

**Abflussverhalten kleiner, forstlich genutzter
Bacheinzugsgebiete am Beispiel des
Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches
im Soonwald/Hunsrück**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
„Doktor der Naturwissenschaften“

am Fachbereich
Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

vorgelegt von

Michael Tempel
geboren am 27. April 1973 in Neustadt a. d. Weinstraße

Mainz 2006

Dekan:

1. Berichterstatter:

2. Berichterstatter:

3. Berichterstatter:

Tag der mündlichen Prüfung: 13.10.2006

Kurzfassung

Die in jüngerer Vergangenheit zunehmende Häufigkeit schwerer Hochwasser der Nahe in Rheinland-Pfalz bildete den Ausgangspunkt der durchgeführten Untersuchungen. Trotz eines hohen Flächenanteils forstlich genutzter Areale im Einzugsgebiet der Nahe, denen allgemein eine hochwasserdämpfende Wirkung zugesprochen wird, wurden im Nahetal u. a. in den Jahren 1993 und 1995 erhebliche Schäden durch Hochwasserereignisse hervorgerufen. Das vom Ministerium für Umwelt und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz geförderte Projekt „Wasserrückhalt in Wäldern“, das unter Federführung des Geographischen Instituts und des Instituts für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz umgesetzt wurde, sollte hier weitere Erkenntnisse zum Abflussverhalten forstlich genutzter Standorte im Einzugsgebiet der Nahe liefern. Zu diesem Zweck wurde der 0,56 km² große Modellhang Hölzerkopf als Untersuchungsgebiet ausgewählt, der als Teilraum des 12,73 km² umfassenden Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches, auf das die Untersuchungen im weiteren Verlauf ausgedehnt wurden, im fast ausschließlich waldbestandenen Soonwald am Südrand des Schiefergebirges lokalisiert ist. Aus dem Projekt resultierte u. a. die vorliegende Arbeit.

Das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches wurde ab Frühjahr 1999 sukzessive mit einem hydrometeorologischen Messnetz ausgestattet, das u. a. 7 Pegelanlagen und 30 Messwehre im Gewässernetz des Gebietes sowie eine Wetterstation umfasste. Die Abflussmessungen, die einen Kernpunkt der Geländearbeit darstellten, wurden durch die speziellen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet erleichtert: Vor allem in den mittleren und unteren Hangbereichen stehen kaum wasserwegsame Tonschiefer an, auf denen weitgehend Pseudogleye mit deutlich ausgeprägtem Stauhorizont ausgebildet sind. In Kombination mit einem dichten Netz anthropogen angelegter, tief in den Untergrund eingeschnittener Drainagegräben führt dies zu einer aus messtechnischer Sicht vergleichsweise einfachen Erfassbarkeit der Abflüsse in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Zusammen mit eingehenden Geländebeobachtungen des Abflussgeschehens und einer Aufnahme der physiogeographischen Gebietseigenschaften wurde eine aufbauende Analyse des Abflussverhaltens, einschließlich der Aufdeckung der zugrunde liegenden Abflussbildungsprozesse, möglich. Die aufbauenden Analysen umfassten einerseits die grundlegende quantitative Auswertung der erhobenen Zeitreihen mit Hilfe statistisch-mathematischer Verfahren und andererseits die Nachbildung der ablaufenden hydrologischen Prozesse mit Hilfe des physikalisch basierten, konzeptionellen Einzugsgebietsmodells MMS/PRMS. Die zur Modellanwendung notwendige räumliche Diskretisierung des Gebietes erfolgte durch Ausweisung von Hydrological Response Units (HRUs), Teilflächen mit weitgehend hydrologisch homogener Prozessdynamik. Die Nachbildung des Ist-Zustandes wurde durch Rechnung mehrerer Landnutzungsszenarien ergänzt.

Die Untersuchungen zeigten die enorme Variabilität der Gebietsabflüsse bei insgesamt hohen Jahresabflussvolumina auf. Trotz eines z. T. vollständigen Trockenfallens des Gewässernetzes im Sommer verlassen auf Jahresbasis bis zu 53 % der eingehenden Niederschläge den Modellhang als Abfluss. Zwischen den einzelnen Hangbereichen bestehen dabei grundlegende Unterschiede, die sowohl die Abflussbildungsprozesse als auch den Abflussgang und die resultierenden Abflussvolumina betreffen: Während am Unterhang, bei langer Nassphase des Pseudogleys, dem Sättigungsflächenabfluss eine dominierende Stellung zufällt, herrscht am Mittelhang Interflow vor. Eine Grundwasserneubildung findet ausschließlich am Oberhang und auf dem Kamm statt. Mittlere und obere Hangbereiche weisen ein entsprechend erhöhtes Wasserrückhaltevermögen auf, wohingegen sich der Unterhang hauptverantwortlich für Hochwasserabflüsse des Gräfenbaches zeigt. Im Rahmen der Landnutzungsszenarien wurde aufbauend deutlich, dass sich eine Veränderung der forstlichen Bestandeszusammensetzung nur nachrangig auf die Abflussentstehung auswirkt. Eine Veränderung des Versiegelungsgrades führt dagegen zu einer erheblich stärkeren Modifikation des Wasserhaushaltes.

Abstract

The recent increase in the frequency of serious flooding in the Nahe River region in Rhineland-Palatinate forms the starting point of the research carried out. Despite the large amount of forested areas in the catchment area of the Nahe River, which are generally attributed a flood-inhibiting effect, significant damage was incurred by flooding events in the Nahe Valley, notably in the years 1993 and 1995 among others. The project “Water retention in forests”, funded by the Ministry of Environment and Forestry Rhineland-Palatinate, which was realized by the Institute of Geography and the Institute of Geosciences of the Johannes Gutenberg University of Mainz, was intended to deliver further insights into the runoff behaviour of forested areas in the Nahe River catchment area. To this end the 0.56 km² exemplary slope Hölzerkopf was selected as the research area. The area is part of the 12.73 km² catchment area of the upper Gräfenbach Stream, to which the research area was extended as the study progressed, and is localized as part of the almost fully forested Soonwald at the southern edge of the Rhenish Slate Mountains. Among other things, the project resulted in the document in hand.

From spring 1999 the catchment area of the upper Gräfenbach Stream was successively equipped with a hydro-meteorological network which, among other apparatuses, included 7 water level gauges and 30 gauging weirs in the area's water network as well as a weather station. The drainage measurements, which constituted the quintessential part of the site work, were made easier by the special conditions in the research area: In particular in the middle and lower areas of the slope, there is practically non-water-permeable clay-slate which is covered by pseudogleys with clearly pronounced accumulation horizons. In combination with a dense network of man-made drainage ditches cut deep into the substratum, this leads, from a measurement point of view, to a relatively simple ascertainability of the runoff with high spatial and temporal resolution. Together with the detailed site observations of runoff events and recording of the area's physiogeographic characteristics, a constitutive analysis of the runoff behaviour was possible, including the revelation of the underlying runoff generation processes. The constitutive analyses incorporated, on one hand, the fundamental quantitative analysis of the collected time series using statistic-mathematical processes. And, on the other hand, the simulation of the occurring hydrological process using the physical-based conceptual catchment area model MMS/PRMS. The area was spatially discretised as necessary for modelling through the entry of Hydrological Response Units (HRUs), subareas with predominantly homogenous hydrological process dynamics. The simulation of the actual status was supplemented by the calculation of several land usage scenarios.

The research highlights the enormous variability of the area's runoff under prevailing overall high annual runoff volumes. Despite the complete drying out of parts of the network of drainage ditches in summer, on a yearly basis up to 53 % of the incoming precipitation exits the exemplary slope as runoff. There exist fundamental differences between individual parts of the slope in the runoff process. These pertain to the runoff generation process, the runoff course and the resulting runoff volumes: While on the lower slope, saturation excess runoff is the dominating process during long wet periods in the pseudogleys, interflow is predominant on the middle slope. Groundwater regeneration occurs exclusively on the upper slope and the ridge. Middle and upper slope areas exhibit a correspondingly increased water retention capacity, whereas the lower slope shows itself to be primarily responsible for floods of the Gräfenbach stream. Within the framework of the land usage scenarios it was clear when building on these results that changes to the forested area composition have only a subordinate effect on runoff generation. A change to the degree of soil sealing and soil compression, in comparison, leads to a significantly stronger modification of the water balance.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung

Abstract

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Anlass und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Methodik.....	4
1.3.1 Erfassung der Gebietsausstattung und Aufbau eines GIS	5
1.3.1.1 Reliefanalyse und Ableitung der Einzugsgebietsgrenze	7
1.3.1.2 Erfassung des geologischen Untergrundes	8
1.3.1.3 Erfassung der Böden und ihrer Eigenschaften.....	8
1.3.1.4 Erfassung der Landnutzung	10
1.3.2 Erfassung hydrometeorologischer Messreihen.....	11
1.3.3 Auswertung der hydrometeorologischen Daten	13
1.3.4 Modellanwendung	13
 2 Hydrologische Grundlagen.....	 15
2.1 Überblick über den Wasserkreislauf und die Skalenbereiche in der Hydrologie.....	15
2.2 Komponenten des Wasserhaushaltes.....	17
2.2.1 Niederschlag	17
2.2.2 Verdunstung.....	18
2.2.3 Abfluss.....	19
2.2.3.1 Abflussbildung in der lokalen Skala	20
2.2.3.2 Abflussbildung im Hangmaßstab.....	24
2.2.3.3 Abflussbildung im Einzugsgebietsmaßstab	26

2.3 Hochwasserabflüsse	27
2.3.1 Entstehung und gesellschaftliche Bedeutung	27
2.3.2 Anthropogener Einfluss	29
2.3.2.1 Klimawandel	29
2.3.2.2 Einflüsse im Einzugsgebiet	30
2.3.2.2.1 Landnutzung	30
2.3.2.2.2 Maßnahmen der Standortmelioration	31
3 Einführung in das Untersuchungsgebiet	34
3.1 Lage und Geomorphologie des Untersuchungsgebietes	34
3.2 Geologie	41
3.2.1 Abriss der geologischen Entwicklungsgeschichte	41
3.2.2 Geologie des Untersuchungsgebietes	43
3.3 Periglaziale Deckschichten und Böden	46
3.3.1 Allgemeine Gliederung periglazialer Deckschichten	46
3.3.2 Periglaziale Deckschichten und Böden des Modellhanges Hölzerkopf	48
3.3.2.1 Profile des Kammes und des Oberhanges (C7 bis C5.5)	49
3.3.2.2 Profile des oberen Mittelhanges (C5.4 bis C5)	51
3.3.2.3 Profile des unteren Mittelhanges (C4.2 bis C3.5)	52
3.3.2.4 Profile des oberen Unterhanges (C3.4 bis C2.4)	53
3.3.2.5 Profile des unteren Unterhanges (C2.3 bis C1.0)	53
3.3.2.6 Zusammenfassende Darstellung der Böden im Modellhang Hölzerkopf	54
3.3.3 Böden im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches	56
3.3.4 Bodenhydraulische Eigenschaften im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches	58
3.4 Regionalklima	59
3.5 Landnutzung	63
3.5.1 Vegetation	63
3.5.2 Wegenetz	66
3.5.3 Gewässernetz	68
3.6 Modellvorstellung zur Hydrologie des Untersuchungsgebietes	71

4 Aufnahme hydrologischer und meteorologischer Zeitreihen	77
4.1 Abflussmessungen im Grabennetz des Modellhanges Hölzerkopf	77
4.1.1 Messmethodik.....	77
4.1.2 Ergebnisse.....	78
4.2 Abflussmessungen im Gräfenbach	79
4.2.1 Messmethodik.....	79
4.2.2 Ergebnisse	80
4.3 Pegelmessungen im Grabennetz des Modellhanges Hölzerkopf.....	82
4.3.1 Messmethodik.....	82
4.3.2 Ergebnisse.....	83
4.4 Pegelmessungen im Gräfenbach.....	87
4.4.1 Messmethodik.....	87
4.4.2 Ergebnisse.....	88
4.5 Aufnahme des Stauwasserspiegels am Modellhang Hölzerkopf.....	89
4.5.1 Messmethodik.....	89
4.5.2 Ergebnisse	90
4.6 Erhebung meteorologischer Daten im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches	90
4.6.1 Messmethodik.....	90
4.6.2 Ergebnisse.....	91
5 Berechnung der Abflusskurven und Ableitung der Abflussganglinien..	94
5.1 Berechnung der Abflusskurven	94
5.1.1 Abflusskurven der Pegel im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf	94
5.1.1.1 Abflusskurve Pegel <i>P1</i>	94
5.1.1.2 Abflusskurve Pegel <i>P2</i>	99
5.1.1.3 Abflusskurve Pegel <i>P3</i>	102
5.1.1.4 Abflusskurve Pegel <i>P6</i>	106
5.1.1.5 Abflusskurve Pegel <i>P7</i>	109
5.1.1.6 Abflusskurve Pegel <i>P8</i>	111
5.1.2 Abflusskurve des Pegels <i>P5</i> am Gebietsauslass	113
5.2 Ableitung quasi-kontinuierlicher Abflussganglinien	115

6 Darstellung und Analyse des Abflussverhaltens.....	120
6.1 Überblick über das hydrologische Geschehen im Untersuchungszeitraum	121
6.1.1 Hydrologisches Sommerhalbjahr 1999.....	121
6.1.2 Hydrologisches Jahr 1999/2000	124
6.1.3 Hydrologisches Jahr 2000/2001	126
6.1.4 Hydrologisches Jahr 2001/2002	128
6.1.5 Hydrologisches Jahr 2002/2003	131
6.1.6 Zusammenfassender Überblick über den beobachteten Zeitraum.....	134
6.2 Analyse des Abflussverhaltens in unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Dimensionen.....	141
6.2.1 Abflussverhalten von Modellhang Hölzerkopf und Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches	141
6.2.1.1 Längerfristiges Abflussverhalten und Saisonalität des Abflussverhaltens	143
6.2.1.2 Hochwasserereignisse	147
6.2.2 Abflussverhalten unterschiedlicher Hangbereiche	151
6.2.2.1 Längerfristiges Abflussverhalten und Saisonalität des Abflussverhaltens	154
6.2.2.2 Hochwasserereignisse	164
6.2.3 Abflussverhalten einzelner Hangkompartimente des Modellhanges Hölzerkopf	169
 7 Modellierung des Wasserhaushaltes	 177
7.1 Einführung in die hydrologische Modellierung	177
7.1.1 Überblick über hydrologische Modelle	177
7.1.2 Konzepte zur Ausweisung von Modellierungseinheiten	181
7.2 Ausgliederung von Hydrological Response Units (HRUs).....	185
7.3 Hydrologische Modellierung mit dem Modell MMS/PRMS.....	196
7.3.1 Aufbau des Modells MMS/PRMS.....	196
7.3.1.1 Eingabedaten und deren HRU-spezifische Anpassung.....	197
7.3.1.2 Interzeption und Bestandesniederschlag.....	199
7.3.1.3 Auf- und Abbau von Schneedecken.....	199
7.3.1.4 Potenzielle und aktuelle Evapotranspiration.....	201
7.3.1.5 Infiltration, Bodenspeicher und Abfluss	202
7.3.1.5.1 Oberflächenabfluss und Infiltration	202
7.3.1.5.2 Interflow und Grundwasserabfluss	203

7.3.1.5.3 Gesamtabfluss aus den HRUs und dem Gesamteinzugsgebiet	205
7.3.2 Wahl der Modellstruktur für die Anwendung im Untersuchungsgebiet	206
7.3.3 Parametrisierung des Modells MMS/PRMS	207
7.3.3.1 Parameter zur Anpassung der Eingabedaten.....	208
7.3.3.2 Landnutzungsparameter	208
7.3.3.3 Bodenparameter	211
7.3.4 Kalibrierung und Validierung des Modells MMS/PRMS	212
7.3.4.1 Modellkalibrierung	215
7.3.4.2 Modellvalidierung.....	217
7.3.5 Darstellung der Simulationsergebnisse.....	220
7.3.6 Prognoserechnungen für veränderte Landnutzungen	226
8 Zusammenfassung der Ergebnisse	232
Quellenverzeichnis.....	240
Abkürzungsverzeichnis	262
Verzeichnis der Abbildung, Karten, Bilder und Tabellen	264
Anhang	

1 Einleitung

1.1 Anlass und Problemstellung

Hochwasserereignisse stellen natürliche Phänomene dar, die seit Menschengedenken auftreten. Bereits im assyrischen Gilgamesch-Epos finden sich Schilderungen entsprechender Ereignisse. Das Ausmaß dieses natürlichen Phänomens wird dabei einerseits durch anthropogene Eingriffe in den Einzugsgebietsflächen deutlich verstärkt, andererseits schafft erst der Mensch selbst durch die Besiedelung potenzieller Überflutungsflächen entsprechende Schadenspotenziale an den Gewässern. Da ein dauerhafter Rückzug der Bevölkerung aus den Gefährdungsbereichen kaum mehr möglich erscheint, wird auf vielfältige Weise der Versuch eines Schutzes der Anlieger unternommen. Diese Versuche umfassen die Abschirmung gefährdeter Gebiete durch technische Anlagen, die Absenkung der Hochwasserscheitel sowie die Verringerung der Schadenspotenziale durch Meidung überflutungsgefährdeter Gebiete.

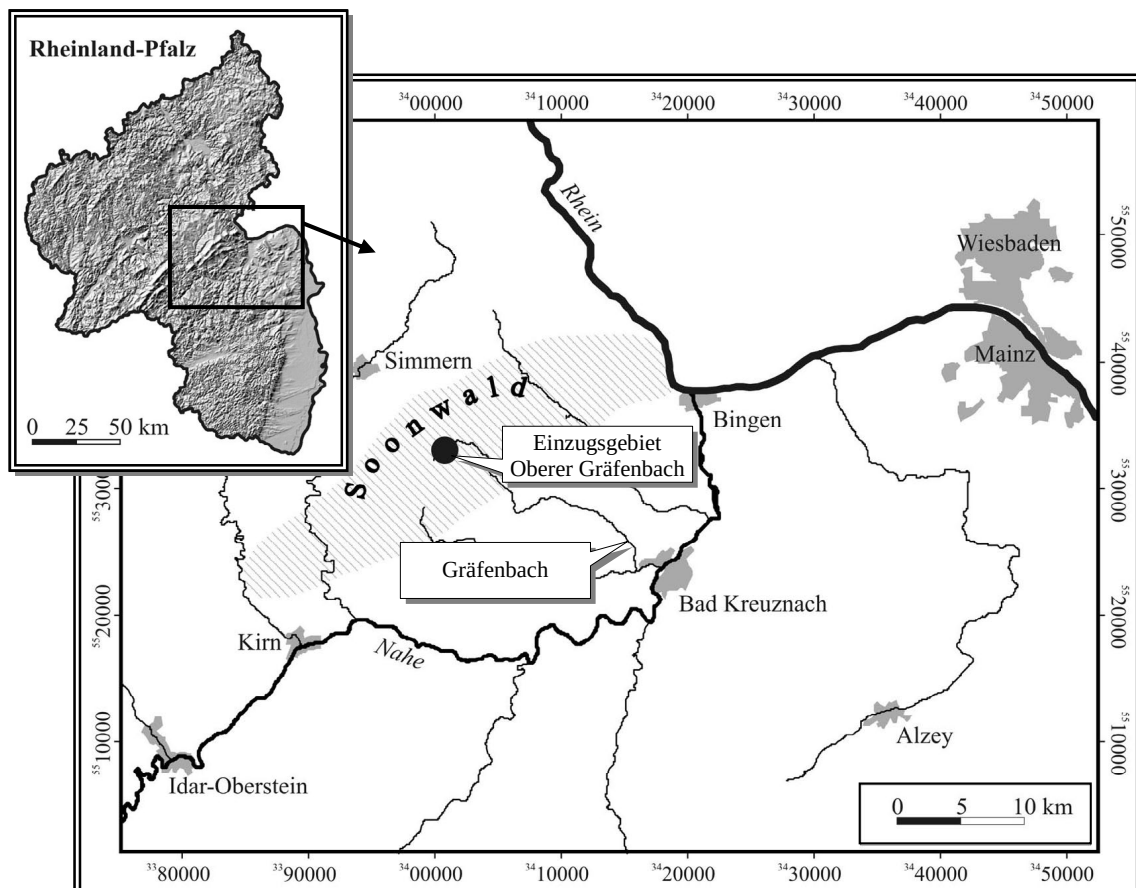
Auch Rheinland-Pfalz ist immer wieder von Hochwasserereignissen betroffen. Sowohl der Rhein selbst als auch seine Nebenflüsse, insbesondere Mosel, Lahn und Nahe, bilden dabei die Schwerpunkte. Entsprechend groß ist das öffentliche Interesse, die auftretenden Schäden zu minimieren, wobei sich das Hauptaugenmerk lange Zeit auf die aktive Schadensverminderung durch den Bau technischer Anlagen wie Deiche und Schutzwände sowie die Schaffung von Polderflächen konzentrierte. Darüber hinaus ist in den vergangenen Jahren die Schaffung natürlicher Retentionsflächen durch Renaturierung von Fließgewässern verstärkt in den Mittelpunkt getreten (vgl. MUF RLP 1995). Letztlich muss jedoch auch die Frage beantwortet werden, in welchem Umfang die Bewirtschaftung der Einzugsgebietsflächen durch den Menschen einen Einfluss auf die Abflusssdynamik der Flüsse aufweist. Letztgenannte Frage bildete die Grundlage der an dieser Stelle durchgeführten Untersuchungen in einem Teilraum des Nahe-Einzugsgebietes, dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches im Soonwald.

Das Einzugsgebiet der Nahe umfasst eine Fläche von 4065 km² und ist damit, bedingt durch seine gedrungene, fast kreisförmige Form, im Verhältnis zur Flusslänge von ca. 120 km vergleichsweise groß (vgl. Anhang I), was an Mittel- und Unterlauf zum raschen Eintritt ausgeprägter Abflussscheitel infolge von Niederschlagsereignissen führt (Kohlhaas 2004). Entsprechend ist auch die Bevölkerung des Nahetals seit alters her mit der Hochwasserproblematik konfrontiert. Die erste schriftliche Dokumentation eines extremen Nahehochwassers in Bad Kreuznach stammt aus dem Jahr 1458. Bis heute schloss sich eine Vielzahl weiterer Hochwasser an, wobei die Häufigkeit extremer Ereignisse im 20. Jahrhundert, hier vor allem im letzten Drittel, einen deutlichen Anstieg aufweist. So kam es in den Jahren 1918 (Wasserführung der Nahe in Bad Kreuznach ca. 1100 m³/s), 1981 (950 m³/s), 1993 (1098 m³/s; vgl. Bild 1-1) und 1995 (991 m³/s) zu erheblichen Schäden, infolge derer eine Notwendigkeit zur Erarbeitung von Gegenmaßnahmen entstand (Zapp 2004). In diesem Zusammenhang sind jedoch nicht ausschließlich aktive Schutzmaßnahmen, wie z. B. die Realisierung eines



Bild 1-1 Bad Kreuznacher Innenstadt während des Nahe-Hochwassers am 21.12.1993
(Quelle: Stadt Bad Kreuznach 1994).

umfassenden technischen Hochwasserschutzes für die Stadt Bad Kreuznach (vgl. Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord 2004), zielführend, sondern es ist, wie zuvor bereits erwähnt, auch die Frage nach den Auswirkungen der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung in den Einzugsgebietsflächen zu erörtern. Das Wasserrückhaltepotenzial von Waldgebieten, die ca. 38 % der Einzugsgebietsfläche der Nahe bilden (BMU 2006), stand dabei bisher nur in untergeordnetem Maße im Mittelpunkt wissenschaftlicher Untersuchungen. Das vom Ministerium für Umwelt und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz (MUF RLP) geförderte Projekt „Wasserrückhalt in Wäldern“, das unter Federführung des Geographischen Instituts und des Instituts für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz zusammen mit der Forstlichen Versuchsanstalt und dem Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz umgesetzt wurde, sollte in diesem Zusammenhang weitere Informationen liefern. Grundsätzliches Ziel der Untersuchungen war die Gewinnung neuer Erkenntnisse zur Abflussentstehung und Abflussrückhaltung in Waldgebieten, hier speziell in den forstlich genutzten Teilbereichen des Nahe-Einzugsgebietes. Als konkretes Untersuchungsgebiet diente der 0,56 km² große, im weitgehend waldbestandenen Soonwald, dem südöstlichen Teil des Hunsrücks, gelegene „Modellhang Hölzerkopf“. Der Modellhang stellt einen Teilraum des insgesamt 12,76 km² umfassenden Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches dar, auf das die Untersuchung im weiteren Verlauf ausgedehnt wurde. Karte 1-1 verdeutlicht die Lage des Soonwaldes und des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches in Rheinland-Pfalz.



Karte 1-1 Lage des Soonwaldes und des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches in Rheinland-Pfalz.

1.2 Zielsetzung

In Anlehnung an die grundsätzliche Problemstellung, der Gewinnung neuer Erkenntnisse zu Abflussentstehung und Abflussrückhaltung in forstlich genutzten Teilbereichen des Nahe-Einzugsgebietes, ergaben sich für die vorliegende Arbeit drei Hauptziele und drei untergeordnete Teilziele. Folgende Hauptziele wurden im Rahmen der Untersuchungen verfolgt:

- Grundlegende Beschreibung und Analyse des Abflussverhaltens des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches
- Aufdeckung der zugrunde liegenden Abflussbildungsprozesse und Quantifizierung der Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und in Teilräumen des Einzugsgebietes
- Analyse des Einflusses von Landnutzung und Untergrundeigenschaften auf die Abflussentstehung

Alle drei Hauptziele waren letztlich eng miteinander verzahnt und wurden z. T. parallel verfolgt bzw. bauten aufeinander auf. Zusätzlich wurden drei Teilziele formuliert, die der Erreichung der Hauptziele untergeordnet waren:

- Ausweisung hydrologisch homogen reagierender Teilflächen (Hydrological Response Units) im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches, d. h. Regionalisierung des Gebietes nach hydrologischen Gesichtspunkten
- Nachbildung der hydrologischen Prozesse im Ist-Zustand mit Hilfe des physikalisch basierten, konzeptionellen Einzugsgebietsmodells MMS/PRMS (Modular Modeling System/Precipitation Runoff Modeling System)
- Simulation des Abflussgeschehens bei veränderter Landnutzung im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches bzw. am Modellhang Hölzerkopf

Die genannten Zielsetzungen schlossen letztlich auch eine umfassende Aufnahme der physio-geographischen Ausstattung des Untersuchungsgebietes ein, ohne die eine Analyse des Gebietswasserhaushaltes nicht in entsprechender Form möglich gewesen wäre.

1.3 Methodik

Die Vorgehensweise zum Erreichen der zuvor definierten Ziele gliederte sich grundsätzlich in vier Teile, die sich gegenseitig ergänzten und weitgehend aufeinander aufbauten:

- qualitative und quantitative Erfassung hydrologischer Prozesse durch Geländearbeit
- Aufnahme der hydrologisch relevanten Gebietsausstattung durch Geländearbeit sowie durch Auswertung analoger und digitaler Quellen, verbunden mit dem Aufbau eines GIS
- rechnergestützte Aufarbeitung und Auswertung der hydrometeorologischen Messreihen
- Anwendung des Einzugsgebietsmodells MMS/PRMS auf Basis hydrologisch homogen reagierender Teilflächen (Hydrological Response Units), einschließlich Rechnung von Landnutzungsszenarien

Abbildung 1-1 verdeutlicht den grundlegenden Ablauf der Untersuchungen und stellt das Zusammenspiel der unterschiedlichen Teilarbeitsbereiche dar.

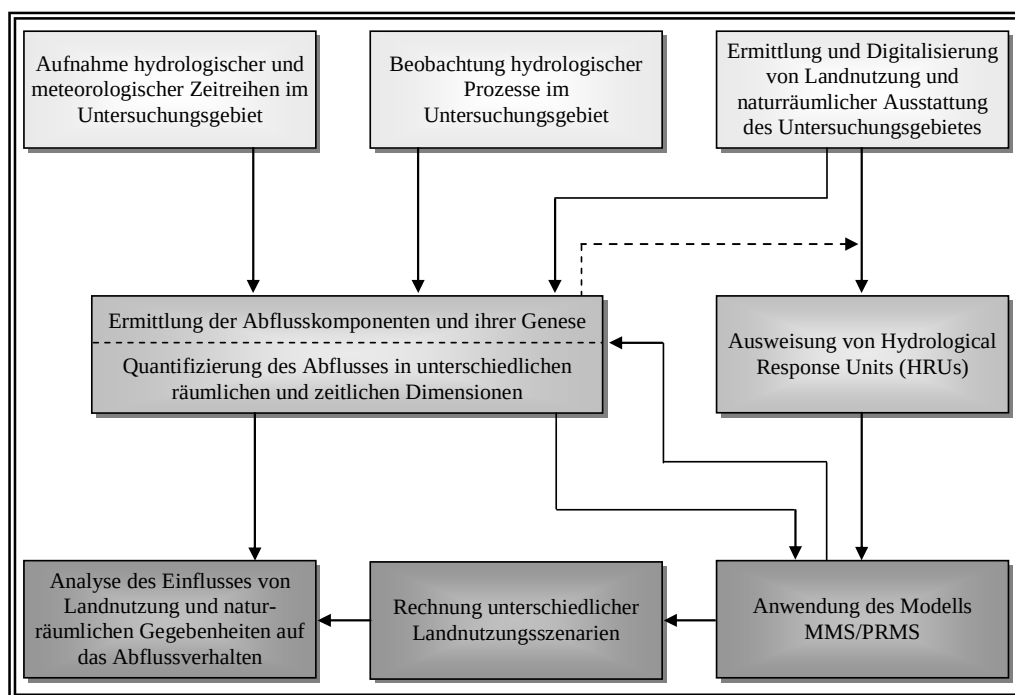


Abb. 1-1 Grundlegendes Schema des Untersuchungsablaufes.

Die Erhebung der hydrometeorologischen Messreihen, die durch den sukzessiven Aufbau eines entsprechenden Messnetzes im Untersuchungsgebiet ermöglicht wurde, und die in ihrer Bedeutung nicht zu unterschätzende Beobachtung hydrologischer Prozesse im Gelände stellten zusammen mit der Erfassung der physiogeographischen Gebietsausstattung die Basis der Untersuchungen dar. Ausschließlich die Kombination der Teilaspekte konnte zu einem entsprechenden Prozessverständnis führen, auf dessen Grundlage die erhobenen Datenreihen deutlich an Wert gewannen. Aufbauend auf der Datenerhebung folgte eine erste rechnergestützte Analyse der gewonnenen hydrometeorologischen Zeitreihen und – bereits im Hinblick auf die Anwendung des hydrologischen Modells MMS/PRMS – die Regionalisierung des

Gebietes auf Basis hydrologisch homogener Teilflächen (Hydrological Response Units). Als letzter Untersuchungsschritt schloss sich die Modellanwendung an, die, aufbauend auf den zuvor genannten Teilschritten, eine Nachbildung des Ist-Zustandes und die Rechnung von Landnutzungsszenarien umfasste.

1.3.1 Erfassung der Gebietsausstattung und Aufbau eines GIS

Die Erfassung der physiogeographischen Ausstattung des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches, die mit dem Aufbau eines Geographischen Informationssystems einherging, beruhte auf einer Vielzahl unterschiedlicher Datenquellen. Einerseits wurden eigene Kartierungen im Gelände durchgeführt, andererseits konnte auf eine Vielzahl von Sekundärdaten zurückgegriffen werden. Letztere umfassten einerseits Daten, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem Projekt „Wasserrückhalt in Wäldern“ erhoben wurden, und andererseits Daten, die im Rahmen des Projektes (zumeist für die Anfertigung von Diplomarbeiten) erfasst wurden.

Die zur Anwendung gekommenen Sekundärdaten ohne direkten Projektbezug sind, zusammen mit den daraus abgeleiteten Informationen, in der Folge aufgelistet. Falls nicht anders angegeben, lagen die Daten flächendeckend für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches vor:

- **ATKIS-DGM** der Genauigkeitsklasse 1 (durchschnittliche Höhengenaugkeit $\pm 0,5$ m) bei einer Gitterweite von 20 m (Landesvermessungsamt RLP 1999a)
 - ⇒ Reliefanalyse
 - ⇒ Bestimmung der Einzugsgebietsgrenzen und Ausweisung von Teileinzugsgebieten
- **ATKIS-Basis-DLM** mit Lagegenauigkeit ± 3 m (Landesvermessungsamt RLP 1999b)
 - ⇒ Erfassung des Wege- und Gewässernetzes
- **Digitale panchromatische Ortholuftbilder** (Landesvermessungsamt RLP 1996e)
 - ⇒ Erfassung der Landnutzung (einschließlich Wege- und Gewässernetz)
- **CIR-Luftbilder** (Forstliche Versuchsanstalt Trippstadt 1995a–b; nicht flächendeckend)
 - ⇒ Erfassung der Landnutzung
- Analoges forstliches Kartenmaterial (Forsteinrichtungsamt Koblenz 1962a–e, 1966a–h und Bezirksregierung Koblenz – Forstdirektion 1987a–b, 1991a–c):
 - **Forstliche Standortskarten**
 - **Forstliche Standortseinheitenkarten**
 - **Sonderkarten der stauwassergefährdeten Standorte**
 - ⇒ Erfassung der Böden und ihrer Eigenschaften
- **Geologisches Strukturmodell** (Martin 1980)
 - ⇒ Erfassung des geologischen Untergrundes
- **Topographisches Kartenmaterial** in analoger und digitaler Form (Landesvermessungsamt RLP 1984, 1994 und LVermGeo et al. 2003)
 - ⇒ ergänzender Einsatz

Wie zuvor angemerkt, konnte darüber hinausgehend auf Datenbestände zurückgegriffen werden, die innerhalb des Projektes „Wasserrückhalt in Wäldern“ im Rahmen von Diplomarbeiten und Dissertationen erfasst wurden. Nachfolgenden Arbeiten wurden relevante Informationen entnommen:

- Reinke (2000) ⇨ Böden (Datenerhebung teilweise in Zusammenarbeit)
- Kiefl (2001) ⇨ Landnutzung, Wege- und Gewässernetz, Böden
- Schuwirth (2001) ⇨ Gewässernetz
- Giek (2001) ⇨ Kenngrößen zur Bodenhydraulik
- Bott (2002) ⇨ Kenngrößen zur Bodenhydraulik

Weiterhin flossen die Ergebnisse eigener Kartierungen im Gelände ein. Diese wurden entweder zur Verdichtung und Überprüfung existierenden Datenmaterials oder zur Erhebung relevanter, zuvor noch nicht erhobener Gebietsmerkmale durchgeführt:

- Kartierung der forstlichen Bestände des Modellhanges Hölzerkopf (Sommer 1999)
- stichprobenartige Überprüfung der durch Luftbildinterpretation ausgewiesenen Landnutzungseinheiten im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (Sommer 2003)
- Kartierung des Gewässernetzes am Modellhang Hölzerkopf (Frühjahr 2000)
- Überprüfung des von Kiefl (2001) und Schuwirth (2001) kartierten Gewässernetzes im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (Frühjahr 2003)
- Kartierung des Wegenetzes am Modellhang Hölzerkopf (Sommer 1999)
- Überprüfung des auf Basis von DLM und Luftbildern ausgewiesenen Wegenetzes im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (Sommer 2003)
- Aufnahme von Bodeneigenschaften anhand zweier Catenen am Modellhang Hölzerkopf (Sommer/Herbst 1999) – weitgehend in Zusammenarbeit mit Reinke (2000)
- Überprüfung der prinzipiellen Übertragbarkeit der am Modellhang ermittelten Bodenabfolge auf das gesamte Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches anhand stichprobenartig angelegter Schürfgruben (Sommer 2003)

Die ermittelten Daten zur Ausstattung des Untersuchungsgebietes wurden in ein GIS eingebunden. Als grundlegendes System diente ArcView, wobei im Laufe der Untersuchung eine Vielzahl von Erweiterungen zum Einsatz kam (vgl. Quellenverzeichnis). Während die in digitaler Form vorliegenden Datensätze (z. B. ATKIS-Daten) weitgehend direkt eingebunden werden konnten, bedurfte das analoge Kartenmaterial zur korrekten Einbindung in das GIS der Georeferenzierung und ggf. einer vorhergehenden Entzerrung (CIR-Luftbilder; vgl. ERDAS 2003). Die entsprechende Bearbeitung der analogen Medien erfolgte z. T. in Eigenarbeit mit Hilfe von ERDAS Imagine oder ArcView (z. B. Geologisches Strukturmodell und Topographische Karten), z. T. konnte jedoch auch hier auf die Ergebnisse projektbegleitender Diplomarbeiten zurückgegriffen werden (z. B. CIR-Luftbilder; vgl. Kiefl 2001). Für weitergehende Analysen wurden die entsprechend bearbeiteten Materialien in ArcView transferiert und in einem aufbauenden Schritt ggf. manuell vektorisiert (On-Screen).

1.3.1.1 Reliefanalyse und Ableitung der Einzugsgebietsgrenze

Die Ableitung der relevanten Reliefparameter erfolgte mit Hilfe des Programms ArcView auf Basis der digital vorliegenden Höhendaten (ATKIS-DGM). Von grundlegendem Interesse waren dabei die lokale Hangneigung und die lokale Exposition, deren Ausweisung auf der Methode nach Zevenbergen & Thorne (1987) beruhte. Zur Berechnung kam die ArcView-Erweiterung *DEMAT (DEM Analysis Tool)* zum Einsatz. Mit Hilfe der ArcView-Erweiterung *HydroTools 1.0* wurde in der Folge eine exakte räumliche Abgrenzung des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches möglich, wobei die zur Anwendung gekommene Abgrenzungsmethodik grundsätzlich auf der Berechnung von Fließrichtung (flow direction) und Fließakkumulation (flow accumulation) basiert. Als Fließalgorithmus diente in diesem Zusammenhang der Multiple-Flow-Algorithmus nach Quinn et al. (1991) mit der Konzentrationszahl 1, auf dessen Basis eine disperse Weiterleitung lateraler Wasserflüsse aus einer Rasterzelle an die tiefergelegenen Rasterzellen erfolgt. Eine ausführliche Darstellung der Berechnungsmethodik findet sich in Quinn et al. (1991) und Schäuble (2003). Die so ausgewiesenen Einzugsgebietsgrenzen konnten in dieser Form jedoch nicht ohne weitere Überarbeitung übernommen werden, da die hohe Dichte des Gewässernetzes im Gebiet (vgl. Kapitel 3.5.3) zu einer erheblichen Modifikation der Wasserscheiden führt. Wie in Kapitel 3.6 näher dargelegt wird, bewirken die tief in den Untergrund eingeschnittenen Drainagegräben in Kombination mit dem oberflächennahen Stauhorizont des Pseudogleys, dass an den betreffenden Grabeneinschnitten weitgehend der gesamte Abfluss direkt in das Gewässernetz überführt wird (im Bereich der Pseudogleye finden sich im Untergrund kaum wasserwegsame Tonschiefer, die keine signifikanten Grundwasserströmungen zulassen), wodurch die natürlichen Wasserscheiden erheblich verändert sind (vgl. Abbildung 1-3). Zur korrekten Ausweisung der Einzugsgebietsgrenzen musste aus diesem Grund das Gewässernetz Berücksichtigung finden, dessen „Abschirmungseffekt“ mit Hilfe der ArcView-Erweiterung *HydroTools 1.0* nachgebildet werden konnte. Die Überprüfung des so ermittelten, korrigierten Grenzverlaufes erfolgte einerseits durch eine manuelle Analyse des digitalen Höhenmodells, andererseits wurden kritische Grenzverläufe, die in erster Linie im Nordosten und Osten des Gebietes vorliegen, vollständig im Rahmen umfangreicher Geländebegehungen auf Plausibilität überprüft. Abbildung 1-2 zeigt die endgültige, korrigierte Ausdehnung des 12,73 km² umfassenden Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches und die Abweichungen zur ursprünglichen, ausschließlich auf Reliefparametern basierten Grenzziehung. Die Abgrenzung des am Südostrand des Einzugsgebietes gelegenen, 0,56 km² großen Modellhanges Hölzerkopf (bezügl. der Lage vgl. Abbildung 1-4 und Karte 3-1) beruht auf der identischen Methodik.

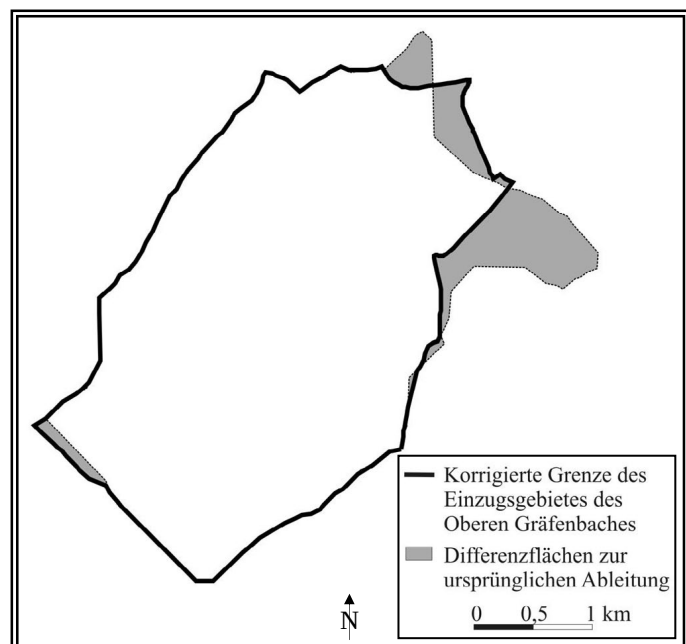


Abb. 1-2 Endgültige Ausdehnung des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches unter Berücksichtigung der modifizierenden Wirkung des Gewässernetzes und ursprüngliche Grenzziehung ohne Berücksichtigung des Gewässernetzes.

1.3.1.2 Erfassung des geologischen Untergrundes

Die geologischen Untergrundverhältnisse im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches wurden einem von Martin (1980) auf Basis von Geländeaufnahmen und photogeologischem Befund entworfenen, geologischen Strukturmodell des nordöstlichen Soonwaldes entnommen. Bezüglich der exakten Erfassungsmethodik sei auf die Ursprungsquelle verwiesen. Zur weiteren Analyse wurde das analog vorliegende Kartenmaterial digitalisiert, georeferenziert und mit Hilfe von ArcView manuell vektorisiert (On-Screen).

1.3.1.3 Erfassung der Böden und ihrer Eigenschaften

Hydrologisch relevante Bodeninformationen wurden auf mehreren, einander ergänzenden Arbeitsebenen erhoben:

- Profilaufnahmen entlang zweier Bodencatenen am Modellhang Hölzerkopf
- Erfassung bodenhydraulischer Kenngrößen in unterschiedlichen Hangpositionen des Modellhanges Hölzerkopf
- Übernahme bodenhydraulischer Kenngrößen aus projektbegleitenden Arbeiten
- Ableitung relevanter Bodeninformationen aus bestehenden, analogen Karten

Die grundlegende Aufnahme der pedologischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes erfolgte anhand von 52 Bodenprofilen, die in Zusammenarbeit mit Bernhard Reinke (vgl. Reinke 2000) im Sommer 1999 entlang zweier Catenen am Modellhang Hölzerkopf angelegt wurden. Wie Abbildung 1-3 illustriert, verläuft die „Catena West“, die insgesamt 31 Schürfgruben umfasst, entlang der Westgrenze des Modellhanges vom Quarzitkamm (Profil C7) bis zum Unterhang (Profil C1), wohingegen die 21 Schürfgruben umfassende „Hangfall-Catena“ im zentralen Bereich des Modellhanges angelegt wurde. Der exakte Verlauf der Catenen mit zugehöriger Benennung der Profile findet sich in der Ergebnisdarstellung in Kapitel 3.3. Aufgrund des hohen Anteils an Blockschutt im Untersuchungsgebiet konnte eine systematische Verdichtung der Catenen mit dem Pürckhauer-Bohrstock im Rahmen der Geländeaufnahmen nicht realisiert werden. Zudem war die Tiefe der in Handarbeit angelegten Profile aufgrund der Kompaktheit und des hohen Bodenskelettgehaltes der Böden auf maximal 100 cm begrenzt. Mit Hilfe eines Baggers wurden jedoch sechs Profile der „Catena West“ (Hauptprofile) bis in eine maximale Tiefe von 150 cm u. GOF aufgeschlossen (vgl. Bild 1-2 und 1-3).

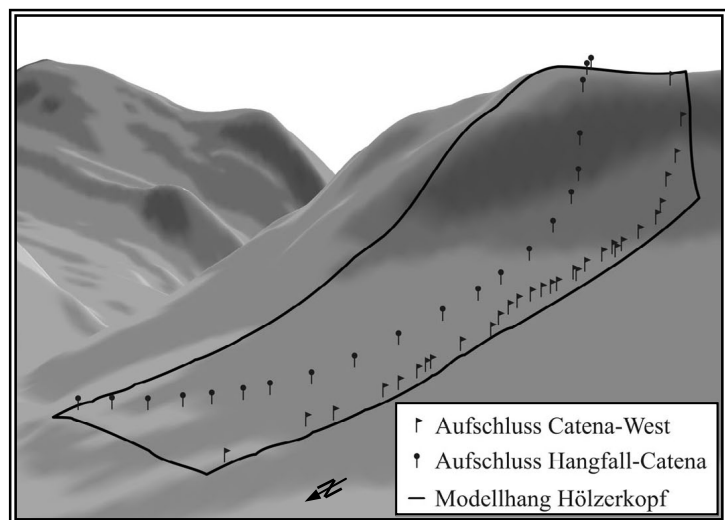


Abb. 1-3 Verlauf der der beiden Bodencatenen („Catena-West“ und „Hangfall-Catena“) entlang des Modellhanges Hölzerkopf.



Bild 1-2 Anlage der Profilgruben mit einem Bagger (hier Profil C3).



Bild 1-3 Profil C3 (Tiefe 120 cm).

Die Datenerhebung in den Schürfgruben umfasste einerseits eine allgemeine Profilsprache nach AG Boden (2005), andererseits wurden an den sechs Hauptprofilen jeweils horizontspezifische Bodenproben (gestörte Proben und Stechzylinderproben mit 100 cm³, Letztere aufgrund des hohen Skelettgehaltes problematisch) für weitergehende Lobaranalysen entnommen, die zum Großteil im Rahmen von projektbegleitenden Praktika realisiert werden konnten. Für den weiteren Untersuchungsverlauf zeigten sich in erster Linie die Ergebnisse folgender bodenphysikalischer Analysen relevant:

- Korngrößenzusammensetzung (vgl. Barsch et al. 2000; DIN 19683-1; DIN 19683-2)
 - ⇒ Nasssiebung der Sand- und Skelettfraction
 - ⇒ Sedimentationsanalyse der Ton- und Schlufffraction (nach Köhn)
- Dichte- und Volumenverhältnisse (vgl. Barsch et al. 2000; Schichting et al. 1995)
 - ⇒ Trocknung
 - ⇒ Luftpyknometer
- Wasserspannungskurve (vgl. Barsch et al. 2000)
 - ⇒ Überdruckmethode mit Hilfe der pF-Apparatur nach Eijkelkamp

Ebenfalls in Zusammenarbeit mit Reinke (vgl. Reinke 2000) wurden im Frühjahr 1999 mittels eines Guelph-Permeameters Messungen zur gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Böden in 15 bis 20 cm u. GOF durchgeführt (vgl. Bild 1-4). Die Lage der Messpunkte wurde in direkter Umgebung der Hauptprofile der „Catena West“ gewählt, wobei an jeweils drei unterschiedlichen Stellen eine Messung erfolgte. Die Untersuchungen wurden durch eine Reihe von Störfaktoren beeinflusst. So führten die z. T. sehr hohen Skelettgehalte in den mittleren und oberen Hangbereichen ebenso zu einer erhöhten Streubreite der Messergebnisse wie die teilweise starke Durchwurzelung des Oberbodens.



Bild 1-4 Permeametermessungen im Bereich des Mittelhangs nahe Profil C4 (Foto: B. Reinke).

Neben den Daten der eigenen Feld- und Laboranalysen flossen bodenhydraulische Kenngrößen aus projektbegleitenden Untersuchungen in die Arbeit ein. Bezüglich der exakten Methodik wird auf die entsprechenden Arbeiten verwiesen:

- Infiltrationskapazität der Modellhangböden (Doppelringinfiltrrometer) $\Rightarrow$ Giek (2001)
- Wasserspannungskurve (200 cm³ Stechzylinderproben) $\Rightarrow$ Bott (2002)

Aufgrund der Größe des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches war im Rahmen der Geländeaufnahmen keine dem Modellhang entsprechende Detailkartierung der Böden im Gesamteinzugsgebiet möglich. Hier wurde, bei entsprechenden Einbußen im Informationsgehalt, auf bestehendes, analoges Kartenmaterial zurückgegriffen. Wie in der Einführung dargelegt, erwies sich in diesem Zusammenhang v. a. forstliches Kartenmaterial als hilfreich. Insbesondere die Sonderkarte der stauwassergefährdeten Standorte (Forsteinrichtungsamt Koblenz 1966e–h), die die räumliche Verteilung der Standortsgrundformen wiedergibt, besaß hohe Relevanz für die Untersuchung, da sie einerseits flächendeckend für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches vorlag und andererseits die dargestellten Grundformen direkt mit entsprechenden Bodentypen korreliert sind (vgl. Kapitel 3.3.3), wodurch eine Übertragung der am Modellhang ermittelten Bodenkenngößen auf das Gesamtgebiet möglich wurde. Das analoge Kartenmaterial wurde bereits im Vorfeld durch Kiefl (2001) digitalisiert und für weitere Analysen zur Verfügung gestellt. Ergänzend standen forstliche Standortskarten (Maßstab 1:5000; Forsteinrichtungsamt Koblenz 1962b–e) und Standortseinheitskarten (Maßstab 1:10000; Forsteinrichtungsamt Koblenz 1966a–d und Bezirksregierung Koblenz – Forstdirektion 1987a–b, 1991a–c) zur Verfügung.

1.3.1.4 Erfassung der Landnutzung

Die Erfassung der Landnutzung verlief grundsätzlich auf zwei Arbeitsebenen: die Aufnahme nichtlinearer Elemente (Vegetationsbestand, Siedlungs- und Gewässerflächen) sowie die Aufnahme linearer Elemente (Wege- und Gewässernetz). Die Datengewinnung basierte dabei in beiden Fällen sowohl auf eigenen Erhebungen im Gelände als auch auf der Auswertung und Integration bestehender Datenbestände aus projektbegleitenden Untersuchungen:

- Nichtlineare Elemente (Vegetationsbestand, Siedlung- und Gewässerflächen)
 - $\Rightarrow$ eigene Kartierung der Forstbestände am Modellhang Hölzerkopf (Sommer 1999)
 - $\Rightarrow$ Luftbildauswertung für das Gesamteinzugsgebiet Oberer Gräfenbach (Kiefl 2001)
 - $\Rightarrow$ stichprobenartige Überprüfung der von Kiefl (2001) erzielten Ergebnisse im Gelände (Sommer 2003)
- Lineare Elemente (Wege- und Gewässernetz)
 - $\Rightarrow$ eigene Kartierung des Gewässernetzes am Modellhang Hölzerkopf (Sommer 1999)
 - $\Rightarrow$ eigene Kartierung des Wegenetzes am Modellhang Hölzerkopf (Sommer 1999)
 - $\Rightarrow$ Kartierung des Gewässernetzes im Gesamteinzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches durch Kiefl (2001) und Schuwirth (2001)
 - $\Rightarrow$ Kartierung des Wegenetzes im Gesamteinzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches durch Kiefl (2001) – Basisdatensatz: ATKIS-DLM
 - $\Rightarrow$ stichprobenartige Überprüfung der Untersuchungsergebnisse von Kiefl (2001) und Schuwirth (2001) im Gelände (Frühjahr 2003)

1.3.2 Erfassung hydrometeorologischer Messreihen

Ab März 1999 konnte sukzessiv ein hydrologisch-meteorologisches Messnetz im Untersuchungsgebiet aufgebaut werden. Aufgrund der sich mit fortschreitender Projektdauer verdichtenden Kenntnisse über die dort ablaufenden hydrologischen Prozesse wurde die endgültige Instrumentierung, die vorwiegend am Modellhang Hölzerkopf lokalisiert ist, erst im November 2001 erreicht. Folgende Messanlagen wurden errichtet:

- 6 elektronische Pegelanlagen im Grabennetz des Modellhanges Hölzerkopf
- 1 elektronische Pegelanlage am Auslass des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach (zugleich Messstelle zur Erfassung des Einzugsgebietsabflusses)
- 2 Maximalpegelanlagen im Gräfenbach (nordwestlich und östlich des Modellhanges)
- 30 Messwehre für volumetrische Abflussmessungen im Grabennetz des Modellhanges
- 11 Standrohre (ab 10/2001) bzw. 29 Profilgruben der „Catena West“ (bis 9/2001) zur Erfassung des Stauwasserspiegels am Modellhang Hölzerkopf
- 1 Wetterstation (elektronisch) am Modellhang Hölzerkopf
- 7 Niederschlagssammler und 5 Minimum-Maximum-Thermometer am Modellhang

Tabelle 1-1 gibt einen Überblick über Installationszeitpunkt und Nutzungsdauer der Messanlagen sowie über das Messintervall bei der Datenerhebung; Abbildung 1-4 veranschaulicht die räumliche Verteilung der Messgeräte im Untersuchungsgebiet.

Tabelle 1-1 Aufnahmezeitraum und -intervall der erhobenen Variablen bzw. Nutzungsdauer der Messanlagen.

Erhobene Daten/ Messstelle	SH 99	WH 99/00	SH 00	WH 00/01	SH 01	WH 01/02	SH 02	WH 02/03	SH 03	WH 03/04
Abflussmessungen Modellhang (W1–W39)	w	w	w	w	2-w	w	2-w	w	2-w	+
Abflussmessungen Gräfenbach (P5)	+	–	–	–	–	–	+	–	+	+
Elektr. Pegel Gebietsabflüsse Modellhang (P1, P2, P3)	–	15-m	15-m	15-m	15-m	15-m	15-m	15-m	15-m	15-m
Elektr. Pegel Unterhangbereich Modellhang (P6, P7, P8)	–	–	–	–	–	15-m	15-m	15-m	15-m	15-m
Maximalpegel Gräfenbach (Max1, Max2)	w	w	w	w	2-w	–	–	–	–	–
Elektr. Pegel Gräfenbach (P5)	–	–	–	–	–	15-m	15-m	15-m	15-m	15-m
Stauwasserspiegel Profilgruben (C1.0–C6.4)	–	w	2-w	2-w	2-w	–	–	–	–	–
Stauwasserspiegel Standrohre (IF 1–IF 11)	–	–	–	–	–	w	2-w	w	+	+
Niederschlag Modellhang (manuell) (Nd F1–Nd F4, Nd Fi1–Nd Fi2, Nd Ju1)	w	w	w	–	–	–	–	–	–	–
Freilandniederschlag Modellhang (elektr.) (Nd Thies)	–	5-m	5-m	5-m	5-m	5-m	5-m	15-m	15-m	15-m
Lufttemperatur Modellhang (manuell) (T F1–T F3, T Fi1–T Fi2)	w	w	w	–	–	–	–	–	–	–
Lufttemperatur Modellhang (elektr.) (T Thies)	–	5-m	5-m	5-m	5-m	5-m	5-m	15-m	15-m	15-m
w = 1–5 Messungen/Woche	2-w = 2-wöchentl. Messung		3-m/5-m/15-m = 3-/5-/15-minütl. Messung			+ = Messung nach Bedarf		– = keine Messung		

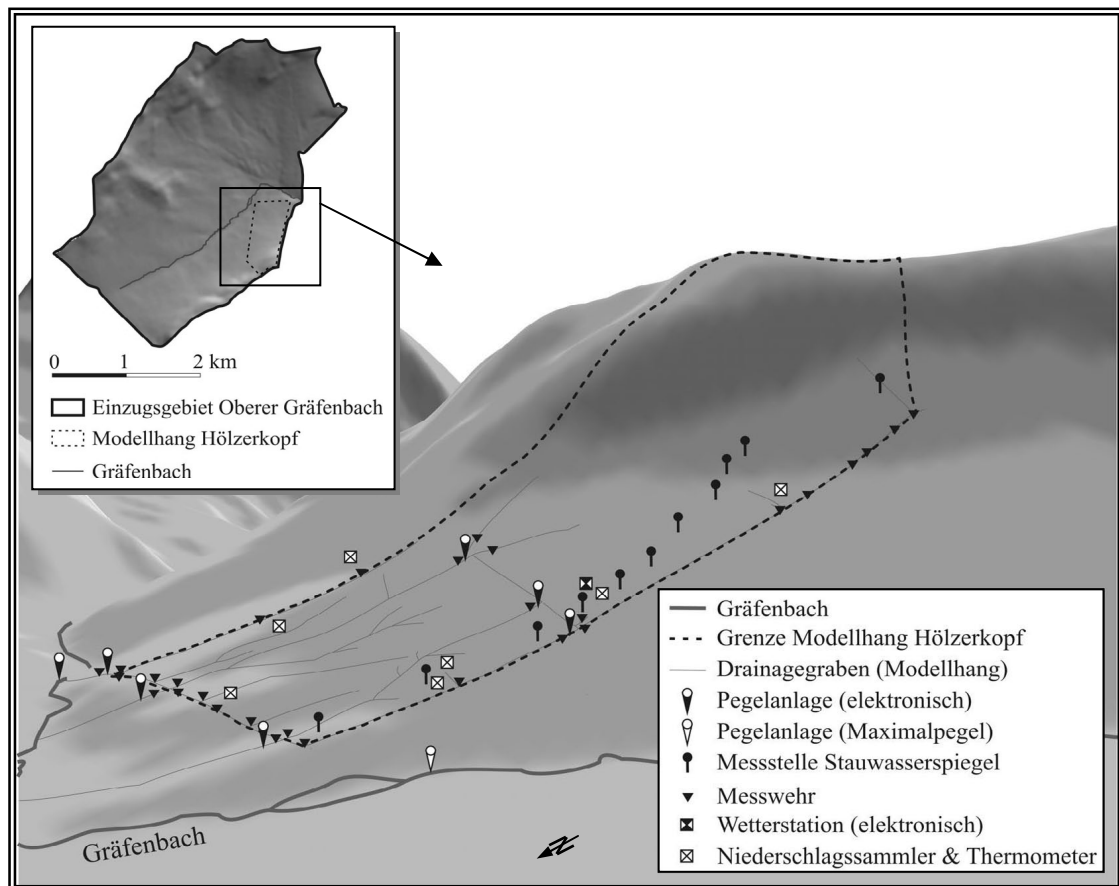


Abb. 1-4 Messgeräteausstattung im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

Der Modellhang Hölzerkopf wurde mit einer unbeheizten elektronischen Wetterstation ausgestattet, die 15-minütlich Niederschlags- und Temperaturdaten aufnahm (*Nd Thies/T Thies*). Weiterhin wurden sieben Niederschlagstotalisatoren nach Hellmann (*Nd F1*“ etc.) und fünf Minimum-Maximum-Thermometer („Six-Thermometer“; *T F1* etc.) installiert.

Entlang des Grabensystems des Modellhanges Hölzerkopf wurden 30 Abflussmessstellen (*W1–W39*) errichtet,¹ an denen ab Frühjahr 1999 in wechselnden zeitlichen Intervallen direkte volumetrische Abflussmessungen (Gefäßmessungen) durchgeführt wurden (je nach Witterung bis maximal 5 Messungen/Woche). Dieses Messnetz wurde im Verlauf der Untersuchungen durch sechs elektronische Pegelanlagen am Modellhang (*P1, P2, P3, P6, P7, P8*) und eine elektronische Pegelanlage am Gebietsauslass im Gräfenbach (*P5*) ergänzt, die in 15-minütlichen Intervallen den Wasserstand am zugehörigen Gewässerquerschnitt erfassten und so quasi-kontinuierliche Daten für ausgewählte Knotenpunkte des Gewässernetzes lieferten.

An 29 Profilgruben der „Catena West“ (*C1.0–C6.4*), die ursprünglich für Bodenuntersuchungen angelegt wurden, erfolgten bis Oktober 2001 – in identischen Intervallen zu den Abflussmessungen – zusätzlich Messungen zur Höhe des Stauwasserspiegels am Modellhang. Ab November 2001 wurden die Messungen in den Profilgruben durch Messungen in 11, zu diesem Zweck neu installierten Standrohren (Maximalpegel; *IF 1–IF 11*) ersetzt.

Die hier gegebene Darstellung zur hydrometeorologischen Datenerhebung im Untersuchungsgebiet dient lediglich als grundsätzlicher Überblick über die Vorgehensweise. Eine exakte Vorstellung der jeweiligen Messmethodik erfolgt in Kapitel 4.

¹ Ursprünglich wurden 39 Messstellen angelegt, von denen einige frühzeitig wieder aufgegeben wurden. Durch die Aufrechterhaltung der ursprünglichen Bezeichnungen besitzen die bestehenden Messstellen dennoch die Kürzel *W1–W39*.

1.3.3 Auswertung der hydrometeorologischen Daten

Die Auswertung der hydrometeorologischen Messreihen basierte auf allgemeinen statistisch-mathematischen Methoden, zu deren Umsetzung folgende Software zum Einsatz kam:

- SPSS 11.5 und SPSS 13²
- MS Excel 2000 und MS Excel 2003
- Maple 9.5

Eine weitergehende Darstellung spezieller Methoden, z. B. die Erstellung der Abflusskurven oder die Klassifizierung von Teileinzugsgebieten auf Basis ihrer Abflussdynamik, erfolgt auch hier aus darstellungstechnischen Gründen in den Kapiteln 5 und 6.

1.3.4 Modellanwendung

Der abschließende Arbeitsschritt umfasste die Nachbildung der im Einzugsgebiet ablaufenden hydrologischen Prozesse anhand des physikalisch basierten, konzeptionellen Einzugsgebietsmodells MMS/PRMS (Modular Modeling System/Precipitation Runoff Modeling System; vgl. Leavesley et al. 1983 und USGS 2006a) und die aufbauende Rechnung von Landnutzungsszenarien. Das distributive Modell erfordert die Regionalisierung des Untersuchungsgebietes nach prozesshydrologischen Gesichtspunkten im Vorfeld der Modellierung. Zu diesem Zweck kam das Konzept der Hydrological Response Units (HRUs) in Anlehnung an Flügel (1995a, 1995b, 1996a, 1996b) zum Einsatz. Modell und GIS waren dabei lediglich lose gekoppelt, d. h. die GIS-Funktionen wurden ausschließlich im Rahmen des Preprocessing (Datenaufbereitung und Regionalisierung) und Postprocessing (Visualisierung und Analyse der Ergebnisse) genutzt.

HRUs, die die räumlichen Modellierungseinheiten bildeten, stellen hydrologisch homogene Flächenklassen dar, innerhalb derer die Variabilität der hydrologischen Prozessdynamik geringer ist als zwischen verschiedenen HRUs. Für ihre Ausweisung erfolgte zunächst eine Klassifikation der hydrologisch relevanten Gebietsmerkmale (Relief, Geologie, Pedologie, Landnutzung), an die sich eine Verschneidung der klassifizierten Merkmalsebenen mit Hilfe Geographischer Informationssysteme (ArcView, ArcGis) anschloss. Eine eingehende Darstellung des HRU-Konzeptes und der Ausweisung der HRUs im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches findet sich in Kapitel 7.

Die aufbauende Anwendung des Modells MMS/PRMS umfasste folgende drei Schritte:

- **Modellparametrisierung:** Festlegung der Ausprägung physikalischer Parameter und Abschätzung der Ausprägung konzeptioneller Parameter
- **Modellkalibrierung:** Optimierung der konzeptionellen Modellparameter anhand im Untersuchungsgebiet erhobener hydrologischer Messreihen
- **Modellvalidierung:** Überprüfung der Modellgüte anhand im Untersuchungsgebiet erhobener hydrologischer Messreihen

² Alle in der Arbeit aufgeführten Produktamen sind Warenzeichen der jeweiligen Firmen und werden an den betreffenden Stellen nicht weiter als solche gekennzeichnet.

An die Nachbildung des Ist-Zustandes schloss sich die Rechnung unterschiedlicher Landnutzungsszenarien an, die einerseits eine Veränderung der forstlichen Bestockung und andererseits eine Veränderung des Versiegelungsgrades im Gebiet umfassten. Eine detaillierte Beschreibung des Modells MMS/PRMS sowie der Methodik der Modellanwendung findet sich in Kapitel 7. Abbildung 1-5 gibt einen zusammenfassenden Überblick über den prinzipiellen Ablauf der Modellierung.

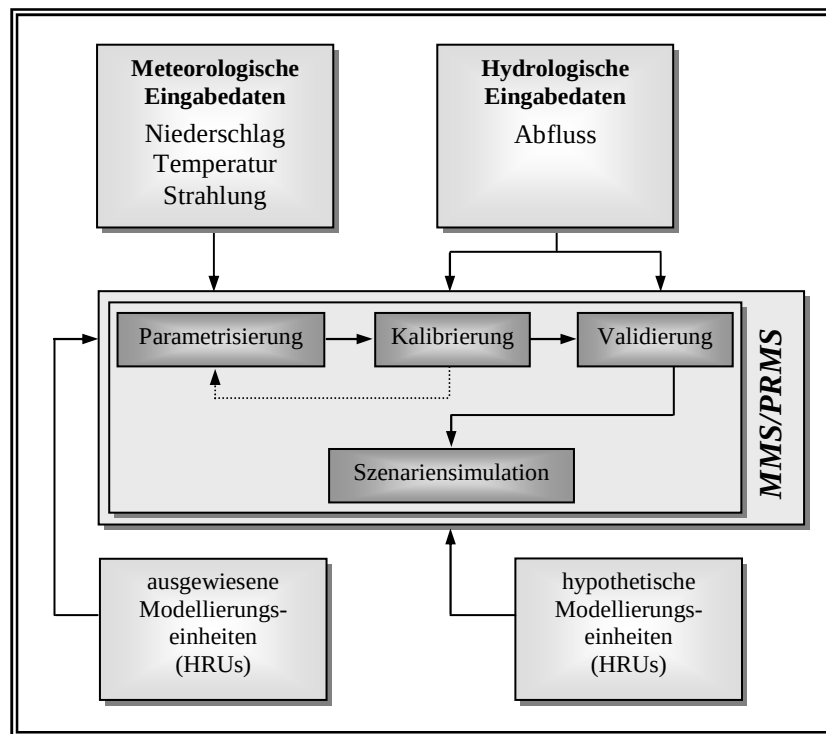


Abb. 1-5 Schema der Anwendung des Modells MMS/PRMS.

2 Hydrologische Grundlagen

Hydrologische Untersuchungen und die damit verbundene Anwendung hydrologischer Berechnungsverfahren können nur dann sinnvoll erfolgen, wenn ein grundlegendes Verständnis der hydrologischen Vorgänge gegeben ist. Daher soll in diesem Kapitel zunächst eine kurze Einführung in die Grundlagen des Wasserhaushaltes erfolgen, die jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Umfassende Darstellungen mit z. T. unterschiedlichen Schwerpunkten findet sich u. a. in Baumgartner & Liebscher (1996), Dyck & Peschke (1995), Herrmann (1977), Hölting (1996), Maniak (1997), Wilhelm (1997) und Wohlrab et al. (1992).

2.1 Überblick über den Wasserkreislauf und die Skalenbereiche in der Hydrologie

Das gesamte Weltwasservorkommen wird auf ca. 1,386 Mrd. km³ geschätzt. Betrachtet man die Wasserreservoirs der Erde, wird deutlich, dass der mit 96,54 % größte Anteil der Gesamtwassermenge als Salzwasser in den Weltmeeren gespeichert ist, wohingegen auf Eis und Schnee lediglich 1,76 %, auf Grundwasser 1,69 % und auf Oberflächenwasser 0,013 % entfallen. Bodenwasser, Wasser der Atmosphäre und Wasser der Biosphäre besitzen nur einen Anteil von jeweils unter 0,001 % der Gesamtwassermenge (Baumgartner & Liebscher 1996). Das Wasser befindet sich hierbei in einem von Strahlungsenergie der Sonne und Schwerkraft der Erde angetriebenen globalen Wasserkreislauf, in dem es durch die Komponenten Verdunstung, atmosphärischer Wasserdampftransport, Niederschlag und Abfluss unter ständigen Zustandsänderungen zwischen den einzelnen Speichergliedern bewegt wird. Ein Großteil des Wasserumsatzes erfolgt dabei ausschließlich über dem Meer, während ein geringerer Teil auch in der Landphase des Gesamtkreislaufes umgesetzt wird (Dyck & Peschke 1995).

Im Rahmen hydrologischer Untersuchungen werden unterschiedliche räumliche und zeitliche Skalenbereiche betrachtet. Der räumliche Maßstab (vgl. Tabelle 2-1) erstreckt sich von der globalen bis zur lokalen Dimension (Dooge 1986), bzw. von der Makro- bis zur Mikroskala (Becker 1992), und der zeitliche Maßstab vom Einzelereignis bis zur langfristigen Dimension (Kleeberg & Cemus 1992). Betroffen sind sowohl die Prozesse selbst als auch deren Beobachtung und Nachbildung in Modellen, wie Blöschl & Sivapalan (1995) umfassend erörtern. Die hydrologischen Prozesse beruhen dabei zwar grundsätzlich auf skalenunabhängigen physikalischen Gesetzmäßigkeiten, jedoch treten mit wechselndem Maßstab unterschiedliche Prozesse in den Vordergrund. Hydrologische Untersuchungen gehen bei kleiner werdender Skala mit einer immer detaillierteren Betrachtung bzw. Modellierung der tatsächlich ablaufenden Prozesse einher, so dass innerhalb unterschiedlicher Skalenniveaus unterschiedliche Abstraktionsniveaus vorherrschen. Aus den genannten Gründen stellt sich ein Skalenwechsel innerhalb hydrologischer Untersuchungen und Prozessnachbildungen als problematisch dar. Eine nähere Betrachtung zum Forschungsbereich der Regionalisierung in der Hydrologie und zu den räumlichen und zeitlichen Skalen erfolgt in Kapitel 7.

Tabelle 2-1 Skalenbereiche in der Hydrologie und ihre Charakteristika (nach Dyck & Peschke 1995 und Kleeberg 1999).

Skalenbereich	Länge	Fläche	Charakteristika
Mikroskala	< 0,1 km	< 0,01 km ²	elementare Flüsse, räumliche Homogenität, Lysimeter, Parzellen, Schläge, Standorte, Hydrotope, Teileinzugsgebiete
Mesoskala	0,1–10 km	0,01–100 km ²	komplexe Flüsse, räumliche Homogenität, Grundwasserleiter, Versorgungsgebiete, Flussgebiete
Makroskala	> 10 km	> 100 km ²	komplexe regionale und globale Flüsse, räumliche Heterogenität, Stromgebiete, Kontinente

Eine Vielzahl hydrologischer Studien bewegt sich in der räumlichen Dimension der Mesoskala. Diese umfasst die Betrachtung des Wasserhaushaltes ganzer Landschaften und Landschaftsteile, mit einer Größe von nur wenigen Hektar bis zu hundert Quadratkilometern. Als sinnvolle Bezugsräume für die Wasserhaushaltsuntersuchungen dienen in diesem Zusammenhang Einzugsgebiete unterschiedlicher Größenordnung. Unter einem Einzugsgebiet versteht man „[...] das durch eine ober- und/oder unterirdische Wasserscheide abgegrenzte Gebiet, welches durch einen Fluss oder Bach mit allen seinen Nebenflüssen entwässert wird“ (Leser et al. 1993). Man unterscheidet zwischen oberirdischen Einzugsgebieten (A_{Eo}), die durch oberirdische Wasserscheiden bestimmt werden und deren Größe die Fläche des von der Wasserscheide umschlossenen Gebietes in der Horizontalprojektion darstellt, und unterirdischen Einzugsgebieten (A_{Eu}), deren Größe und Verlauf vom geologischen Untergrund abhängt und somit nicht mit dem oberirdischen Einzugsgebiet übereinstimmen muss (Baumgartner & Liebscher 1996). Einzugsgebiete sind bezüglich des Wasserkreislaufs offene dynamische Systeme, für die Wasserbilanzen erstellt, Wasserbewegungen untersucht sowie Zusammenhänge zwischen hydrologischen Vorgängen und physiographischen Gebietsmerkmalen studiert werden können (Wohlrab et al. 1992).

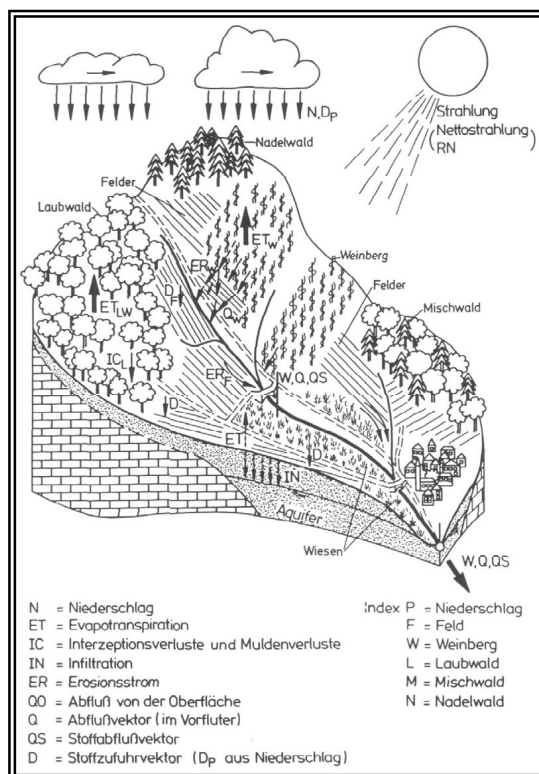
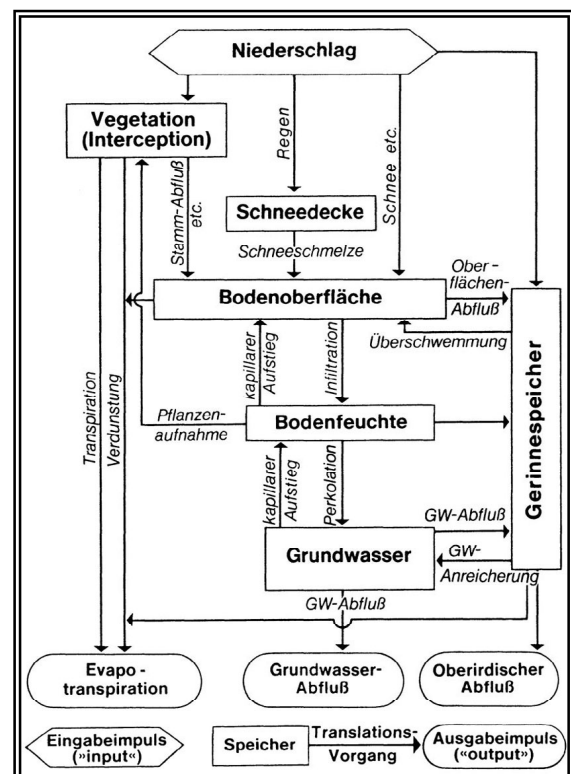
**Abb. 2-1** Modell eines mesoskaligen Einzugsgebietes (Plate 1992).**Abb. 2-2** Schema der hydrologischen Systemzusammenhänge in einem Einzugsgebiet (Wilhelm 1997).

Abbildung 2-1 zeigt ein Einzugsgebietsmodell mit den zugehörigen hydrologischen Prozessen, deren Zusammenspiel in Abbildung 2-2 nochmals schematisch verdeutlicht ist. Den grundlegenden Systeminput stellt der Gebietsniederschlag dar, der nach Durchlaufen mehrerer Speicher letztlich als Output wieder aus dem Einzugsgebiet abgeht. Dieser Output kann in Form von Evapotranspiration, unterirdischem und oberirdischem Abfluss erfolgen. Die ablaufenden Prozesse werden im Wesentlichen von sechs Faktoren gesteuert: Klima, Vegetation, Geomorphologie, Boden, Geologie und Einfluss des Menschen (Schaar 1989). Zusammenfassend lässt sich für die Wasserbilanz eines Einzugsgebietes in einem bestimmten Zeitintervall Δt folgende Gleichung aufstellen (Baumgartner & Liebscher 1996):

$$Nd = A + V \pm \Delta S$$

(Gleichung 2-1)

mit: Nd = mittlere Niederschlagshöhe des Einzugsgebietes [mm]
 A = mittlere Abflusshöhe [mm]
 V = Verdunstung [mm]
 ΔS = Rücklage oder Aufbrauch von Wasser im Einzugsgebiet [mm]

Im Folgenden werden die Prozesse und Speicherglieder dieses komplexen Systems einführend erläutert, wobei ein Schwerpunkt im Bereich des Bodenwasserhaushaltes liegt.

2.2 Komponenten des Wasserhaushaltes

2.2.1 Niederschlag

Betrachtet man zunächst den Systeminput durch Niederschläge, der in Form unterschiedlicher Niederschlagsarten auftreten kann, zeigt sich, dass bei Vorhandensein einer Vegetationsdecke nur ein Teil der Freilandniederschläge (P bzw. Nd) als durchfallender Niederschlag (P_d) direkt die Bodenoberfläche erreicht. Der andere Teil wird von den Interzeptionsspeichern (I_r) der Vegetation aufgenommen, verdunstet von dort aus (Interzeptionsverdunstung I), tropft wieder ab (P_t) oder fließt entlang der Pflanze zum Boden (P_{st} ; vgl. Abbildung 2-3).

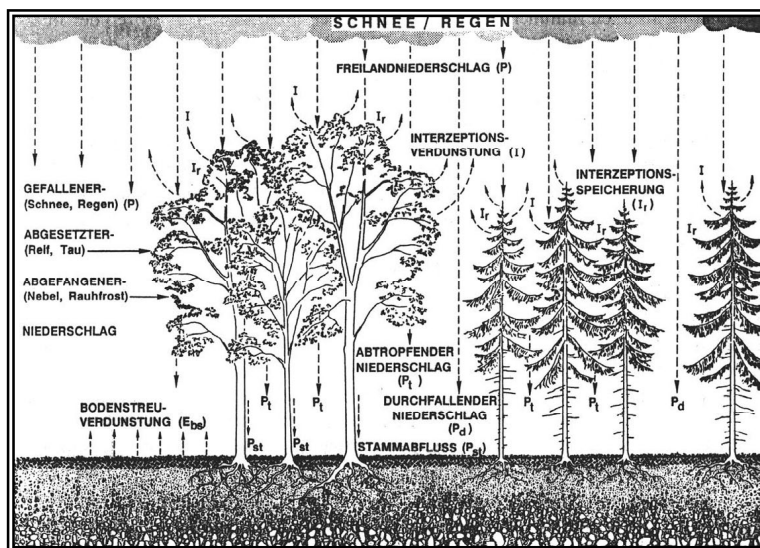


Abb. 2-3 Komponenten der Niederschlagsbilanz von Vegetationsdecken, hier Buchenwald mit Stammabfluss und Fichtenwald ohne Stammabfluss (Baumgartner & Liebscher 1996).

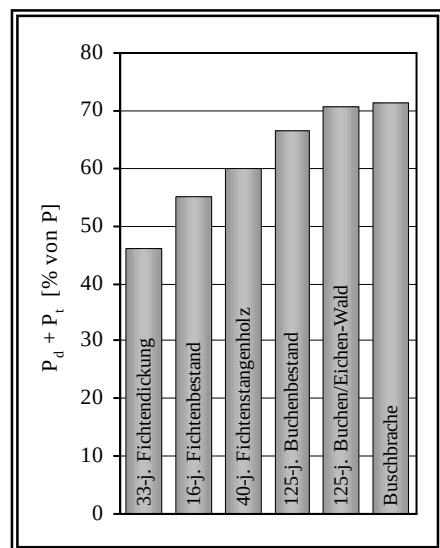


Abb. 2-4 Mittlerer Kronendurchlass verschiedener Bestände (nach Ernstberger 1987, Meuser 1989).

Die Höhe der Interzeption hängt von den spezifischen Eigenschaften des Vegetationsbestandes (Pflanzenart, Bestandesdichte, Rauigkeit, Alter und Höhe des Bestandes) und klimatischen Faktoren (Art und Intensität der Niederschläge, Wind, Energie und Luftfeuchte) ab (Ernstberger 1987). Der Bestandesniederschlag (P_b) passiert direkt oder indirekt die Vegetationsdecke. Im Bereich des Auflagehorizontes von Waldbeständen erfolgt durch Speicher- und Verdunstungsprozesse (Bodenstreu-Verdunstung (E_{bs})) eine nochmalige Reduktion der Niederschläge zum letztlich auf den Mineralboden auftreffenden Netto-niederschlag (A_{S1}). Die Niederschlagsbilanz des Waldes lässt sich wie folgt zusammenfassen:

$$P = I + E_{bs} + A_{S1}$$

(Gleichung 2-2)

Abbildung 2-4 zeigt den mittleren jährlichen Anteil von durchfallendem Niederschlag (P_d) und abtropfendem Niederschlag (P_t) vom Freilandniederschlag (P) für verschiedene Vegetationsbestände in unteren Mittelgebirgslagen Hessens. Es werden erhebliche Unterschiede zwischen den Beständen deutlich. Insgesamt reicht die Spannweite von 46 % bis über 70 %.

2.2.2 Verdunstung

Verdunstung stellt den Übergang eines Körpers vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand dar und beruht auf dem physikalischen Vorgang der Verdampfung unterhalb der Siedetemperatur (Wohlrab et al. 1992). Die Verdunstung von Wasser im Rahmen des hydrologischen Zyklus lässt sich grundsätzlich in die zwei Teilkomponenten Evaporation, der Verdunstung unter Ausschluss biotischer Vorgänge, und Transpiration, der Verdunstung aus dem lebenden Organismus heraus, aufgliedern. Zwar beruhen beide Vorgänge grundsätzlich auf einem Wasserpotenzialgefälle, bei der Transpiration (E_T) ist jedoch die Pflanze in das Wasserpotenzialgefälle zwischen Boden und Luft zwischengeschaltet und greift modifizierend in die Wasserabgabe ein. Detaillierte Darstellungen der Transpirationsmechanismen finden sich in Kutschera (1995), Larcher (1994), Libbert (1993), Löscher (2001) und Sitte et al. (1991).

Die Evaporation lässt sich in Abhängigkeit von dem jeweils zugrunde liegenden Speicher-glied des hydrologischen Zyklus in folgende Teilkomponenten weiter aufteilen: Verdunstung vom Boden aus (E_B), Interzeptionsverdunstung von benetzten Pflanzenoberflächen (E_I), Verdunstung von Eis- und Schneeoberflächen (E_S) und Verdunstung von freien Wasserflächen (E_O). Zusammen bilden Transpiration und Evaporation die Evapotranspiration (ET), wobei im Rahmen mesoskaliger hydrologischer Untersuchungen eine genaue Trennung beider Komponenten praktisch nicht möglich ist (Baumgartner & Liebscher 1996). Neben diesen einzelnen Komponenten der Evapotranspiration wird weiterhin zwischen potenzieller Evapotranspiration (ET_p) und tatsächlicher Evapotranspiration (ET_a) unterschieden. Unter der potenziellen Evapotranspiration versteht man das Wasservolumen, das unter den vorliegenden meteorologischen Randbedingungen von einer ganz oder teilweise mit Vegetation bedeckten Fläche bei unbegrenztem Wassernachschub an die Atmosphäre abgegeben werden kann. Die tatsächliche Evapotranspiration stellt demgegenüber die Verdunstung der gegebenen Fläche bei dem real existierenden Wasserangebot dar (DVWK 1996).

Eine Bestimmung der Verdunstungshöhe kann durch unterschiedliche Verfahren erfolgen. Zum einen direkt über Messgeräte wie Atmometer, Evaporimeter oder Lysimeter, zum

anderen indirekt durch Ableitung aus der Wasserbilanz, dem Wasserdampfaustausch und der Energiebilanz oder anhand empirischer Formeln. Empirisch ermittelte Formeln stellen hierbei eine in der hydrologischen Praxis häufig angewandte Methode zur Abschätzung der Verdunstungshöhe eines Standortes auf Basis einer mehr oder minder großen Zahl meteorologischer Parameter dar. Ein international weit verbreiteter Ansatz zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung bewachsener Flächen ist das Penman-Monteith-Modell (Monteith 1965), das auf der komplexen Verknüpfung der Ausgangsgrößen Strahlungsbilanz, Temperatur, Dampfdruck der Luft, Windgeschwindigkeit und Verdunstungswiderständen beruht. Die Genauigkeit der ermittelten Verdunstungshöhe ist bei diesem Verfahren ausgesprochen gut und eine zeitliche Auflösung gegebenenfalls sogar im Stundenbereich möglich, jedoch ist der Arbeitsaufwand zur Anwendung des Verfahrens und die Anzahl der benötigten Ausgangsgrößen dementsprechend hoch (DVWK 1996). Es existieren jedoch auch deutlich einfachere Verfahren zur Berechnung der Evapotranspiration eines Standortes, die anhand einer deutlich geringeren Anzahl von Parametern befriedigende Ergebnisse in einer zeitlichen Auflösung von Tagen oder Monaten liefern (DVWK 1996). Genannt seien hier z. B. das Haude-Verfahren (Haude 1955), das Turc-Verfahren (Turc 1961) und das Verfahren nach Jensen/Haise (Jensen & Haise 1963), die alle der Berechnung der potenziellen Evapotranspiration dienen. Das Verfahren nach Jensen/Haise, das u. a. im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Wasserhaushaltsmodellierung zur Anwendung kommt, beruht dabei ausschließlich auf den meteorologischen Eingangsparametern Temperatur und Solarstrahlung, und kann somit auch bei relativ geringer messtechnischer Ausstattung des Untersuchungsgebietes Anwendung finden. Vor allem die einfacheren Berechnungsverfahren sind jedoch bezüglich ihrer regionalen Anwendbarkeit jeweils kritisch zu hinterfragen. Ein detaillierter Überblick über die Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Verdunstung findet sich in den Merkblättern 238 des DVWK (1996) und bei Ernstberger (1987).

Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über Jahreswerte der tatsächlichen Evapotranspiration (ET_a) unterschiedlicher Vegetationsbestände in unteren Mittelgebirgslagen bei jährlichen Freilandniederschlägen zwischen 700 und 800 mm. Hier zeigt sich eine sehr hohe Variationsbreite, wobei Nadelwälder mit über 600 mm die höchsten Werte aufweisen. Weitere Werte zur Evapotranspiration an unterschiedlichen Standorten finden sich u. a. in Ernstberger (1987).

Tabelle 2-2 Jährliche ET_a verschiedener Bestände in unteren Mittelgebirgslagen (nach Ernstberger 1987).

Vegetationsbestand	ET_a [mm]
Fichte mittelalt	680
Fichte jung	670
Buche alt	570
Buschbrache	560
Buche/Eiche alt	550
Grünland	500
Mais	410
* Nd = 700–800 mm nFKWe = 140–170 mm	

2.2.3 Abfluss

Eine weitere Komponente der Landphase des hydrologischen Kreislaufs stellt der Abfluss dar, dessen Bildung und zeitliche Intensitätsverteilung von allen hydrologischen Prozessen beeinflusst wird (DIN 1996). Im Rahmen der Abflussbildung entscheidet sich, welcher Teil des Niederschlags durch Evapotranspiration wieder an die Atmosphäre abgegeben wird und welcher Teil direkt oder zeitlich verzögert als Abfluss in den Vorfluter gelangt. Grundsätzlich stellt die Bodenzone das entscheidende Glied der Abflussbildung dar, das den um

Interzeptionsverluste reduzierten Niederschlag in die einzelnen Abflusskomponenten³ Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss transformiert. Abbildung 2-5 zeigt einen schematischen Überblick über die Prozesse der Abflussbildung, die im Rahmen der weiteren Ausführungen näher erläutert werden sollen. Die Betrachtung erfolgt in Anlehnung an Leibundgut & Uhlenbrook (1997a) und Bronstert et al. (2001) in unterschiedlichen räumlichen Dimensionen, wobei die für unterschiedliche Skalen dargestellten Prozesse aufeinander aufbauen. Als kleinste räumliche Dimension dient die lokale Skala (Bodenmonolith), in der vornehmlich vertikale Fließprozesse zu beobachten sind; die nächstgrößere Dimension ist die Hangskala (Teilfläche eines Einzugsgebietes), in der laterale Abflussprozesse verstärkt an Bedeutung gewinnen; und die übergeordnete Dimension ist das Einzugsgebiet, in dem das Gewässernetz mit den darin ablaufenden Fließprozessen als weitere entscheidende Einflussgröße hinzukommt (vgl. Abbildung 2-5).

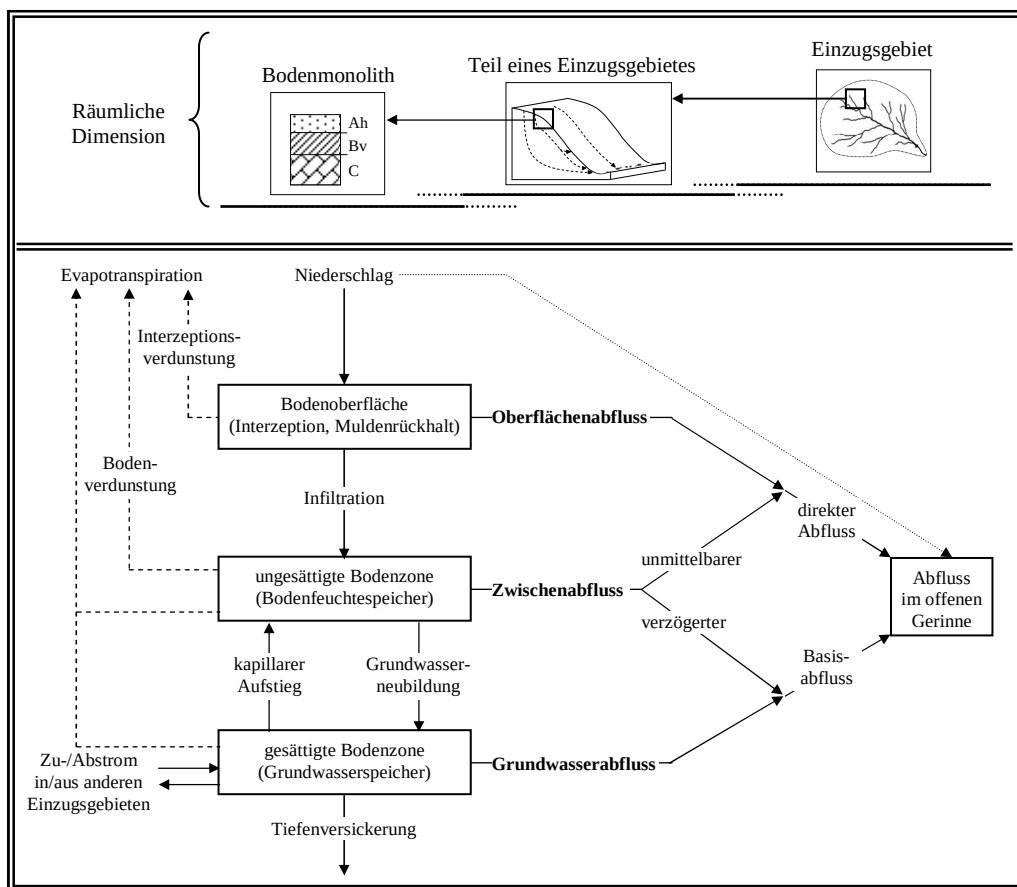


Abb. 2-5 Schematische Darstellung des Abflussprozesses und Unterscheidung verschiedener räumlicher Dimensionen (nach Leibundgut & Uhlenbrook 1997a und Baumgartner & Liebscher 1996).

2.2.3.1 Abflussbildung in der lokalen Skala

Im Rahmen der Betrachtung der lokalen Skala sollen in erster Linie vertikale Wasserbewegungen (Infiltration, Sickerung und kapillarer Aufstieg) dargestellt werden. Eine eingehendere Erörterung lateraler Fließprozesse folgt in Kapitel 2.2.3.2.

³ Zur Problematik der Begriffe Abflussbildungsprozess (Fließprozess zu einem bestimmten Zeitpunkt an einer bestimmten Stelle im Einzugsgebiet) und Abflusskomponente (Wasservolumen im Vorfluter, das bestimmten Bildungsprozessen zugeordnet wird) vgl. Bronstert et al. (2001) und Becker et al. (1999).

Der Boden bildet als entscheidendes Transformationsglied der Abflussbildung eine Art hydrologisches Puffersystem. Er stellt ein poröses Medium dar, das einerseits Wasser speichern kann, andererseits jedoch auch wasserdurchlässig ist und somit als Verteiler dient (Peschke 2001). Die Geschwindigkeit der auftretenden Wasserbewegungen variiert stark und kann bis zu 20 cm/s betragen (Beven & Germann 1982). Die bodenspezifische Wasseraufnahmefähigkeit, Wasserleitfähigkeit und Wasserspeichermöglichkeit beruhen auf dem Porensystem des Bodens, das von der Korngrößenzusammensetzung (Bodenart), der Packungsdichte der Bodenpartikel (Lagerungsdichte) und ihrer räumlichen Anordnung (Bodengefüge, Bodenstruktur) abhängig ist (Zepp & Herget 2001).

In einer Reihe von Untersuchungen (Flury et al. 1994, Hornberger et al. 1991, Mosley 1982) konnte durch Markierungsversuchen nachgewiesen werden, dass bei der Abflussbildung mehrere Porensysteme im Boden aktiv sein können. Abweichend von (bzw. aufbauend auf) der klassischen bodenkundlichen Unterteilung in Grob-, Mittel- und Feinporen erscheint dabei die von Beven & Germann (1982) eingeführte Unterteilung in Mikroporensystem und Makroporensystem sinnvoll, wobei die Definition von Makroporen bei unterschiedlichen Autoren stark variiert. Nach Beven & Germann (1981) umfassen sie alle Poren mit einem Äquivalentdurchmesser größer 3 mm. Eine Übersicht bezüglich der verschiedenen Definitionen von Makroporen findet sich in Uhlenbrook (1995). Die Vorgänge, die zur Entstehung von Makroporen führen, sind vielfältig: z. B. Einwirkungen der Bodenfauna und -flora, subterrane Erosion, Rissbildung durch Schrumpfungsprozesse oder auch anthropogene Aktivitäten (vgl. Beven & Germann 1982; Leibundgut & Uhlenbrook 1997).

Auf Basis dieser grundlegenden Unterteilung des Porensystems kann von einem bimodalen Porenwassertransport in vertikaler (vgl. Abbildung 2-6) wie lateraler Richtung (vgl. Kapitel 2.2.3.2) gesprochen werden (Zepp & Herget 2001). Entscheidend ist, dass die im Mikroporensystem stattfindenden Wasserbewegungen (Mikroporenfluss, Matrixfluss) maßgeblich von Kapillarkräften beeinflusst sind und in der Regel vergleichsweise langsam ablaufen, wohingegen der nicht maßgeblich von Kapillarkräften beeinflusste Wasserfluss im Makroporensystem (Makroporenfluss) nach Beven & Germann (1981) deutlich schneller ablaufen kann (vgl. Bild 3-14). Ein Auftreten von Makroporenfluss hängt u. a. vom Bodenwassergehalt der umliegenden Bodenmatrix, der Beschaffenheit der Matrixporenwandungen und der verfügbaren Wassermenge in den Makroporen ab (Bronstert et al. 2001). Die Geschwindigkeit der auftretenden Wasserbewegung steht dabei in direkter Abhängigkeit zu Gefälle, Rauigkeit und Vernetztheit der Makroporen (vgl. Kapitel 2.2.3.2). Grundsätzlich gilt, dass Makroporenfluss nur dann entsteht, wenn die Wasserzufuhr die Aufnahmekapazität der Mikroporen überschreitet. Detaillierte Diskussionen über die notwendigen Entstehungsbedingungen für Makroporenfluss finden sich u. a. bei Beven & Germann (1981, 1982), Flury et al. (1994), Germann (1986, 1999) und Mosley (1982).

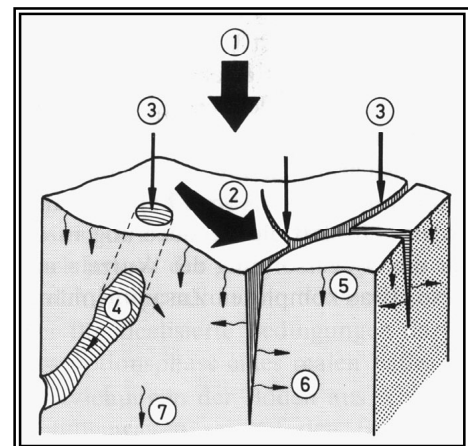


Abb. 2-6 Die wichtigsten Wasserbewegungen bei der Infiltration (Bronstert 1994):
 ① Niederschlag
 ② Oberflächenabfluss
 ③/④ Sickerung in Makroporen
 ⑤/⑦ Sickerung in Mikroporen
 ⑥ laterale Wasserbewegung in Mikroporen

Das Ausmaß des Mikroporenflusses in einer spezifischen Bodenschicht hängt – im Gegensatz zum Makroporenfluss – in erster Linie von der aktuellen Bodenfeuchte und dem aufbauenden Gradienten des hydraulischen Potenzials ab. Eine Möglichkeit, Wasserspeicherung und Wasserbewegungen (Infiltration, Sickerung, kapillarer Aufstieg und lateraler Fluss) im Bereich der Mikroporen zu beschreiben, stellt das Potenzialkonzept dar. Dieses klassische Modell beruht auf der Annahme, dass die Wasserbewegungen im Porenraum des Bodens von der räumlichen Verteilung des Wasserpotenzials abhängig sind, wobei Wasserbewegungen stets von Stellen höheren Potenzials zu Stellen niedrigeren Potenzials gerichtet sind. Das Potenzial ist dabei definiert als die Arbeit, die notwendig ist, um eine Einheitsmenge Wasser von einem Punkt eines Kraftfeldes zu einem Bezugspunkt zu transportieren (Wohlrab et al. 1992). Das Gesamtpotenzial (ψ) setzt sich dabei aus einer Reihe von Teilpotenzialen zusammen. Als Annäherung an das Gesamtpotenzial dient aus messtechnischen Gründen oftmals das hydraulische Potenzial (ψ_H), das die Summe der am einfachsten zu bestimmenden Teilpotenziale Gravitationspotenzial (ψ_z) und Matrixpotenzial (ψ_m) in der wasserungesättigten Bodenzone bzw. Gravitationspotenzial (ψ_z) und Druckpotenzial (ψ_p) in der wassergesättigten Bodenzone darstellt, wobei thermische und osmotische Potenziale vernachlässigt werden (Blume et al. 2002):

$$\psi_H = \psi_z + \psi_m \text{ (oder } \psi_p \text{)}$$

(Gleichung 2-3)

Das Gravitationspotenzial (ψ_z) entspricht der zu leistenden Arbeit, die notwendig ist, um eine Einheitsmenge Bodenlösung von einem Bezugsniveau auf eine bestimmte Höhe anzuheben. Das Bezugsniveau für das Gesamtpotenzial wird dabei stets so gewählt, dass das Gravitationspotenzial ein positives Vorzeichen erhält und somit von der freien Wasseroberfläche (Grund- oder Stauwasseroberfläche) nach oben gerichtet zunehmende Beträge annimmt. Das Matrixpotenzial (ψ_m) ist ein Maß für den Einfluss der Bodenmatrix. Es gibt die Bindungsstärke an, die die Matrix durch Adsorptions- und Kapillarkräfte auf das Wasser ausübt. Je weniger Wasser der Boden enthält, desto stärker halten die matrixbedingten Kräfte das Wasser fest. Das Matrixpotenzial wirkt dem Gravitationspotenzial entgegen und besitzt entsprechend ein negatives Vorzeichen. Der Betrag des Matrixpotenzials wird als Wasserspannung bezeichnet. Liegt der Messpunkt in der wassergesättigten Zone, ist das Matrixpotenzial gleich null und an seine Stelle tritt das Druckpotenzial (ψ_h) mit positivem Vorzeichen (Hartge & Horn 1999).

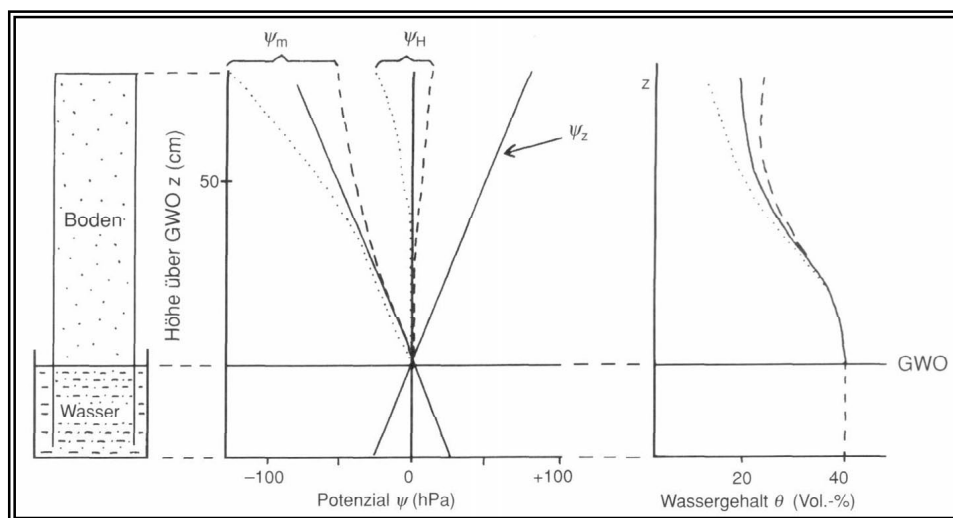


Abb. 2-7 Hydraulisches Potenzial (ψ_H), Matrixpotenzial (ψ_m), Gravitationspotenzial (ψ_z) und Wassergehalt in einer homogenen Bodensäule im Gleichgewicht (—), bei Abwärtsbewegung (- - -) und Aufwärtsbewegung (· · · · ; nach Blume et al. 2002).

Befinden sich Gravitationspotenzial (ψ_z) und Matrixpotenzial (ψ_m) an allen Stellen einer Bodensäule im Gleichgewicht, d. h. $|\psi_m| = \psi_z$ bzw. $\psi_H = 0$, so finden keine (vertikalen) Wasserbewegungen statt (Abbildung 2-7). Da die Werte des Matrixpotenzials (ψ_m) jedoch in Abhängigkeit zum Wassergehalt des Bodens (Θ) stehen, führen Wasserzufuhr (infiltrierender Niederschlag) oder Wasserabgabe (Evapotranspiration) zu einer ständigen Veränderung des Matrixpotenzials und somit zu einer Störung des Gleichgewichts, wodurch ab- bzw. aufsteigende Wasserbewegungen hervorgerufen werden (Blume et al. 2002).

Die Wassermenge, die bei einem bestimmten Matrixpotenzial vorliegt, hängt vom Porenvolumen und der Porengrößenverteilung ab. Für jede Bodenschicht existiert somit – abhängig von Korngrößenzusammensetzung, Packungsdichte der Bodenpartikel und deren räumlichen Anordnung – eine charakteristische Beziehung zwischen Wassergehalt und Matrixpotenzial, die sich in der Wasserspannungskurve bzw. pF-Kurve widerspiegelt. Der pF-Wert entspricht dabei dem Logarithmus der Wasserspannung ($pF = \log |\psi_m|$; Blume et al. 2002). In Abbildung 2-8 ist die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt verschiedener Böden sowie die zugehörige Porenraumgliederung zusammenfassend dargestellt.

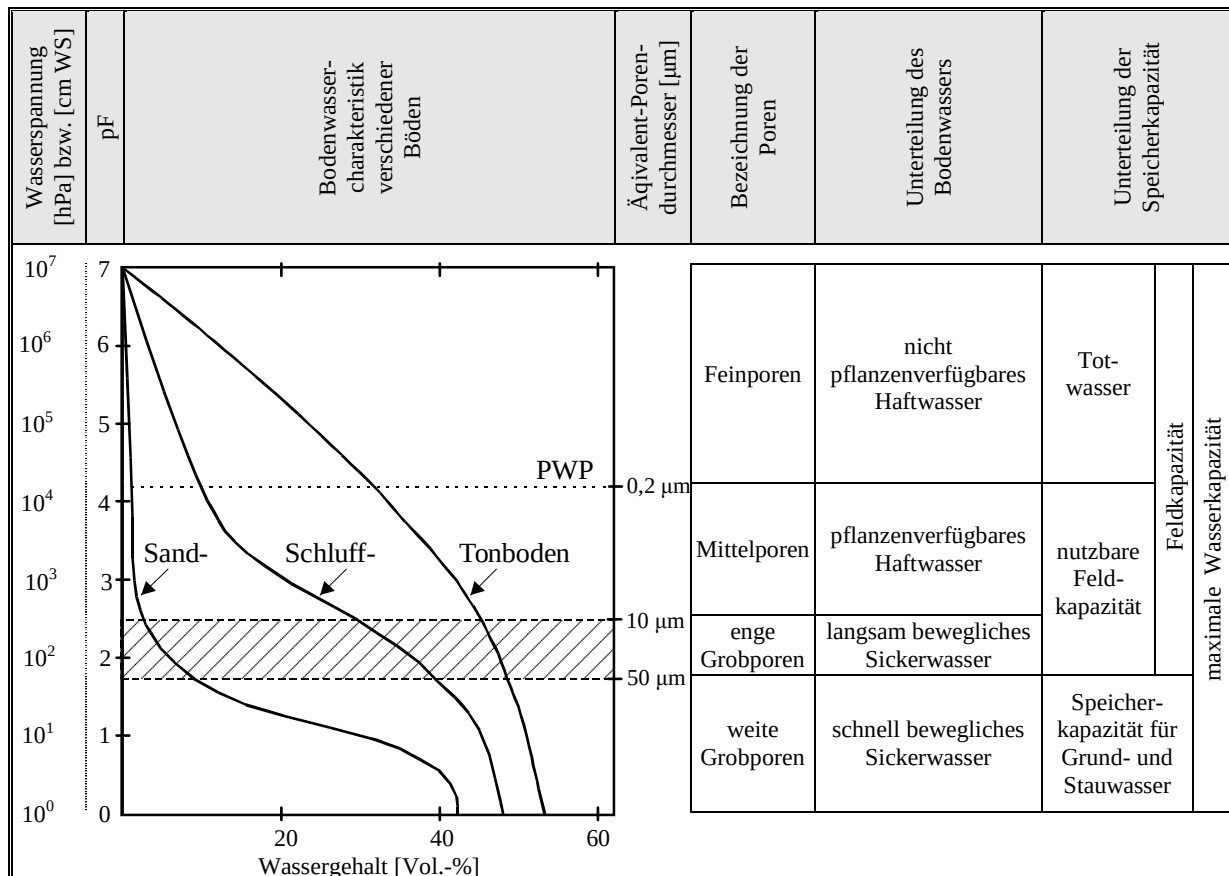


Abb. 2-8 Überblick über die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt verschiedener Böden, sowie Porenraumgliederung und die Unterteilung des Bodenwassers und der Speicherkapazität (nach Schachtschabel et al. 1992 und AG Boden 2005).

Das beschriebene Potenzialkonzept stellt das klassische Konzept zur Beschreibung der Wasserbewegung und Wasserspeicherung im Boden dar, auf dessen Basis Richards (1931), aufbauend auf dem Darcy-Gesetz, das Gesetz zur Berechnung des Wasserflusses in der gesättigten und ungesättigten Zone herleitete. Das Ausmaß der Wasserbewegung ist hierbei abhängig vom Potenzialgefälle und der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens (k_f), die in diesem Fall als Funktion der Wassersättigung zu behandeln ist (vgl. Baumgartner & Liebscher 1996, Blume et al. 2002, Leibundgut & Uhlenbrook 1997). Mit dem Potenzialkonzept kann jedoch, wie erwähnt, nur ein Teil der Abflussprozesse im Boden erklärt werden, da Entstehung und Geschwindigkeit des Makroporenflusses von weiteren Faktoren abhängt.

2.2.3.2 Abflussbildung im Hangmaßstab

Wurde im zuvor beschriebenen Skalenbereich das Hauptaugenmerk auf vertikale Wasserbewegungen gerichtet, sollen im nächstgrößeren Skalenbereich, der Teilfläche eines Einzugsgebietes (Hangmaßstab), aufbauend auf den zuvor erläuterten Sachverhalten laterale Abflussbildungsprozesse in ihrer flächenhaften Ausprägung ausgewiesen werden: Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss (vgl. Abbildung 2-5). Die einzelnen Prozesse sind hierbei nicht strikt getrennt zu betrachten, sondern stehen miteinander in Interaktion und können ineinander übergehen (Leibundgut & Uhlenbrook 1997a).

Unter (Land-)Oberflächenabfluss wird der laterale, flächenhaft auf der Landoberfläche stattfindende Abflussprozess verstanden. Oberflächenabfluss kann unmittelbar dem Vorfluter zukommen oder zu einem späteren Zeitpunkt in den Boden infiltrieren (Bronstert et al. 2001). Seine Entstehung kann unterschiedlich begründet sein:

Ein Übersteigen der aktuellen Infiltrationsrate des Mineralbodens durch die Intensität des auftreffenden (in diesem Fall zumeist hochintensiven) Niederschlags (A_{S1}), d. h. $A_{S1} > k_f$ -Wert des obersten Bodenhorizontes, führt zum Horton'schen Oberflächenabfluss (Horton 1933). Oberflächenabfluss aufgrund eines Sättigungsüberschusses des Bodens bis zur Bodenoberfläche wird als Dunne'scher Oberflächenabfluss oder Sättigungsflächenabfluss bezeichnet (Dunne 1978). Die Wassersättigung kann dabei durch vertikal oder lateral zugeführtes Wasser entstehen. Jeder weitere Niederschlag führt dann zu Oberflächenabfluss (Peschke 2001). Tritt hangaufwärts infiltriertes Wasser infolge der Verminderung der Durchlässigkeit des Bodens, der Verminderung des Gefälles der wasserleitenden Schicht oder bis an die Oberfläche reichender Makroporen wieder an die Bodenoberfläche, spricht man von „return flow“ (Musgrave & Holtan 1964). Landoberflächenabfluss ist grundsätzlich als flächenhafter Prozess zu betrachten, der in andere Abflussbildungs- und Abflusskonzentrationsprozesse übergehen oder aus anderen Prozessen hervorgehen kann. Versickerter Abfluss kann erneut an die Oberfläche treten (return flow) und oberflächlich abfließen, einmal gebildeter Oberflächenabfluss kann wieder versickern und als unterirdischer Abfluss zum Vorfluter gelangen bzw., bedingt durch die Mikrotopographie, bis zur Verdunstung oder zur verzögerten Infiltration gestaut werden (Muldenrückhalt; Baumgartner & Liebscher 1996).

Zwischenabfluss oder Interflow stellt den lateralen Abflussprozess in der ungesättigten und temporär gesättigten Bodenzone dar, der sich zumeist in oberflächennahen Bereichen von Berghängen abspielt. Verantwortlich für ein mögliches Entstehen von Interflow ist dabei v. a. eine Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens mit der Tiefe. Nimmt diese entweder kontinuierlich oder sprunghaft ab, d. h. trifft das Wasser beim Eindringen in den

Boden auf weniger durchlässige Schichten, so kommt es zu Stauwirkungen, wodurch ein zeitweise gesättigter Bereich entstehen kann. Ein Teil des gestauten Wassers bewegt sich in der Folge lateral, dem größten Gefälle folgend, durch das Bodensubstrat. Bedingung für das Auftreten dieses klassischen Interflows sind weiterhin ein ausreichendes Gefälle und ein die Feldkapazität übersteigender Wassergehalt der leitenden Bodenschichten (Peschke 2001). Auch diese lateralen Wasserbewegungen erfolgen, wie bereits in Kapitel 1.2.3.1 in Bezug auf die vertikalen Bewegungen im Bodenmonolith erläutert, sowohl im Makroporen- als auch im Mikroporensystem, so dass auch hier von einem bimodalen Bodenwassertransport gesprochen werden muss (Zepp & Herget 2001). Der im Vergleich zum Mikroporendurchfluss (Matrixfeuchtefluss) deutlich höhere Geschwindigkeiten annehmende Abfluss im Makroporensystem ist vor allem dann besonders wirksam, wenn sehr skelettreiche Bodenschichten, wie Hangschutt oder Solifluktionsschutt, im Hangenden von nicht- oder geringdurchlässigen Schichten ausgebildet sind. Diese stellen durch ihre hohe Makroporosität sehr effektive Interflow-Horizonte dar, die einen enormen Beitrag zur Hochwasserbildung leisten können (Leibundgut & Uhlenbrook 1997a). In diesem Zusammenhang ist auch das Phänomen des „Versatzes“ sich bereits im Boden befindlicher Wassermassen zu erwähnen: Entstehen infolge starker Niederschläge oberflächennah großflächige wassergesättigte Bereiche über stark stauenden Schichten, kann durch Druckfortpflanzung sehr rasch Vorereigniswasser aus dem Hangfuß in den Vorfluter ausgepresst werden (translatory flow bzw. piston flow effect). An diesem Effekt können sowohl Makro- als auch Mikroporen beteiligt sein. Weiterführende Darstellungen des Phänomens finden sich u. a. in Burt (1989), Tanaka et al. (1988) und Leibundgut & Uhlenbrook (1997a). Der eingangs erwähnte klassische Interflow auf Schichtgrenzen wird ergänzt durch den lateralen Abfluss in größeren, meist durch Bioaktivität entstandene und subterrane Erosion vergrößerte Röhren im Boden (soil pipes). Allgemein gilt, dass der Makroporenfluss v. a. dann effektiv ist, wenn die Poren über einen großen Bereich vernetzt sind (Leibundgut & Uhlenbrook 1997a). Der Makroporenabfluss kann im Vergleich zum Mikroporenabfluss 100- bis 400-mal höhere Geschwindigkeiten annehmen und liegt z. T. im cm/s-Bereich (Beven & Germann 1981). Obwohl Makroporen nur 0,2 % bis 5 % des Gesamtbodenvolumens ausmachen (Chen & Wagenet 1992), sind sie aufgrund der in ihnen ablaufenden schnellen Fließprozesse maßgeblich an der Entstehung von Hochwasserabflüssen beteiligt (Leibundgut & Uhlenbrook 1997a). Abbildung 2-9 zeigt eine schematische Darstellung der Fließwege in einem Hangboden.

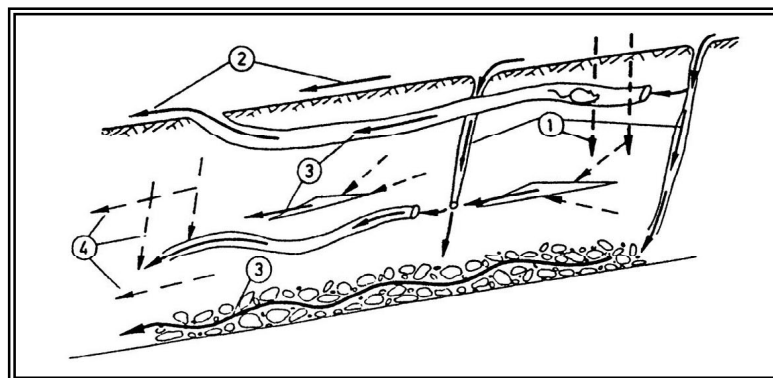


Abb. 2-9 Schematische Darstellung der Fließwege in einem Hangboden (Baumgartner & Liebscher 1996, nach Zuidema 1985):
 ① = Infiltration in Mikro- und Makroporen
 ② = Landoberflächenabfluss
 ③ = schneller lateraler unterirdischer Abfluss im Makroporensystem
 ④ = Mikroporendurchfluss (Matrixfeuchtefluss)

Es existiert eine Reihe von Studien, die sich mit dem Interflow-Prozess beschäftigen. Es sei verwiesen auf Anderson & Burt (1990), Beven & Germann (1982), Bouma et al. (1982), Dunne (1978), Flügel (1979 u. 1993b), Hoogmoed & Bouma (1980), Jury (1982), Mikovari et al. (1995), Mosley 1982, Tanaka et al. (1988), Wels et al. (1991) und Zuidema (1985).

Auch im Grundwasserkörper, d. h. im permanent wassergesättigten Bereich, existieren Wasserströmungen. Die dem Vorfluter zukommende Abflusskomponente wird hier als Grundwasserabfluss bezeichnet (vgl. Abbildung 2-5). Die Wasserbewegungen werden in erster Linie durch den vertikalen Wasserzufluss (Grundwasserneubildungsrate) und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Aquifers gesteuert, wobei die Fließgeschwindigkeiten – mit wenigen Ausnahmen – relativ gering sind (Baumgartner & Liebscher 1996). Eine rasche Bewegung großer Wassermengen kann jedoch durch den Prozess des „groundwater ridging“ erfolgen. Dieser dem „translatory flow“ ähnelnde Prozess bezeichnet das Auspressen von Grundwasser aus vorfluternahen Aquiferen durch Druckfortpflanzung. Ausgelöst wird der Prozess durch eine rasche Aufsteilung der Grundwasseroberfläche infolge von Infiltration in Gebiete mit oberflächennahem Kapillarsaum (Leibundgut & Uhlenbrook 1997a). Wie Bonnel (1998) feststellt, ist die Existenz dieses Prozesses jedoch nicht unumstritten.

2.2.3.3 Abflussbildung im Einzugsgebietsmaßstab

Aufbauend auf den beiden vorangegangenen Kapiteln soll abschließend die Abflussbildung im Maßstab eines Einzugsgebietes betrachtet werden. Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Prozessen treten hier die Konzentration des zuvor gebildeten Abflusses in der Fläche und die aufbauende Abflusskonzentration im offenen Gerinne in den Vordergrund. Letzteres ist jedoch erst bei größeren Einzugsgebieten mit einer Fläche ab ca. 1000 km² von vorrangiger Bedeutung (Leibundgut & Uhlenbrook 1997a). Eine weitere Betrachtung soll daher an dieser Stelle nicht erfolgen. Ausführliche Darstellungen finden sich z. B. in Dyck & Peschke (1995) und Baumgartner & Liebscher (1996).

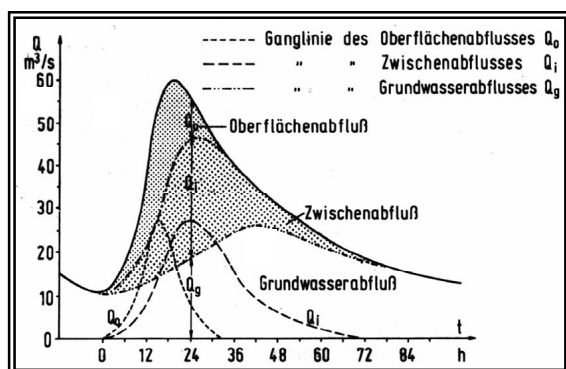


Abb. 2-10 Zusammensetzung einer Abflussganglinie aus ihren Komponenten Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss (Baumgartner & Liebscher 1996).

Bei der Betrachtung der Konzentration des auf der Fläche gebildeten Abflusses ist das zeitliche Eintreffen im Vorfluter von entscheidender Bedeutung. Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss bilden zusammen den Gesamtabfluss eines Vorfluters. Sie überlagern sich und treten zeitlich mit z. T. erheblicher Verzögerung in Erscheinung, wie in Abbildung 2-10 beispielhaft dargestellt ist: Der Oberflächenabfluss wirkt sehr direkt mit nur geringer zeitlicher Verzögerung, der Interflow, je nach Ausprägung, mit geringer bis mittlerer zeitlicher Verzögerung und der Grundwasserabfluss mit der größten zeitlichen Verzögerung. Die Anteile der Abflusskomponenten und die jeweiligen Fließzeiten hängen, wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, von den physiogeographischen Gebietsmerkmalen ab (Baumgartner & Liebscher 1996).

Die Anteile der Abflusskomponenten und die jeweiligen Fließzeiten hängen, wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, von den physiogeographischen Gebietsmerkmalen ab (Baumgartner & Liebscher 1996).

Für die Praxis der Hochwasserberechnung- und -analyse wird oftmals zwischen Basisabfluss und direktem Abfluss unterschieden. Es handelt sich dabei weniger um prozessorientierte Herkunftsbezeichnungen des Wassers, sondern um – anhand unterschiedlicher Separationsverfahren ermittelbarer – reaktionszeitorientierte Teile der Abflussganglinie (Leibundgut & Uhlenbrook 1997a). Der Direktabfluss kennzeichnet dabei das schnell abfließende, für die Hochwasserentstehung verantwortliche Wasser, das zusätzlich zu dem bereits vor dem auslösenden Ereignis existierenden Abfluss abfließt. Sein Volumen ist mit dem sog. Abflusswirksamen Niederschlag identisch (Baumgartner & Liebscher 1996).

2.3 Hochwasserabflüsse

2.3.1 Entstehung und gesellschaftliche Bedeutung

Dyck und Peschke (1995) definieren Hochwasser als „die zeitlich begrenzte Anschwellung des Durchflusses über den Basisdurchfluss, die eine für jeden Durchflussquerschnitt aus der Statistik oder den örtlichen Gegebenheiten zu bestimmende Grenze überschreitet“. Eine umfassende Beschreibung eines Hochwasserereignisses ermöglicht die Abflussganglinie an einem bestimmten Querschnitt des Vorfluters mit dem zugehörigen Hochwasserscheitel, der den maximalen Durchfluss bzw. den maximalen Wasserstand beim Durchgang der Hochwasserwelle kennzeichnet, mit der Abflussfülle, die das Abflussvolumen einer Hochwasserwelle, beginnend mit dem Scheitelabfluss, über einem bestimmten Schwellenwert darstellt, und mit der Dauer des Ereignisses (Maniak 1997). Hochwasserereignisse sind prinzipiell als ein natürlicher Teil des Wasserkreislaufs anzusehen und werden bereits im assyrischen Gilgamesch-Epos geschildert. Das Ausmaß dieses natürlichen Phänomens wird jedoch einerseits durch menschliche Eingriffe verstärkt, andererseits schafft erst der Mensch die entsprechenden Schadenspotenziale an Gewässern, durch die Hochwasser in den Mittelpunkt des gesellschaftlichen Interesses gerückt werden (Worreschk 2002). Prinzipiell kann somit zunächst zwischen dem Ausmaß eines Hochwassers aus hydrologischer Sicht und dem Ausmaß von Hochwasserschäden aus gesellschaftlicher Sicht unterschieden werden, wobei aus dem Blickwinkel des Hochwasserschutzes und der Hochwasservorsorge eine verzahnte Betrachtungsweise notwendig ist. Eine Verringerung von Hochwasserschäden ist folglich durch verschiedene Strategien zu erreichen: Absenkung des Scheitelabflusses und der Abflussfülle eines Hochwassers, Verringerung des Schadenspotenzials durch Meidung überflutungsgefährdeter Gebiete, Schutz gefährdeter Gebiete durch technische Anlagen und eine „allgemeine Anpassung des Lebens“ an die Hochwassergefahr (Worreschk 2002).

Wie erwähnt, beruhen Entstehung und Ausmaß von Hochwasserabflüssen einerseits auf natürlichen Ursachen, andererseits wirken sich jedoch anthropogene Eingriffe verschärfend auf Hochwasserabflüsse aus, wobei entgegen der landläufigen Meinung gerade die extremsten Hochwasserereignisse von anthropogenen Einflüssen im Einzugsgebiet eher weniger beeinflusst werden (LAWA 1995, Uhlenbrook & Leibundgut 1997a–b, Bronstert et al. 2001, Worreschk 2002). Dies belegen u. a. Untersuchungen von Wood et al. (1990), die für bestimmte Einzugsgebiete zeigen, dass die Abflussbildung bei Hochwasserereignissen mit hoher Jährlichkeit zunehmend von den Niederschlagscharakteristika und weniger von den Gebietseigenschaften bestimmt wird, da bei Überschreitung der Speicherkapazität eines Gebietes die Speichereigenschaften keinen weiteren Einfluss mehr auf den Hochwasserverlauf besitzen. Die Abflussbildungsprozesse wurden bereits im vorangegangenen Kapitel

dargelegt. Die in Anlehnung an Bronstert et al. (2001) erstellte Abbildung 2-11 gibt einen umfassenden schematischen Überblick über die steuernden hydroklimatischen und physiogeographischen Faktoren und ihre jeweilige Einflussstärke auf die Hochwasserentstehung in unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Maßstäben. Es wird deutlich, dass das Ausmaß von Hochwasserabflüssen, auch im Hinblick auf deren räumliche Wirksamkeit, vom Zusammenspiel einer Reihe von Faktoren abhängig ist, die sich grob in „Ereignischarakteristika“, „Anfangsbedingungen“ und „Gebietscharakteristika“ untergliedern lassen (Bronstert et al. 2001). Für ein extremes Hochwasser mit großer Jährlichkeit (zur exakten Definition eines „extremen“ Hochwassers vgl. DVWK 1999a) treten die Gebietscharakteristika gegenüber den Ereignischarakteristika, z. B. Niederschlagsintensität und Niederschlagsdauer, stark in den Hintergrund. Sind dabei größere Einzugsgebiete betroffen (advektive Niederschläge), kommt zudem den Charakteristika des Gewässernetzes eine entscheidende Bedeutung zu. Andererseits führen räumlich stark begrenzte, hochintensive Gewitterniederschläge lediglich zu räumlich begrenzten Hochwasserabflüssen. In diesem Fall treten die Charakteristika des Gewässernetzes gegenüber den Flächencharakteristika in den Hintergrund (Bronstert et al. 2001, LAWA 1995, Mendel & Fischer 1998).

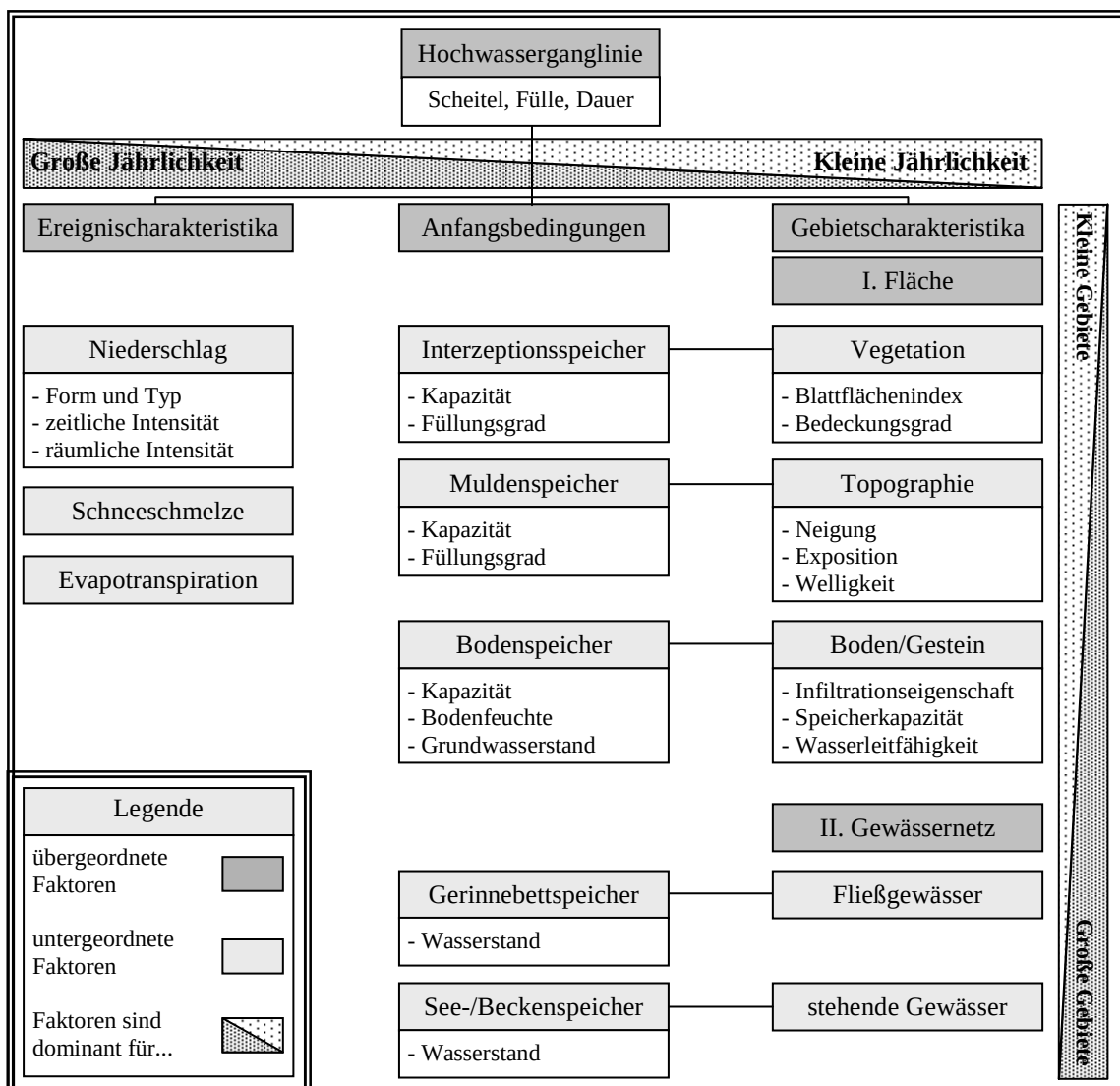


Abb. 2-11 Schematischer Überblick über die wichtigsten Steuergrößen einer Hochwasserganglinie für natürliche Einzugsgebiete in Abhängigkeit von der Gebietsgröße und der Jährlichkeit der Ereignisse (leicht verändert nach Bronstert et al. 2001).

2.3.2 Anthropogener Einfluss

Der Mensch hat in mehrfacher Hinsicht Einfluss auf das Auftreten von Hochwasserabflüssen: durch Veränderung der Gebietscharakteristika infolge der Landnutzung, durch Veränderung der Ereignischarakteristika im Rahmen des anthropogenen Anteils an der Klimaveränderung und im Rahmen des Einflusses neuartiger Waldschäden (Bronstert et al. 2001, Niehoff & Bronstert 2002). Die ersten beiden Punkte werden in der Folge kurz umrissen. Auf die hydrologisch bedeutsamen Begleiterscheinungen neuartiger Waldschäden soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, es sei jedoch auf Brechtel (1985), Caspary (1990) sowie Plate et al. (1986) verwiesen.

2.3.2.1 Klimawandel

Da das Wettergeschehen ohne Zweifel den dominierenden Faktor für das Auftreten von Hochwasserereignissen darstellt (Gees 1997), kann davon ausgegangen werden, dass langfristige Klimaänderungen einen entscheidenden Einfluss auf Veränderungen der Hochwasserhäufigkeit und des Hochwasserausmaßes besitzen (Bendix 1997). Zwar ändert sich das Klima seit die Erde existiert, jedoch deutet vieles darauf hin, dass seit Beginn des Industriezeitalters ein „besonders markanter Klimawandel“ (Schönwiese 2004) stattfindet, der zumindest zum Teil durch anthropogene Einflüsse hervorgerufen bzw. verstärkt wird. In unterschiedlichen Modellrechnungen konnte gezeigt werden, dass der anthropogene Anteil an der mittleren globalen Erwärmung der bodennahen Luftschicht seit 1860, unter Summierung verschiedener Faktoren, ca. 0,6 °C beträgt (Schönwiese 2004, Schönwiese et al. 2003). Der klimatologische Trend wird dabei zum einen in zeitlicher Hinsicht von Fluktuationen und Anomalien überlagert, zum anderen zeigt der Klimawandel große räumliche Variationen. Diese räumlichen Strukturen sind dabei zusätzlich einer jahreszeitlichen Schwankung unterworfen (Schönwiese 2004). Die Auswirkung des Klimawandels auf das Auftreten von Hochwasserereignissen wird seit langer Zeit untersucht und diskutiert. Eine Reihe von Regionalanalysen kommt zu dem grundlegenden Schluss, dass die im Rahmen des aktuellen Klimawandels bereits eingetretenen Veränderungen des Niederschlagsregimes in Europa (vgl. Bárdossy & Caspary 1990, Luterbacher et al. 2002, Rapp 2000, Schönwiese 2003, Schönwiese & Rapp 1997) erhebliche Auswirkungen auf Hochwasserereignisse besitzen. So stellen Caspary & Bárdossy (1995) fest, dass die, im Vergleich zu den Jahren 1930 bis 1976, seit Mitte der 70er Jahre drastische Zunahme der für winterliche Extremhochwasser in den deutschen Mittelgebirgen vornehmlich verantwortlichen Großwetterlage „Westlage zyklonal“ (Wz) über Mitteleuropa in den Monaten Dezember, Januar und Februar mit einem deutlich erhöhten Extremabflussniveau der Enz (Nordschwarzwald) einhergeht. Die Autoren kommen in ihrer Untersuchung zu folgendem Fazit: „Die Frage, ob es sich bei den hier nachgewiesenen Veränderungen der Auftretenshäufigkeit der großräumigen atmosphärischen Zirkulationsmuster und der damit verbundenen Änderungen des Winterklimas um eine „natürliche“ oder „anthropogen“ verursachte Klimaänderung handelt, kann von den Autoren [...] nicht beantwortet werden. Das System der Extremabflüsse scheint infolge der Zunahme der Häufigkeiten der winterlichen Wz-Großwetterlagen gleichsam einem Quantensprung auf ein höheres Extremabflussniveau angehoben zu werden, wobei wir uns derzeit vermutlich in einer Phase des Übergangs von dem historischen Niveau zu einem neuen, höheren, noch unbekannten Niveau befinden.“ Auch Bendix (1997) kommt bei der Untersuchung der Häufigkeit extremer Hochwasserereignisse des Rheins für den Zeitraum ab 1817 zu dem Schluss, dass die seit Mitte der 1970er Jahre bestehende extreme Verschärfung der Hochwassersituation des Rheins mit der

Persistenzsteigerung charakteristischer Witterungstypen einhergeht. Sturm et al. (2001) und Jacobeit et al. (2004) verdeutlichen dagegen anhand Analysen von Hochwasserereignissen und Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation im Bereich Mitteleuropas seit 1500, dass auch in der Vergangenheit ein ständiger Wechsel zwischen hochwasserreichen und hochwasserarmen Phasen stattgefunden hat, wobei in hochwasserreichen Zeitabschnitten der Vergangenheit extreme Hochwasserereignisse z. T. sogar häufiger aufgetreten sind als in der jüngsten Vergangenheit.

Im Gegensatz zur Analyse der Entwicklung der Hochwassersituation in der Vergangenheit, sind Untersuchungen zur zukünftigen Entwicklung der Hochwassersituation, wie sie für verschiedene europäische Regionen u. a. von Arnell & Reynard (1996), Bultot et al. (1988), Bultot et al. (1992), Bronstert et al. (2001), Gellens & Roulin (1998) und Grabs et al. (1997) durchgeführt wurden, grundsätzlich sehr stark vom zugrunde liegenden Szenario der künftigen Klimaentwicklung abhängig. Newson (1997) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die große Komplexität der ablaufenden hydrologischen Prozesse exakte Aussagen kaum möglich macht. Fast alle Studien kommen jedoch grundlegend zu dem Schluss, dass sich die zukünftige Hochwassersituation in Europa aufgrund der in Zukunft weiter ansteigenden winterlichen Niederschlagssummen v. a. im Winter und Frühjahr verschärfen wird. Modellrechnungen, die im Rahmen der Studie von Bronstert et al. (2001) für drei Teilräume des deutschen Rheineinzugsgebietes durchgeführt wurden, kommen zu dem Ergebnis, dass, bedingt durch eine weitere deutliche Verschiebung des Niederschlagsregimes, in Zukunft v. a. für Frühjahrshochwasser eine deutliche Verschärfung der Situation zu erwarten ist, wodurch wiederum die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens mit den Schneeschmelzabflüssen aus den Alpen deutlich erhöht wird. Bezüglich aktueller Szenarien zur weiteren Klimaentwicklung im mitteleuropäischen Raum wird an dieser Stelle auf die Publikationen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2006) verwiesen.

2.3.2.2 Einflüsse im Einzugsgebiet

Die den Abfluss beeinflussenden anthropogenen Maßnahmen direkt im Einzugsgebiet können grundlegend in zwei Gruppen aufgeteilt werden: Eingriffe im Gewässerbett und Eingriffe auf der Landfläche. Die Einflussmöglichkeiten sind dabei äußerst vielfältig und können an dieser Stelle nur exemplarisch, mit einem Hauptaugenmerk auf forstwirtschaftlich genutzte Gebiete, dargestellt werden. Umfassendere Schilderungen finden sich u. a. bei Baumgartner & Liebscher (1996), Bismuth et al. (1998), Bronstert et al. (2001) und Wohlrab et al. (1992). Eine Zusammenstellung der anthropogenen Einflussnahme auf die Hochwasserentstehung in Waldgebieten findet sich in Frister (2003).

2.3.2.2.1 Landnutzung

Von großer Bedeutung für die Hochwasserentstehung ist in diesem Zusammenhang die Art der Landnutzung. Pauschale Aussagen sind hierbei jedoch kaum möglich, da auch hier Randbedingungen wie z. B. den Ereignischarakteristika oder den Anfangsbedingungen (vgl. Abbildung 2-11) eine entscheidende Bedeutung zufällt. Bronstert et al. (2001) kommen anhand ihrer Untersuchungen zu dem Schluss, dass „...Waldbestand entgegen der nach wie

vor weit verbreiteten Meinung kein Indiz für einen per se geringen Beitrag zur Hochwasserentstehung [ist]. Richtig ist, dass ein natürlicher Wald bessere Speichereigenschaften (Interzeption, Streuspeicher) aufweist als andere Landnutzungen und Waldböden oft gute Infiltrationseigenschaften besitzen. Da aber Wälder in Mittelgebirgen häufig auf geringmächtigen Böden stocken, sind Waldflächen insbesondere in Kombination mit geringdurchlässigem Festgestein prädestiniert für rasche unterirdische Abflussbildung“ (Bronstert et al. 2001). Diese Feststellung bezieht sich weniger auf die Landnutzung an sich, als vielmehr auf die zugrunde liegenden geologischen und pedologischen Gebiets-eigenschaften. So weisen andere Autoren explizit auf die hochwassermindernde Wirkung forstlicher Landnutzung gegenüber anderen Landnutzungsarten hin (Bismuth et al. 1998, Leibundgut & Uhlenbrook 1997a–b, VDG 2003, Wohlrab et al. 1983). Als Gründe werden in erster Linie der große Interzeptionsspeicher, die hohe Evapotranspiration, die abfluss-hemmende Streu und die zumeist hohe Infiltrationsleistung von Waldböden aufgeführt (Schüler et al. 2002, Uhlenbrook & Leibundgut 1997a). Insgesamt dominieren im Wald die im Vergleich zum Landoberflächenabfluss zeitlich verzögert zum Vorfluterabfluss beiträgenden unterirdischen Abflusskomponenten (Uhlenbrook & Leibundgut 1997a). Diese können, wie auch Bronstert et al. (2001) feststellen (s.o.), je nach geologischen und pedologischen Eigenschaften des Gebietes z. T. jedoch vergleichsweise rasch als oberflächennaher Abfluss in Erscheinung treten (vgl. hierzu Schüler et al. 2002).

Einen wichtigen anthropogenen Einflussfaktor in forstlich genutzten Standorten stellt die Art und Weise der Waldbewirtschaftung dar. Entscheidend sind u. a. Betriebsart und Artenzusammensetzung des Waldes, die nach Calder (1992) sogar einen potenziell größeren Einfluss auf das Abflussverhalten besitzen als die An- oder Abwesenheit des Waldes an sich. Waldbau im Altersklassenwald (schlagweiser Hochwald), der am weitesten verbreiteten Form des Hochwaldes, der mehr als 95 % der deutschen Waldfläche umfasst (Erlbeck et al. 1998), führt zu großflächigen Wirtschaftsformen und zur Kahlschlagswirtschaft mit erhöhtem Oberflächenabfluss (Schüler et al. 2002). Sinnvoll aus hydroökologischer Sicht erscheinen Bewirtschaftungsformen, die Kahllagen weitestgehend vermeiden, indem eine Nutzung in erster Linie einzelstamm-, trupp- oder gruppenweise erfolgt (Kynast 1995). Auch die standortgerechte Artenzusammensetzung ist von entscheidender Bedeutung.

2.3.2.2 Maßnahmen der Standortmelioration

Unter die Maßnahmen der Standortmelioration fallen unter anderem die für forstwirtschaftlich genutzte Standorte bedeutende Walderschließung und die künstliche Entwässerung nasser Standorte. Letztere stellt als sog. Hydromelioration einen Teilaspekt der Bodenmelioration dar (Kuntze 2004).

Die Walderschließung umfasst alle Einrichtungen und Maßnahmen, die dem Zugang zu den Waldflächen, der Zuführung von Betriebsmitteln und dem Abtransport von erzeugten Forstprodukten dienen. Grundsätzlich kann zwischen Basiserschließung durch vorwiegend befestigte Fahrwege und Feinerschließung durch unbefestigte Rückewege und Rückegassen unterschieden werden (Dietz et al. 1984). In beiden Fällen handelt es sich um linienhafte Strukturen, die als Konsequenz der Holzproduktion unumgänglich sind, und im Vergleich zum ungestörten Waldboden veränderte bodenphysikalische Kennwerte aufweisen, wodurch die Abflussgenese in diesem Bereich i. d. R. erheblich modifiziert ist (Hildebrand 1996).

Der Aufbau befestigter forstwirtschaftlicher Wege richtet sich nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik für den Fahrwegebau, die in der DVWK-Regel 137 definiert sind (DVWK 1999b). Befestigte Fahrwege stellen in erster Linie Wege mit versiegelter, relativ wasserundurchlässiger Oberfläche dar, die auftreffendes Niederschlagswasser annähernd komplett in Oberflächenabfluss transformieren. In einer Reihe von Studien wurde der z. T. überproportionale Einfluss von Fahrwegen und ihrer zugehörigen Seitengräben auf das Ausmaß von Hochwasserabflüssen in forstwirtschaftlich und landwirtschaftlich genutzten Gebieten nachgewiesen (vgl. u. a. Engler 1919 (zitiert nach Mendel et al. 1997), Fleck 1987, Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg 1993, Liebscher 1975, Slupik 1983). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich bei Frister (2003). Nach Verworn & Harms (1984) hängt die Stärke des Einflusses grundsätzlich von dem Ausmaß des einzelnen Ereignisses, dem Anteil und der Lage der versiegelten Flächen, der Größe des Einzugsgebietes und der potenziellen Abflussbereitschaft der versiegelten Böden vor der Versiegelung ab. So wirkt sich der Wegebau z. B. auf Böden mit ohnehin verstärkter Neigung zur Bildung von Oberflächenabfluss weniger verschärfend auf Hochwasserereignisse aus als auf Böden mit hoher Infiltrationskapazität (DVWK 1982). Von entscheidender Bedeutung ist auch der Einfluss eventueller Wegeseitengräben, da diese zum einen den Oberflächenabfluss des Wegesystems aufnehmen und ableiten, und sie zum anderen, je nach Struktur des Gebiets, auch ganze Hangbereiche entwässern können (vgl. Kapitel 3.5, 3.6 und 6.2). Die Wegenetzdichte in öffentlichen Wäldern in Rheinland-Pfalz liegt auf Basis der Daten der 2. Bundeswaldinventur bei ca. 55,7 lfdm/ha (BMELV 2006).

Auch die bereits angesprochenen unbefestigten Rückewege und Rückegassen, die der Feinerschließung forstwirtschaftlich genutzter Gebiete dienen, besitzen einen stark modifizierenden Einfluss auf die Abflussbildung. Rückewege (Maschinenwege) stellen dabei einfache unbefestigte Wege dar, deren Abstand untereinander in der Regel bei 80 bis 120 m liegt. Rückegassen sind einfache linienhafte Schneisen mit mittleren Abständen untereinander von 20 bis maximal 40 m (bezüglich einer exakten Definition von Rückewegen und Rückegassen vgl. DVWK 1999b und Rittershofer 1999). Die Befahrung durch forstliche Maschinen führt dabei zu erheblichen Veränderungen der bodenphysikalischen Parameter im Kontaktbereich. Grundsätzlich reichen die Auswirkungen – in Abhängigkeit von den standorteigenen Faktoren aktueller Bodenwassergehalt, Körnung und Vorverdichtung sowie den verfahrensbedingten Faktoren Gewicht, Anzahl der Überfahrten, Kontaktflächendruck und armierende Auflagen (Hildebrand 1996) – von der elastischen Verformung über die Setzung bis zum Grund- oder Scherbruch (Dietz et al. 1984, Hartge & Horn 1999). So kann sich das wasserleitende Porenvolumen bei Einsatz moderner, aber schwerer Forstmaschinen (Harvester, Vorwarder, Schlepper) auf verdichtungsempfindlichen Waldböden bis in den Unterboden verringern (Schüler et al. 2002). Das Porensystem wird dabei jedoch nicht nur durch die mit der Verdichtung einhergehende drastische Reduktion weiter Grobporen modifiziert, sondern auch durch die Zerstörung der Porenkontinuität (Hildebrand 1983). Direkte hydrologische Folgen sind u. a. die im Vergleich zu unbefahrenen Böden verminderten Infiltrationsraten, die v. a. in den oberen Bodenschichten herabgesetzte Wasserleitfähigkeit und der resultierende verstärkte Oberflächenabfluss (Ammer et al. 1988, Hofmann 1989). Die durch den (im Zuge der Forstwirtschaft notwendigen) Maschineneinsatz bedingten Strukturen tragen somit durch einen Verlust des Wasserretentionsvermögens direkt zur Bildung schneller Abflusskomponenten bei. Zum vertieften Studium der Materie sei u. a. auf die Veröffentlichungen von Becker et al. (1986, 1989) und Hildebrand (1996) verwiesen.

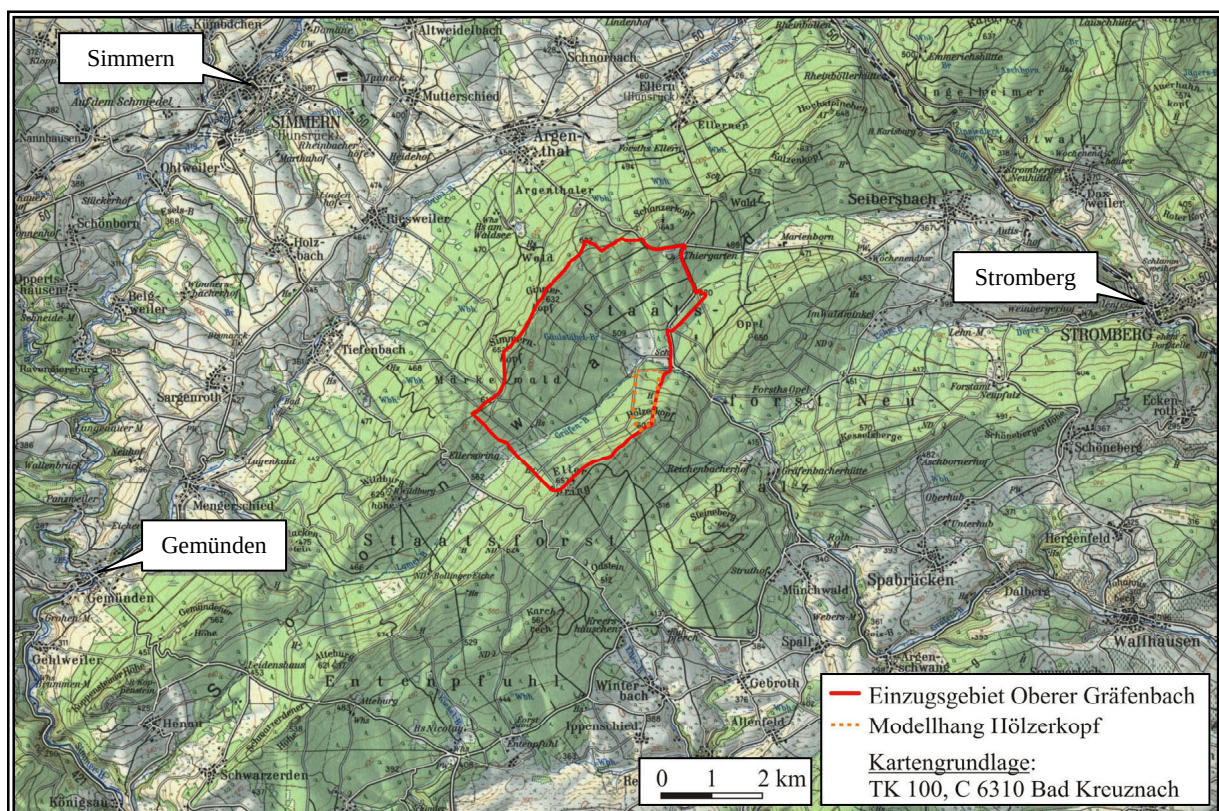
Ein weiterer anthropogener Eingriff im Rahmen der Standortmelioration ist die künstliche Entwässerung nasser Standorte, die durch unterschiedliche Maßnahmen erfolgen kann (vgl. Kuntze 2004). Auch in forstwirtschaftlich genutzten Gebieten kommen künstlich geschaffene

Vorfluter zur Verbesserung der Standortbedingungen für Nutzbäume zur Anwendung. Diese stellen, wie bereits für Wegeseitengräben dargelegt wurde, einen erheblichen Eingriff in das hydrologische System dar und werden heute nur noch in Ausnahmefällen neu angelegt. Dennoch werden vorhandene Grabensysteme, wie u. a. auch das Untersuchungsgebiet im Soonwald zeigt, zumindest teilweise weiterhin unterhalten.

3 Einführung in das Untersuchungsgebiet

3.1 Lage und Geomorphologie des Untersuchungsgebietes

Das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches, an dessen südöstlichem Rand der Modellhang Hölzerkopf abgegrenzt ist, liegt im Bereich des Soonwaldes, der als Teil des Hunsrücks am Südrand des Rheinischen Schiefergebirges lokalisiert ist. Der Soonwald, ein nahezu ausschließlich forstwirtschaftlich genutztes Gebiet, besitzt eine Längserstreckung von über 40 km und kann grundsätzlich in die drei Teile Lützelsoon, Großer Soon und Binger Wald untergliedert werden (Uhlig 1954). Der zentral gelegen Große Soon, in dem das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches gelegen ist, wird im Nordosten durch das Durchbruchstal des Guldenbaches gegen den Binger Wald und im Südwesten durch den Simmerbach gegen den Lützelsoon abgegrenzt.



Karte 3-1 Überblick über den Großen Soon und Lage des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und Modellhang Hölzerkopf.

Der Große Soon ist aus drei parallel verlaufenden, NE–SW streichenden Taunusquarzitkämmen aufgebaut. Der am besten entwickelte, nordwestliche Kamm weist die größte Zahl an Höhen auf, die jedoch, wie bei den anderen beiden Kämmen auch, das allgemeine Höhenniveau der Taunusquarzithärtlinge nur wenig überschreiten und daher als Einzelberge kaum zu erkennen sind. Die bedeutendste Erhebung stellt der Simmernkopf mit 653 m NN dar. Der südöstlich davon gelegene Kamm, der in seiner Erstreckung nur noch ca. zwei Drittel der Länge des nordwestlichen Höhenzuges umfasst, besitzt nur noch drei bedeutende Höhen. Der Ellerspring (657 m NN) bildet hier die größte Erhebung (vgl. Karte 3-1). Der dritte, südöstlichste Kamm ist am undeutlichsten entwickelt und steigt lediglich auf 580 m NN am Kesselberg an. In den zwischen den Kämmen liegenden quarzitschuttbedeckten „Schiefermulden“ nehmen eine Reihe von Bächen ihren Ausgang. So auch der Gräfenbach, der westlich von Bad Kreuznach in den der Nahe tributären Ellerbach mündet.

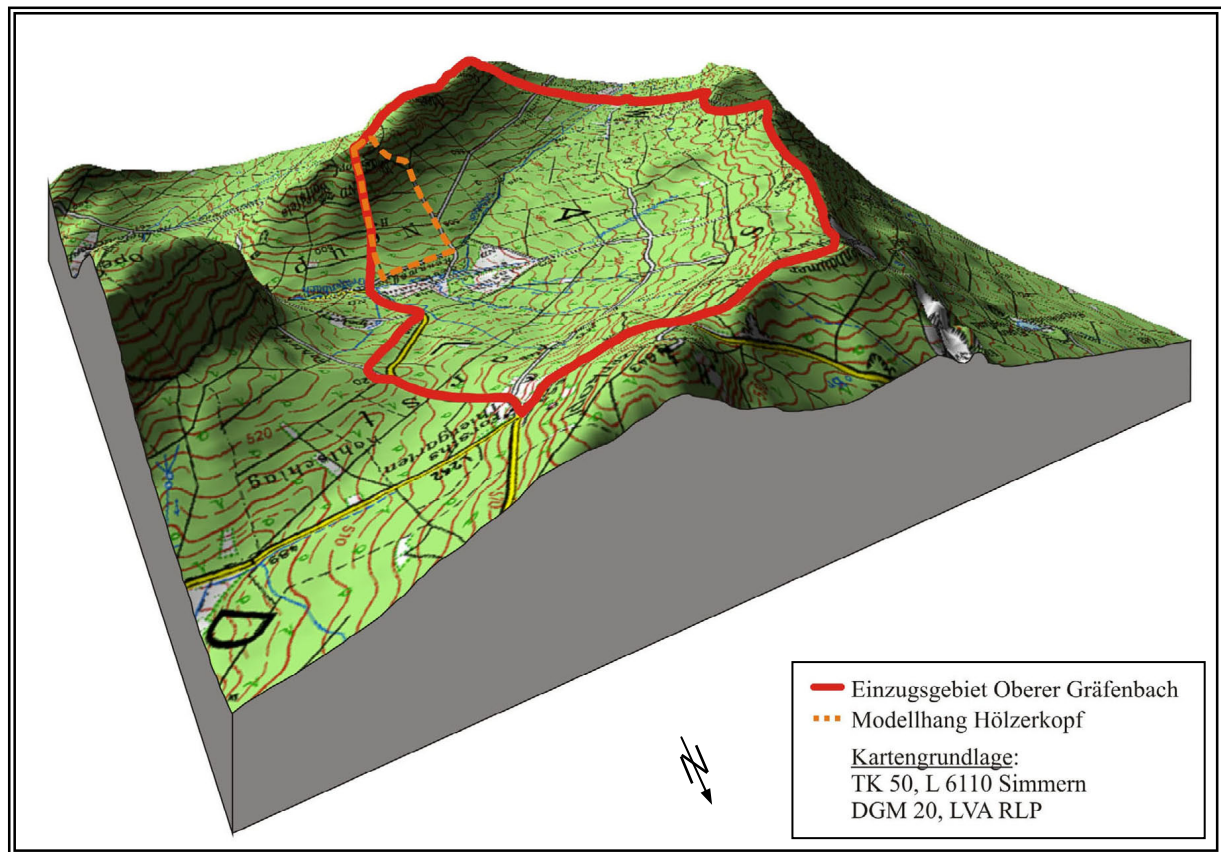


Abb. 3-1 Geländemodell des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches (5-fach überhöht). Erstellt mit TOP 50.

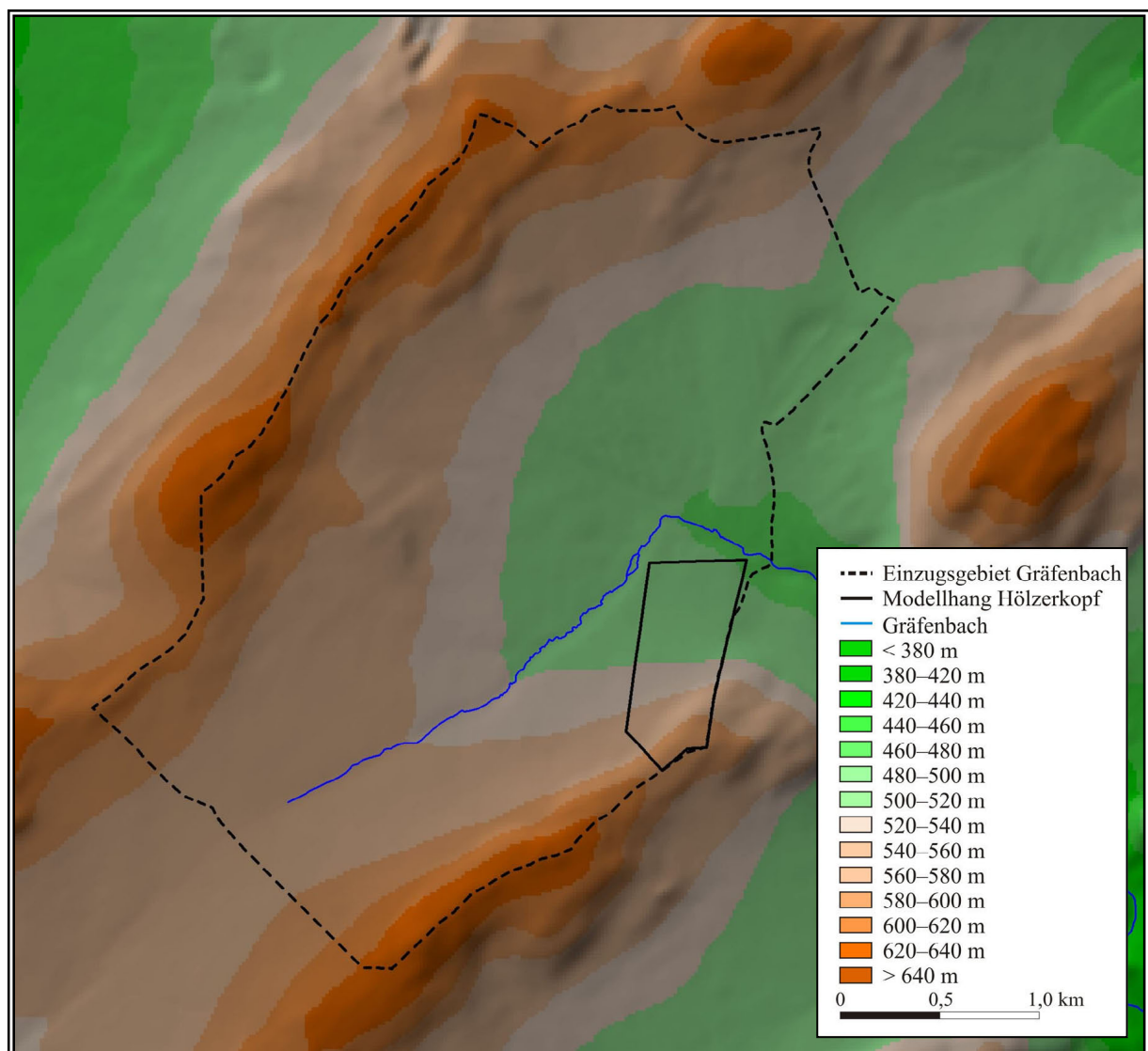
Die Grenzen des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches (vgl. Abbildung 3-1), das insgesamt 12,73 km² umfasst, werden durch Wasserscheiden festgelegt, die durch ein anthropogen angelegtes Netz von Entwässerungsgräben z. T. erheblich modifiziert sind. Im Quellbereich des Gräfenbaches (im Westen des Einzugsgebietes) findet sich eine Talwasserscheide mit sehr geringen Hangneigungen. Der nördliche Quarzitkamm mit den Erhebungen Simmernkopf (653 m NN), Ginsterkopf (633 m NN) und Ochsenbaumer Höhe (632 m NN) bildet die nordwestliche Wasserscheide. Im Süden stellt der mittlere Soonwaldkamm mit Ellerspring (657 m NN), Ödesborner Höhe (638 m NN) und Hölzerkopf (603 m NN) die Einzugsgebietsgrenze dar. Im Nordosten und Osten sind die natürlichen Grenzen des Einzugsgebietes durch ein anthropogen angelegtes Netz an Drainagegräben erheblich verändert (vgl. Kapitel 1.3.1.1 und Kapitel 3.5.3).

Der 0,56 km² umfassende Modellhang Hölzerkopf liegt, wie Karte 3-1 und Abbildung 3-1 verdeutlichen, an der nordwestlichen Flanke des mittleren Hauptkammes im Bereich des Hölzerkopfes. Das Gebiet erstreckt sich von der Kammhöhe im Süden bis zum Rennweg im Norden, an den sich das Naturschutzgebiet Glashütter Wiesen anschließt (vgl. Bild 3-1 und Kapitel 3.5.1). Die Grenzen des Modellhanges wurden so ausgewählt, dass er links- und rechtsseitig von einem Entwässerungsgraben (soweit durch die Hangexposition erforderlich) begrenzt wird, so dass möglichst kein oberirdischer Zufluss (einschließlich Interflow) in das Gebiet stattfindet. Aufgrund der Topographie des Gebietes sind zudem kaum Grundwasserzu- und -abflüsse in bzw. aus dem Gebiet zu erwarten. Die Entwässerung des Modellhanges Hölzerkopf erfolgt somit, wie später noch dargelegt wird, annähernd vollständig durch oberirdischen Abfluss im anthropogen angelegten Grabensystem, das letztlich in den Gräfenbach mündet.

Der Modellhang besitzt eine ungefähre mittlere N-S-Ausdehnung von 1000 m und eine W-E-Ausdehnung von 500 m, so dass sich insgesamt eine Gebietsgröße von 0,555 km² ergibt. Rechts- und Hochwerte der vier äußeren Eckpunkte des Modellhanges Hölzerkopf lauten:

- R³⁴ 01 690 – H⁵⁵ 33 850
- R³⁴ 01 560 – H⁵⁵ 32 875
- R³⁴ 02 025 – H⁵⁵ 32 780
- R³⁴ 02 250 – H⁵⁵ 33 860

Die Höhengschichtenkarte des Untersuchungsgebietes (Karte 3-2) verdeutlicht nochmals die Lage des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches und des Modellhanges Hölzerkopf. Die größte Erhebung des Einzugsgebietes stellt der Ellerspring mit 657 m NN dar, der tiefste Punkt findet sich am Gebietsauslass mit 474 m NN. Die mittlere Höhe des Gesamtgebietes beträgt 558 m NN. Der Modellhang steigt im Bereich des Hölzerkopfs bis auf maximal 603 m NN an, der tiefste Punkt findet sich an der nordöstlichen Grenze mit 481 m NN. Die mittlere Höhe des Modellhanges beträgt 531 m NN. Eine detailliertere Gegenüberstellung der Höhenverhältnisse von Gesamtgebiet und Modellhang ermöglichen Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3.



Karte 3-2 Geschummerte Höhengschichtenkarte des Untersuchungsgebietes (Datengrundlage: DGM 20, LVA RLP).

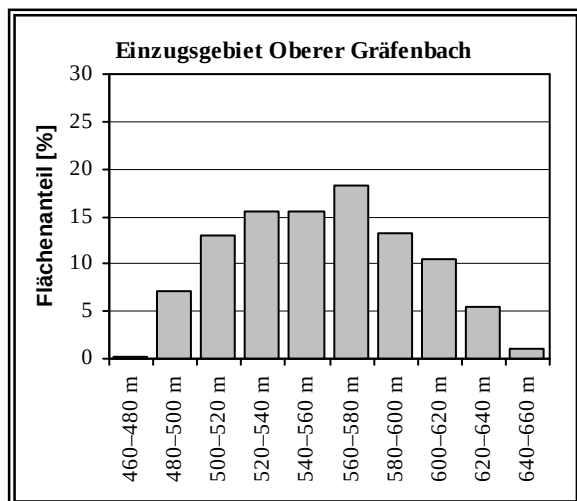


Abb. 3-2 Flächenanteile der Höheniveaus im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

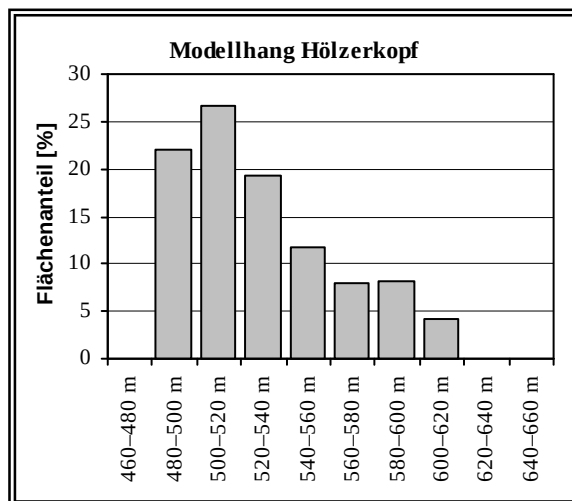
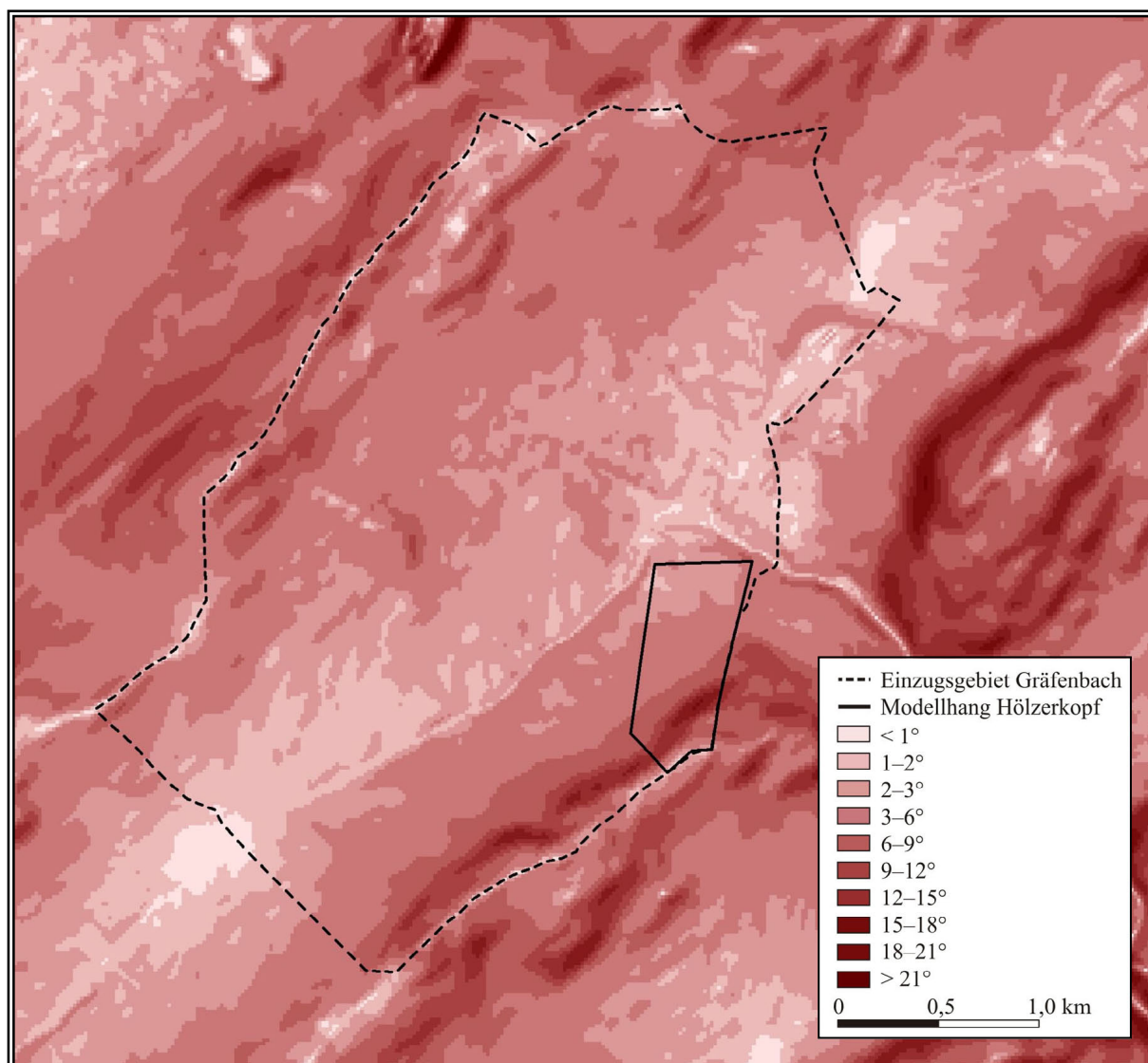


Abb. 3-3 Flächenanteile der Höheniveaus im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.



Karte 3-3 Hangneigungskarte des Untersuchungsgebietes (Datengrundlage: DGM 20, LVA RLP).

Die Hangneigung im Untersuchungsgebiet (vgl. Karte 3-3) findet ihre stärkste Ausprägung in den oberen Hangbereichen der nordwestlichen Flanke des mittleren Soonwaldhauptkammes. Die Hangneigungen betragen hier z. T. über 20°. Auf 45 % der Gebietsfläche finden sich jedoch Neigungen zwischen 3° und 6°. Abbildung 3-4 stellt die räumliche Verteilung der Hangneigungen am Modellhang anhand eines Geländemodells dar. Am östlichen Oberhang finden sich Neigungen bis fast 24°, am Unterhang liegt die Neigung dagegen bei maximal 3° bis 4°. Abbildung 3-5 und 3-6 verdeutlichen die Flächenanteile der Neigungsklassen.

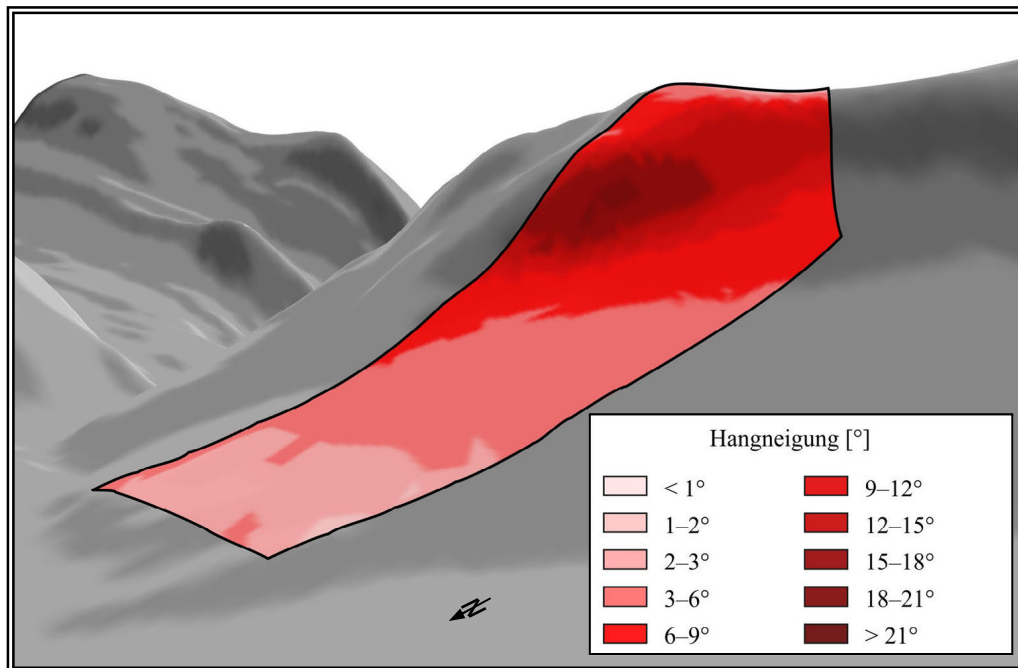


Abb. 3-4 Geländemodell des Modellhanges Hölzerkopf (5-fach überhöht) mit Hangneigungsklassen (Datengrundlage: DGM 20, LVA RLP).

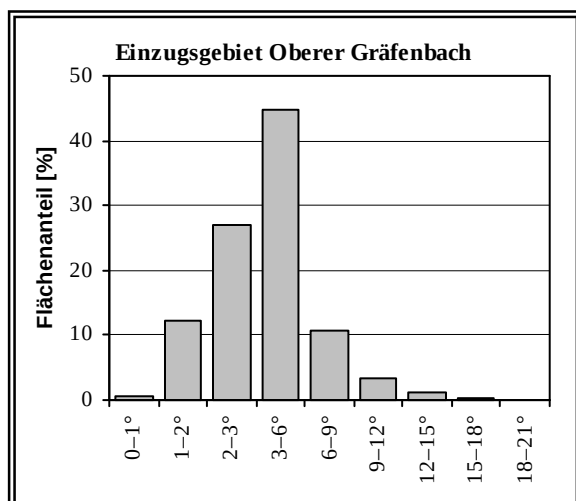


Abb. 3-5 Flächenanteile der Neigungsklassen im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

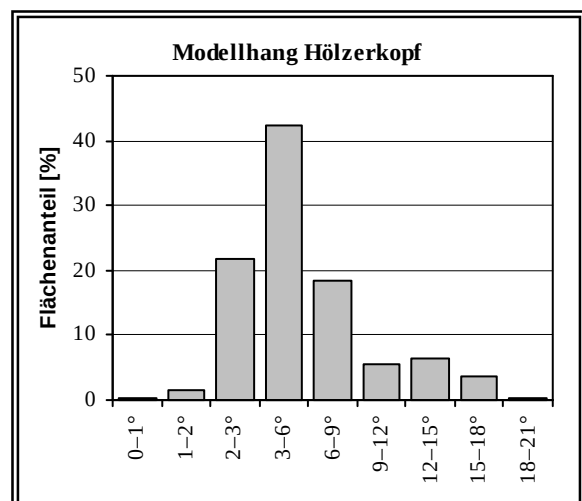
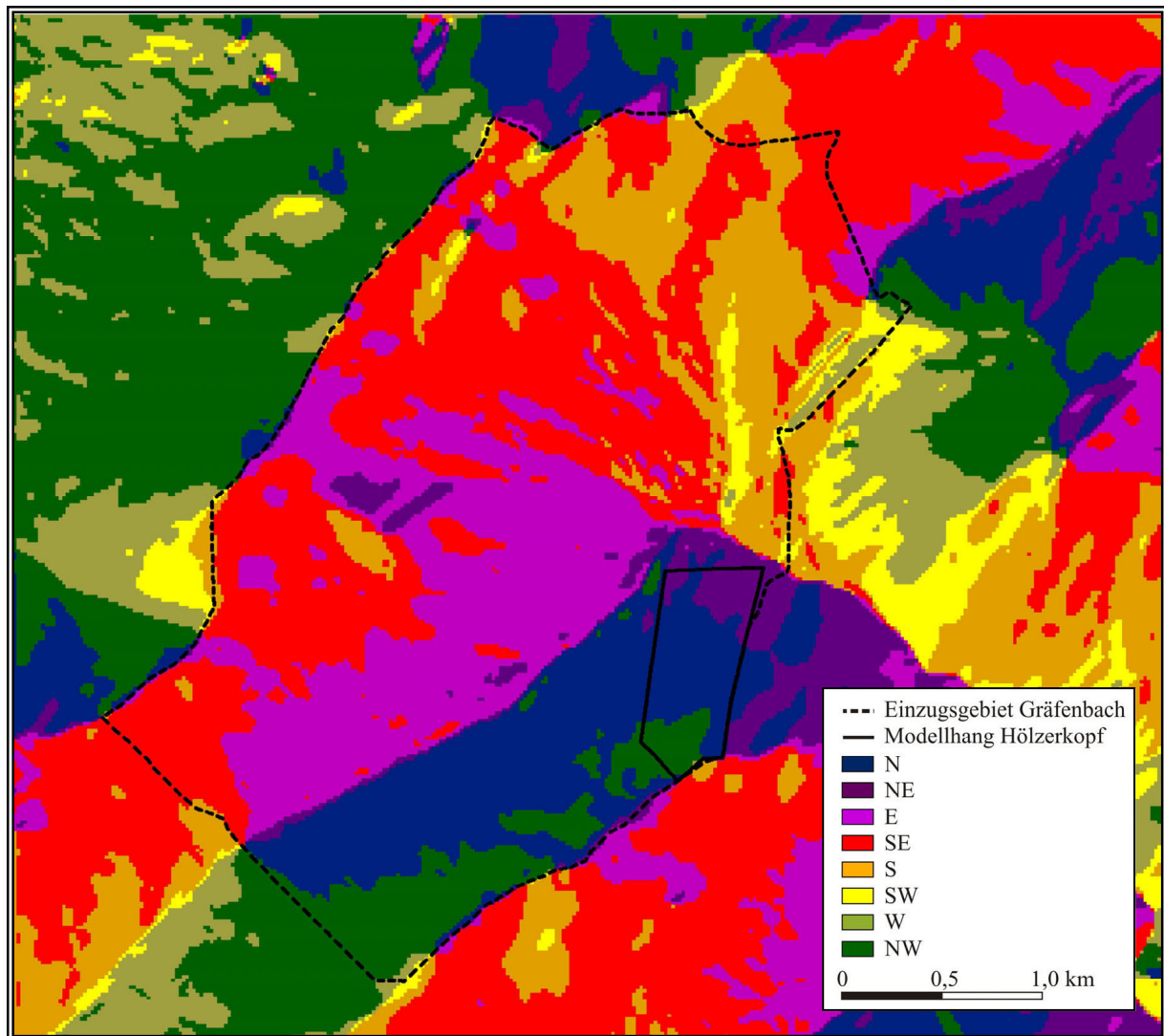


Abb. 3-6 Flächenanteile der Neigungsklassen im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.

Karte 3-4 zeigt die Ausprägungen der Hangexposition im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches; Abbildung 3-7 und 3-8 ermöglichen einen direkten Vergleich zwischen dem Einzugsgebiet und dem Modellhang Hölzerkopf bezüglich der jeweiligen Flächenanteile. Es wird deutlich, dass im Bereich des Modellhanges fast ausschließlich nördlich exponierte Bereiche existieren. Die Hangexposition liegt im Bereich des Kammes bei N bis NW und geht

talwärts in eine NE-Exposition über. Im Gegensatz zum Modellhang sind die Flächenanteile der Expositionsklassen im gesamten Einzugsgebiet deutlich gleichmäßiger verteilt. Hier treten lediglich westlich exponierte Hangbereiche in den Hintergrund.



Karte 3-4 Expositionskarte des Untersuchungsgebietes (Datengrundlage: DGM 20, LVA RLP).

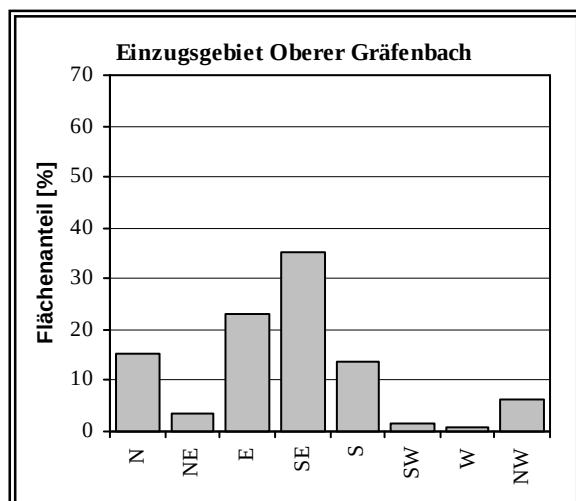


Abb. 3-7 Flächenanteile der Expositionsklassen im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

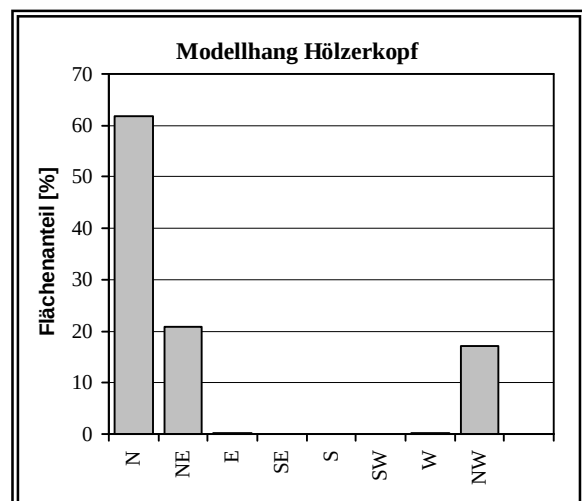


Abb. 3-8 Flächenanteile der Expositionsklassen im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.



Bild 3-1 Glashütter Wiesen mit Modellhang Hölzerkopf im Hintergrund.



Bild 3-2 Rennweg im Westen des Modellhanges mit Blick auf den nördl. Soonwaldhauptkamm.



Bild 3-3 Rennweg im Norden des Modellhanges Hölzerkopf mit Opelberg im Hintergrund.



Bild 3-4 Forstweg im zentralen Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.



Bild 3-5 Mittlerer Soonwaldhauptkamm im Bereich des Hölzerkopfes.

3.2 Geologie

„Das Substrat des Untergrundes (Lockersedimente, verfestigte Gesteine oder Böden) beeinflusst durch seine Eigenschaften, Wasser in unterschiedlicher Quantität speichern und leiten zu können, in vielfacher Weise das hydrologische Geschehen.“ (Wilhelm 1997)

Aus diesem Grund soll zunächst die Geologie des Untersuchungsgebietes betrachtet werden, da diese zum einen direkten Einfluss auf Wasserbewegungen im Untergrund nimmt und zum anderen das Ausgangsmaterial für die Böden liefert, die mit ihren Eigenschaften wiederum grundlegend den Bodenwasserhaushalt prägen.

3.2.1 Abriss der geologischen Entwicklungsgeschichte

Der heutige Hunsrück stellt den südlichen Teil des linksrheinischen Schiefergebirges dar, in dem fast ausschließlich Gesteinsserien des Unterdevons an der Oberfläche anstehen. Im Untergrund des Gebietes finden sich jedoch Gneise, deren Ausgangsgesteine im Präkambrium in einem Meeresbecken abgelagert wurden. Die metamorphe Umwandlung zu Gneisen erfolgte wahrscheinlich im Ordovizium oder Silur (Kneidl 1984).

Kurz vor der Wende zum Devon gliederte sich im mitteleuropäischen Bereich die Variskische Geosynklinale aus. Diese wurde im Norden durch den Old-Red-Kontinent, der sich durch die Schließung des Iapetus-Ozeans bildete, und im Süden durch die Alemannisch-Böhmische Insel (Moldanubisches Hoch) begrenzt (Brinkmann 1986). Nachdem zu Beginn des Devons nur der zentrale Bereich des Troges meeresbedeckt war, dehnte sich die Meeresfläche im weiteren Verlauf nach Norden und Süden aus (Kneidl 1980). Des Weiteren wurde der Trog durch die Aufwölbung der Mitteldeutschen Schwelle in zwei Teiltröge mit verschiedener Entwicklung unterteilt, den südöstlichen Teiltrog (Saxothuringisches Becken) und den nordwestlichen (Rheinischen) Teiltrog (vgl. Abbildung 3-9), in dessen Gebiet auch der heutige Hunsrück liegt (Meyer & Stets 1996). Der Rheinische Trog stellte einen stark sinkenden flachmarinen Sedimentationsraum dar, der den Abtragungsschutt des Old-Red-Kontinents und der Mitteldeutschen Schwelle aufnahm (Schönenberg & Neugebauer 1997). Die hier abgelagerten devonischen Sedimente bilden die heute im Hunsrück an der Oberfläche anstehenden Gesteinsserien.

Die im Obergedinn gebildeten Bunten Schiefer stellen die ältesten devonischen Schichten des Soonwaldes dar. Zur Zeit ihrer Entstehung war der Rheinische Trog, und damit auch das Gebiet des Hunsrücks, eine große Wanne, in die von Norden, Osten und Süden vorwiegend toniges Material angeliefert wurde (Kneidl 1984). Genaue Angaben zur Mächtigkeit der Bunten Schiefer sind nicht möglich (Meyer & Stets 1996); die nachgewiesene maximale Mächtigkeit in Soonwald und Idarwald beträgt ca. 300 m (Kämmerer 1998), im Primstal (südwestlicher Hunsrück) mehr als 1700 m (Knautz 1992). Die nächsthöhere Serie, die Hermeskeilschichten (älteres Siegen), entwickelte sich aus den Bunten Schiefern durch Zunahme der sandigen Einschaltungen. Die Sedimente sind in brackischem bis marinem Milieu entstanden und bestehen aus grünlichen bis braunen Arkosen, Sandsteinen sowie grünen, blauen und grauen Tonschiefern (Kneidl 1984). Ihre Mächtigkeit beträgt zwischen 150 m im Idarwald und ca. 40 m im Gebiet von Bingen (Kutscher 1970). Auf diese Serie folgt der aus der jungen Siegen-Stufe stammende, gegen die Hermeskeilschichten nur nach lithofaziellen Gesichtspunkten abgrenzbare (Meyer & Stets 1996), schwer verwitterbare und bis zu 1100 m mächtige Taunusquarzit (Heer 1987), der im südlichen Hunsrück die

markanten Höhenzüge von Idarwald, Soonwald und Lützelsohn bildet, und auch in den Kamm- und Oberhangbereichen des Untersuchungsgebietes ansteht (vgl. Abbildung 3-13 und 3-30). In die Quarzitlagen, die aus bis zu sechs Meter mächtigen Bänken bestehen, sind mehr oder weniger große, blaugraue Tonschieferlinsen eingeschoben, die nach dem Hangenden hin an Ausdehnung und Mächtigkeit zunehmen (Anacker 1956). Auf den Taunusquarzit folgen die mächtigen Schieferlagen des Hunsrückschiefers (Ems-Stufe).⁴ Dieser Tonschiefer ist vorwiegend aus Material aufgebaut, das als Resttrübe des Abtragungsmaterials vom Old-Red-Kontinent zu verstehen ist und aufgrund einer allmählichen Verschiebung und Eintiefung des Ablagerungsbeckens nach Südosten (und den damit verbundenen ruhigeren Ablagerungsbedingungen) aus der Fazies des Taunusquarzites hervorgeht (Kneidl 1984). Die Gesamtmächtigkeit des Hunsrückschiefers wird auf 2000 m geschätzt (Anacker 1956). Zum Ende des Unterdevons bildete sich im südlichsten Hunsrück eine Schwelle heraus, auf der sich im Mitteldevon ein Riff aufbaute (400 m mächtige Stromberger Kalke; Kneidl 1984). Da die Serien des Mittel- und Oberdevon für das Untersuchungsgebiet keine Rolle spielen, soll auf eine weitere Betrachtung verzichtet werden. Abbildung 3-10 stellt die stratigraphische Gliederung von Vordevon und Devon des Hunsrücks zusammenfassend dar.

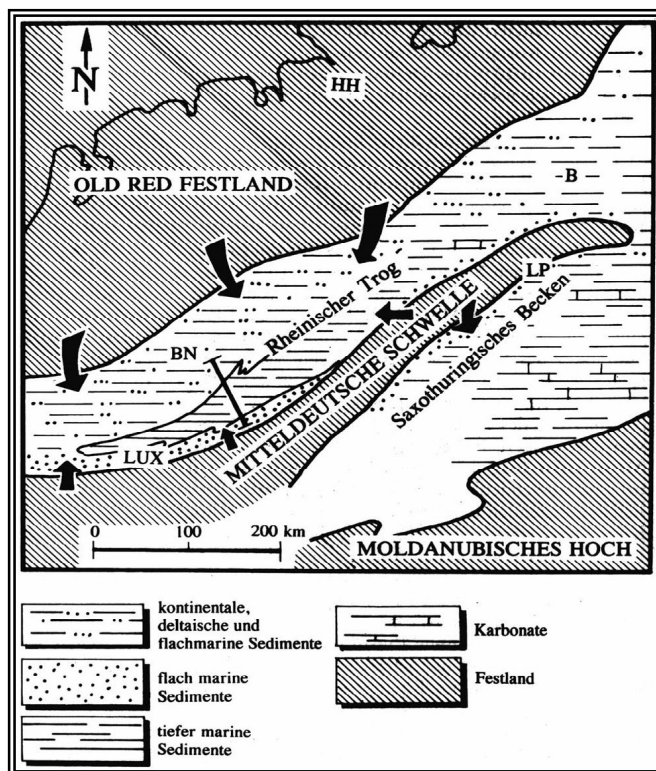


Abb. 3-9 Paläogeographische Übersichtskarte des Unterdevon in Mitteleuropa (Meyer & Stets 1996).

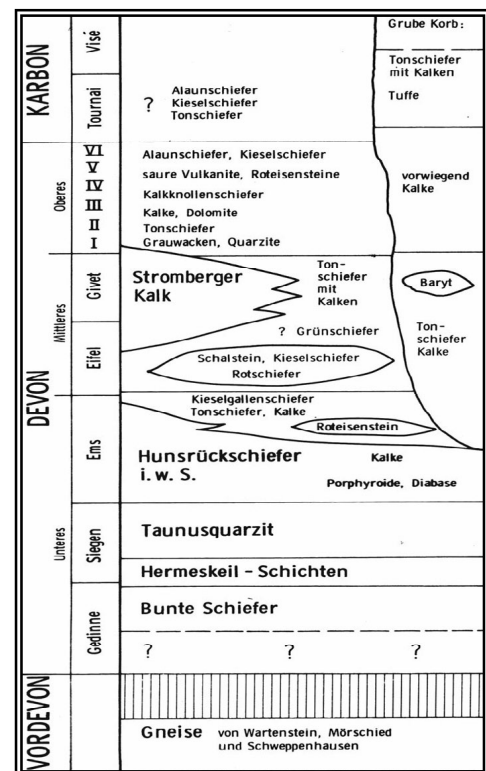


Abb. 3-10 Stratigraphische Gliederung des Hunsrücks (Kneidl 1984).

Die tektonische Gestalt des Hunsrücks ist auf die variszische Gebirgsbildung zurückzuführen. Vor allem ab der Wende Unterkarbon/Oberkarbon setzte in der sudetischen Phase am Südrand des Hunsrücks die Faltung der im Rheinischen Devontrog abgelagerten Schichten mit einem ungefähren Streichen von NE–SW (erzgebirgisch) ein (Meyer & Stets 1996). Mit dieser Auffaltung ging eine Verschuppung und Schieferung der Schichten einher. So wurden auch das aus mehreren Schuppen bestehende Soonwald-Antiklinorium und die Hunsrück-Schuppenzone gebildet. Die Vergenz der Falten ist im nördlichen Bereich nach Nordwesten gerichtet, im zentralen Bereich versteilt sich die Lage der Faltenachsebenen und im Süden ist der Faltenbau ausgeprägt südostvergent (Walter 1995).

⁴ Bezüglich der Problematik der Bezeichnung „Hunsrückschiefer“ vgl. Meyer & Stets (1996).

Ab der Spätphase der variszischen Gebirgsbildung (Oberkarbon) wurde das alte, in Schollen zerbrochene marine Absenkungs- und Ablagerungsgebiet allmählich herausgehoben. Gleichzeitig senkte sich der südlich gelegene Bereich der Mitteldeutschen Schwelle ab (Saar-Nahe-Trog). Infolge der Heraushebung über den Meeresspiegel setzte eine lang anhaltende Abtragung und Einrumpfung des variszischen Gebirges unter wechselfeucht-tropischen Klimabedingungen ein, wobei das Abtragungsmaterial u. a. in dem südlich gelegenen Saar-Nahe-Trog akkumuliert wurde (Meyer & Stets 1996). Gegen Ende des Perms war das Gefälle zwischen den beiden Gebieten weitgehend ausgeglichen, so dass der Hunsrück mit seinem Vorland eine Rumpffläche bildete, die von einzelnen morphologisch harten Quarzitücken überragt wurde (Leibnitz-Institut für Länderkunde 2003a). Im Mesozoikum und im Tertiär herrschten im Bereich des Hunsrücks weitgehend kontinentale Bedingungen vor, wobei es vor allem in der Kreide und dem älteren Tertiär zu tiefgründigen Verwitterungsvorgängen mit der Ausbildung eines mächtigen kaolinitischen Saproliths kam (Felix-Henningsen et al. 1991). In erster Linie gegen Ende des Tertiärs setzte eine, mit entsprechenden Abtragungsvorgängen einhergehende, erneute starke Heraushebung des fast vollständig eingerumpften Schiefergebirges ein (Walter 1995). Die im Zuge der variszischen Orogenese angelegten NE–SW streichenden Falten wurden durch Beanspruchungen im Zuge der alpidischen Orogenese in Bruchschollen zerlegt. Die starren Rumpfflächen reagierten auf den Druck durch bruchtektonische Bewegungen entlang von Störungslinien. Weiterhin entstanden dabei Kluftsysteme in den kompetenten Taunusquarziten (Martin 1980).

Während des Pleistozäns kam es zu periglazialen Überprägungen des Gebietes durch Bildung von Schuttdecken und Deckschichten über dem anstehenden Gestein, worauf in Kapitel 3.3 (Deckschichten und Böden) näher eingegangen werden soll.

3.2.2 Geologie des Untersuchungsgebietes

Der Soonwald (Großer Soon) kann tektonisch als eine variszisch verfaltete Großscholle mit etwa 22 km Länge und maximal 12 km Breite angesehen werden. Begrenzt wird er durch die Soonwaldnord- und -südrandstörung. Die beim ersten Eindruck der Morphologie als weitgespannte Antiklinalen und Synklinalen aufgefassten Höhenzüge und Täler des Soonwaldes schließen in der Regel mindestens zwei größere Falten mit über 200 m Weite und mehrere Spezialfalten ein. Der Falten Spiegel dacht sich im Allgemeinen vom Zentrum des Höhenzuges in Richtung der Täler ab, so dass Antiklinorien und Synklinorien vorliegen (Martin 1980). Der Soonwald wird somit aus drei durchschnittlich 55° NE streichenden Taunusquarzit-antiklinorien aufgebaut, zwischen denen sich zwei hauptsächlich mit Hunsrückschiefer gefüllte Synklinorien befinden. Von Nord nach Süd lassen sich folgende NE–SW streichende Struktureinheiten unterscheiden (Martin 1980):

- » Soonwaldnordrandstörung
- Nördliches Soonwald-Antiklinorium
- Nördliches Synklinorium im SW / Synklinorium von Daxweiler-Seibersbach im NE
- Mittleres Soonwald-Antiklinorium
- Südliches Synklinorium im SW / Synklinorium von Stromberg im NE
- Südliches Soonwald-Antiklinorium
- » Soonwaldsüdrandstörung

Aufgrund der Verwitterungsresistenz der Quarzitgesteine treten die Antiklinorien dabei auch als Höhenzüge in Erscheinung, während die Synklinorien die zwischenliegenden Talräume einnehmen. Der Quarzit ist jedoch nicht ausschließlich auf die Antiklinorien beschränkt. Auch in den Talräumen treten, trotz Vorherrschaft des Hunsrückschiefers, noch bis zu 30 m mächtige quarzitische Komplexe auf, die eine deutliche Geländestufe bedingen (Taunusquarzit-Nebenzüge; Martin 1980).

Der Bau der Synklinalen und Antiklinalen ist kompliziert und nicht sofort aus den morphologischen Verhältnissen abzuleiten. Es handelt es sich um eine sehr enge Faltung der devonischen Schichten, die nur innerhalb mächtiger Quarzite über 300 m Faltenweite erreicht. Die ursprünglich 40°–50° NE streichenden Falten wurden durch Bruchtektonik erheblich deformiert. Die wichtigste Deformation durch quer verlaufende (herzynische) Blattverschiebungen führte zu einer Zerteilung des Soonwaldes in mehrere größere Schollen (Martin 1980).

Karte 3-5 zeigt einen geologischen Überblick über das Untersuchungsgebiet (ohne periglazialen Schutt), Abbildung 3-13 zeigt ein halbschematisches geologisches Profil durch den westlichen Bereich des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches. Beide Darstellungen basieren auf den Untersuchungsergebnissen von Martin (1980). Sowohl im Nordteil des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches, der im Bereich des nördlichen Soonwald-Antiklinoriums liegt, als auch im Südteil, der dem mittleren Antiklinorium zuzurechnen ist, stehen vorwiegend Taunusquarzite an. Im zentralen Teil, der in den Bereich des nördlichen Synklinoriums fällt, finden sich dagegen in erster Linie Hunsrückschiefer und Übergangsschichten zwischen Oberem Taunusquarzit und Hunsrückschiefer („Übergangsschichten“). Der Modellhang Hölzerkopf, an der Nordflanke des mittleren Soonwaldantiklinoriums zum nördlichen Synklinorium gelegen, weist einen weitgehend typischen Aufbau für die Hänge des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches auf. Abbildung 3-11 und 3-12 ermöglichen einen Vergleich der Flächenanteile der anstehenden Schichten zwischen Einzugsgebiet und Modellhang.

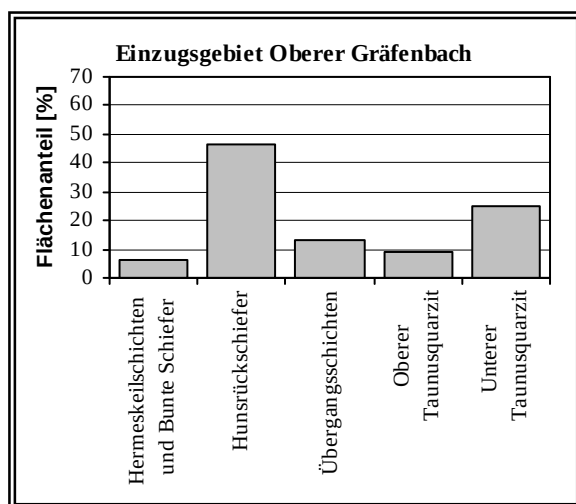


Abb. 3-11 Flächenanteile der geologischen Einheiten im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

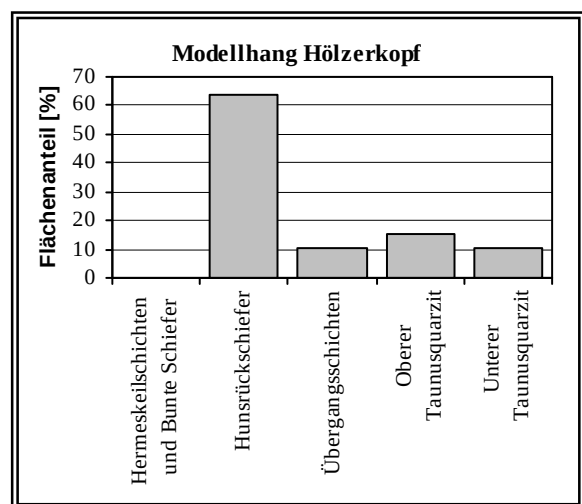
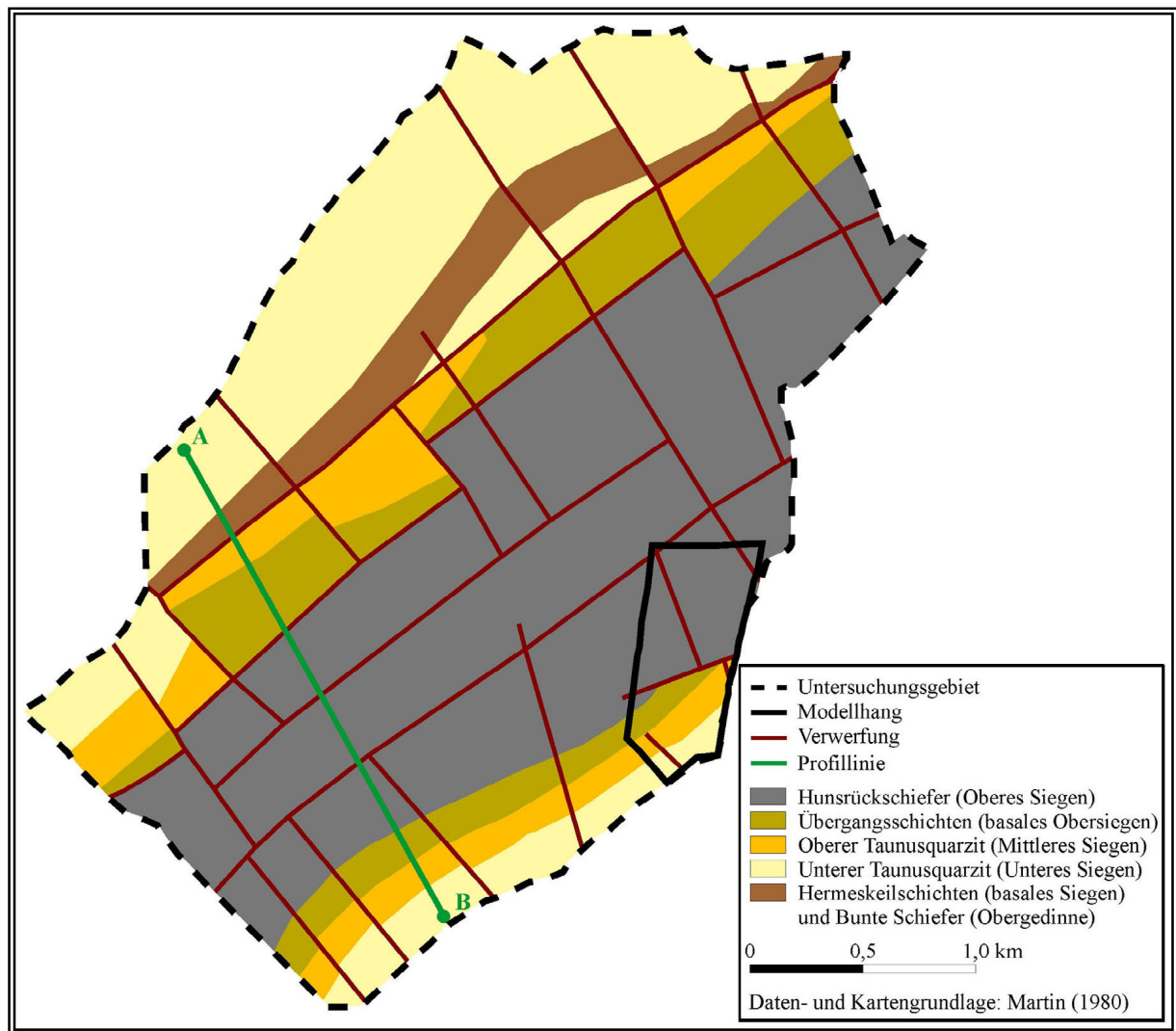


Abb. 3-12 Flächenanteile der geologischen Einheiten im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.



Karte 3-5 Geologischer Überblick über das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (Datenbasis: Martin 1980).

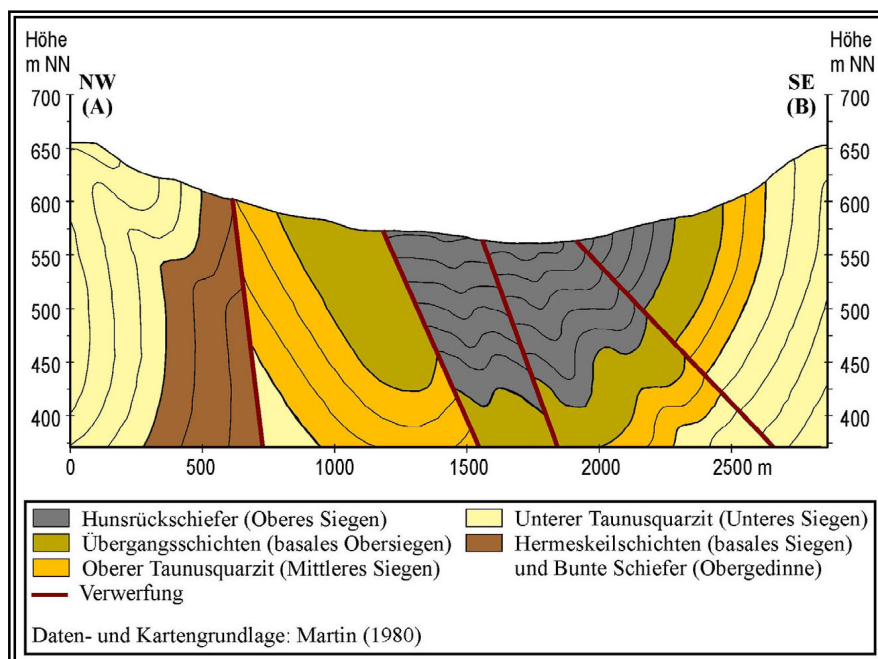


Abb. 3-13 Halbschematisches geologisches Profil durch den nordöstlichen Soonwald (Datenbasis: Martin 1980).

3.3 Periglaziale Deckschichten und Böden

Der Soonwald ist der Bodenregion der Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Ton- und Schluffschiefen zuzurechnen (AG Boden 2005). Als Bodengesellschaft findet sich in erster Linie die Braunerde-Pseudogley-Gesellschaft (Liedtke & Marcinek 1995), wobei die vorherrschenden Braunerden und Pseudogleye mittelgebirgstypisch auf jungpleistozänen Deckschichten – Lockergesteinsdecken, deren Genese mit intensiven periglazialen Prozessen verbunden war – entwickelt sind (Völkel 1995). Die vergesellschafteten Böden treten dabei in charakteristischer Weise gestaffelt in quer zum Hang angeordneten Einheiten auf: Auf dem Kamm und am Oberhang finden sich im Allgemeinen sehr skelettreiche Braunerden aus dem Verwitterungsmaterial der basenarmen Quarzite, wohingegen am Unterhang zumeist mit Grus durchsetzte Pseudogleye aus dem Verwitterungsmaterial der unterdevonischen Schiefer auftreten. Letztere können dabei einen z. T. durchaus noch erheblichen Schuttanteil aufweisen, der aus den oberhalb gelegenen Hangbereichen stammt. In den mittleren Hangbereichen finden sich Übergangsformen zwischen Braunerde und Pseudogley, wobei der Skelettanteil talwärts abnimmt (MUF RLP 1994).

Die auftretenden periglazialen Deckschichten „[...] sind in der Regel in einer Mächtigkeit erhalten, welche ein Durchgreifen der holozänen Pedogenese auf das anstehende Festgestein weitgehend unterbindet“ (Völkel 1995). Die vertikale Schichtung der Schuttdecken geht dabei mit einem signifikanten Wechsel in den Porenverhältnissen und dem Mineralbestand einher (MUF RLP 1994), wobei die Schichtgrenzen im Allgemeinen die Grenzen der Bodenhorizonte widerspiegeln (Völkel 1995). Aus diesem Grund soll zunächst eine kurze, allgemeine Darstellung periglazialer Schuttdecken erfolgen, an die sich eine nähere Typisierung der Deckschichten und der darauf aufbauenden Böden im Untersuchungsgebiet anschließt.

3.3.1 Allgemeine Gliederung periglazialer Deckschichten

Bei lateraler Verlagerung durch solifluidale und aquatisch-denudative Prozesse entstehen an der Erdoberfläche Lockergesteinsdecken, die in geologischem Sinn als Sedimente anzusehen sind. Bei rein solimixtiver Aufbereitung in situ (ebene Fläche) entstehen Solimixtionsdecken, bei Ausspülungsprozessen residuale Restdecken. Letztere beiden sind im engeren Sinne nicht als Sedimente anzusehen. Demgegenüber sind im bodenkundlichen Sinn alle diese Bildungen als eigenständige Einheiten einzuordnen, die unter dem Begriff „Lagen“ bzw. „Decklagen“ (d. h. Solifluktionssedimente, aquatisch-denudative Hangsedimente, Solimixtionsdecken und Restdecken) zusammengefasst werden (Fetzer et al. 1995). Eine Schichtung in Lagen liegt somit vor, wenn das Profil im Anstehenden oder im Bereich der Bodenbildung vertikale Inhomogenitäten aufweist, die nicht auf rezente oder reliktsche Pedogenese zurückzuführen sind (Völkel 1995). Die im Folgenden beschriebenen *pleistozänen* Lagen sind in erster Linie das Ergebnis gelisolifluidaler- und mixtiver sowie erst in zweiter Linie aquatisch-denudativer Prozesse und Ausspülungsprozesse in Periglazialgebieten (Fetzer et al. 1995). Beeinflusst vom (Paläo-)Relief und dem Verbreitungsmuster der materialliefernden liegenden Gesteine sowie der Intensität und Qualität des syngenetischen Stoffeintrags (äolisches Material, Tephra) ist sowohl die stoffliche Zusammensetzung als auch die Struktur (Feinboden, Skelett, Verdichtung, Verfestigung) der einzelnen Lagen lateral differenziert. Vertikal treten Abfolgen mehrerer Lagen auf, wobei die jeweils jüngere von ihrer Liegenden stofflich beeinflusst wird (Fetzer et al. 1995).

Bereits Schilling & Wiefel (1962) und Semmel (1968) versuchten eine allgemein gültige Gliederung pleistozäner Deckschichten zu entwerfen, wobei jedoch Probleme der Vergleichbarkeit – auch mit nachfolgenden Arbeiten anderer Autoren – auftraten. Eine Gegenüberstellung verschiedener Gliederungen findet sich in Altermann & Kühn 1999. Erst 1987 wurde vom Arbeitskreis „Bodensystematik“ der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft eine umfassende Definition und Gliederung vorgenommen, die auf den Ausführungen Semmels beruhten (Sabel 1989). Nach dem relativen Alter und der Stärke der Beeinflussung durch äolisches Material wird die Vertikalabfolge der Lagen demnach wie in Tabelle 3-1 dargestellt unterteilt. Die Abfolge ist nur selten vollständig entwickelt.

Tabelle 3-1 Vertikalabfolge periglazialer Lagen der Mittelgebirge (nach Altermann & Kühn 1999 und Fetzer et al. 1995).

Bezeichnung der Lage	Stratigraphie	Lössbürtige Komponenten	Lagenabfolge							
			■ = häufig				□ = selten			
Oberlage(n)	meist Holozän	können vorhanden sein	X	X	X	X	X	■	■	
Hauptlage	Jungtundrenzeit	immer vorhanden	X	X	X			■	■	X
Mittellage(n)	Präalleröd	immer deutlich vorhanden	X					■	■	
Basislage(n)	Präalleröd	nicht oder in geringen Mengen vorhanden	X	X		X		■	■	

Folgend findet sich eine kurze Darstellungen der periglazialen Lagen der Mittelgebirge. Ausführliche Erläuterungen und diagnostische Geländemerkmale sind u. a. AG Boden (2005), AK Standortskartierung (1996), Altermann & Kühn (1999) und Fetzer et al. (1995) zu entnehmen.

• Basislage

Die Basislage bildet das unterste Glied der Deckschichtenfolge über dem anstehenden Gestein. Es ist eine Soliflukts- oder -mixtionsdecke, die direkt aus den im Untergrund bzw. hangaufwärts anstehenden Gesteinen präallerödzeitlich entstanden ist. Im Gegensatz zu Haupt- und Mittellagen enthält sie keine (bzw. keine deutlichen) äolischen Komponenten und ist somit in ihrer stofflichen Zusammensetzung im Wesentlichen von der Art des Untergrundgesteins und dessen Verwitterungszustand abhängig. Treten, wie im Bereich des Untersuchungsgebietes, mehrere verschiedene Untergrundgesteine auf, so entstehen z. T. sehr komplexe Mischgesteine. Basislagen sind, abgesehen von stark exponierten Geländeexpositionen, weit verbreitet, wobei ihre Mächtigkeit in erster Linie von der relativen Reliefposition, der Erosionsanfälligkeit des Untergrundgesteins und der Größe des „Liefergebietes“ abhängt (Fetzer et al. 1995).

• Mittellage

Soliflukts- oder -mixtionsdecken, die im Liegenden der Hauptlage auftreten und eine deutliche lössbürtige Komponente besitzen (markanter Unterschied zur Basislage), werden als Mittellage bezeichnet. Sie sind wie die Basislage präallerödzeitlich entstanden und enthalten oftmals mehr äolisches Material als die Hauptlage, sind aber im Bergland wegen regional bzw. lokal mangelnder Lösszufuhr und präallerödzeitlicher Erosion nur gering vertreten. Mittellagen treten hier nur in geschützten Reliefpositionen auf, wohingegen sie im lössreichen Tiefland und stark lössbeeinflussten intramontanen Senken großflächig auftreten können (Fetzer et al. 1995).

• Hauptlage

Die jungtundrenzeitliche (jüngere Dryaszeit) Hauptlage ist außerhalb holozäner Erosions- und Akkumulationsgebiete fast überall an der Oberfläche ausgebildet. Sie kommt im Hangenden der Mittellage bzw. Basislage, aber nur selten direkt über dem Anstehenden vor und enthält immer äolisches Material (AG Boden 2005). Die Mächtigkeit der z. T. mehrgliedrigen Hauptlage ist in allen Reliefpositionen auffällig konstant und liegt in der Regel bei 50 cm (± 20 cm), wobei geringere Mächtigkeiten zumeist auf holozäne Erosion zurückzuführen sind (Fetzer et al. 1995). Die Hauptlage ist in ihrer Zusammensetzung sowohl von den jeweils liegenden Gesteinen ihres „Nährgebietes“ als auch von syngenetisch eingetragenen äolischem Material abhängig. Die in die Hauptlage eingearbeiteten liegenden Gesteine können Mittellagen, Basislagen oder andere in situ anstehende Fest- und Lockergesteine sein (Fetzer et al. 1995).

• Oberlage

Im Hangenden der Hauptlage können weitere, als Oberlagen bezeichnete Lagen auftreten. Sie sind oftmals nur lokal im Bereich klippenbildender, sandig verwitternder Gesteine verbreitet oder an Felsdurchragungen gebunden, wobei ihre Mächtigkeit erheblich schwanken kann. Sie besitzt im Vergleich zur Hauptlage wesentlich geringere äolische Anteile, so dass sie sich in erster Linie aus Material der liegenden Hauptlage und klippenbildender Gesteine (hoher Schuttanteil) zusammensetzt (Fetzer et al. 1995).

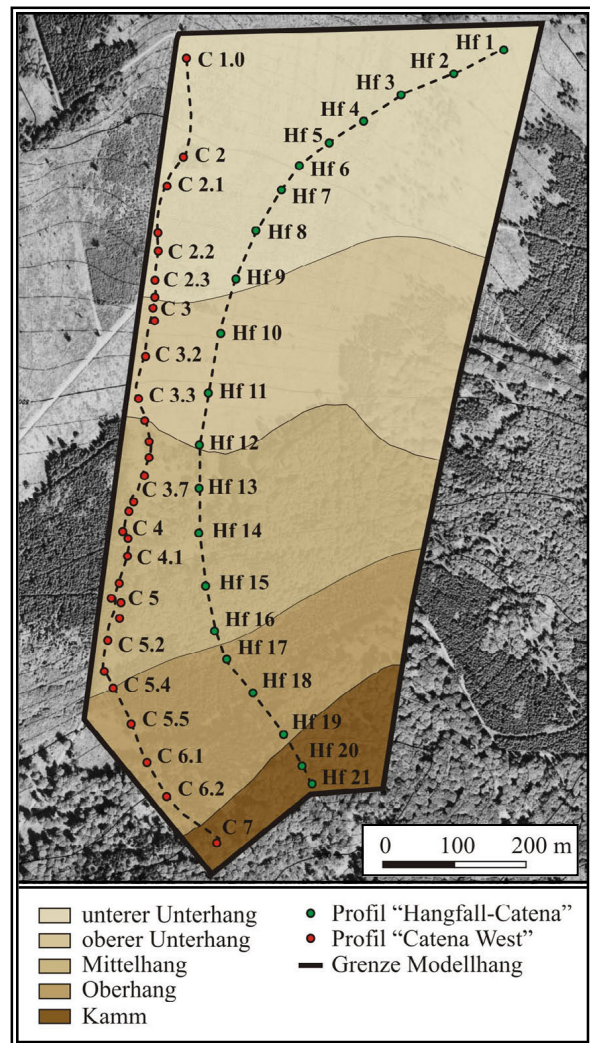
3.3.2 Periglaziale Deckschichten und Böden des Modellhanges Hölzerkopf

Die Untersuchungen zu den Böden und Deckschichten des Modellhanges Hölzerkopf wurden, wie bereits in Kapitel 1.3.1.3 dargelegt, anhand zweier Catenen durchgeführt (vgl. Karte 3-6). Die am Westrand des Hanges verlaufende „Catena West“ erstreckt sich von der nordwestlichen Grenze des Modellhanges (Profil C1.0) bis auf den Quarzitkamm, ca. 100 m südwestlich des Hölzerkopfes (Profil C7), und besteht aus insgesamt 31 Schürfgruben. Sechs der Gruben wurden mit Hilfe von Baggern angelegt (Tiefe 100 bis 150 cm). Diese Hauptprofile wurden mit den Kürzeln „C2“ bis „C7“ benannt.⁵ Die übrigen 25 Profile entstanden in Handarbeit als Verdichtung und sind mit einer Tiefe von 60–100 cm angelegt. Die Benennung dieser Profile erfolgte der räumlichen Lage zwischen den Hauptprofilen entsprechend als „C3.1“, „C3.2“ etc. Durch die maximale Tiefe der Profile von 150 cm, die aufgrund der Kompaktheit und des hohen Skelettanteils nicht weiter ausgedehnt werden konnte, wurde in keinem Fall das anstehende Gestein oder dessen direkter Verwitterungshorizont aufgeschlossen. Die „Hangfall-Catena“ verläuft im zentralen Bereich des Modellhanges und besteht aus 21 in Handarbeit angelegten Schürfgruben mit einer Tiefe von lediglich 30 bis 40 cm. Diese ermöglichten somit vorwiegend eine Untersuchung der Hauptlage und der organischen Auflage. Die Benennung erfolgte mit den Kürzeln „Hf1“ bis „Hf21“.

⁵ Profil C1 liegt außerhalb des Modellhangbereiches und wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

In der weiteren Darstellung findet anhand von Morphologie und Substratwechsel eine Aufteilung des Modellhanges in Kamm, Oberhang, Mittelhang sowie oberer und unterer Unterhang Anwendung (Karte 3-6). Diese schematische Aufteilung stellt keine scharfe Grenzziehung dar, sondern lediglich eine grobe Unterteilung des Gebietes.

In der Folge werden zusammenfassend der Aufbau der periglazialen Lagen im Untersuchungsgebiet sowie die Typisierung der aufbauenden Böden dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Lagen und Böden zeigt sich dabei auch darin, dass die Schichtgrenzen der periglazialen Lagen stets Bodenhorizontgrenzen darstellen. Sie werden von bodenbildenden Prozessen zumeist weder unter- noch überschritten (Völkel 1995). Alle dargestellten Profile stammen aus der „Catena West“, geben diese aber nicht vollständig wieder. Eine tabellarische Beschreibung der Profilaufnahmen findet sich in Anhang IV, in Anhang V sind die Daten zu den Aufschlüssen der „Hangfall-Catena“ aufgeführt, auf die zum Teil in den Ausführungen verwiesen wird.



Karte 3-6 Verlauf der Bodencatenen am Modellhang Hölzerkopf (Luftbild: LVA RLP 1996a-d).

3.3.2.1 Profile des Kammes und des Oberhanges (C7 bis C5.5)

Abbildung 3-14 zeigt für alle 5 Profile des Kamm- und Oberhangbereiches die Lagen- und Horizontabfolge. Es findet sich ohne Ausnahme der Bodentyp der Lockerbraunerde, dessen Ah-, Bfv- und Bv-Horizont auf der Hauptlage und IICv-Horizonte auf der Basislage ausgebildet ist. Der auf dem Kamm mit 18 cm noch recht mächtige Ah-Horizont nimmt im Bereich des Oberhanges bis auf ca. 5 cm ab. Der in allen Aufschlüssen gelb-bräunliche (10 YR 5/6 bzw. 10 YR 4/6) Bfv-Horizont besitzt eine grundsätzlich geringe Lagerungsdichte. In Profil C7 wurde für ihn ein Gesamtporenvolumen von ca. 70 Vol.-% ermittelt. Der Horizont reicht in allen Profilen bis in 45 bis 55 cm Tiefe. Der folgende IICv-Horizont zeigt einen deutlichen Farbwechsel des Feinbodens zu den typischen, leicht rötlichen Brauntönen (2,5 YR 6/4). Das Auftreten von Rostflecken und Bleichzonen ab einer Tiefe von ca. 100 cm in Profil C6 lässt erstmals auf periodischen Stauwassereinfluss schließen (IICv-Sw). Der in der Hauptlage

bereits sehr hohe Skelettanteil von z. T. 50 % (hoher Schuttanteil) nimmt in der Basislage nochmals sichtbar zu. Beim Feinboden des IICv-Horizontes herrscht in den näher untersuchten Profilen C7 und C6 eine stark sandige Komponente vor, wohingegen der Feinboden des Bfv-Horizontes, vor allem bei C6, einen höheren Anteil der Schluff- und Tonfraktion aufweist (sandiger Lehm).

Eine lokale Besonderheit im Bereich des Oberhanges stellt der in Bild 3-6 dargestellte Steilhangbereich dar, der lediglich von der Hangfallcatena erfasst wird (vgl. Abbildung 3-4 und Karte 3-6). Bei Hangneigungen von bis zu 24° findet sich hier eine Blockmeerbildung, die lediglich die Ausbildung von Skeletthumusböden erlaubt. In den Hohlräumen des Grobskelettsubstrates sind mächtige Humuseinlagerungen vorhanden. Weitere Untersuchungen waren hier nicht möglich.



Bild 3-6 Übergang zum Steilhang im Osten des Modellhanges mit Quarzitblöcken.

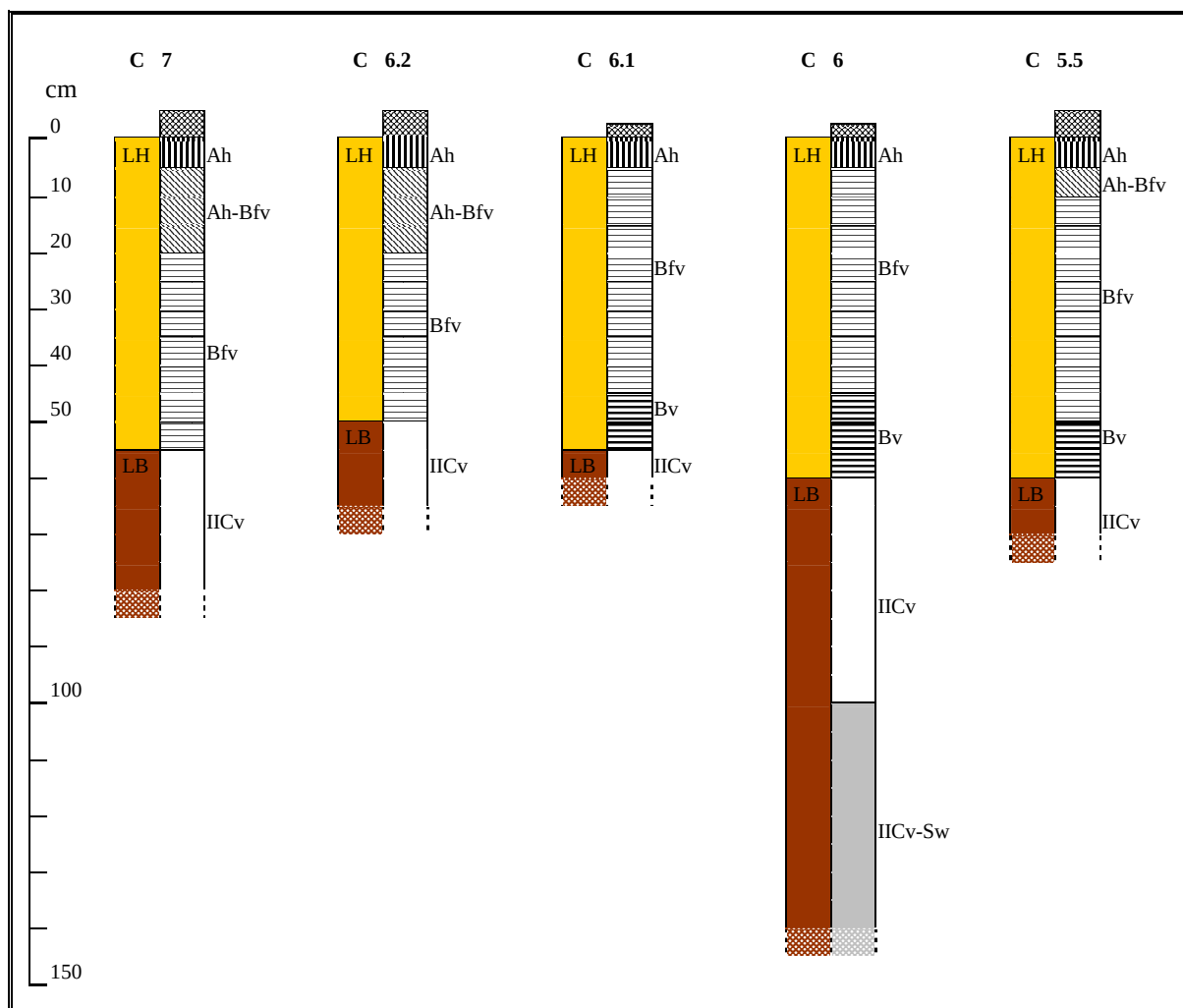


Abb. 3-14 Aufbau der Profile des Kamm- und Oberhangbereiches (LH = Hauptlage/LB = Basislage). Bodentypen: C7 bis C5.5 = Lockerbraunerde.

3.3.2.2 Profile des oberen Mittelhanges (C5.4 bis C5)

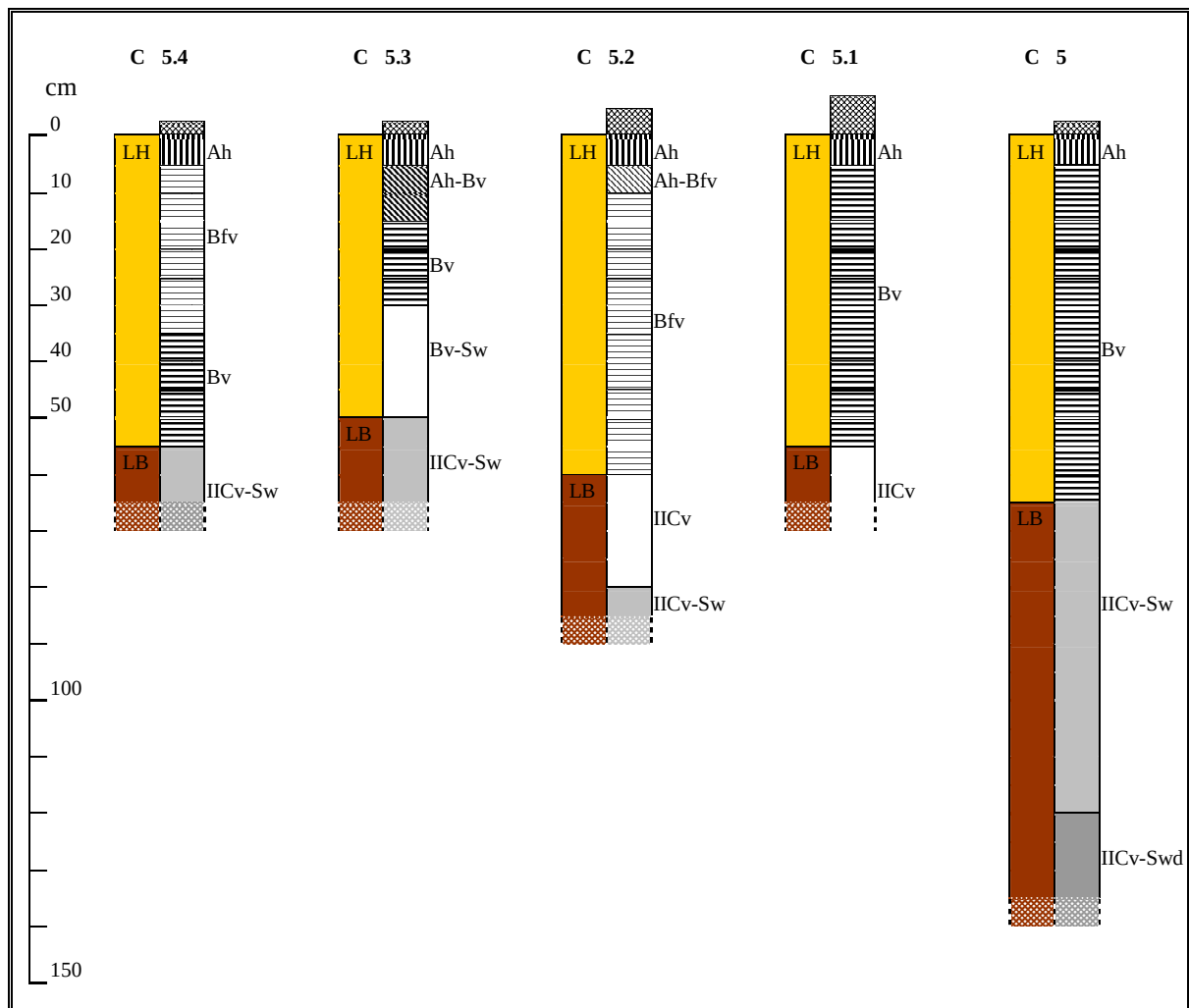


Abb. 3-15 Aufbau der Profile des oberen Mittelhanges (LH = Hauptlage/LB = Basislage).

Bodentypen: C5.4/C5.2 = Hangpseudogley-Lockerbraunerde; C5.3 = Braunerde-Hangpseudogley;
C5 = Hangpseudogley-Braunerde; C5.1 = vermutlich Hangpseudogley-Braunerde
(C5.1 konnte nicht weit genug aufgeschlossen werden, die Basis zeigte jedoch erste Rostflecken).

Der bereits in Profil C6 des Oberhanges festzustellende Stauwassereinfluss in ca. 100 cm Tiefe tritt in den Profilen des oberen Mittelhanges noch deutlicher und oberflächennaher auf, so dass in diesem Abschnitt der Catena bei Hangneigungen von über 5° Hangpseudogley-Lockerbraunerden, Braunerde-Hangpseudogleye und Hangpseudogley-Braunerden vorherrschen (vgl. Abbildung 3-15). Der Skelettanteil nimmt in allen Horizonten deutlich ab. Der Feinboden der Bfv- und Bv-Horizonte besitzt noch die gleiche gelblich-braune Färbung (YR 10 5/6) wie im Oberhangbereich, bei jedoch deutlich verringertem Anteil der sandigen Komponenten (Bodenart: sandig-lehmiger Schluff). In einer Tiefe zwischen 50 und 60 cm ist wiederum ein deutlicher Substratwechsel festzustellen, der wie am Oberhang die Grenze zwischen Basis- und Hauptlage darstellt. Der Feinboden der auf der Basislage ausgebildeten IICv- und IICv-Sw-Horizonte besitzt im Vergleich zum Oberhang eine dunklere Färbung (7,5 YR 5/6), die auf einen Wechsel im Ausgangsgestein hindeuten. Dies bestätigt die vorangegangenen Untersuchungen zur Geologie des Modellhanges, die einen Wechsel von Taunusquarziten zu den Übergangsschichten zum Hunsrückschiefer aufzeigen. Der Skelettanteil nimmt im Vergleich zu den oberhalb gelegenen Hangbereichen ab, und der Feinboden besitzt einen wesentlich höheren Schluff- und Tongehalt (Feinbodenart: sandig-lehmiger

Schluff). An der Basis der Profile weist eine Zunahme von Rostfleckung und Marmorierung auf einen deutlichen Stauwassereinfluss hin. Eine Ausnahme bildet lediglich Profil C5.1, in dem die Merkmale wohl nicht mehr aufgeschlossen sind. Bemerkenswert sind die in Profil C5.2 deutlich ausgebildeten Lehmhauben auf größeren Grobskeletteinlagerungen. Diese Auflagerungen eingeschlammten Materials deuten nach Völkel (1995) – bei gleichzeitig blank gewaschener Unterseite – auf die Existenz verstärkter Interflowbewegungen hin.

3.3.2.3 Profile des unteren Mittelhanges (C4.2 bis C3.5)

Im Bereich des unteren Mittelhanges sind wiederum weitgehend Pseudogley-Braunerden vorzufinden, wobei sich der stauwasserführende Horizont IICv-Swd weiter an die Bodenoberfläche annähert und bei steigendem Tongehalt (Feinboden = schluffiger Lehm) in Kombination mit noch immer deutlichem Skelettanteil bereits eine leichte Marmorierung zeigt. Der Bv-Horizont zeigt ebenfalls Stauwasserführung, hier sind jedoch keine Nassbleichungsmerkmale sichtbar. Es handelt sich somit um den Bodentyp der Pseudogley-Braunerde. Der Feinboden des Bv-Horizontes besitzt eine gelblich-braune Färbung (10YR 5/4) und zeigt von der Korngrößenverteilung keine signifikanten Unterschiede zum oberen Mittelhang. Der Skelettanteil nimmt dagegen auf ca. 30 % ab.

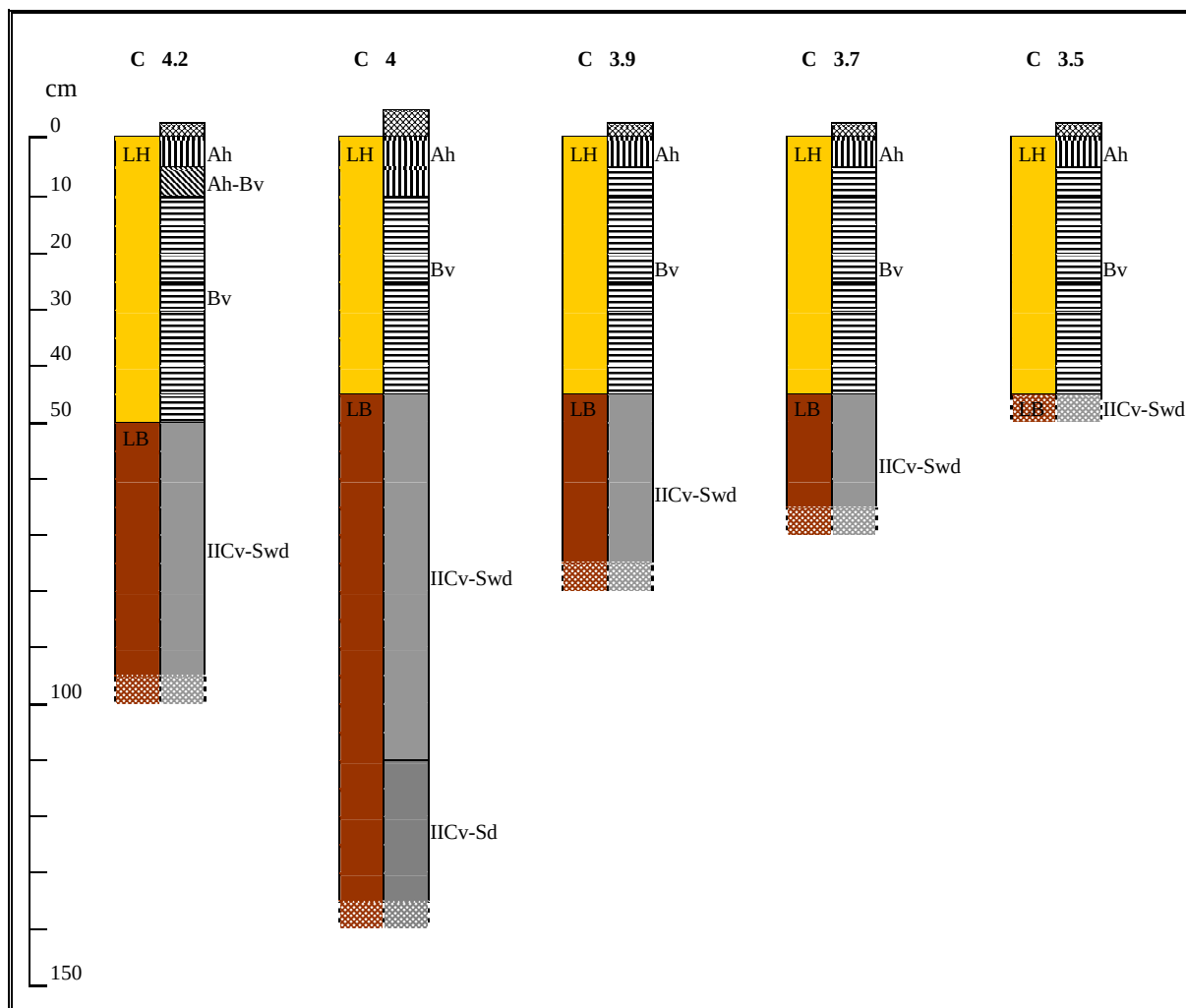


Abb. 3-16 Aufbau der Profile des unteren Mittelhanges (LH = Hauptlage/LB = Basislage).
Bodentypen: C4.2 bis C3.5 = Pseudogley-Braunerde.

3.3.2.4 Profile des oberen Unterhanges (C3.4 bis C2.4)

Die Profile des oberen Unterhanges zeigen gegenüber dem unteren Mittelhang signifikante Veränderungen in der Hauptlage. Ein zunehmender Anteil der Tonkomponente geht mit einer markanten Farbänderung des Feinbodens in ein deutlich graues Farbspektrum (Y2,5 5/4 bis Y2,5 7/2) im unteren Bereich der Hauptlage einher (vgl. Abbildung 3-19). Bedingt wird die Farbänderung durch starke Nassbleichungseffekte aufgrund zeitweise anstehenden Stauwassers, so dass die auf der Hauptlage ausgebildeten Bodenhorizonte als Ah und Bv-Sw anzusprechen sind. Insgesamt nimmt die Mächtigkeit der Hauptlage auf 35 cm ab. Die darunter liegende, sich deutlich abhebende Basislage bildet den zugehörige StauhORIZONT aus, der bei höherem Tongehalt (Feinboden = schluffiger Lehm) Rostflecken und Marmorierungseffekte zeigt. Insgesamt können die Böden als Pseudogleye angesprochen werden. Bemerkenswert ist der talwärts stark abfallende Skelettanteil der Hauptlage, der sich 0–5 % annähert, wohingegen er in der Basislage lediglich auf ca. 15 % absinkt.

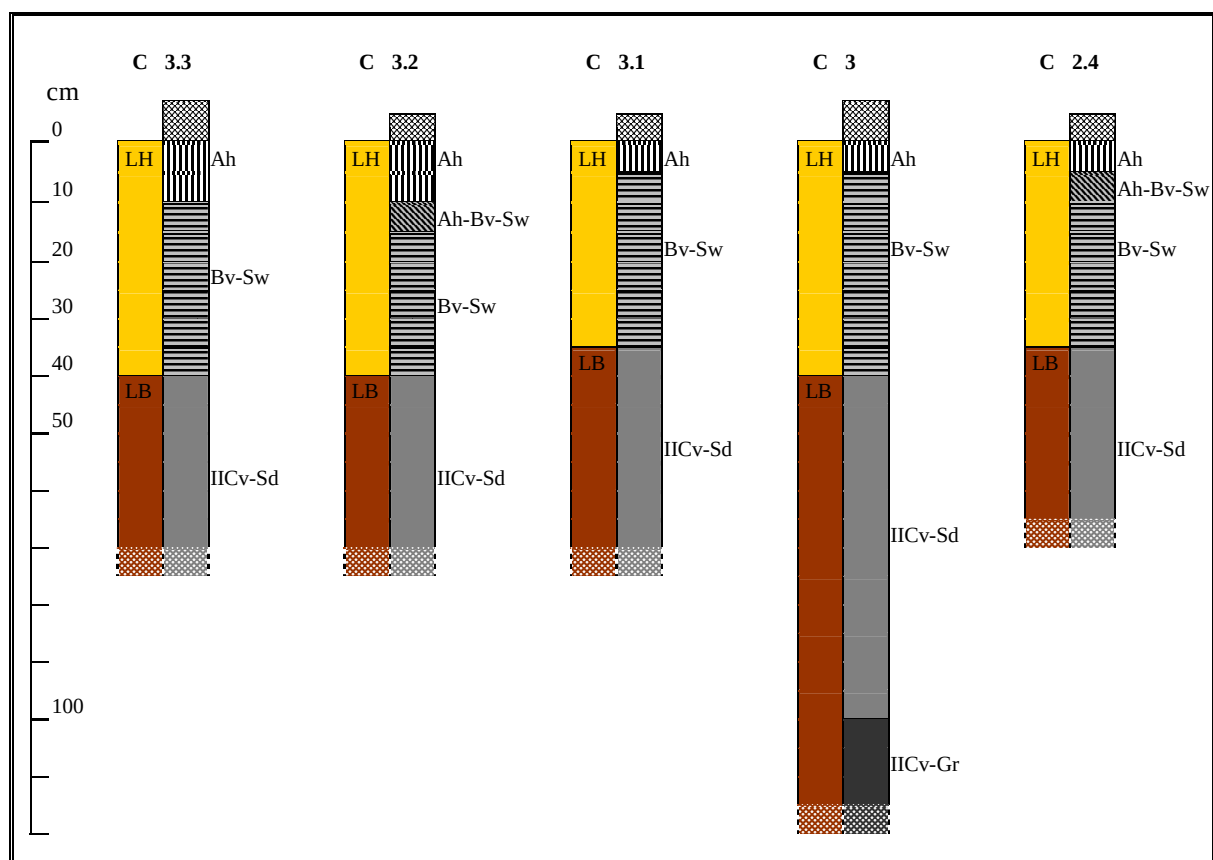


Abb. 3-17 Aufbau der Profile des oberen Unterhanges (LH = Hauptlage/LB = Basislage).
Bodentypen: C3.3/C3.2/C3.1/C2.4 = Pseudogley; C3 = Gley-Pseudogley.

3.3.2.5 Profile des unteren Unterhanges (C2.3 bis C1.0)

Im Gegensatz zum oberen Unterhang besitzt der untere Unterhang keine Blockschuttbedeckung mehr. Pseudogley herrscht auch hier als Bodentyp vor, lokal treten zudem Stagnogleye auf (vgl. „Hangfall-Catena“, Anhang V). Die Mächtigkeit der weitgehend skelettfreien Hauptlage nimmt bis auf 30 cm ab, wobei die Basis z. T. stauende Eigenschaften aufweist (Bv-Swd-Horizont). Für die deutlich abgrenzbare Basislage, die immer noch einen Skelettgehalt von bis zu 10 % aufweist, zeigen sich keine Unterschiede zum oberen Unterhang.

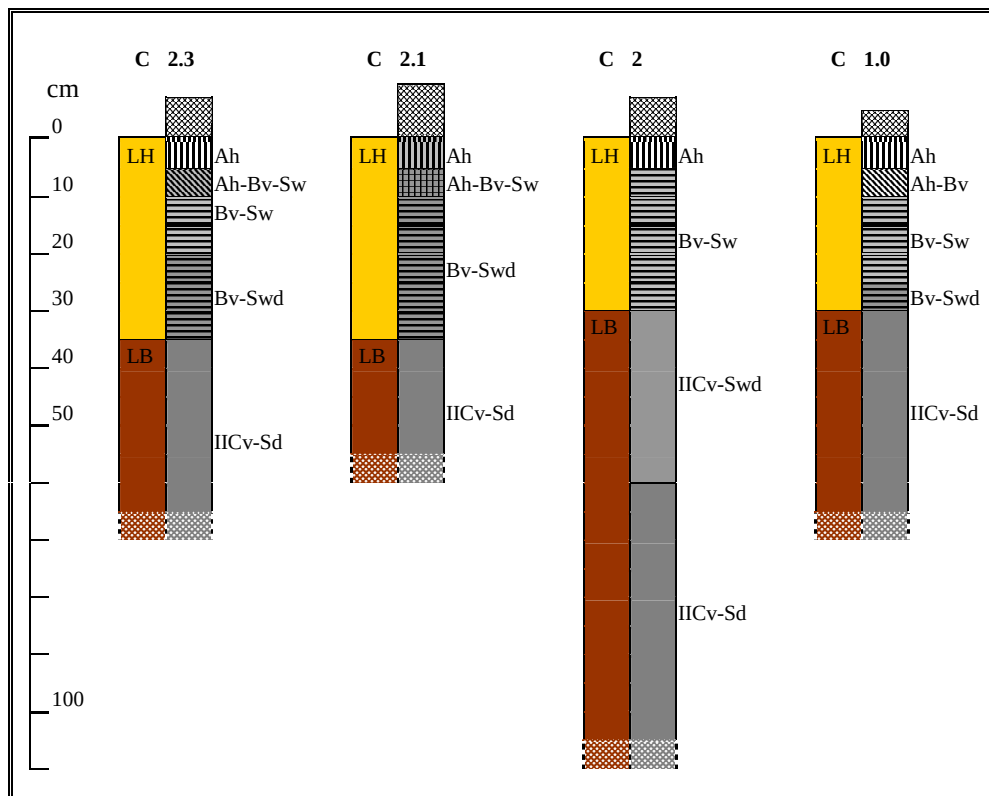


Abb. 3-18 Aufbau der Profile des unteren Unterhanges (LH = Hauptlage/LB = Basislage).
Bodentypen: C2.3 bis C1.0: Pseudogley.

3.3.2.6 Zusammenfassende Darstellung der Böden im Modellhang Hölzerkopf

Bezüglich der vorgefundenen periglazialen Lagen im Bereich des Modellhanges lassen sich folgende zusammenfassenden Aussagen treffen:

- Entlang der gesamten „Catena West“ sind Basis- und Hauptlage ausgebildet, wohingegen Mittel- und Oberlage nicht deutlich abgegrenzt werden konnten.
- Über die Mächtigkeit der Basislage ist keine Aussage möglich, da ihre Basis in keinem Profil aufgeschlossen wurde. Die Mächtigkeit der Hauptlage nimmt relativ konstant vom Kammbereich zum unteren Unterhang von ca. 55 cm auf 30 cm ab.
- Das Substrat der Basislage besitzt im Kammbereich einen Skelettanteil von 80 %, wobei das Maximum bei Grus und kantigen Steinen (eingeregelt) liegt. Der Feinboden ist hier stark sandig. Hangabwärts sinkt der Skelettgehalt sukzessive bis auf ca. 10–15 % am Unterhang ab, wohingegen der Feinboden, beeinflusst vom Wechsel im anstehenden Gestein, eine deutliche Abnahme der sandigen Komponente zeigt. Demgegenüber steigen der Schluffanteil und am unteren Mittelhang/Unterhang vor allem der Tonanteil deutlich an.
- Das Substrat der deutlich abgrenzbaren Hauptlage besitzt im Vergleich zur Basislage zumeist einen geringeren Skelettanteil, der sich zudem in seiner Zusammensetzung unterscheidet (hoher Anteil kantiger Blöcke). Der Skelettanteil nimmt von ca. 70 % im Kammbereich auf annähernd 0 % am unteren Unterhang ab. Eine Ausnahme bildet dabei der Steilhang im östlichen Teil des Oberhanges. Der Feinboden der Hauptlage weist im Vergleich zur Basislage einen wesentlich geringeren Anteil an sandigen Komponenten im Oberhang- und Kammbereich auf und zeigt am Unterhang ein deutliches Maximum in der Schlufffraktion. Die Basislage besitzt am Unterhang einen hohen Tongehalt.

- Bemerkenswert ist die deutliche Zunahme des Skelettgehaltes an der Basis der Hauptlage, die gerade in den Mittelhangbereichen über der z. T. bereits wasserstauend wirkenden Basislage starke und schnelle Interflowbewegungen ermöglicht. Dieser Interflow ist zum einen an den Profilen direkt zu beobachten, zum anderen deuten Lehmhauben auf dem Grobskelettsubstrat bei gleichzeitig blank gewaschener Unterseite darauf hin.
- Insgesamt bestätigt die vorgefundene Situation folgende durch die Literatur vorgegebenen Erwartungen: Die periglazialen Lagen verschleppen die geologischen Grenzen der im Untergrund anstehenden Gesteine in Oberflächennähe deutlich talwärts (vgl. Michl 1998). Die im Oberhangbereich noch stark sandige Basislage (über dem Verwitterungshorizont der Quarzitgesteine) nimmt talwärts verstärkt toniges Material der Hunsrückschiefer auf (vgl. AG Boden 2005) und zeigt im Talbereich eine deutliche Verfestigung und Verdichtung mit einer daraus folgenden Abnahme der Wasserleitfähigkeit (vgl. Fetzer et al. 1995). Die Hauptlage besitzt einen gegenüber der Basislage erhöhten Feinerdegehalt, der deutliche Zeichen von Lösseinlagerungen (Korngrößenmaximum im Schluffbereich) aufzeigt (vgl. AG Boden 2005).

Abbildung 3-19 zeigt schematisch die Verteilung der Böden am Modellhang. Es wird die gestaffelte Anordnung mit Lockerbraunerden auf dem Kamm und am Oberhang, Pseudogley-Braunerden am Mittelhang und Pseudogleyen (lokal Stagnogley) am Unterhang deutlich.

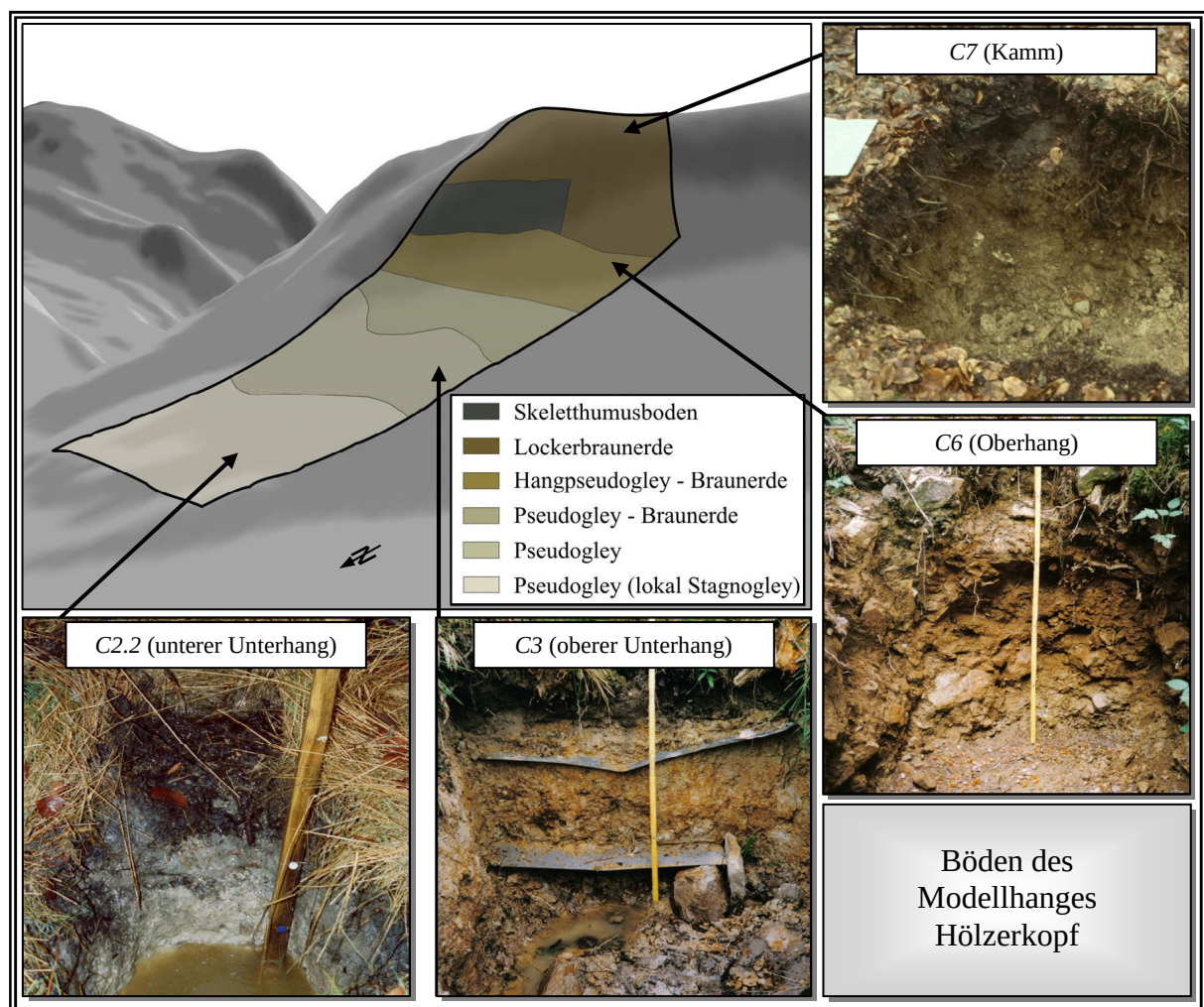


Abb. 3-19 Schematische Bodenkarte des Modellhanges Hölzerkopf. Der Schuttanteil nimmt talwärts stetig ab: Kamm, Oberhang und oberer Mittelhang sind blockschuttreich, unterer Mittelhang und oberer Unterhang sind blockschutthaltig, der untere Unterhang ist schuttarm.

Bezüglich der bodenhydraulischen Eigenschaften ist bereits an dieser Stelle festzuhalten, dass die (Locker-)Braunerden der oberen Hangbereiche offensichtlich eine allgemein hohe Wasserleitfähigkeit aufweisen, wohingegen in den Pseudogley-Braunerden des Mittelhangs bereits ein wenig wasserdurchlässiger Stauhorizont ausgebildet ist, der zu deutlichen Interflowbewegungen in den darüber liegenden Horizonten führt. Die Pseudogleye der unteren Hangbereiche besitzen einen stark ausgeprägten Sd-Horizont, der erhebliche Staunäseeinflüsse in den hangenden Horizonten hervorruft. Kneidl & Benecke (1990) haben in zwei benachbarten Untersuchungsgebieten am nördlichen Soonwaldhauptkamm für den Sw-Horizont des Pseudogleys noch laterale Wasserbewegungen bei lediglich geringen Hangneigungen von 2° festgestellt.

3.3.3 Böden im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches

Aufgrund der Größe des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches konnte hier keine dem Modellhang Hölzerkopf entsprechende Detailkartierung der Böden realisiert werden, so dass, bei entsprechenden Einbußen im Informationsgehalt, auf forstliches Kartenmaterial zurückgegriffen werden musste. Trotz umfangreichen Kartenmaterials (vgl. Kapitel 1.2.2.3) lagen jedoch keine flächendeckenden Daten zu Bodentyp und Bodenart vor, so dass eine Klassifizierung anhand der Standortsgrundformen erfolgte, die eine grobe Untergliederung der Standorte nach Art und Intensität des Stau- bzw. Grundwassereinflusses darstellen (Forsteinrichtungsamt Koblenz 1962a, MLWF RLP 1963, AK Standortskartierung 1996). Tabelle 3-2 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der im Einzugsgebiet vertretenen stauwasserbeeinflussten Grundformen.

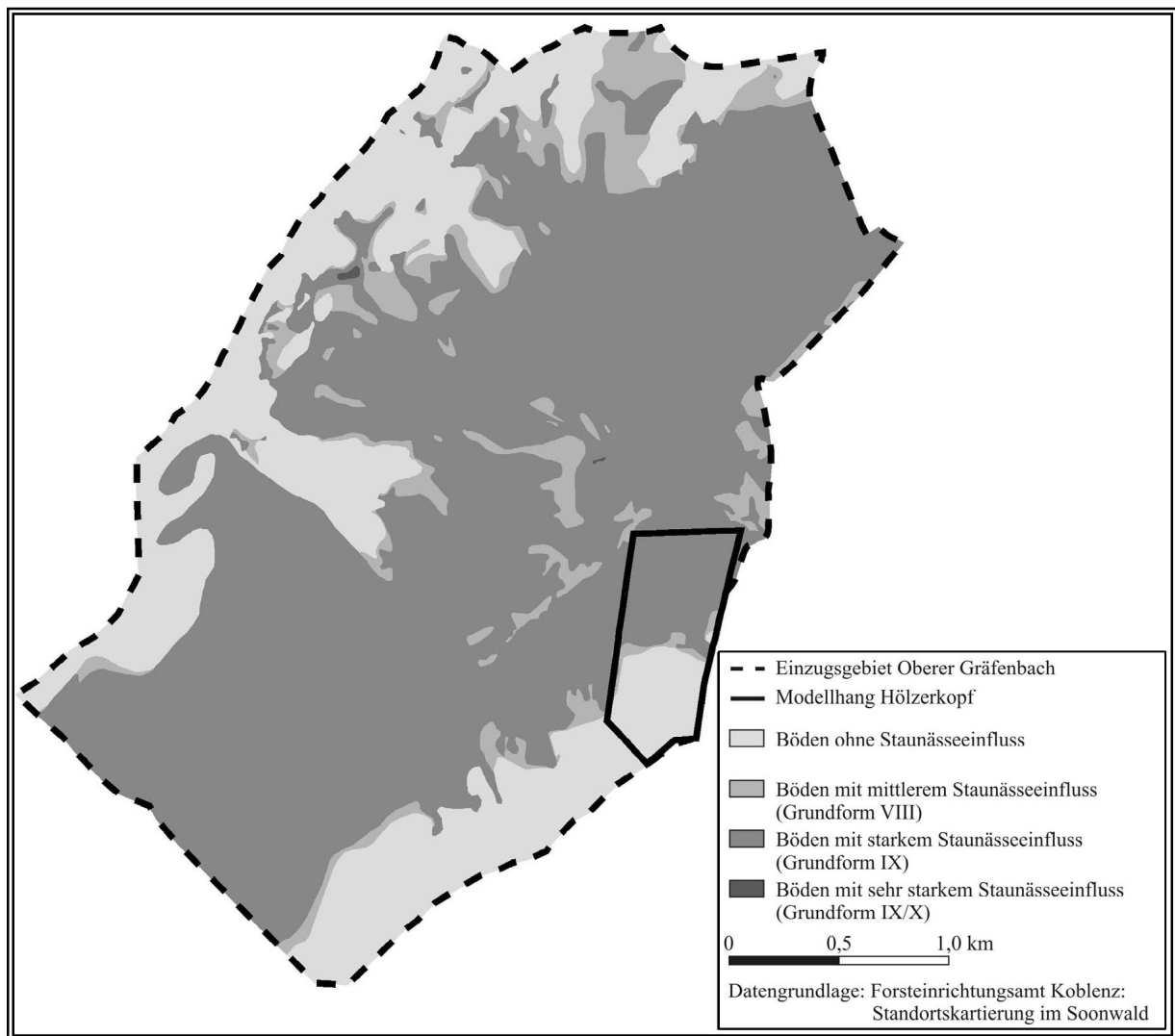
Den Grundformen können im Untersuchungsgebiet speziellen Bodentypen zugeordnet werden. Eine entsprechende Übersicht findet sich in Tabelle 3-2. Grundformen ohne Stau- bzw. Grundnässezeichen entsprechen dabei i. d. R. Braunerden (Kneidl & Benecke 1990). Die Zuordnung der Bodentypen konnte durch die eigenen Untersuchungen im Modellhangbereich weitgehend bestätigt werden (vgl. Kapitel 3.3.2).

Tabelle 3-2 Überblick über die Grundformen und die entsprechenden Bodentypen im Untersuchungsgebiet (nach AK Standortskartierung 1996, Forsteinrichtungsamt Koblenz 1962a, Kneidl & Bennecke 1990 und MLWF RLP 1963).

Grundform	Staunässestufe	Hydromorph ab cm u. GOF	Feuchthumusauflage bzw. Torf	Dauer des Stau-/ Grundwassers im Oberboden	Bodentyp
VII	schwach staunass	65–45 cm			Pseudogley-Braunerde
VIII	mittel staunass	45–25 cm			Braunerde-Pseudogley
IX	stark staunass	25–0 cm		4–7 Monate	Pseudogley
IX/X	sehr stark staunass	25–0 cm	10–30 cm	7–10 Monate	Pseudogley
X	äußerst staunass	25–0 cm	> 30 cm	> 10 Monate	Pseudogley

Karte 3-7 zeigt die räumliche Verteilung der Grundformen im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches, Abbildung 3-20 und 3-21 verdeutlicht die Flächenanteile der Grundformen im Gesamteinzugsgebiet bzw. am Modellhang. Es wird deutlich, dass sowohl im Gesamtgebiet als auch am Modellhang Böden mit starkem Staunäseeinfluss (Grundform IX, i. d. R. Pseudogleye) mit einem Flächenanteil von 66 % bzw. 54 % vorherrschen. Diese finden sich vorwiegend in den unteren Hangbereichen. Böden ohne Staunäseeinfluss (i. d. R. Braunerden), deren Flächenanteil im Gesamteinzugsgebiet 25 % und am Modellhang 39 % beträgt,

finden sich demgegenüber vorwiegend auf dem Kamm und in den oberen Hangbereichen. Böden mit mittlerem Staunäseeinfluss sind vorwiegend am Mittelehang lokalisiert, wobei ihr Flächenanteil lediglich 9 % im Gesamtgebiet bzw. 7 % am Modellhang ausmacht.



Karte 3-7 Grundformenkarte des Einzugsgebiets (Datengrundlage: Forsteinrichtungsamt Koblenz 1966e-h)

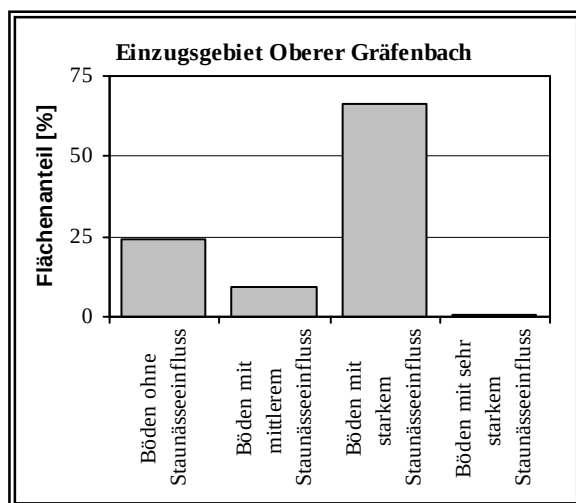


Abb. 3-20 Flächenanteile der Grundformen im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbachs.

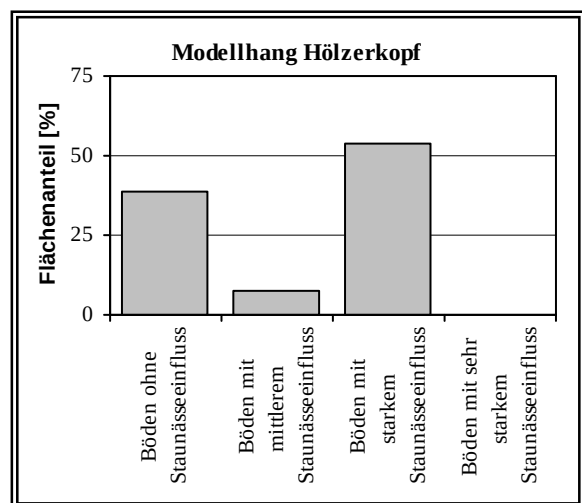


Abb. 3-21 Flächenanteile der Grundformen im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.

3.3.4 Bodenhydraulische Eigenschaften im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches

Abbildung 3-22 zeigt die Ergebnisse (Mittelwerte) der in Zusammenarbeit mit Bernhard Reinke durchgeführten Untersuchungen zur gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Böden im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf. Die Messungen wurden nahe der Hauptprofile der „Catena West“ in 15 bis 20 cm u. GOF durchgeführt. Die Messergebnisse können dabei wie folgt den einzelnen Hangbereichen zugeordnet werden:

- Profilgrube C1, C2 und C3 ⇒ Unterhang (Pseudogley)
- Profilgrube C4 und C5 ⇒ Mittelhang (Braunerde-Pseudogley)
- Profilgrube C6 ⇒ Oberhang und Kamm (Braunerde)

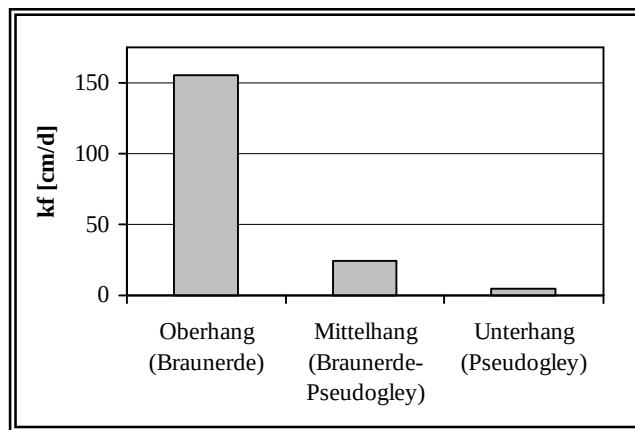


Abb. 3-22 Gesättigte Wasserleitfähigkeit unverdichteter Waldböden in unterschiedlichen Hangpositionen (Mittelwerte) – 15 cm bis 20 cm u. GOF.

Trotz einer Reihe von Störfaktoren, die im Rahmen der Messungen auftraten (vgl. Kapitel 1.3.1.3), wird deutlich, dass die Wasserleitfähigkeit des betrachteten Horizontes am Oberhang beträchtlich gegenüber mittleren und unteren Hangbereichen erhöht ist. Durchschnittlich finden sich am Oberhang kf-Werte von 156 cm/d, was einer sehr hohen Wasserleitfähigkeit (kf5) entspricht. Dagegen ist die Leitfähigkeit am Mittelhang bei 24 cm/d (kf3 – mittlere Wasserleitfähigkeit) und am Unterhang bei 5 cm/d (kf2 – geringe Wasserleitfähigkeit) angesiedelt (vgl. AG Boden 2005).

Zur Bestimmung der Infiltrationskapazitäten wurden von Giek im Jahr 2000 Messungen mit Hilfe eines Doppelring-Infiltrometers durchgeführt (Giek 2001). Dabei erfolgte eine Untersuchung ungestörter Waldböden im Bereich von Mittel- und Oberhang und verschiedener Wegetypen (bezüglich der Einteilung der Wegetypen vgl. Kapitel 2.3.2.2). Abbildung 3-23 stellt die Durchschnittswerte der ermittelten Infiltrationsraten dar. Es zeigt sich eine mit 172 mm/h sehr hohe Infiltrationskapazität der ungestörten Waldböden. Demgegenüber weisen sowohl Asphaltwege (0 mm/h), als auch Schotter- und Erdwege im Bereich der Fahrspuren (1 bzw. 6 mm/h) keine bzw. minimale Infiltrationskapazitäten auf. Lediglich im Bereich der Mittelstreifen sind die Werte geringfügig erhöht. Rückegassen zeigen in ihren Mittelstreifen keine deutlichen Unterschiede zu ungestörten Waldböden, wohingegen in den Fahrspuren die Infiltrationskapazität im Mittel auf 70 mm/h herabgesetzt ist. Andere Studien (vgl. z. B. Ammer et al. 1988; BLfW 1981, Hofmann 1989) weisen hier, in Abhängigkeit von den physikalischen Eigenschaften des ungestörten Untergrundes, eine deutlich ausgeprägtere Herabsetzung der Infiltrationskapazität aus. Insgesamt muss davon ausgegangen werden, dass das 56 lfdm/ha dichte Forstwegenetz des Untersuchungsgebietes in Kombination mit den Rückegassen, die in einer mittleren Dichte von ca. 240 lfdm/ha vorzufinden sind, zu einer erheblichen Modifikation des Gebietswasserhaushaltes im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches führt (vgl. Kapitel 3.5.2 und Kapitel 2.3.2.2).

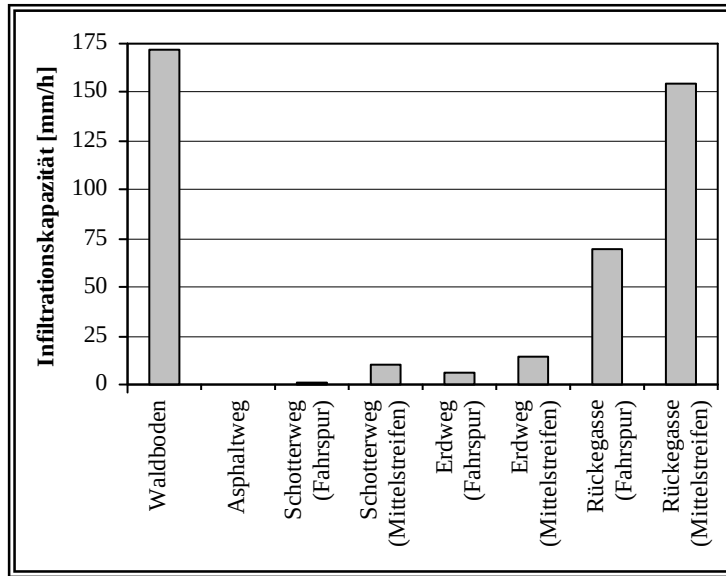


Abb. 3-23 Infiltrationskapazität unterschiedlicher Standorte am Modellhang Hölzerkopf (vgl. Giek 2001).

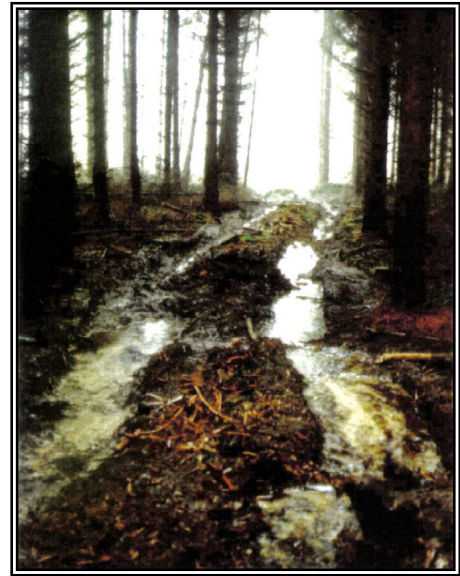


Bild 3-7 Fahrspuren mit Abfluss am Modellhang Hölzerkopf (Foto: W. Bott).

3.4 Regionalklima

Der am südlichen Rand des Linksrheinischen Schiefergebirges gelegene Soonwald, der sich vertikal von ca. 300 m NN bis 657 m NN erstreckt, zeichnet sich insgesamt durch ein ozeanisch geprägtes, gemäßigtes Mittelgebirgsklima aus. Bei vorherrschend atlantischen Großwettertypen Südwest bis Nordwest (Hendl 1995), die überwiegend mit zyklonalen Aktivitäten verbunden sind, ist die jährliche Niederschlagshöhe des Soonwaldes infolge der Kulissenwirkung von Eifel, Hohem Venn, Ardennen, Hochwald und Idarwald auf eher niedrigem Niveau angesiedelt. Zum Vergleich können folgende langjährige, jährliche Niederschlagswerte herangezogen werden (Datenbasis: DWD 2005 und Müller 1996):

- Soonwald (Simmern-Wahlbach, 436 m NN, Datenbasis 1961 bis 1990): 690 mm
- Soonwald (Ellern-Forsthaus Thiergarten, 567 m NN, Datenbasis 1961 bis 1990): 788 mm
- Westliche Hocheifel (Schneifel-forsthaus, 657 m NN, Datenbasis 1961 bis 1990): 1147 mm
- Hohes Venn (Botrange-Robertville, 694 m NN, Datenbasis 1931 bis 1960): 1510 mm
- Hochwald (Deuselbach, 480 m NN, Datenbasis 1961 bis 1990): 814 mm

Innerhalb des Soonwaldes bestehen bezüglich der klimatischen Gegebenheiten deutliche Unterschiede zwischen den tief gelegenen Randgebieten (300 m NN) und den zentralen Hochlagen (bis 657 m NN). Wie die Übersicht in Tabelle 3-3 verdeutlicht, weisen die tiefer gelegenen Randbereiche, die bis in Höhenlagen von 300 m NN herabreichen, im langjährigen Mittel eine Jahresniederschlagshöhe von ca. 600 bis 650 mm und eine Jahresmitteltemperatur von 8 °C auf (Brose et al. 1957). Die durchschnittliche Temperatur während der forstlichen Wuchszeit von 01.05. bis 30.09. (tvS) beträgt in diesem Bereich ca. 14,7 °C, so dass die Untergrenze des Soonwaldes noch der kollinen Höhenstufe zuzurechnen ist. In den mittleren

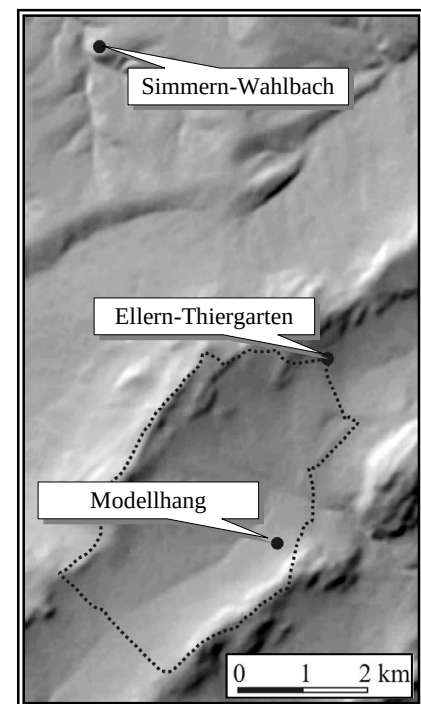
Höhenlagen des Soonwaldes (ca. 500 m NN) liegt die langjährige Jahresmitteltemperatur bei ca. 6,7 °C, während sich die durchschnittliche Jahresniederschlagshöhe zwischen 700 und 750 mm bewegt. Die mittlere Temperatur während der forstlichen Wuchszeit beträgt 13,5 °C. Die Mittellagen des Soonwaldes sind somit als submontan zu bezeichnen. In den Hochlagen des Gebietes, die bis 657 m NN reichen (Ellerspring), finden sich dagegen langjährige Niederschlagshöhen von ca. 800 bis 850 mm und Jahresmitteltemperaturen von durchschnittlich ca. 5,7 °C. Mit einer mittleren Temperatur von 12,5 °C während der forstlichen Wuchszeit liegen die Hochlagen des Gebietes bereits in der montanen Höhenstufe.

Tabelle 3-3 Langjährige Klimawerte für den Soonwald (nach Brose et al. 1957, Leibnitz-Institut für Länderkunde 2003b und MUF RLP 1994).

	Tieflagen Soonwald	Mittellagen Soonwald	Hochlagen Soonwald
Höhenlage	300 m NN	500 m NN	657 m NN
Jahresniederschlag	600–650 mm	700–750 mm	800–850 mm
Jahresmitteltemperatur	8,0 °C	6,7 °C	5,7 °C
Mittlere Temperatur während der forstlichen Wuchszeit (tvS)	14,7 °C	13,5 °C	12,5 °C

In einer Entfernung von 6 km zum Modellhang Hölzerkopf befindet sich die Beobachtungsstation Simmern-Wahlbach (436 m NN) des Deutschen Wetterdienstes und in 3,5 km Entfernung die Station Ellern-Forsthaus Thiergarten (567 m NN). In Letzterer werden ausschließlich Niederschlagsdaten erhoben. Darüber hinaus wurde am Modellhang eine eigene Beobachtungsstation aufgebaut, auf deren Daten im weiteren Verlauf der Untersuchungen zurückgegriffen wurde (vgl. Kapitel 4.6). Abbildung 3-24 zeigt die langjährige Verteilung der Monatsniederschläge und der Monatsmitteltemperaturen der Station Simmern-Wahlbach, Abbildung 3-25 stellt die langjährigen monatlichen Niederschlagshöhen der Station Ellern-Forsthaus Thiergarten dar.

Die langjährige Jahresmitteltemperatur der Station Simmern-Wahlbach ist bei 7,6 °C angesiedelt, die jährliche Niederschlagshöhe bei 690 mm. Im Jahresverlauf zeigt sich ein deutliches Niederschlagsmaximum im Sommerhalbjahr, mit einem monatlichen Maximalwert von 88 mm im August. Im Winterhalbjahr bildet der Dezember mit 59 mm den niederschlagsreichsten Monat. Der Niederschlagshöhe von 392 mm des Sommerhalbjahrs (April bis September) stehen insgesamt lediglich 298 mm im Winterhalbjahr (Oktober bis März) gegenüber. Nach Hendl (1995) kann diese Niederschlagsverteilung als Normaltyp des Mittelgebirgsraumes bezeichnet werden, der in erster Linie in den unteren Höhenlagen auftritt. Der wärmste Monat Juli besitzt ein langjähriges Temperaturmittel von 15,8 °C, der Januar als kältester Monat ein Mittel von –0,6 °C. Die Temperaturamplitude von 16,4 °C bei einer Höhenlage von 436 m NN deutet auf die ozeanische Prägung des Gebietes hin (vgl. MUF RLP 1994 und Leibnitz-Institut für Länderkunde 2003b).



Karte 3-8 Lage der Klimastationen Simmern-Wahlbach und Ellern-Thiergarten. (··· EZG Gräfenbach)

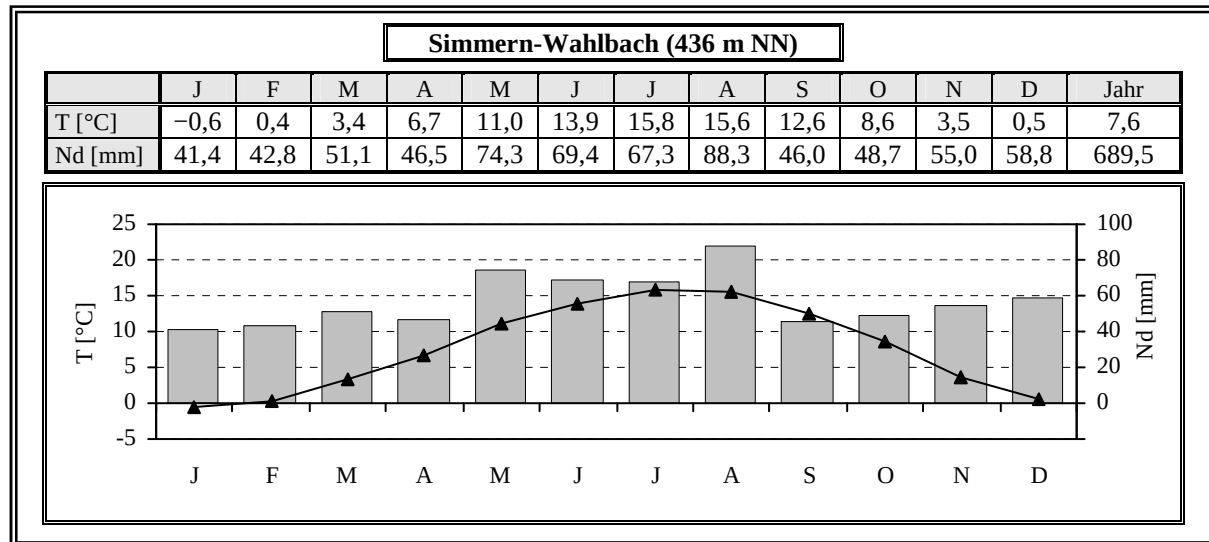


Abb. 3-24 Langjährige monatliche Niederschlagshöhen und Monatsmitteltemperaturen der Station Simmern-Wahlbach (1961 bis 1990; Datenquelle: DWD 2005).

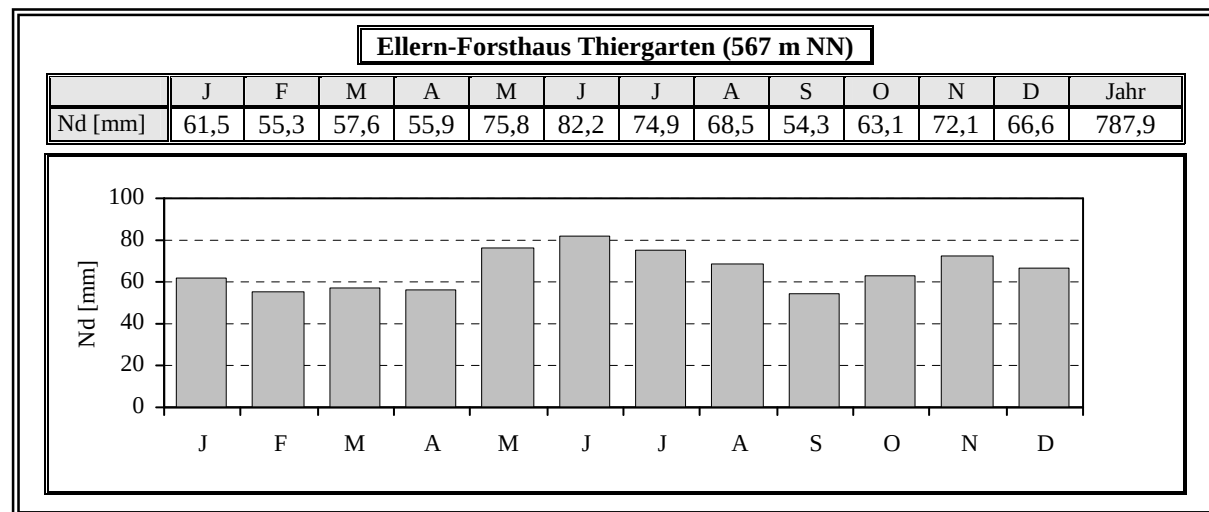


Abb. 3-25 Langjährige monatliche Niederschlagshöhen der Station Ellern-Forsthaus Thiergarten (1961 bis 1990; Datenquelle: DWD 2005).

Im Vergleich zur Station Simmern-Wahlbach verzeichnet die 131 m höher gelegene Station Ellern einen um durchschnittlich 98 mm erhöhten Jahresniederschlag. Am niederschlagsreichsten ist der Juli mit 82 mm, wobei gegenüber der Station Simmern-Wahlbach in erster Linie die Niederschlagswerte im Winterhalbjahr deutlich erhöht sind. Ein sekundäres, winterliches Maximum ist im November mit einer Monatsniederschlagshöhe von 55 mm ausgebildet. Insgesamt stehen in der Station Ellern-Thiergarten 412 mm Niederschlag im Sommerhalbjahr 376 mm Niederschlag im Winterhalbjahr gegenüber. Das Verhältnis ist im Vergleich zur Station Simmern-Wahlbach ausgeglichener. Nach Hendl (1995) kann diese Niederschlagsverteilung als Übergang zum Höhentyp des Niederschlagsjahresganges angesehen werden, der durch eine Jahresdoppelwelle und eine Abnahme des Quotienten aus Sommer- und Winterniederschlägen gekennzeichnet ist. Abbildung 3-26 zeigt Mittel, Minimum, Maximum und Standardabweichung der Niederschläge der Station Ellern auf Monatsbasis für die Jahre 1986 bis 1999. Die Maxima im 14-jährigen Bemessungszeitraum finden sich im Juni mit 169 mm, im Januar mit 163 mm und im Dezember mit 152 mm. Der Monat Juni stellt mit einer Standardabweichung im 14-jährigen Bezugszeitraum von 43 mm bei einem Niederschlagsmittel von 70 mm den Monat mit der höchsten Niederschlagsvariabilität dar (Variationskoeffizient = 34 %).

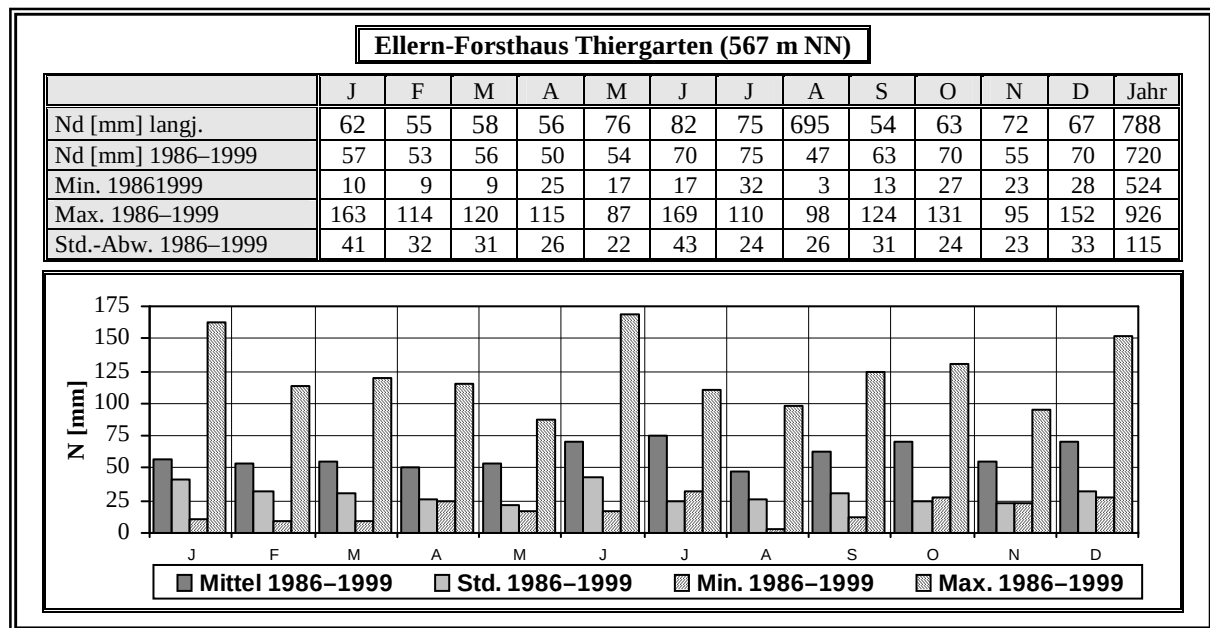


Abb. 3-26 Charakteristische Kennzahlen zur monatlichen Niederschlagsverteilung in den Jahren 1986 bis 1999 für die Station Ellern-Forsthaus Thiergarten (Datenquelle: DWD).

Tabelle 3-4 stellt die täglichen Niederschlagsmaxima sowie die Anzahl der Tage mit $N_d \geq 0,1$ mm, $N_d \geq 1$ mm und $N_d \geq 10$ mm für die Station Ellern-Forsthaus Thiergarten von 1986 bis 1999 dar. Die Tage mit maximalen Niederschlägen liegen in 11 von 14 Jahren im Zeitraum Ende Mai bis Anfang September, d. h. dem Zeitraum ergiebiger Gewitterniederschläge (Hendl 1995). Das absolute Maximum wurde am 13.6.1997 mit 83 mm erfasst. Lediglich in den Jahren 1986 und 1996 fällt das Tagesmaximum in den Monat Oktober und 1995 in den Monat Januar. Diese typische Niederschlagsverteilung spiegelt sich auch in den Abflussganglinien des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches und des Modellhanges Hölzerkopf wider. Vor allem im Sommer der Jahre 1999 und 2000 führten hochintensive sommerliche Konvektionsniederschläge in den kleinräumigen Untersuchungsgebieten zu hohen Abflussscheiteln (vgl. Kapitel 6).

Tabelle 3-4 Tägliche Niederschlagsmaxima und Niederschlagsverteilung der Station Ellern (1986 bis 1999; Quelle: DWD).

Jahr	Tägliches Nd-Maximum		Tage mit $N_d \geq 0,1$ mm	Tage mit $N_d \geq 1$ mm	Tage mit $N_d \geq 10$ mm
	Ausprägung	Datum			
1986	31 mm	22.10.	179	140	25
1987	33 mm	13.07.	188	149	24
1988	49 mm	27.05.	195	140	24
1989	26 mm	07.09.	145	117	24
1990	32 mm	31.08.	165	127	21
1991	23 mm	13.07.	143	108	12
1992	41 mm	10.07.	168	124	15
1993	38 mm	30.07.	170	134	14
1994	39 mm	18.07.	166	125	10
1995	33 mm	22.01.	163	129	26
1996	27 mm	01.10.	154	115	14
1997	83 mm	13.06.	163	115	13
1998	20 mm	22.08.	182	120	11
1999	49 mm	06.07.	190	124	17

Nach Bauer (1962) ist die im Soonwald vorherrschende Windrichtung Südwest bis West (47 %), gefolgt von nordwestlichen bis nordöstlichen Winden (35 %), was zumindest z. T. auf der Leitwirkung des Landschaftsreliefs beruht. Dabei treten an 25 bis 30 Tagen pro Jahr Windstärken ≥ 8 auf, die v. a. in den flachwurzelnden Fichtenbeständen der staunassen Böden des Unterhangs zu erheblichen Windwurfschäden führen können (vgl. Kapitel 3.5.1). Die mittlere Schneedeckendauer des Soonwaldes bewegt sich, wiederum in Abhängigkeit von der Höhe, weitgehend zwischen 40 und 60 Tagen pro Jahr, nur in den äußersten Höhenlagen werden die genannten Werte z. T. überschritten (Rachner et al. 2000, Brose et al. 1957).

3.5 Landnutzung

3.5.1 Vegetation

Die Art der Vegetation beeinflusst zum einen durch die Interzeption, zum anderen durch ihre Auswirkung auf die Evapotranspiration in entscheidendem Maße den Wasserhaushalt eines Gebietes. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, führt das spezifische Interzeptionsvermögen der Vegetation nicht nur zu einer Herabsetzung des den Boden erreichenden Niederschlages, sondern auch zu einer zeitlichen Verzögerung des Auftreffens, so dass sich sowohl langfristig als auch kurzfristig Auswirkungen auf den Wasserhaushalt ergeben.

Folgende heutige potenzielle natürliche Vegetation (hpnV) ist im Bereich des Soonwaldes nach Bauer (1962) und MUF RLP (1994) zu erwarten:

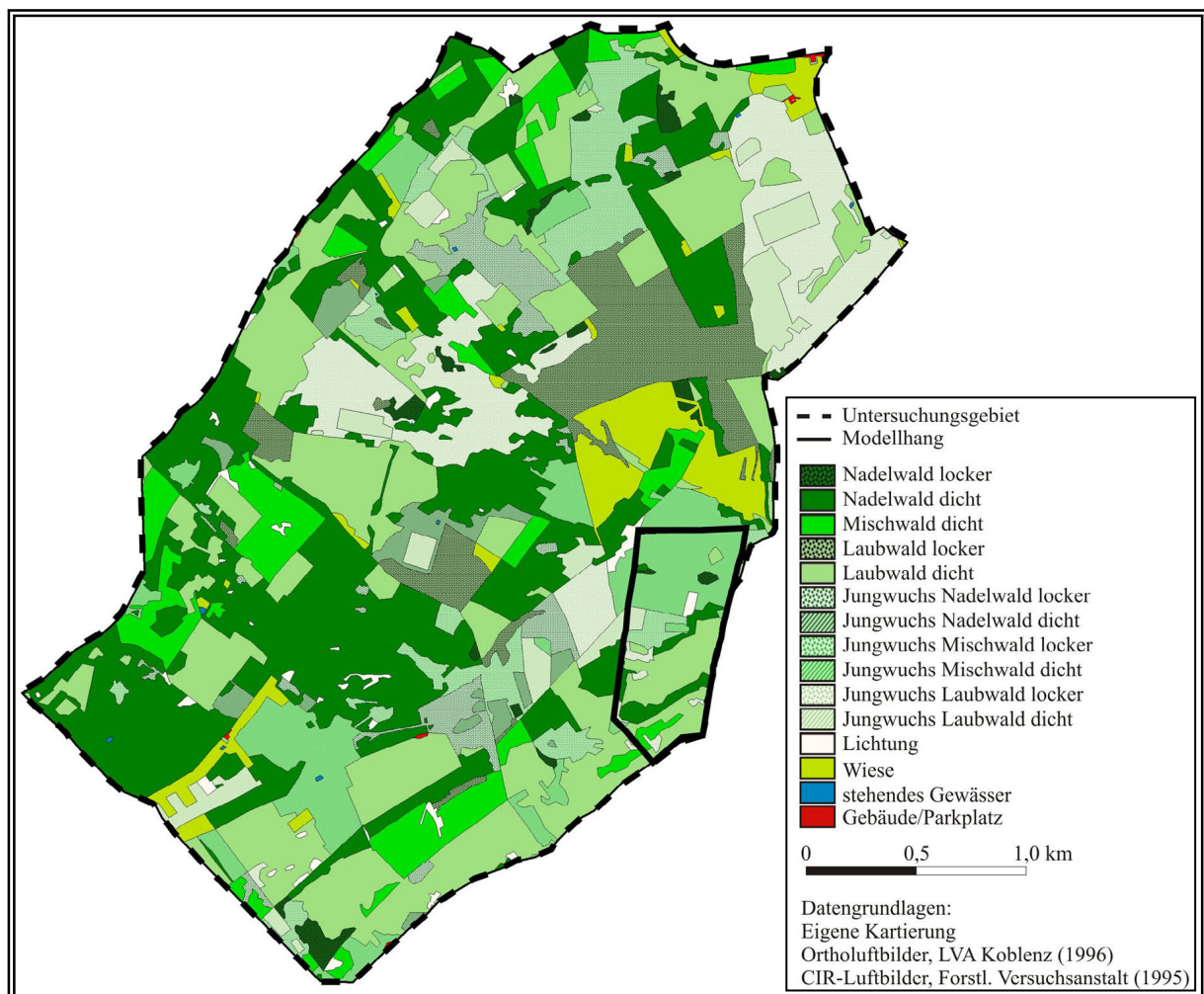
Tabelle 3-5 Heutige potenzielle natürliche Vegetation (hpnV) des Soonwaldes (nach Bauer 1962 und MUF RLP 1994).

Hangbereich	Standorteigenschaften	Heutige potenzielle natürliche Vegetation (hpnV)
Kamm und Oberhang	• basenarm • trocken	• Hainsimsen-Buchenwald • Hainsimsen-Eichenwald
Mittelhang	• vorwiegend basenarm • frisch bis feucht	• Hainsimsen-Buchenwald mit Rasenschmiele • Flattergras-Hainsimsen-Buchenwald mit Rasenschmiele
Mittelhang (Quellbereich)	• vorwiegend basenarm • feucht bis nass	• Birken-Stieleichenwald • Moorbirken-Schwarzerlen-Bruchwald (Hunsrückbrücher)
Unterhang	• vorwiegend basenarm • wechsellöss bis nass	• Schwarzerlen-Bruchwald • Moorbirken-Schwarzerlen-Bruchwald (Hunsrückbrücher)

Aufgrund der basenarmen Böden über den unterdevonischen Quarziten in den oberen Lagen und den sehr stark staunässebeeinflussten Böden in den unteren Lagen stellt der Soonwald ein fast ausschließlich forstwirtschaftlich genutztes Gebiet dar. Vor allem seit Ende des 18. Jahrhunderts wird die Forstwirtschaft in ihrer organisierten Form intensiv betrieben (Bauer 1962). Im Rahmen dieser erfolgte zu Beginn des 19. Jahrhunderts eine Umstellung von Mittel- auf Hochwaldbetrieb, wobei der Soonwald zudem verstärkt mit Fichten bestockt wurde. Deren Flächenanteil stieg bis in zweite Hälfte des 20. Jahrhundert an. Während der Fichtenanteil 1780 noch unter 1 % lag, waren 1952 45 % der Fläche des Soonwaldes mit Fichte bestanden (Bauer 1962). Fichten wurden dabei auch in den unteren, stark vernässten Hangbereichen angepflanzt, in denen sie lediglich flache Tellerwurzeln ausbilden und v. a. in Reinbeständen stark windwurfgefährdet sind, so dass sie in der Vergangenheit oftmals Sturm-

ereignissen zum Opfer gefallen sind. Der Orkan „Wiebke“ 1990 richtete im Soonwald erhebliche Schäden an. Dabei wurde vor allem der stark staunässebeeinflusste Unterhang großflächig entwaldet, wodurch der Fichtenanteil deutlich zurückging. Auf den damaligen Windwurfflächen wurden in der Folge weitgehend standortgerechtere Laubwälder begründet, Teile der Flächen wurden auch vorübergehend der natürlichen Sukzession überlassen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte keine umfassende Vegetationskartierung realisiert werden. Lediglich für den Modellhang Hölzerkopf wurde eine exakte Kartierung der forstlichen Bestände durchgeführt, wobei Baumarten, Bestandesalter und Deckungsgrad der Baumschicht erfasst wurden. Die Ergebnisse finden sich in Anhang VI und VII. Darüber hinaus wurden, aufbauend auf den in digitaler Form vorliegenden Ergebnissen einer Luftbildauswertung von Kiefl (2001), klassifizierte Landnutzungseinheiten für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches ausgewiesen, wobei manuell Objekte mit einer Mindestgröße von 400 m² erfasst wurden (vgl. Kiefl 2001). Eine Überprüfung der Zuordnung erfolgte stichprobenartig im Gelände (vgl. Kapitel 1.3.1.4). Zusätzlich zu den in Tabelle 3-6 und Karte 3-9 dargestellten Nutzungsklassen wurden öffentliche Wege und Forstwege abgegrenzt, deren Verbreitung in Kapitel 3.5.2 dargestellt ist.



Karte 3-9 Landnutzung im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (ohne Berücksichtigung linearer Elemente wie öffentlicher Straßen, Forstwege, Rückegassen und Fließgewässer) – „Jungwuchs“ = Jungwuchs und Dichtung.

Tabelle 3-6 Flächenanteile der unterschiedlichen Landnutzungsformen im Gesamteinzugsgebiet und am Modellhang (ohne Berücksichtigung öffentlicher Straßen, Forstwege, Rückegassen und Fließgewässer).

Klasse	EZG Oberer Gräfenbach		Modellhang Hölzerkopf	
	Fläche [m²]	Anteil [%]	Fläche [m²]	Anteil [%]
Nadelwald locker	141382	1,11	7754	1,40
Nadelwald dicht	3431144	26,95	67226	12,12
Mischwald dicht	854819	6,71	14732	2,66
Laubwald locker	872143	6,85	0,00	0,00
Laubwald dicht	3030297	23,80	185050	33,36
Jungwuchs Nadelwald locker	381460	3,00	0,00	0,00
Jungwuchs Nadelwald dicht	231779	1,82	0,00	0,00
Jungwuchs Mischwald locker	636795	5,00	35602	6,42
Jungwuchs Mischwald dicht	896307	7,04	205906	37,11
Jungwuchs Laubwald locker	1121467	8,81	17309	3,12
Jungwuchs Laubwald dicht	443981	3,49	14460	2,61
Lichtung	103503	0,81	6742	1,22
Wiese	572492	4,50	0,00	0,00
stehendes Gewässer	5141	0,04	0,00	0,00
Gebäude und Parkplatz	8008	0,06	0,00	0,00

Wie in Karte 3-9 und in Anhang VI zu erkennen ist, zeigen sowohl das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches als auch der Modellhang Hölzerkopf die oben skizzierten Auswirkungen von Orkan „Wiebke“ 1990. Vor allem in den Unterhangbereichen sind heute vorwiegend Jungwuchs und Dickung vorzufinden, da die zuvor angesiedelten flachwurzelnenden Fichtenbestände dem Windwurf zum Opfer gefallen sind. Wie die detailliertere Aufnahme der Bestände des Modellhanges Hölzerkopf in Anhang VI verdeutlicht, herrschen im Kammbereich Buchen und am Ober- und Mittelhang Buchen und Fichten vor. In den unteren Hangbereichen dominiert, ausgenommen weniger Reste von Fichtenaltbeständen, der Jungwuchs. Im Jungwuchs sind vor allem Birken und Erlen in hohem Maße vertreten, aber auch forstlich angebaute Fichten sind wiederum, jedoch nur in untergeordnetem Maße in Reinkultur, anzutreffen. Aufschluss über die Landnutzung im gesamten Einzugsgebiet geben Karte 3-9 und Tabelle 3-6. Es wird deutlich, dass der Anteil der Nutzungsklasse „Jungwuchs“ im gesamten Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches mit ca. 29 % deutlich geringer ist als am Modellhang Hölzerkopf, wo der Flächenanteil ca. 49 % beträgt. Der Anteil an Nadelalterswald ist am Modellhang mit 13,5 % demgegenüber deutlich geringer als im gesamten Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches, in dem der Anteil 28 % beträgt.

Nördlich des Modellhanges befindet sich das Naturschutzgebiet Glashütter Wiesen (Karte 3-9 und Bild 3-8). Auf dem 1984 unter Naturschutz gestellten Areal entstand bereits 1707 erstmals eine Glashütte. Diese und ihre etwas nördlich (nahe dem Forsthaus-Thiergarten) gelegene Vorgängerin brauchten innerhalb von ca. 30 Jahren 525 Morgen Wald für Pottascheherstellung und Glashüttenbrand auf, wodurch ein so starker Holzbedarf entstand, dass die bis dahin bereits mehrfach unterbrochene Glasproduktion 1720 ganz eingestellt werden musste (Oesau & Merz 1988). Das gerodete Gebiet wurde in Wiesen und Viehweiden umgewandelt, von denen heute 64,83 ha das ausgewiesene Naturschutzgebiet darstellen (MUF RLP 2005b).



Bild 3-8 Blick über die Glashütter Wiesen Richtung Modellhang Hölzerkopf während eines Hochwasserereignisses.



Bild 3-9 Jungwuchs am Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf (1999).

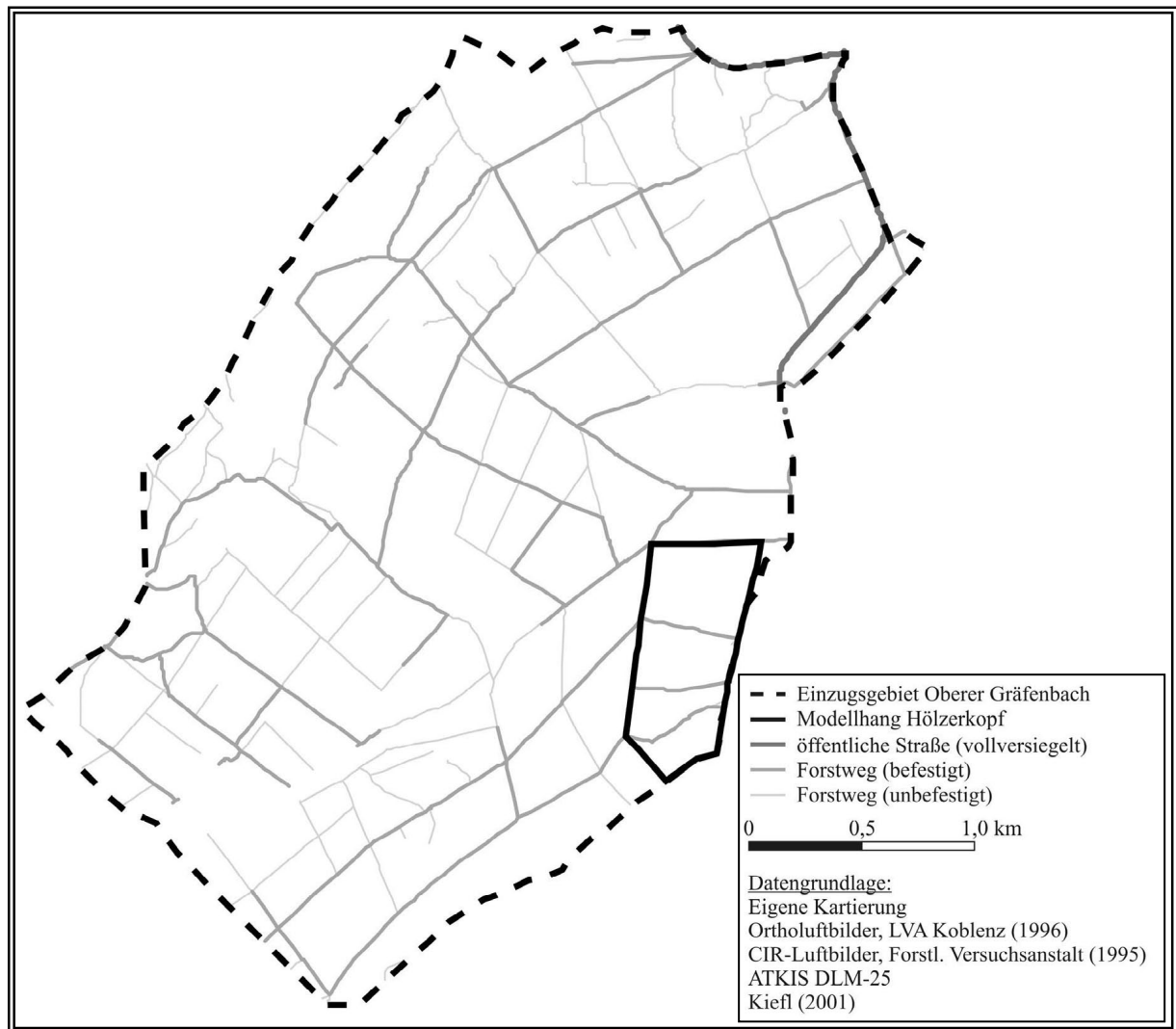


Bild 3-10 Fichtenaltbestand am Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf.

3.5.2 Wegenetz

Das Untersuchungsgebiet ist von einem vergleichsweise dichten Wegenetz durchzogen. Dessen Aufnahme erfolgte, wie in Kapitel 1.3.2 dargelegt, anhand eigener Kartierungen, ATKIS-Daten und auf Basis von Untersuchungsergebnissen von Kiefl (2001). Es wurde eine Klassifizierung in drei Kategorien durchgeführt: öffentliche Straßen (vollversiegelt), Forstwege (befestigt) und Forstwege (unbefestigt). Eine weitergehende Untergliederung befestigter Forstwege nach ihrer Bauart erfolgte nicht.

Karte 3-10 zeigt das Wegenetz im Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach, Abbildung 3-27 und Abbildung 3-28 geben einen Überblick über die Dichte der verschiedenen Wegekategorien in Einzugsgebiet und Modellhangbereich. Für das Gesamtgebiet ergibt sich eine Dichte des Wegenetzes von 55,6 lfdm/ha, wovon 2,3 lfdm/ha auf öffentliche Straßen, 28,5 lfdm/ha auf befestigte Forstwege und 24,8 lfdm/ha auf unbefestigte Forstwege entfallen. Im Bereich des Modellhanges ist die Wegenetzdichte mit 47 lfdm/ha dagegen deutlich geringer. Hier entfallen 44,9 lfdm/ha auf befestigte Forstwege und 2,1 lfdm/ha auf unbefestigte Forstwege. Öffentliche Straßen existieren in diesem Bereich nicht. Im Vergleich zur durchschnittlichen Dichte der Fahrwege in öffentlichen Wäldern in Rheinland-Pfalz, die bei ca. 55,7 lfdm/ha liegt (BMELV 2006), ist das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches somit durchschnittlich erschlossen.



Karte 3-10 Wegenetz im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

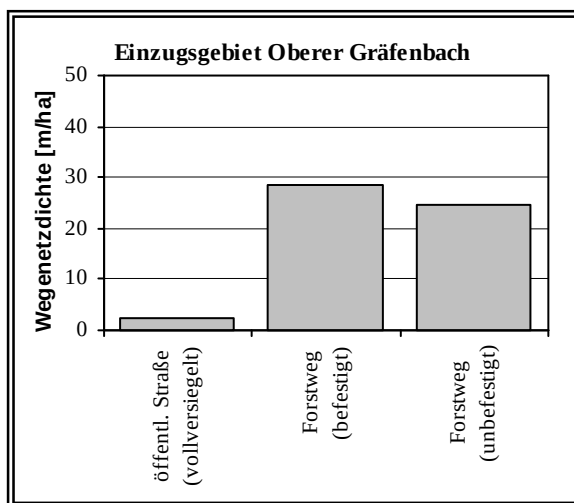


Abb. 3-27 Flächenanteile der Wegekategorien im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

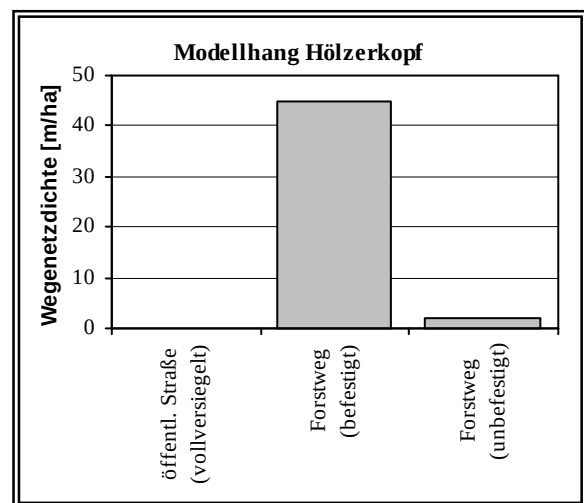


Abb. 3-28 Flächenanteile der Wegekategorien im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.

Eine Kartierung der Rückegassen wurde in der Untersuchung nicht durchgeführt, anhand der Angaben des Forstamtes Neupfalz konnte jedoch deren mittlere Dichte im Gebiet ermittelt werden. Demnach sind im Forstrevier Reichenbach in Nadelwaldbeständen alle 20 m Rückegassen angelegt, in Laubwaldbeständen alle 50 m.⁶ Dies deckt sich mit den typischen Kennzahlen, die in der Literatur zu finden sind (vgl. DVWK 1999b, LFV BW 2003, Odenthal-Kahabka 2005, Rittershofer 1999). Bei den gegebenen Flächenanteilen ergibt sich für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches eine Dichte der Rückegassen von ca. 240 lfdm/ha, für den Modellhang Hölzerkopf von ca. 190 lfdm/ha.

3.5.3 Gewässernetz

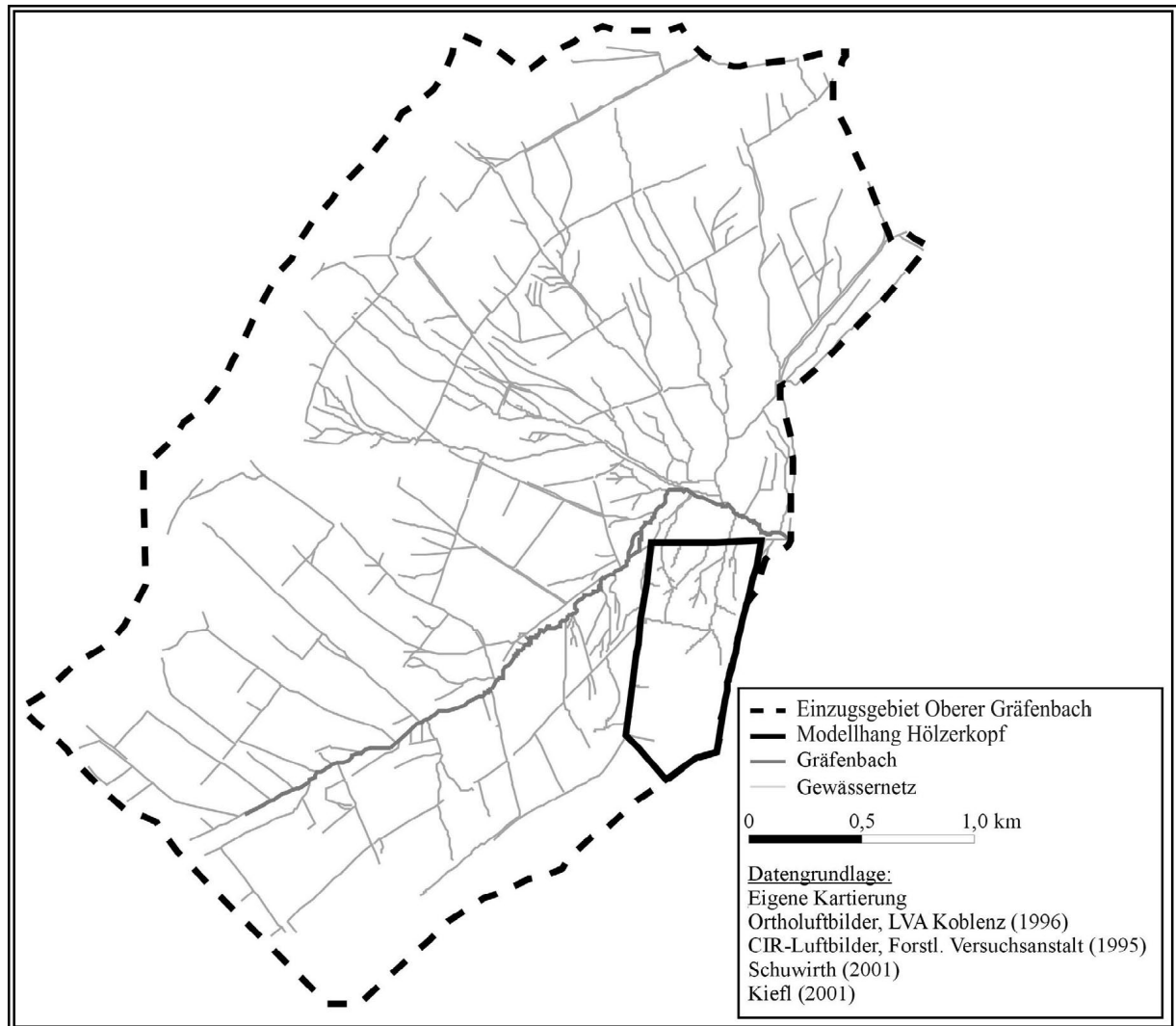
Das Untersuchungsgebiet wird zusätzlich zu den natürlichen Fließgewässern von einem sehr dichten, anthropogen angelegten Grabensystem zur Entwässerung durchzogen, das in erster Linie den Vernässungstendenzen der unteren Hangbereiche entgegenwirken soll. Ein solches Grabensystem existiert im gesamten Soonwald und wurde bereits ab 1786 angelegt (Bauer 1962). So führte Forstkommissar Kling 1790 vor der Pfälzischen Akademie der Wissenschaften über die Entwässerungsarbeiten im Soonwald aus: „Leichter als im Kaiserslauterer Reichswald war die Trockenlegung im Soonwald, weil es meist an dem erforderlichen Gefälle nicht fehlte. Mehr als 30.000 Ruthen (rd. 136.000 m) an Gräben sind im Soonwald schon gezogen. Und wenn noch einige tausend Ruthen werden aufgeworfen sein, so ist diese Verbesserung vollendet“ (J.P. Kling 1790, zitiert nach Bauer 1962). In der Folgezeit wurde der Ausbau des Grabensystems weiter vorangetrieben, wobei das Drainagenetz im Zuständigkeitsbereich des Forstamtes Neupfalz (heute: Forstamt Soonwald), der auch den Modellhang einschließt, ab 1808 entstand. Erst ab 1871 kam Kritik an den z. T. übertriebenen Entwässerungsmaßnahmen auf und von 1898 bis 1910 folgte eine „Entwässerungspause“. Nach 1910 wurden die Gräben in eingeschränktem Maße – vor allem in stark vernässten Gebieten mit windwurfgefährdeten Fichtenbeständen – wieder erneuert (Bauer 1962). Erst seit Mitte der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts wird im Bereich des Untersuchungsgebietes von einer intensiven Pflege der Gräben in den oberen Hangbereichen abgesehen.⁷

Die Aufnahme des Gewässernetzes erfolgte anhand von ATKIS-Daten, eigenen Kartierungen sowie den Kartierungen von Schuwirth (2001) und Kiefl (2001). Karte 3-11 zeigt das Gewässernetz des Einzugsgebietes, Abbildung 3-29 speziell das fast vollständig anthropogen angelegte Grabensystem des Modellhanges. Insgesamt ergibt sich eine Dichte des Gewässernetzes von 79 lfdm/ha im Gesamtgebiet und 99 lfdm/ha am Modellhang. Es wird deutlich, dass in den stark vernässten unteren Hangbereichen die Grabendichte im Vergleich zu Mittel- und Oberhang wesentlich höher ist (vgl. Kapitel 3.6). Die Gräben sind dabei ca. 0,5 m bis 1,5 m tief in den Untergrund eingeschnitten, so dass sie vor allem in den unteren Hangbereichen den dort vorhandenen Stauhorizont aufschließen. Durch die hohe Dichte des Grabennetzes ergibt sich, dass laterale Abflusskomponenten, die an Mittel- und Oberhang v. a. Interflow und am Unterhang zum größeren Teil Oberflächenabfluss umfassen, vergleichsweise schnell dem Grabensystem und in der Folge dem Gräfenbach zugeführt werden, und so als Gerinneabfluss aus dem Untersuchungsgebiet abgehen. Vor allem der Graben im Norden des Modellhanges erreicht eine Tiefe bis zu 1,5 Metern und schließt den Stauhorizont komplett auf, so dass in diesen am tiefsten gelegenen Bereichen des Modellhanges der

⁶ Mündliche Mitteilung, Forstamt Neupfalz (Daten auf Basis einer Erhebung von 1989).

⁷ Mündliche Mitteilung, Herr Raschdorf – Forstrevier Reichenbach.

gesamte Interflow in das Grabensystem entwässert. Aus messtechnischer Sicht ergibt sich daraus, wie in Kapitel 4 nochmals verdeutlicht wird, dass weitgehend der gesamte oberirdische Abfluss aus dem Modellhang Hölzerkopf zum Vorfluter Gräfenbach im Grabensystem erfassbar wird. Die Auswirkungen auf die Dynamik der hydrologischen Prozesse werden im folgenden Kapitel 3.6 dargelegt.



Karte 3-11 Gewässernetz im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

Abbildung 3-29 verdeutlicht die Fließwege im Grabensystem des Modellhanges Hölzerkopf anhand einer Systemskizze. Die aufgezeigte Fließsystematik im Grabennetz ist von grundlegender Bedeutung für die spätere Interpretation der erhobenen Abflussreihen. Es wird deutlich, dass insgesamt drei Gebietsabflüsse aus dem Modellhang zum Gräfenbach existieren, die jeweils klar definierbare „Zuflussgräben“ aufweisen. Lediglich für Gebietsabfluss 3 existiert bei starken Abflussereignissen ein „Überlauf“ Richtung Gebietsabfluss 2.

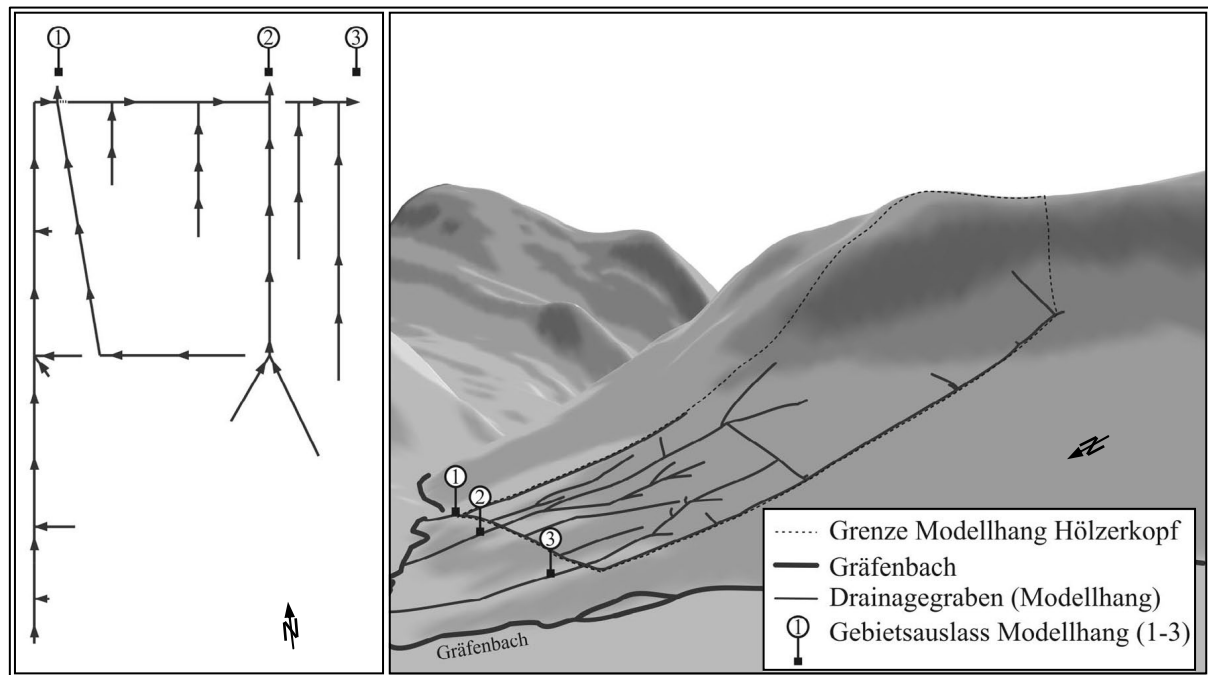


Abb. 3-29 Grabennetz des Modellhangs Hölzerkopf. a) Systemskizze der Abflüsse b) Grabennetz im Geländemodell



Bild 3-11 Graben am Oberhang des Modellhangs während eines Niederschlagsereignisses.



Bild 3-12 Graben entlang des unteren Querweges des Modellhangs (nördliche Modellhanggrenze).

3.6 Modellvorstellung zur Hydrologie des Untersuchungsgebietes

Das folgende Kapitel gibt einen zusammenfassenden Überblick über die zuvor beschriebenen physiogeographischen Gebietseigenschaften und die daraus resultierenden, grundlegenden hydrologischen Eigenschaften des Gebietes.

Abbildung 3-30 zeigt zunächst die physiogeographische Ausstattung des Untersuchungsgebietes anhand eines schematischen Schnittes durch den Modellhang. Hierbei sind Geologie (der Saprolith des Ausgangsgesteins ist nicht eingezeichnet), Bodentypen und Vegetation berücksichtigt. Es wird deutlich, dass am Kamm und Oberhang Lockerbraunerden vorherrschen, die auf den periglazialen Decken über dem Taunusquarzit entwickelt sind. In den höheren Lagen finden sich vorwiegend Buchen-, in den unteren Lagen auch Fichtenaltbestände. Im Bereich des Mittelhanges schließen sich Pseudogley-Braunerden und Braunerde-Pseudogleye an, die auf den periglazialen Lagen der Übergangsschichten von oberem Taunusquarzit zum Hunsrückschiefer ausgebildet sind. Der Baumbestand umfasst in diesem Hangabschnitt vorwiegend Buchenaltbestände, im unteren Teil sind auch Fichtenaltbestände anzutreffen. Am Unterhang herrschen Pseudogleye vor, die auf den periglazialen Lagen über den Tonschiefern des Unterdevons (Hunsrückschiefer) ausgebildet sind. Zwischen Taunusquarzit und Übergangsschichten im Süden des Modellhanges und den Hunsrückschiefern im Norden des Gebietes verläuft eine Störung (vgl. Kapitel 3.2.2). Bezüglich der forstlichen Bestände finden sich am Unterhang primär Jungwuchs und Dickung, wobei vor allem Birken und Erlen in den Vordergrund treten. Nur vereinzelt sind Überreste alter Fichtenbestände vorhanden.

Darüber hinaus verdeutlicht Abbildung 3-30, dass die räumliche Verbreitung der Bodentypen nicht mit den Grenzen des geologischen Untergrundes deckungsgleich ist, sondern eine talwärts gerichtete Grenzverschiebung auftritt, die durch den Aufbau der Böden auf den periglazialen Decken bedingt ist.

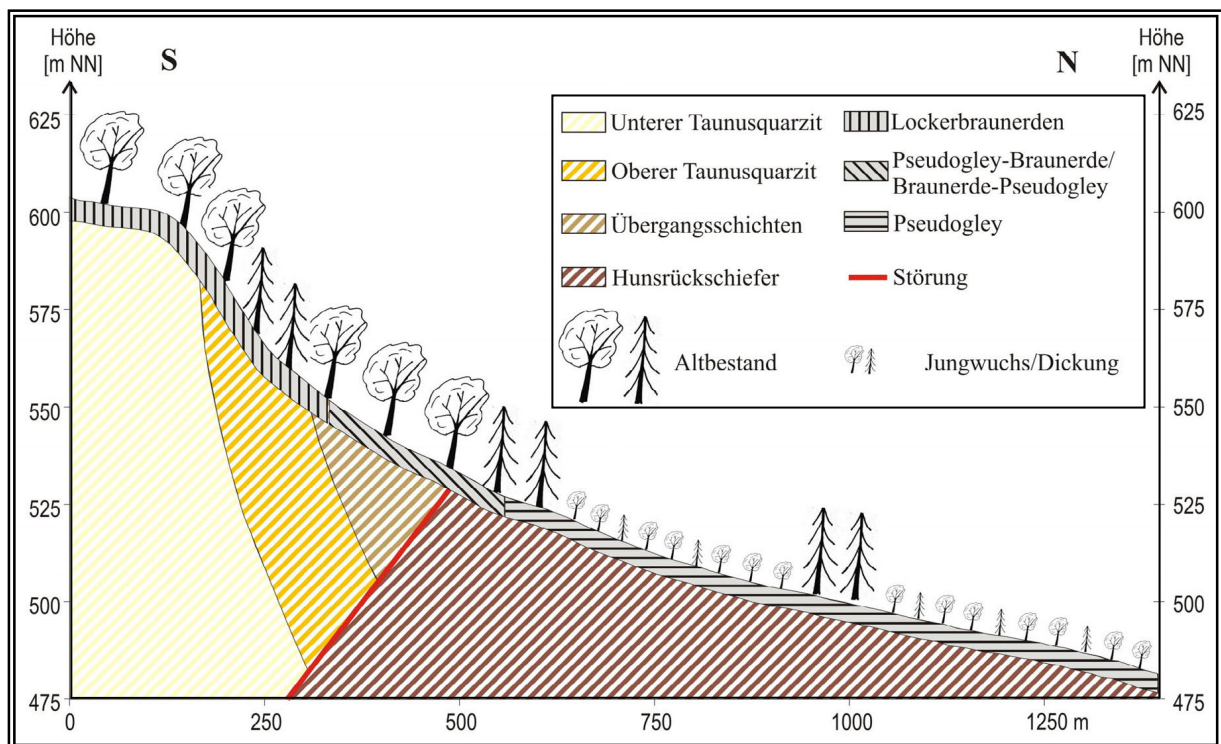


Abb. 3-30 Halbschematischer Schnitt durch den Modellhang Hölzerkopf (5-fach überhöht) mit Darstellung des geologischen Untergrundes, der Bodentypen und der forstlichen Bestände.

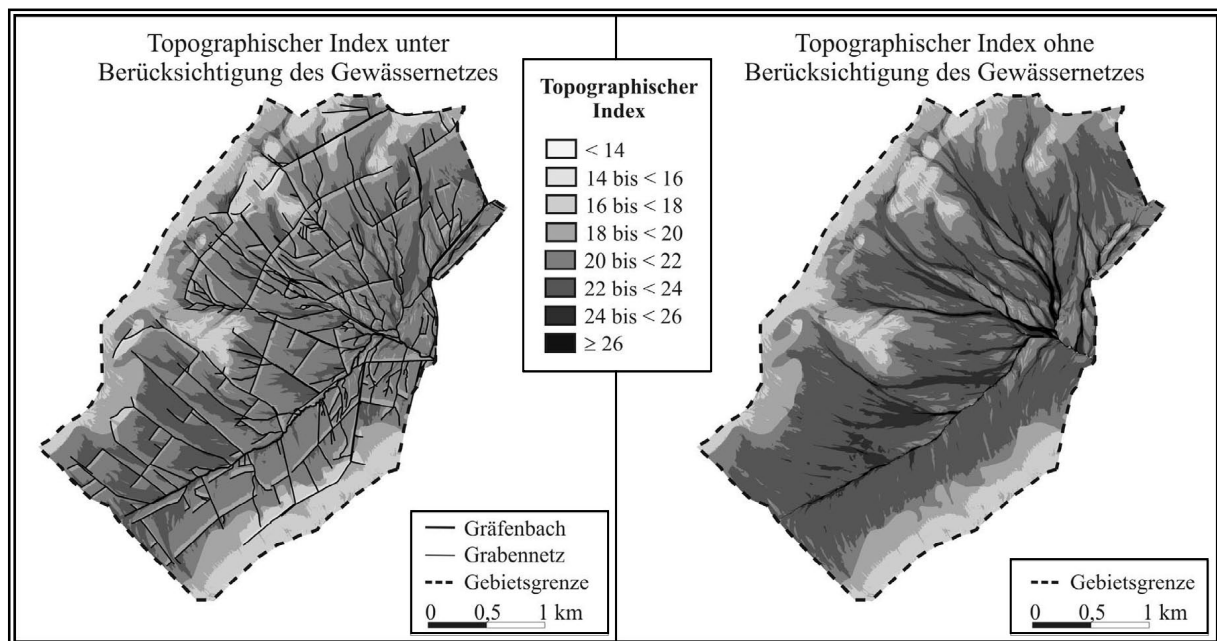
Von entscheidender Bedeutung für den Gebietswasserhaushalt und seine Prozessdynamik stellt sich das in Kapitel 3.5.3 vorgestellte, sehr dichte Gewässernetz dar, das zum Großteil aus anthropogen angelegten Drainagegräben besteht. Der Wasserhaushalt wird dabei in dreierlei Hinsicht modifiziert. Erstens ist der Anteil direkt abflusswirksamer Flächen deutlich erhöht, da direkt in das Grabensystem fallender Niederschlag unmittelbar zum Vorfluter weitergeleitet wird. Eine Aufrechnung in Kapitel 7 ergibt einen Flächenanteil des Gewässernetzes (einschließlich Gräfenbach) von 0,91 % im gesamten Einzugsgebiet und 0,99 % am Modellhang Hölzerkopf (vgl. Kapitel 7.3.3.2). Einen zweiten Aspekt der Abflussmodifikation durch das Grabennetz stellt die bereits in Kapitel 3.5.3 erläuterte Entwässerung hangaufwärts gelegener Areale in die Drainagegräben dar. Wie angesprochen führt die große Einschnitttiefe der Gräben, die in weiten Teilen des Gebietes bis zum Stauhorizont reicht, sowie deren teilweise höhenlinienparallele Anlage dazu, dass neben ggf. auftretendem Oberflächenabfluss auch der gesamte Interflow in Gerinneabfluss transformiert wird. Entsprechende Beobachtungen konnten im Gebiet gemacht werden. Die hohe Grabendichte bewirkt so eine enorme Abflussvariabilität, die mit ausgeprägten Abflussscheiteln einhergeht (vgl. Kapitel 6 und 7). Aufbauend auf dieser Feststellung folgt ein dritter Aspekt der Abflussmodifikation durch das Grabennetz. Durch das Auslaufen des an Mittel- und Oberhang gebildeten Interflows in das Grabensystem wird der laterale Wasserzufluss in die Unterhangbereiche eingeschränkt, wodurch die am Unterhang insgesamt sehr hohe Neigung zur Ausbildung von Sättigungsflächen leicht herabgesetzt wird. Einen Vergleich der potenziellen Sättigungsneigung im Ist-Zustand (mit Grabennetz) einerseits und einem Szenario ohne Drainagegräben andererseits zeigt Karte 3-12. Hier kommt in Anlehnung an Beven & Kirkby (1979) ein topographischer Index zum Einsatz, der die Neigung eines Areals zur Ausbildung von Sättigungsflächen verdeutlicht. Die Kennzahl, die in der angewandten Form auch im Modell WaSiM-ETH (mit TOPMODEL-Ansatz; Schulla & Jasper 1998) implementiert ist, berechnet sich auf Basis des spezifischen Einzugsgebietes einer Rasterzelle, der lokalen Hangneigung und der gesättigten Wasserleitfähigkeit der Böden:

$$c_s = \ln \frac{a_t}{T_0 \cdot \tan \beta_t}$$

(Gleichung 3-1)

- c_s = topographischer Index
 a_t = tributäre Fläche pro Längeneinheit einer Rasterzelle [m²/m]
 T_0 = Transmissivität am Standort [m²/s]
 (entspricht k_f über die Mächtigkeit h : $T = \int k_f dh$)
 β_t = lokale Hangneigung [°]

Je höher die Ausprägung der Kennzahl (c_s), desto größer ist die potenzielle Neigung zur Ausbildung von Sättigungsflächen. Karte 3-12 verdeutlicht die oben angesprochene Modifikation des Wasserhaushalts durch die Drainagegräben im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. Ohne das ausgedehnte Netz an Gräben (Karte 3-12b) nimmt der Index in den Tallagen deutlich höhere Werte an, da keine Begrenzung der tributären Flächen durch Grabeneinschnitte erfolgt. Im Ist-Zustand (Karte 3-12a) tritt demgegenüber die Absenkung der Indexwerte im „Schattenbereich“ der Gräben deutlich hervor. Letztlich folgt daraus jedoch auch, dass die Abführung der lateralen Abflusskomponenten Interflow und Oberflächenabfluss aus dem Einzugsgebiet infolge der raschen Entwässerung in die Gräben deutlich beschleunigt wird.



Karte 3-12 Topographischer Index (c_s) im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches; Rastergröße: $1\text{ m} \times 1\text{ m}$.
a) unter Berücksichtigung des Gewässernetzes b) ohne Berücksichtigung des Gewässernetzes
Die zugrunde liegende Abflussakkumulation wurde in ArcView unter Verwendung von Hydrotools 1.0 anhand des Multiple-Flow-Prinzips (Konzentrationszahl = 1) nach Quinn et al. (1991) berechnet.

Aufbauend auf der Kenntnis von Geologie, Böden und Vegetation sowie dem Verlauf des Grabensystems kann ein erstes gedankliches Modell zur Abflusentstehung im Untersuchungsgebiet skizziert werden (vgl. Abbildung 3-31).

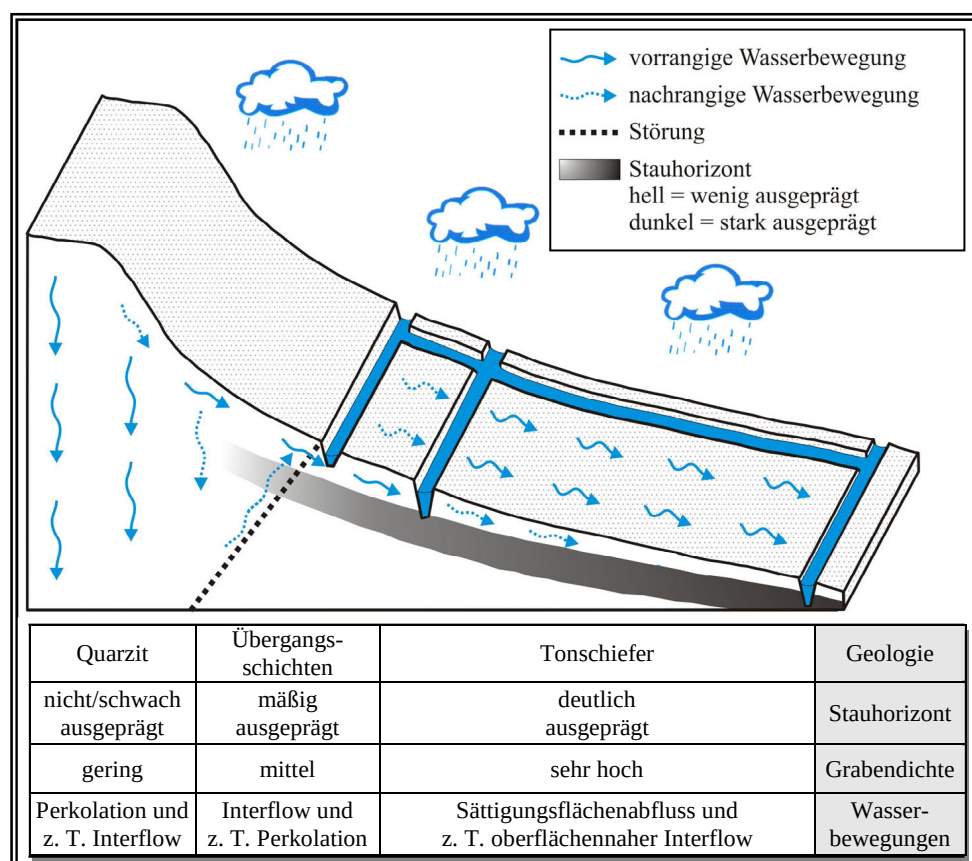


Abb. 3-31 Modell der Abflussbildung am Modellhang Hölzerkopf.

Im Allgemeinen ist in den oberen Hangbereichen kein deutlicher Stauhorizont ausgebildet, so dass lediglich im Bereich der Taunusquarzite eine Perkolation des eingehenden Wassers in tiefere Gesteinsschichten und somit eine Grundwasserneubildung im eigentlichen Sinne zu erwarten ist. Auch Martin (1980) weist darauf hin, dass der Hauptteil der Grundwasserneubildung auf die Zentralbereiche der Antiklinorien entfällt, wohingegen im Bereich der Synklinorien infolge der weiten Verbreitung mächtiger impermeabler Böden die Neubildungsraten erheblich reduziert sind. Diese Annahme wird auch durch die Beobachtungen im Untersuchungsgebiet bestätigt. Innerhalb des Modellhanges tritt das auf dem Kamm und am Oberhang gebildete Grundwasser in einem Quellbereich, der entlang der in Abbildung 3-30 und Abbildung 3-31 eingezeichneten Störungslinie verläuft, wieder an die Oberfläche (vgl. Bild 3-13).

Unterhalb der oberen Hangbereiche bildet sich zunehmend ein Stauhorizont aus, der sich talwärts deutlich der Geländeoberfläche annähert. Während der Stauhorizont im Bereich des oberen Mittelhanges dabei noch vergleichsweise schwach ausgeprägt ist, und somit noch geringe vertikale Zuflüsse zum Grundwasserspeicher zu erwarten sind, existiert, bedingt durch den deutlichen Stauhorizont in Kombination mit den Hunsrückschiefern im Untergrund, am Unterhang keine erwähnenswerte Grundwasserneubildung mehr. In gleichem Maße, wie die Perkulationsrate vom Kammbereich zum Mittelhang abnimmt, steigt der Anteil des Interflows an. Besonders an der Basis der Hauptlage, bei z. T. sehr hohem Skelettanteil, ist der Interflow deutlich ausgeprägt. Dieser kann an den Grabeneinschnitten beobachtet werden (vgl. Bild 3-14, 3-15 und 6-6). Hier finden sich auch schnelle Interflowbewegungen. Bedingt durch die flachgründigen Böden tritt an Unterhang und unterem Mittelhang massiver Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen auf, der in erster Linie auf die Ausbildung von Sättigungsflächen zurückzuführen ist (vgl. Karte 3-12 und Bild 3-16). In diesen Hangbereichen wurde auch ein Auftreten von „returnflow“ beobachtet. Wie die Ergebnisse der Geländeuntersuchungen zur Infiltrationskapazität der Böden (vgl. Kapitel 3.3.4) zeigen, spielt der Oberflächenabfluss im Sinne von Horton (1933) nur eine untergeordnete Rolle.

In Relation zu ihrer Flächenausdehnung tragen unbefestigte (vgl. Bild 3-18) und befestigte Forstwege (vgl. Bild 3-19) sowie Rückegassen (vgl. Bild 3-7) in noch ausgeprägterem Maße als die Unterhangflächen ganzjährig zur Bildung von Oberflächenabfluss bei. Dessen Entstehung beruht hier auf der starken Verdichtung der Fahrspuren bzw. auf der Versiegelung der Flächen und dem oftmals direkten Anschluss der Elemente an die Drainagegräben. Dabei kann auf den unbefestigten Wegen selbst bei sommerlicher Trockenheit, bedingt durch die enorme Verdichtung des Oberbodens, noch Staunässe ausgebildet sein (vgl. Bild 3-17). Bei Niederschlagsereignissen führt dies zur unmittelbaren Bildung von Oberflächenabfluss, der durch die angrenzenden Abflussgräben abgeführt wird, und somit zu einer enormen Verschärfung der Hochwasserabflüsse beiträgt (vgl. Bild 3-20).



Bild 3-13 Quellhorizont im Westen des Modellhanges (Bereich der Störungslinie).



Bild 3-14 Interflowaustritt aus dem Makroporensystem in das Grabensystem am mittleren Querweg des Modellhanges Hölzerkopf (Februar 2004).



Bild 3-15 Interflowaustritt in das Grabensystem nahe der Abflussmessstelle W20.



Bild 3-16 Oberflächlich anstehendes Stauwasser am Unterhang nach Niederschlagsperiode (Foto: B. Reinke).



Bild 3-17 Verdichtete Fahrspuren am mittleren Querweg des Modellhanges Hölzerkopf im Sommer 1999.



Bild 3-18 Oberflächenabfluss in den Fahrspuren eines unbefestigten Forstweges (mittlerer Querweg des Modellhanges Hölzerkopf) während eines Niederschlagsereignisses.



Bild 3-19 Oberflächenabfluss auf versiegeltem Forstweg an der Westgrenze des Modellhanges Hölzerkopf.



Bild 3-20 Direkte Ableitung von Oberflächenabfluss aus den Fahrspuren eines unbefestigten Forstweges (vgl. Bild 3-18) in das Grabensystem bei Pegel P7.



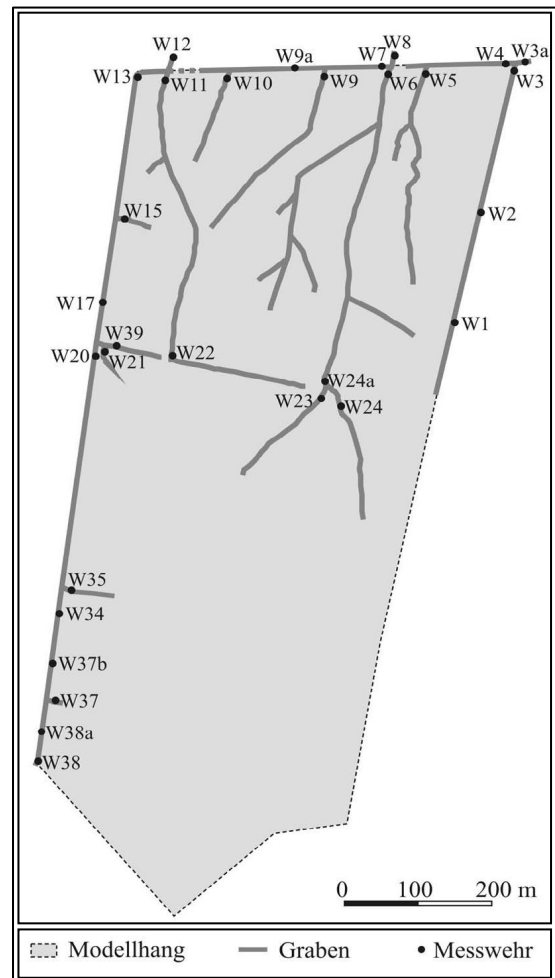
Bild 3-21 Infolge von Starkregen vollständig wassergefüllte Profilgrube C2 (Feb. 2002).

4 Aufnahme hydrologischer und meteorologischer Zeitreihen

4.1 Abflussmessungen im Grabennetz des Modellhanges Hölzerkopf

4.1.1 Messmethodik

Insgesamt wurden im Grabennetz des Modellhanges 30 Abflussmessstellen (W1–W39) zur Durchführung direkter volumetrischer Abflussmessungen (Gefäßmessung, „Auslitern“) errichtet. Karte 4-1 verdeutlicht die Lage der Messpunkte. Beim Bau der Anlagen wurde die Physiognomie des Grabensystems berücksichtigt, so dass an drei Stellen (W1, W2, W9a) bereits vorhandene Durchlaufrohre, die eine Sprungstelle darstellen, zur Datenerhebung genutzt werden konnten und weitere fünf Messstellen durch markante natürliche Sprungstellen im Grabenverlauf gebildet wurden (W10, W17, W21, W24, W38). An den übrigen Punkten wurden Messwehre errichtet, deren Überfall ebenfalls eine direkte Abflusserfassung mittels Gefäßmessung ermöglichte. Das Konstruktionsprinzip der Wehre ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Die Holzwehre wurden mit tonigem Substrat abgedichtet, das die Grabensohle ab ca. 1 m vor dem Wehr „versiegelte“. Über dieser Schicht lagerte zusätzlich eine mit einer Steinschicht beschwerte Folie. Insgesamt blieb so der am Wehr vorbeigehende, nicht erfassbare Abfluss minimal. Bilder 4-1 bis 4-3 zeigen verschiedene Messstellen.



Karte 4-1 Abflussmessstellen am Modellhang.

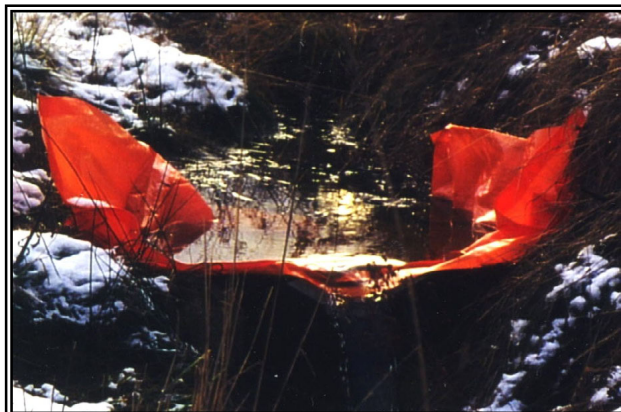


Bild 4-1 Messstelle W3 im Winter 1999/2000.

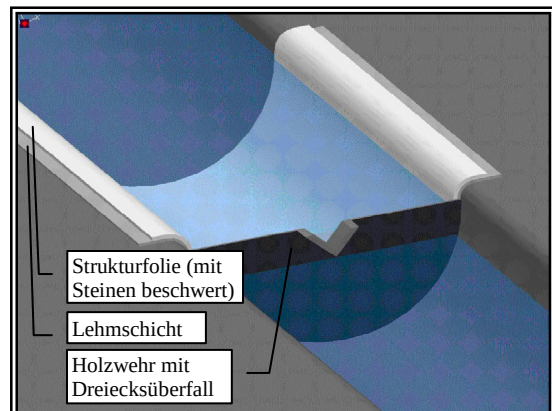


Abb. 4-1 Konstruktionsprinzip der Messwehre.



Bild 4-2 Abflussmessstelle W9a mit starker Eisbildung im Februar 2000.



Bild 4-3 Abflussmessstelle W24 an einer Sprungstelle im Grabenbett.

An den insgesamt 30 Abflussmessstellen wurden, wie bereits in Kapitel 1.3.2 dargelegt, in unterschiedlichen, von der Witterungssituation abhängigen Zeitintervallen volumetrische Abflussmessungen durchgeführt (insgesamt 156 Messgänge, im Mittel 1 Messgang/Woche). An jeder Messstelle wurden je drei Einzelmessungen mit möglichst großem zeitlichen Umfang durchgeführt, um den Effekt der Reaktionszeit zu minimieren. Zu diesem Zweck kamen, je nach aktuellem Abflussvolumen und spezifischer Anwendbarkeit an der Messstelle, alternativ Messgefäße mit einem Volumen von 100 l, 56 l, 20 l, 12 l und 1 l zum Einsatz. Wo die Form der Messstelle es erlaubte, wurde als Messdauer die Zeit bis zur vollständigen Füllung des Gefäßes gewählt, was jedoch aufgrund der Grabenmorphologie nicht immer möglich war. Aus den drei direkt aufeinander folgenden Einzelmessungen wurde als Messergebnis das arithmetische Mittel gebildet. Im Vergleich zu anderen Methoden der Abflussermittlung (vgl. hierzu Kapitel 4.2.1) birgt dieses direkte Messverfahren ein vergleichsweise geringes Fehlerpotenzial. Die Anwendungsmöglichkeit beschränkt sich jedoch in der Praxis auf Gewässer mit Durchflussmengen bis maximal ca. 50 l/s (Maniak 1997).

Probleme bei den Messungen ergaben sich dementsprechend in erster Linie bei sehr hohen Abflussmengen, hier vor allem an kleineren Wehren, deren Physiognomie keine Verwendung des 100 l-Messgefäßes ermöglichte. Da eine kurze Messdauer i. d. R. zu erhöhten Messfehlern führt, wurden in diesen Fällen 5 Einzelmessungen zur Berechnung des Mittelwertes herangezogen (vgl. Messprotokoll Anhang XV). Ein weiteres Problem ergab sich bei starken Frostperioden, infolge derer der Abfluss z. T. unter einer Eisdecke stattfand (vgl. Bild 4-2). Weiterhin führte der hohe zeitliche Aufwand für die Messgänge, bei denen alle Messgrößen im Gebiet erfasst und zusätzlich Wartungsarbeiten durchgeführt wurden, dazu, dass an weniger bedeutenden Messstellen teilweise auf eine Datenerhebung verzichtet werden musste.

4.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der insgesamt 156 Messgänge von März 1999 bis November 2003 finden sich in Anhang IX. Die Werte bildeten u. a. die Grundlage zur Erstellung der Wasserstands-Abfluss-Beziehungen (Abflusskurven) der Pegel im Modellhangbereich (vgl. Kapitel 5) und somit die Berechnungsgrundlage der Abflussganglinien, die u. a. als Basisdaten der Kalibrierung und Validierung des hydrologischen Modells PRMS dienten (vgl. Kapitel 7). Eine weitergehende Darstellung der Zeitreihen findet sich in Kapitel 6.

4.2 Abflussmessungen im Gräfenbach

4.2.1 Messmethodik

Der Gesamtabfluss aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches wurde im Bereich des elektronischen Pegels *P5* am Gebietsauslass ermittelt (vgl. Abbildung 1-4 und 4-9). Dabei kamen zwei unterschiedliche Verfahren zur Anwendung: Sommerliche Niedrigwasserabflüsse wurden, vergleichbar den Abflussmessungen am Modellhang, durch direkte volumetrische Messungen (Gefäßmessungen) an Sprungstellen im Flussbett ermittelt, wohingegen Abflüsse über ~5 l/s indirekt über Fließgeschwindigkeiten berechnet werden mussten. Die Geschwindigkeitsmessungen wurden im Januar und Februar 2004 durchgeführt, während die direkten Messungen sporadisch über den gesamten Untersuchungszeitraum verteilt erfolgten. Das Verfahren der direkten volumetrischen Messung wurde bereits in Kapitel 4.1.1 erläutert. An dieser Stelle wird daher ausschließlich das auf der Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten basierende, indirekte Verfahren der Abflussbestimmung näher vorgestellt.

Der Abfluss durch einen Gewässerquerschnitt kann als Produkt der durchflossenen Fläche und der mittleren Fließgeschwindigkeit berechnet werden, wobei sich die mittlere Geschwindigkeit v_m mathematisch aus der Integration der ortsunabhängigen Fließgeschwindigkeit über die Breite B und die Wassertiefe T ergibt:

$$v_m = \iint_{BT} v_{bt} \, dB \, dT$$

(Gleichung 4-1)

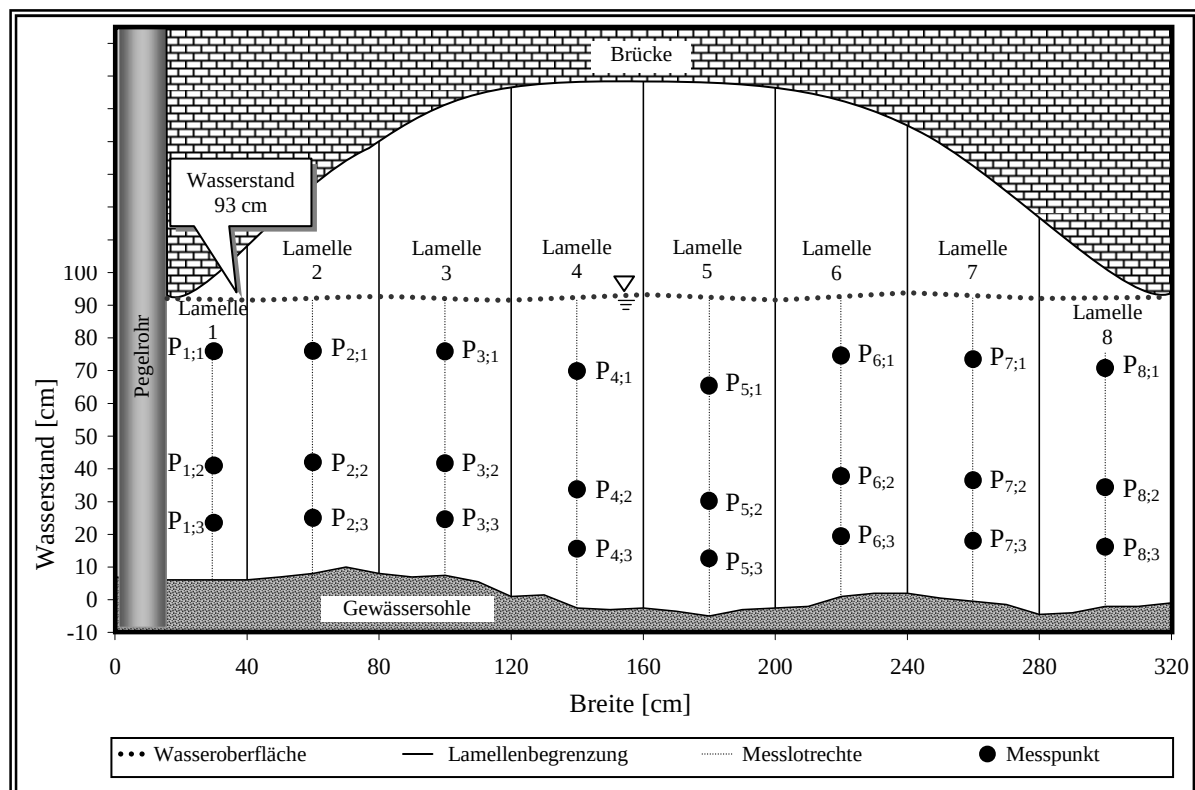


Abb. 4-2 Einteilung des Messquerschnitts (Gräfenbach im Bereich von Pegel *P5*) in 8 Lamellen und Lage der Messpunkte zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit (*P*) bei einem exemplarischen Wasserstand von 93 cm.

In der Praxis erfolgt die Erfassung der mittleren Fließgeschwindigkeit durch gewichtete Mittelung punktueller Geschwindigkeitsmessungen. Diese punktuellen Messungen wurden im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches mit Hilfe eines hydrometrischen Flügels durchgeführt (vgl. Abbildung 4-3 und Bild 4-4), wobei der Gewässerquerschnitt am Auslasspunkt des Einzugsgebietes in acht Lamellen unterteilt wurde. In jeder Lamelle erfolgte eine Geschwindigkeitsmessung nach der Drei-Punkt-Methode (BfG 1971), bei der in die Lamellenmitte eine Messlotrechte gelegt wird, in deren Bereich drei Geschwindigkeitsmessungen durchzuführen sind: in einer Höhe von $\frac{8}{10}$ (Messpunkt 1), $\frac{4}{10}$ (Messpunkt 2) und $\frac{2}{10}$ (Messpunkt 3) des Wasserstandes über der Gewässersohle (vgl. Abbildung 4-2 und Messprotokoll in Anhang XVI).

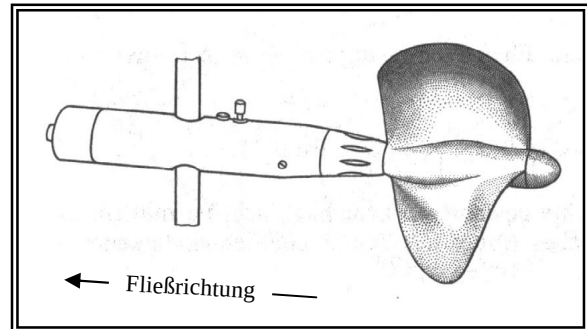


Abb. 4-3 Hydrometrischer Messflügel
(ergänzt nach Dyck & Peschke 1995).

Für jede Lamelle L_i ergibt sich eine mittlere Abflussgeschwindigkeit $\bar{v}_i$ [m/s] nach:

$$\bar{v}_i = \frac{(v_{i;1} + v_{i;2} + v_{i;3})}{3} \quad [\text{m/s}]$$

Der Durchfluss Q_i [m³/s] jeder Lamelle L_i ergibt sich aus dem Produkt des Durchflussquerschnittes A_i [m²] und der mittleren Abflussgeschwindigkeit $\bar{v}_i$ [m/s]:

$$Q_i = A_i \cdot \bar{v}_i \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Der Gesamtabfluss durch den Messquerschnitt Q_{gesamt} [m³/s] ergibt sich durch Aufsummierung der Lamellendurchflüsse Q_i :

$$Q_{\text{gesamt}} = \sum_{i=1}^m Q_i \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$



Bild 4-4 Messung mit dem hydrometrischen Flügel an Messpunkt P5 (Gräfenbach) im Februar 2004.

4.2.2 Ergebnisse

Tabelle 4-1 gibt die indirekt ermittelten Abflusswerte des Gräfenbaches am Gebietsauslass bei Pegel P5 wieder. Tabelle 4-2 und Abbildung 4-4 zeigen exemplarisch die ausführlichen Ergebnisse der Abflussmessung beim Hochwasserereignis vom 13.01.2004. In diesem Zusammenhang werden die erheblich höheren Abflussvolumina am Prallhang deutlich (vgl. Lage des Messpunktes in Abbildung 1-4 und 4-9).

Tabelle 4-1 Indirekt über Abflussgeschwindigkeit ermittelte Abflusswerte des Gräfenbaches im Bereich von Pegel P5 (Januar und Februar 2004). Zur Lage der Lamellen vgl. Abbildung 4-2.

Datum	Pegelstand [cm]	Mittlerer Durchfluss Lamelle i Q_i [m ³ /s]								Gesamtdurchfluss Q [m ³ /s]
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$	$i = 8$	
08.01.2004	57,0	0,0069	0,0136	0,0186	0,0258	0,0303	0,0324	0,0334	0,0317	0,1926
12.01.2004	73,0	0,0168	0,0332	0,0450	0,0608	0,0793	0,0739	0,0732	0,0622	0,4446
13.01.2004	93,5	0,0461	0,0636	0,0897	0,1302	0,1555	0,1639	0,1921	0,2276	1,0687
14.01.2004	74,0	0,0077	0,0241	0,0354	0,0600	0,0770	0,0854	0,1108	0,1038	0,5040
15.01.2004	69,5	0,0053	0,0135	0,0213	0,0396	0,0630	0,0681	0,0812	0,0922	0,3841
01.02.2004	74,0	0,0181	0,0292	0,0443	0,0591	0,0753	0,0725	0,0848	0,0979	0,4813
02.02.2004	67,0	0,0087	0,0146	0,0216	0,0395	0,0531	0,0555	0,0658	0,0700	0,3288
03.02.2004	61,5	0,0067	0,0164	0,0208	0,0278	0,0313	0,0355	0,0482	0,0479	0,2346
05.02.2004	55,0	0,0034	0,0043	0,0074	0,0139	0,0208	0,0275	0,0301	0,0306	0,1379
06.02.2004	54,0	0,0033	0,0042	0,0044	0,0131	0,0176	0,0202	0,0253	0,0257	0,1138

Tabelle 4-2 Abfluss und Abflussgeschwindigkeit des Gräfenbaches im Bereich von Pegel P5 während des Hochwasserereignisses am 13.01.2004 (Messung 10:45 bis 12:00).

		Lamelle 1	Lamelle 2	Lamelle 3	Lamelle 4	Lamelle 5	Lamelle 6	Lamelle 7	Lamelle 8
Abflussgeschwindigkeit [m/s]	$v_{i,1}$	0,1400	0,1619	0,2511	0,3737	0,4635	0,4880	0,5125	0,5534
	$v_{i,2}$	0,2103	0,2103	0,2756	0,3410	0,3818	0,4227	0,4880	0,6024
	$v_{i,3}$	0,1776	0,1857	0,2429	0,3165	0,3573	0,4063	0,5289	0,6188
mittlere Abflussgeschwindigkeit der Lamelle v_i [m/s]		0,1759	0,1860	0,2565	0,3437	0,4009	0,4390	0,5098	0,5915
Durchflussquerschnitt A_i [m ²]		0,2621	0,3420	0,3498	0,3788	0,3880	0,3733	0,3768	0,3848
Lamellendurchfluss Q_i [m ³ /s]		0,0461	0,0636	0,0897	0,1302	0,1555	0,1639	0,1921	0,2276
Gesamtdurchfluss Q [m ³ /s]		1,0687							

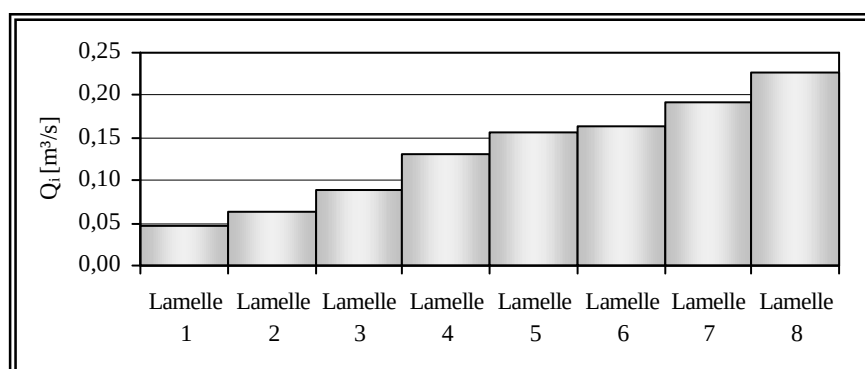
**Abb. 4-4** Abflussquerschnitt des Gräfenbaches im Bereich von Pegel P5 am 13.01.2004 (Messung 10:45 bis 12:00).

Tabelle 4-3 stellt die anhand direkter Gefäßmessungen ermittelten Abflusswerte dar. Die Pegelstände von P5 und Max2 sind dabei nur indirekt vergleichbar. Zusammen mit den oben aufgeführten Daten bildeten die Abflusswerte die Grundlage für die Erstellung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung (Abflusskurve) für Pegel P5 (vgl. Kapitel 5) und somit auch die Grundlage für die Berechnung der Abflussganglinie, auf der die weiteren hydrologischen Analysen basierten (Kapitel 6 und 7).

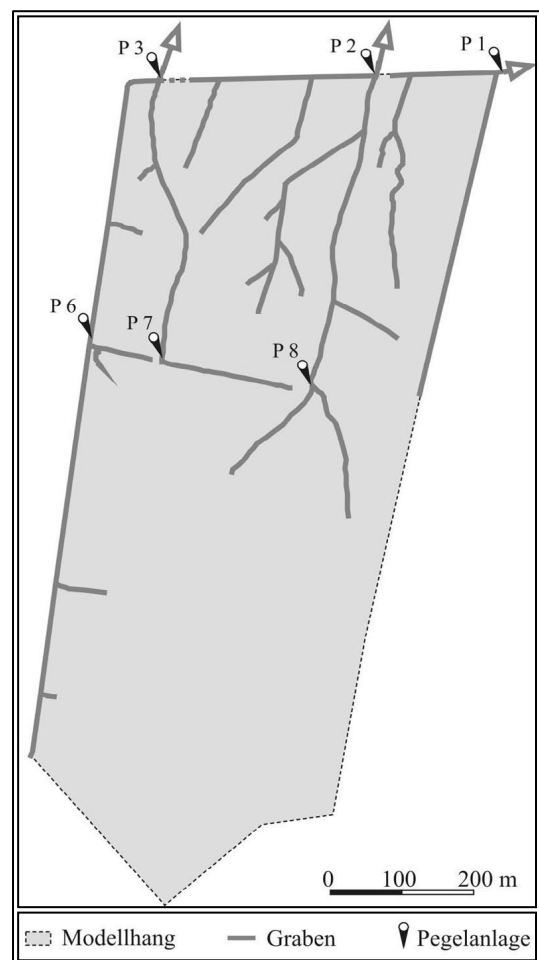
Tabelle 4-3 Ergebnisse der Gefäßmessungen im Bereich von Pegel P5 bzw. Max2.

Datum	Pegelstand Pegel P5 bzw. Max2 [cm]	Abfluss [l/s]	Datum	Pegelstand Pegel P5 bzw. Max2 [cm]	Abfluss [l/s]
30.07.1999	33,0 (Max2)	0,0	22.10.1999	42,0 (Max2)	1,6
20.08.1999	41,0 (Max2)	1,0	29.10.1999	45,0 (Max2)	5,0
30.08.1999	41,0 (Max2)	0,7	22.05.2002	39,0 (P5)	3,8
06.09.1999	35,0 (Max2)	0,1	29.05.2002	40,0 (P5)	5,0
13.09.1999	31,0 (Max2)	0,1	19.06.2002	35,0 (P5)	0,8
17.09.1999	30,0 (Max2)	0,0	28.08.2002	36,0 (P5)	1,0
27.09.1999	42,0 (Max2)	1,1	16.09.2002	33,0 (P5)	0,2
01.10.1999	48,0 (Max2)	4,5	25.09.2002	36,5 (P5)	1,0
08.10.1999	43,0 (Max2)	2,0	29.08.2003	3,0 (P5)	0,0
15.10.1999	42,0 (Max2)	1,8			

4.3 Pegelmessungen im Grabennetz des Modellhanges Hölzerkopf

4.3.1 Messmethodik

Insgesamt wurde der Modellhang mit sechs elektronischen Pegelanlagen zur Erfassung des Wasserstandes im Grabensystem ausgerüstet, deren Lage in Karte 4-2 ersichtlich ist. Die drei Pegel P1, P2 und P3, die an den drei Gebietsabflüssen des Modellhanges lokalisiert sind, wurden am 29.10.1999 in Betrieb genommen, die drei an der Grenze von oberem und unterem Unterhang gelegenen Pegel P6, P7 und P8 am 30.10.2001. Es handelt sich um elektronische Pegelanlagen, die nach dem Luft-Einperlprinzip arbeiten. Ihr Aufbau ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Durch eine Kolbenpumpe erzeugte Druckluft strömt über eine Messleitung und den Ausperltopf in das zu messende Gewässer. Der sich in der Messleitung einstellende Überdruck ist direkt proportional zur Wassersäule über dem Ausperltopf. Der Datensammler ermittelt nacheinander den barometrischen Luftdruck und den Druck in der Messleitung. Durch Differenzbildung der beiden Werte wird die Höhe des Wasserstandes über dem Ausperltopf berechnet (Ott 1999). Die Installation der Anlagen erfolgte, durch Pegelrohre geschützt, in den Entwässerungsgräben. Um die spätere Berechnung der Abflusskurve zu erleichtern, wurden Standorte mit möglichst einfachen Grabenprofilen (gerade Flanken) ausgewählt. Für Pegel P1 konnte zunächst nur ein vergleichsweise ungünstiger

**Karte 4-2** Pegelanlagen am Modellhang.

Standort gefunden werden, der am 28.08.2001 durch Vorlagerung des Messwehres *W3a* modifiziert wurde (vgl. Bild 4-5). Seit diesem Zeitpunkt besteht eine veränderte Pegelstands-Abfluss-Beziehung (vgl. Kapitel 5). Zur Gewährleistung einer hohen Datendichte erfolgte die Speicherung der Pegelstände in 15-minütlichen Intervallen in einer Diskretisierung von 5 mm-Schritten.

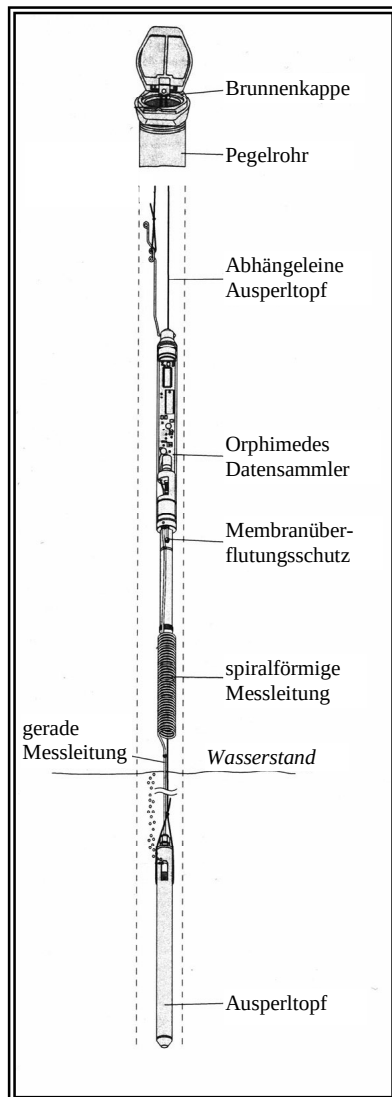


Abb. 4-5 Aufbau der Pegelanlagen (verändert nach Ott 1999).



Bild 4-5 Pegelanlage *P1* mit dem vorgelagerten Messwehr *W3a* während des Hochwasserereignisses im Februar 2002.

In erster Linie bei den drei zuerst installierten Pegeln *P1*, *P2* und *P3*, deren Ausperltopf ursprünglich für die Messungen von Grundwasserständen konzipiert wurde, ergaben sich Probleme bei der Datenerhebung. Vor allem Verschlämmungen des Ausperltopfes und technische Probleme führten bei den Pegelanlagen *P2* und *P3* zu Datenausfällen. Die Werte der entsprechenden Fehlzeiträume mussten, wie im Rahmen der Ergebnisdarstellung detailliert dargelegt, durch Schätzwerte aus Regressionen mit anderen Pegeln ersetzt werden. Dies stellt zwar die bestmögliche Fehlwertersetzung dar, dennoch ist auch diese Schätzwertfindung mit einem Qualitätsverlust der Daten verbunden. Ein weiteres Problem ergab sich für Pegel *P1* im Zeitraum von 23.06.2000 bis 30.06.2000. Hier führten mangelhafte Batterien zu einem Datenverlust. Anfängliche kurzzeitige Fehlwerte konnten

durch lineare Interpolationen ersetzt werden, ein späterer umfangreicherer Datenverlust musste jedoch anhand von Schätzwerten aus einer Regression mit Pegel *P2* ausgeglichen werden (vgl. Kapitel 4.3.2). Im Juli 2000 kam es weiterhin zu einer Veränderung des Gerinnebettes im Bereich von Pegel *P1*, im August 2001 wurde dem Pegel Messwehr *W3a* vorgelagert. Beides schlug sich jeweils in Veränderungen der Abflusskurven nieder (vgl. Kapitel 5).

4.3.2 Ergebnisse

Abbildung 4-6 und 4-7 zeigen die Pegelstandsganglinien der sechs Pegelanlagen am Modellhang auf Basis der Tagesmittelwerte. Ersatzwerte sind grau markiert.

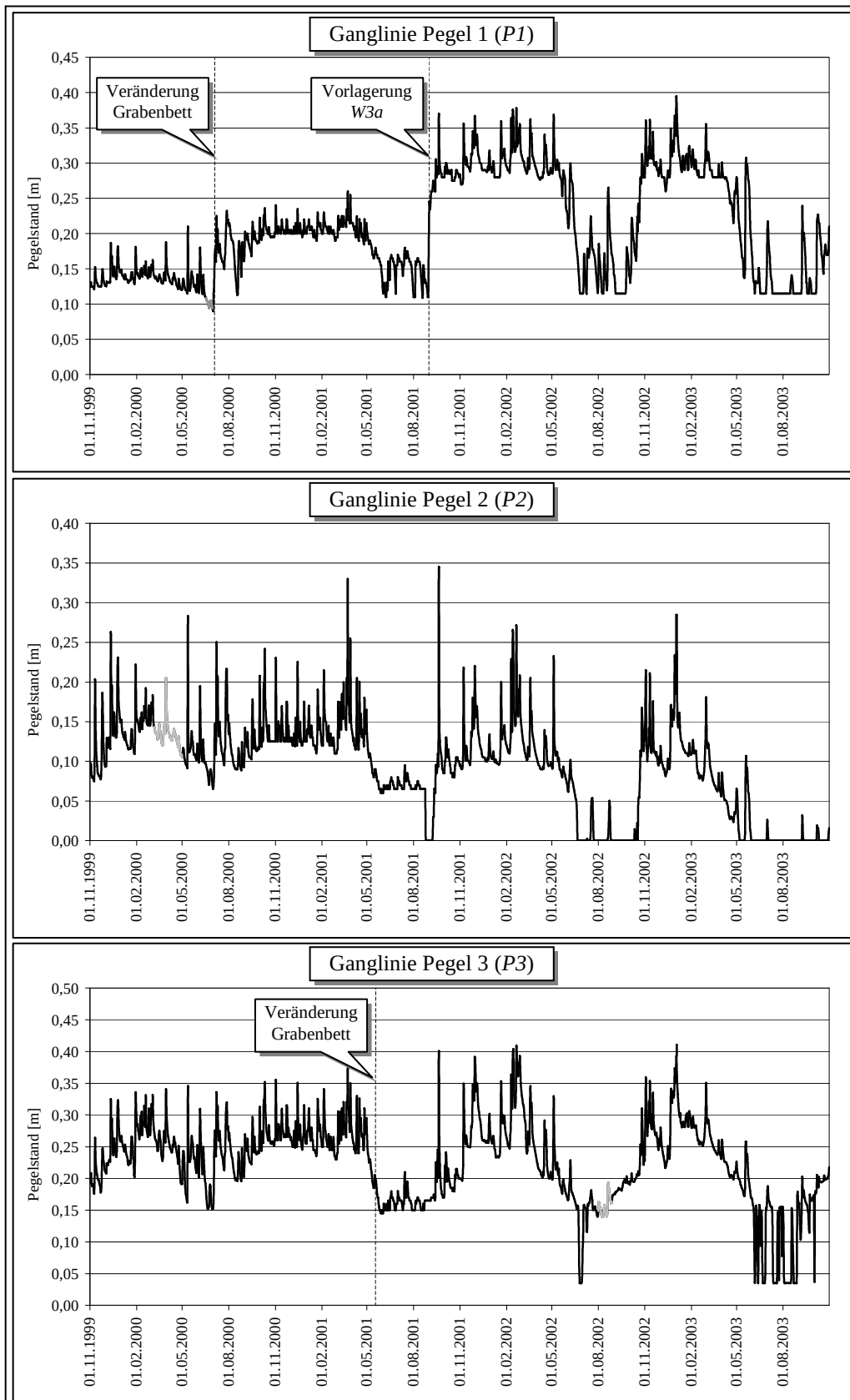


Abb. 4-6 Pegelstandsganglinien der Pegel P1, P2 und P3 auf Basis von Tagesmittelwerten im Zeitraum November 1999 bis Oktober 2003. Ersatzwerte sind grau markiert.

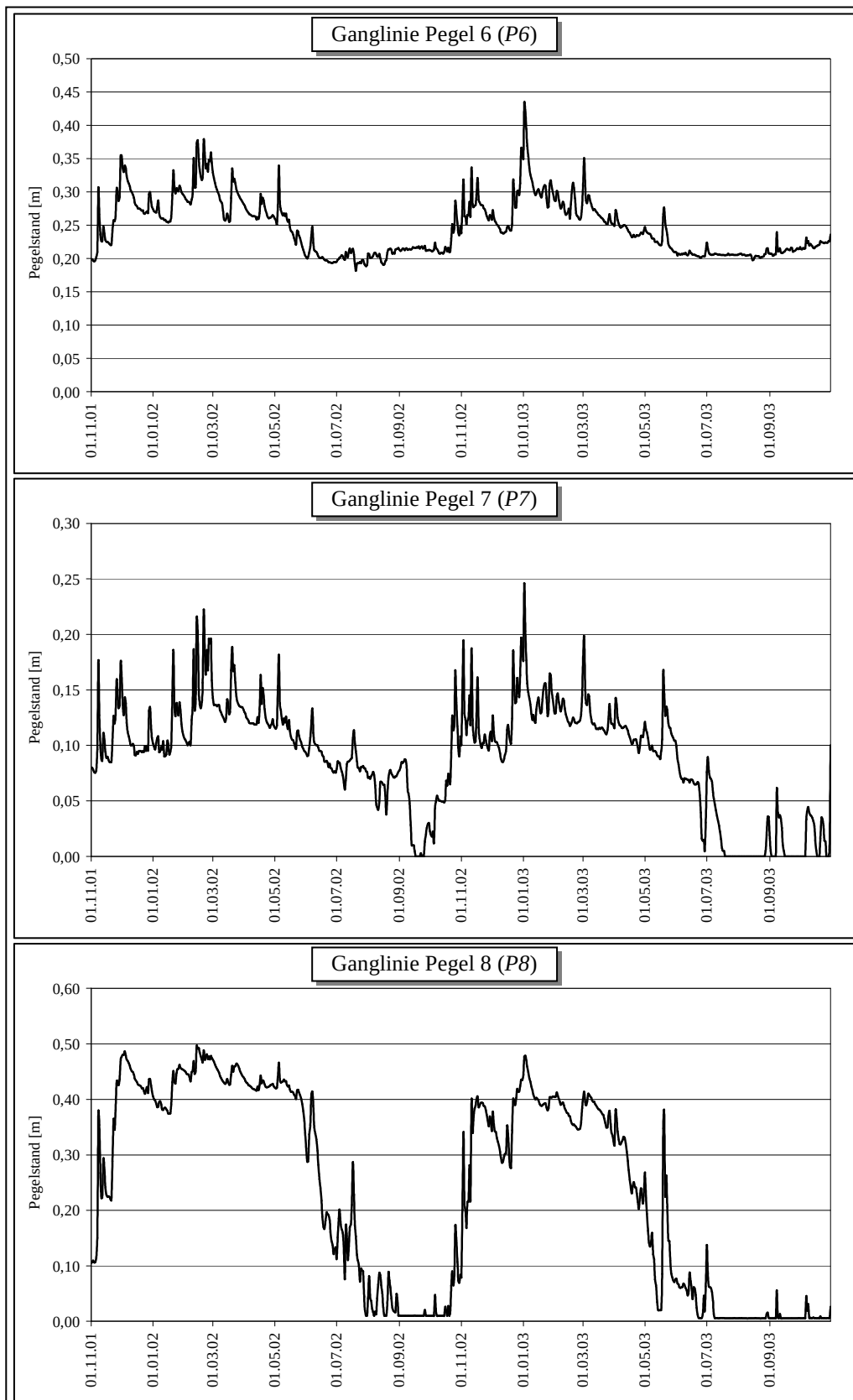


Abb. 4-7 Pegelstandsganglinien der Pegel P6, P7 und P8 auf Basis von Tagesmittelwerten im Zeitraum November 2001 bis Oktober 2003.

Die vor allem bei den Ganglinien der Pegel *P2* und *P3* festzustellenden starken Schwankungen in unteren Pegelstandsbereichen beruhen auf der Platzierung der Pegelanlagen in leichten Vertiefungen der Grabensohle (abflusslose Senken). Hierdurch tritt bei fehlendem Abfluss eine „Pfützenbildung“ ein, die, trotz Abwesenheit entsprechender Abflussmengen, zu schnellen Pegelreaktionen infolge schwacher Niederschlagsereignisse bzw. Verdunstung führt (vgl. Abbildung 4-8). Diese Tatsache wurde bei der Erstellung der Abflusskurven beachtet (vgl. Kapitel 5).

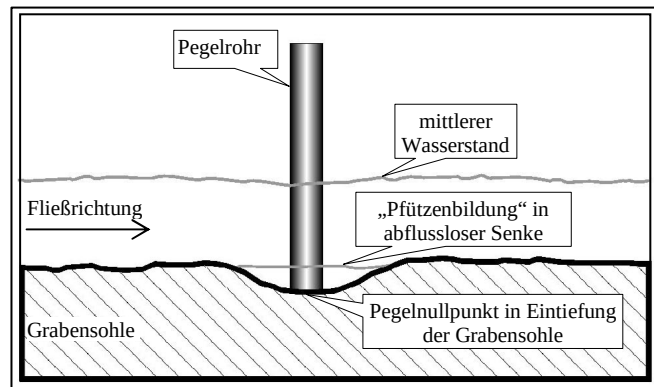


Abb. 4-8 Lage der Pegel und Problematik abflussloser Senken in der Gewässersohle.

Die Ersatzwerte für die Fehlzeiträume (in den Ganglinien in Abbildung 4-6 bereits berücksichtigt und markiert) wurden anhand von Regressionsmodellen aus Pegeldata benachbarter Pegel berechnet. Tabelle 4-4 gibt einen Überblick über die Fehlzeiträume und die zur Ersatzwertfindung herangezogenen Pegel mit den zugehörigen Regressionszeiträumen, Schätzgleichungen und Modellgüten. Wie ersichtlich wird, ist die Güte der zugrunde liegenden Regressionsmodelle, gemessen anhand des Bestimmtheitsmaßes, für alle drei Ausfallzeiten vergleichsweise hoch angesiedelt. Für die Regressionszeiträume können jeweils zwischen 87,5 % und 90,9 % der Varianz der Pegelstände durch die Ganglinie des Vergleichspegels wiedergegeben werden. Dies schließt jedoch mögliche Einbußen in der Datenqualität im Schätzzeitraum (Zeitraum des Pegelausfalls) nicht aus, so dass die so ermittelten Daten entsprechend kritisch zu betrachten und auszuwerten sind.

Tabelle 4-4 Ausfallzeiträume der Pegel und zugehörige Modelle zur Ersatzwertfindung.

Ausgefallener Pegel	Ausfallzeitraum	Schätzwerte berechnet anhand...	Regressionszeitraum	Modellgüte	Regressionsmodell
<i>P2</i>	07.03.2000 bis 01.05.2000	<i>P3</i>	01.01.2000 bis 06.03.2000	$r^2 = 0,907$	$y = 0,0958 - 0,4778 x^2 + 4,1468 x^3$
<i>P1</i>	23.06.2000 bis 30.06.2000	<i>P2</i>	23.04.2000 bis 22.06.2000	$r^2 = 0,909$	$y = 0,1141 - 0,9949 x + 10,1232 x^2$
<i>P3</i>	01.08.2002 bis 28.08.2002	<i>P1</i>	01.07.2002 bis 31.07.2002	$r^2 = 0,875$	$y = 0,0954 + 0,3687 x$

Die Daten bildeten die Grundlage zur Erstellung der Abflusskurven und Abflussganglinien (vgl. Kapitel 5), die wiederum als Basisdaten für die Kalibrierung und Validierung des Niederschlag-Abfluss-Modells PRMS dienten (Kapitel 7). Eine detaillierte Darstellung findet sich auch in diesem Fall in Kapitel 6.

4.4 Pegelmessungen im Gräfenbach

4.4.1 Messmethodik

Im Juli 1999 wurden zwei Maximalpegelanlagen im Gräfenbach installiert: Maximalpegel 1 (*Max1*) westlich und Maximalpegel 2 (*Max2*) östlich des Modellhanges Hölzerkopf am Auslasspunkt des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches (Abbildung 4-9). Im Oktober 2001 wurde Maximalpegel 2 durch eine elektronische Pegelanlage (*P5*) ersetzt.

Während die beiden Maximalpegel, deren Funktion auf mit Magnetband versehenen Schwimmkörpern basiert, lediglich der manuellen Erfassung der maximalen und aktuellen Pegelstände im jeweiligen Intervall der Messgänge dienten, handelt es sich bei Pegelanlage *P5* um einen schwimmerbetriebenen Winkelcodierer mit Datensammler, der eine quasi-kontinuierliche Erfassung der Pegelstände ermöglichte. Der grundlegende Aufbau der elektronischen Pegelanlage, der sich vom Aufbau der Pegel am Modellhang grundlegend unterscheidet, ist in Abbildung 4-10 dargestellt. Aufgrund der robusten Technik traten an Pegel *P5* im gesamten Untersuchungszeitraum keine Störungen auf. Mit Maximalpegel 1 konnten aufgrund mutwilliger Zerstörungen dagegen zwischen dem 07.01. und 25.02.2000 keine Messwerte erhoben werden.

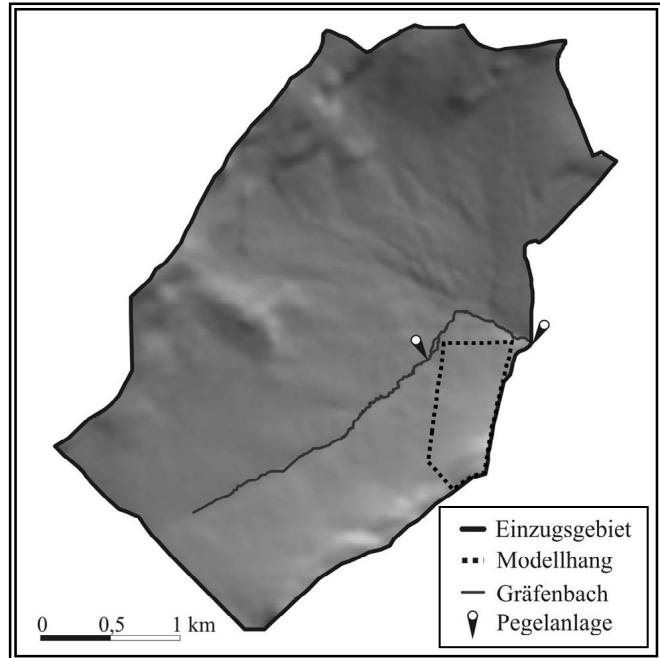


Abb. 4-9 Lage der Pegelanlagen im Gräfenbach.



Bild 4-6 Gräfenbach mit Maximalpegel 1 (Bildmitte) im Sommer 2000.

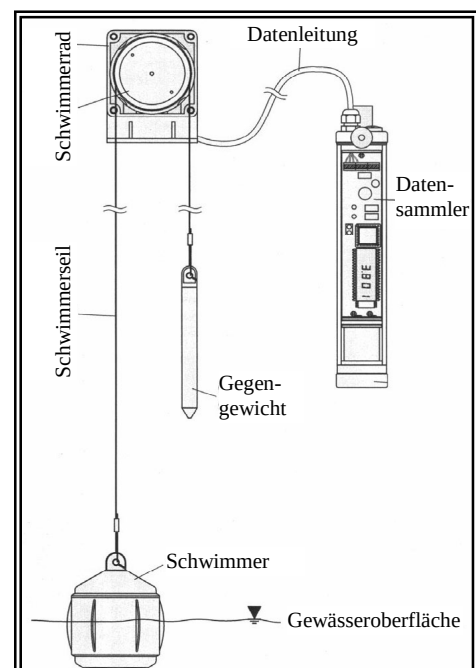


Abb. 4-10 Aufbau der Pegelanlage *P5* (leicht verändert nach Ott 2001).

4.4.2 Ergebnisse

In der Folge sind die maximalen und aktuellen Pegelstände beider Maximalpegel bis Oktober 2000 (Abbildung 4-11) graphisch dargestellt. Aufgrund der „schwebenden“ Installation von Maximalpegel 2 an der Brücke am Gebietsauslass konnten nur Maximalpegelstände > 60 cm erfasst werden, so dass die im Diagramm punktiert dargestellten Werte von 60 cm einem Maximalpegelstand ≤ 60 cm entsprechen. Eine tabellarische Auflistung der Werte findet sich in Anhang X. Abbildung 4-12 zeigt die anhand Pegel P5 ermittelte Wasserstandsganglinie des Gräfenbaches am Gebietsauslass von Oktober 2001 bis Oktober 2003 auf Tagesmittelbasis. Die Daten fließen in die Analyse des Abflussverhaltens in den Kapiteln 6 und 7 ein.

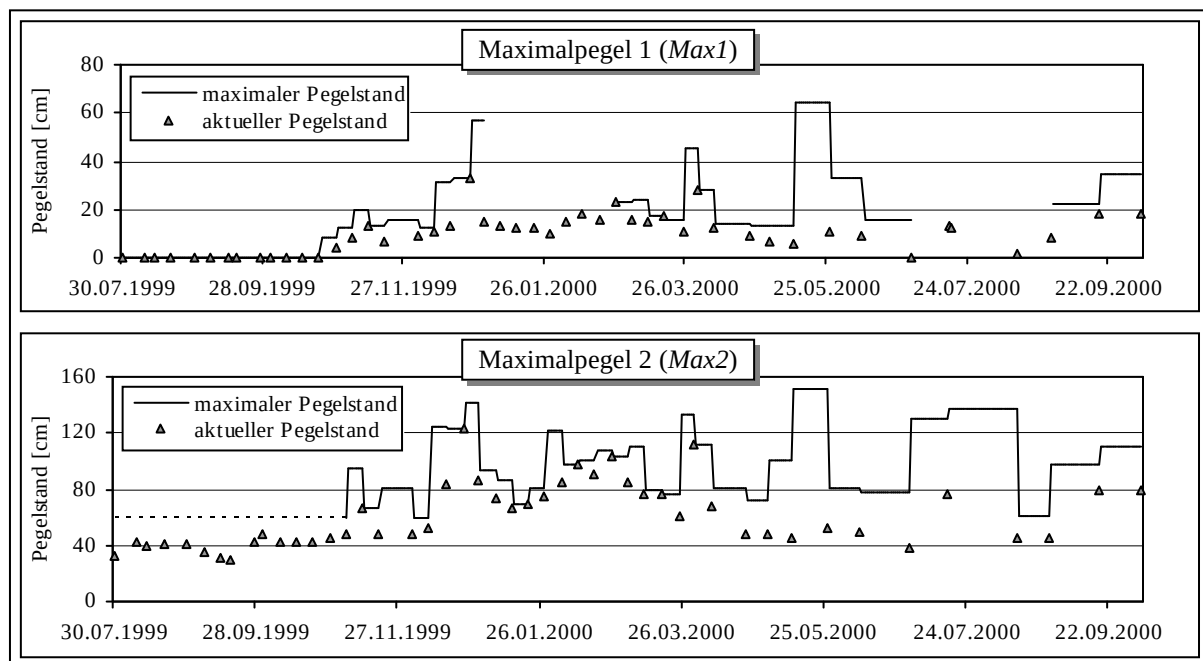


Abb. 4-11 Verlauf der maximalen und aktuellen Pegelstände der Maximalpegelanlagen im Gräfenbach (Untergrenze des erfassbaren Maximalpegelstandes für Maximalpegel Max2 = 60 cm).

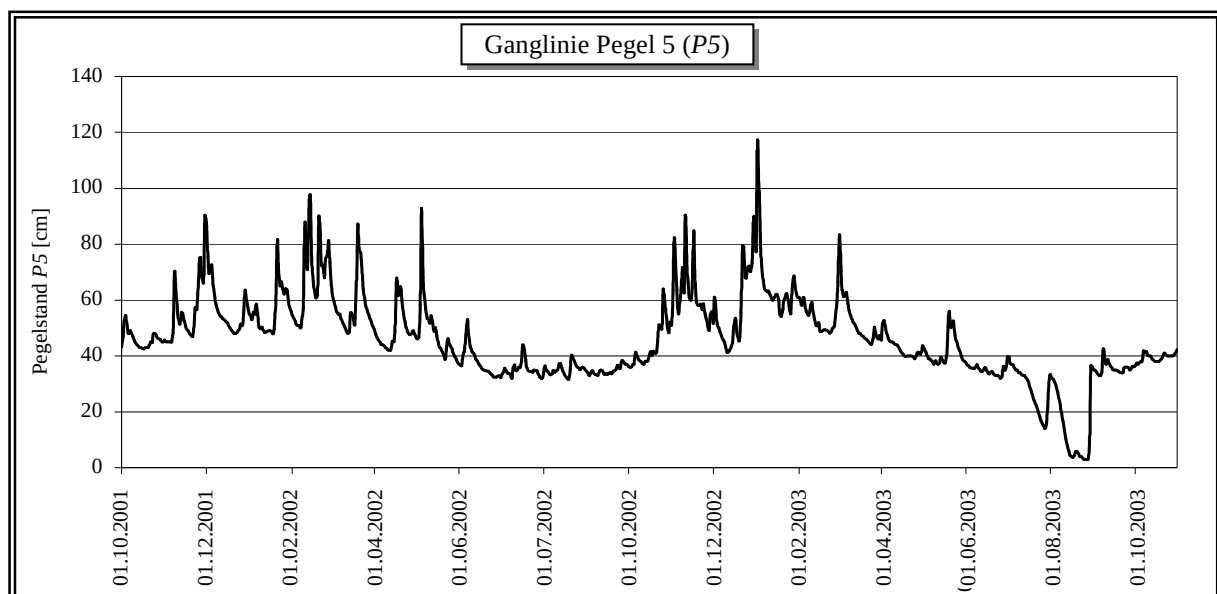


Abb. 4-12 Pegelstandsganglinie Pegel P5 (Gebietsauslass Gräfenbach) auf Basis von Tagesmittelwerten im Zeitraum Oktober 2001 bis Oktober 2003.

4.5 Aufnahme des Stauwasserspiegels am Modellhang Hölzerkopf

4.5.1 Messmethodik

Ab 25.06.1999 wurde der Stauwasserspiegel über dem StauhORIZONT in den Profilgruben der „Catena West“ bestimmt (vgl. Karte 3-6 und Bild 4-7). Die Profile wurden sukzessive angelegt, so dass erst ab Dezember 1999 eine vollständige Ermittlung des Stauwasserspiegels in allen Profilgruben möglich war. Da die Höhe des ermittelten Stauwasserspiegels bei dieser Messmethodik jedoch neben den kleinräumigen Untergrundbedingungen auch sehr stark von der Größe der Profilgrube abhängt, wurden die vergleichsweise ungenauen Messungen im September 2001 durch Messungen in elf neu installierten Standrohren (IF 1 bis IF 11) abgelöst, deren Lage am Hang in Abbildung 4-13 dargestellt ist. Mit Hilfe dieser war eine weitgehend objektive Erfassung des Stauwasserspiegels (Standrohrspiegelhöhe des ungespannten Stauwassers; Messung mit Maximalpegel) möglich. Exakte Lagekoordinaten und jeweilige Tiefe des StauhORIZONTES im Bereich der Standrohre finden sich in Anhang VIII.

Die zunächst genutzten Profile der „Catena West“ wurden je nach Gegebenheiten mit einer Tiefe zwischen 40 cm und 150 cm angelegt (vgl. Kapitel 3.3.2), wobei der StauhORIZONT zum Teil nicht aufgeschlossen war, so dass der Stauwasserspiegel bei entsprechend tiefen Ständen z. T. nicht mehr bestimmt werden konnte. Die im Spätjahr 2001 installierten Standrohre IF 1 bis IF 9 wurden demgegenüber bis zum StauhORIZONT in den Untergrund eingebracht, lediglich die Pegel IF 10 und IF 11 schlossen den StauhORIZONT nicht auf. Die Messwerterhebung erfolgte jeweils im gleichen Intervall wie die direkten Abflussmessungen, so dass teilweise bis zu fünf Messwerte pro Woche vorliegen.

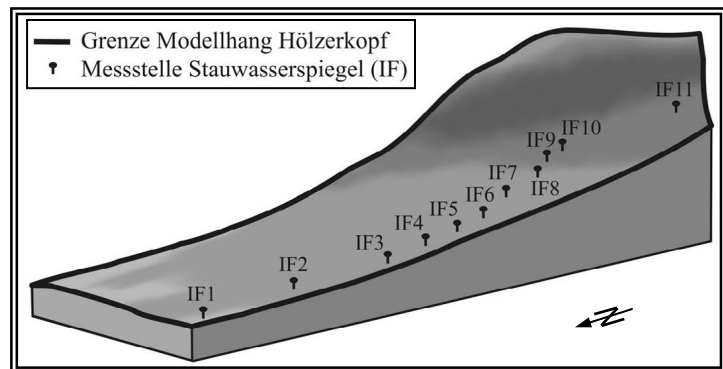


Abb. 4-13 Lage der Standrohre zur Bestimmung des Stauwasserspiegels am Modellhang.



Bild 4-7 Profil C4 im Frühjahr 2000.



Bild 4-8 Stauwasserpegel IF 9.

4.5.2 Ergebnisse

Eine tabellarische Auflistung der Messergebnisse von Juni 1999 bis Oktober 2003 findet sich in Anhang XI und XII. Eine weitere Darstellung der Daten erfolgt in von Kapitel 6.

4.6 Erhebung meteorologischer Daten im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches

4.6.1 Messmethodik

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Niederschlags- und Temperaturdaten im Bereich des Modellhanges erfasst. Von März bis November 1999 erfolgte dabei lediglich eine Aufnahme von Niederschlagssummen mit Hilfe von sieben Totalisatoren nach Hellmann (Auffangfläche 100 cm²). Vier der Niederschlagssammler wurden im Freilandbereich installiert (*Nd F1–Nd F4*), zwei in Fichtenbeständen (*Nd Fi1–Nd Fi2*) und einer im Birken- und Erlenjungwuchs des Unterhanges (*Nd Ju1*). Ihre exakte Lage ist in Abbildung 1-4 dargestellt. Die ermittelten Bestandesniederschläge können aufgrund ihrer punktuellen Natur und der geringen Anzahl der Stationen nicht als repräsentativ angesehen und auf die Fläche übertragen werden. Ihre Ergebnisse werden im Folgenden dennoch kurz dargelegt. An fünf Stationen wurden zusätzlich Minimum-Maximum-Thermometer („Six-Thermometer“; *T F1–T F3*, *T Fi1–T Fi3*) angebracht, die entsprechend den Niederschlagsstationen ca. wöchentlich abgelesen wurden.

Die 7 in ihrer zeitlichen Auflösung ungenauen Totalisatoren wurden ab Dezember 1999 durch einen unbeheizten, elektronischen Regenmesser nach dem Kippwaagenprinzip mit einer Auffangfläche von 200 cm² ergänzt (*Nd Thies*; vgl. Abbildung 4-14 und Bild 4-9). Die auf einer Freifläche nahe Profil C3 (515 m NN) lokalisierte Station speicherte in 15-minütlicher (ab 11/2002) bzw. 5-minütlicher Auflösung (12/1999 bis 10/2002) Niederschlagswerte in einer Diskretisierung von 0,1 mm-Schritten. An den Datenlogger wurde weiterhin ein Temperaturfühler angeschlossen, der in gleicher zeitlicher Auflösung Daten aufnahm (*T Thies*). Da anhand der 7 ursprünglichen Totalisatoren keine signifikanten räumlichen Inhomogenitäten der Niederschläge am Modellhang festgestellt werden konnten, wurde ab Juli 2000 aus Zeitgründen auf deren zusätzlichen Betrieb verzichtet.

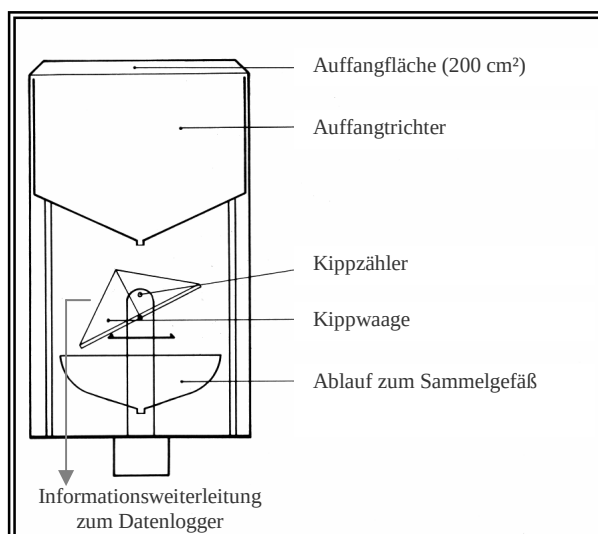


Abb. 4-14 Funktionsprinzip der Niederschlagskippschale (verändert nach Becht & Wetzel 1994).



Bild 4-9 Elektronische Wetterstation am Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf nahe Aufschluss C3.

4.6.2 Ergebnisse

In der Folge sind die mit Hilfe der elektronischen Station im Modellhangbereich ermittelten Niederschlags- und Temperaturdaten für den Zeitraum Januar 2000 bis Dezember 2003 auf Monatsmittelbasis dargestellt (Abbildung 4-15 und Tabelle 4-5). Abbildung 4-16 zeigt zum Vergleich die Werte der angrenzenden Station Simmern-Wahlbach (bezüglich der Lage der Station s. Karte 3-8) für den entsprechenden Zeitraum.

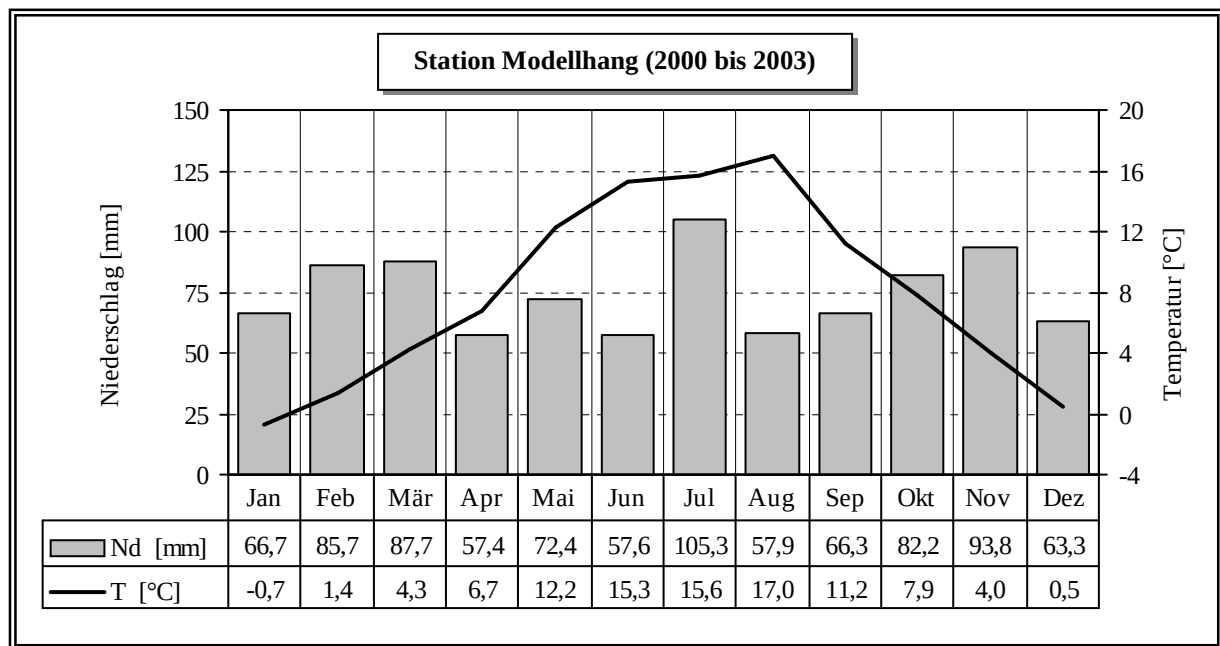


Abb. 4-15 Mittlere monatliche Niederschlagshöhe und mittlere Monatstemperaturen im Bereich von Profil C3 (515 m NN) in den Jahren 2000 bis 2003.

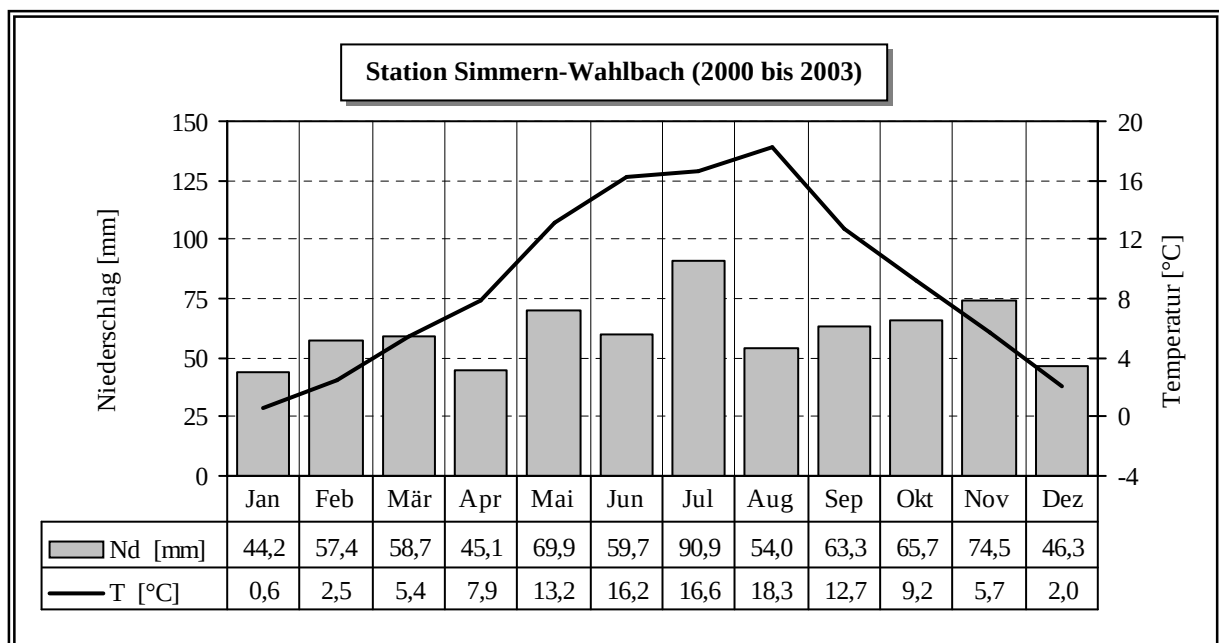


Abb. 4-16 Mittlere monatliche Niederschlagshöhe und mittlere Monatstemperaturen der Station Wahlbach (436 m NN) in den Jahren 2000 bis 2003 (Datenquelle: DWD 2005).

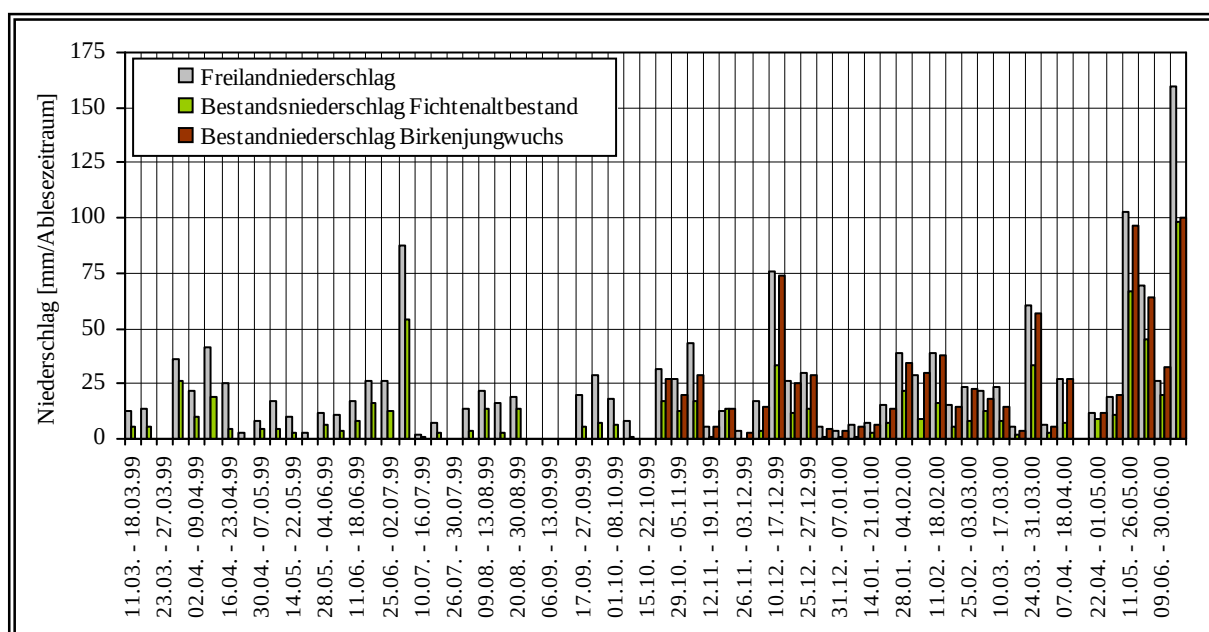
Tabelle 4-5 Monatliche Temperatur- und Niederschlagswerte für den Modellhang Hölzerkopf. Ermittelt anhand der elektronischen Wetterstation im Bereich von Profil C3 von Januar 2000 bis Dezember 2003.

Niederschlag [mm] im Bereich von Profil C3 (Nd Thies)													
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
2000	58,0	86,7	93,1	41,7	139,0	76,7	250,8	57,9	104,6	120,1	98,6	74,1	1201,2
2001	84,3	71,1	162,4	109,4	13,5	73,3	69,3	61,9	87,5	45,8	107,8	54,0	940,3
2002	31,7	156,5	66,9	50,6	74,9	37,6	59,7	64,4	25,5	108,0	118,5	81,9	876,3
2003	92,9	28,4	28,2	27,9	62,3	43,0	41,5	47,2	47,8	54,7	50,2	43,1	567,1
Mittel	66,7	85,7	87,7	57,4	72,4	57,6	105,3	57,9	66,3	82,2	93,8	63,3	896,2

Temperatur [°C] Profil C3 (T Thies)													
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
2000	0,0	2,7	4,2	8,1	12,6	14,8	13,4	16,2	12,6	8,6	4,3	2,3	8,3
2001	0,0	1,8	3,8	5,3	13,0	12,7	16,8	16,5	9,7	11,0	2,1	-1,3	7,6
2002	-0,7	3,7	4,2	6,6	11,4	15,7	15,4	16,3	10,9	7,3	5,0	0,8	8,0
2003	-2,0	-2,6	5,1	6,9	11,9	17,9	16,9	19,0	11,7	4,6	4,6	0,2	7,9
Mittel	-0,7	1,4	4,3	6,7	12,2	15,3	15,6	17,0	11,2	7,9	4,0	0,5	8,0

Da für den Zeitraum April 1999 bis Anfang Dezember 1999 keine zeitlich hochaufgelösten Daten für den Modellhang existieren (nur wöchentliche Summenwerte der Niederschlags-sammler und Temperaturextremwerte der Minimum-Maximum-Thermometer), wurden für diese acht Monate Ersatzwerte aus den angrenzenden Beobachtungsstationen herangezogen. Als Ersatzdaten für den Niederschlag dienten Werte der Station Ellern-Forsthaus Thiergarten. Da für diese Station jedoch keine Temperaturdaten vorlagen, wurden diese von der etwas tiefer gelegenen Station Simmern-Wahlbach übernommen.

Abbildung 4-17 zeigt die zu Beginn der Untersuchungen mit Hilfe von Niederschlags-sammlern ermittelten Freiland- und Bestandesniederschläge am Modellhang. Die Erstellung von Monatssummen stellte sich hier problematisch dar, da der Zeitpunkt der Datenerfassung im Allgemeinen nicht mit dem Bezugszeitraum „Monat“ übereinstimmte. Aus diesem Grund wurden für die vergleichende Darstellung von Freiland- und Bestandesniederschlägen (Fichte und Birken-Erlen-Jungwuchs) die jeweiligen Ablesezeiträume als Bezugsbasis gewählt.

**Abb. 4-17** Freiland- und Bestandesniederschläge im Bereich des Modellhanges von März 1999 bis Juni 2000.

Die Werte zeigen deutlich, dass die Fichtenaltbestände ganzjährig hohe Interzeptionsraten aufweisen, die bei ca. 59,2 % angesiedelt sind. Die Unterschiede zwischen Winter- und Sommerhalbjahr sind hierbei minimal. Von 30.4.1999 bis 29.10.1999 beträgt die Interzeption 59,9 %, von 30.10.1999 bis 1.5.2000 58,5 %. Der Birken-Erlen-Jungwuchsbestand zeigt dagegen im Winterhalbjahr mit durchschnittlich 10,1 % wesentlich geringere Interzeptionsraten. Über die Werte für das Gesamtjahr sowie die saisonale Schwankung ist keine Aussage möglich, da lediglich das Winterhalbjahr komplett erfasst wurde. Jedoch ist zu erwarten, dass die Interzeptionsraten des Sommerhalbjahres über denen des Winters liegen.

Ein Vergleich der im Gebiet ermittelten Interzeptionswerte mit Ergebnissen anderer Studien (vgl. Tabelle 4-6) zeigt, dass die beobachteten Interzeptionsverluste vergleichsweise hoch ausfallen. Einem mittleren Interzeptionsverlust von 59 % in den Fichtenaltbeständen des Modellhanges Hölzerkopf stehen Werte von 32 % bis 40 % in der Literatur gegenüber (Untersuchungsgebiet: Harz). Die Werte der Fremduntersuchungen variieren jedoch stark in Abhängigkeit von Lage des Untersuchungsgebietes, Deckungsgrad der Baumschicht und weiteren Faktoren. Brechtel & Pavlov (1977) geben einen ausführlichen Überblick über Interzeptionswerte im Rhein-Main-Gebiet.

Tabelle 4-6 Interzeptionswerte unterschiedlicher Fichtenbestände.

	Interzeptionsverlust [%] im Harz nach Delfs (1958; Quelle: Keller 1961)		Interzeptionsverlust [%] im Harz nach Balázs (1983; Quelle: Flügel 1988)	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Fichtenaltholz	39	32	39	40
Fichtenstangenholz	30	26		
Fichtendickung	20	22		
Fichtenjungwuchs	12	10		

5 Berechnung der Abflusskurven und Ableitung der Abflussganglinien

5.1 Berechnung der Abflusskurven

Auf Basis der Pegelstände und der Ergebnisse der Abflussmessungen an den zugehörigen Abflussmessstellen (Gefäßmessungen und indirekte Messungen mit Hilfe des hydro-metrischen Flügels) konnten für die Gewässerquerschnitte an den Pegelanlagen des Untersuchungsgebietes Abflusskurven erstellt werden, d. h. für jede Messstelle wurde ein Regressionsmodell berechnet, das den Pegelständen Abflussmengen im zugehörigen Gewässerquerschnitt zuordnet (zur Methodik vgl. Hahn 1951 und Dyck & Peschke 1995). Auf Basis der Regressionsmodelle und der quasi-kontinuierlichen Wasserstandsganglinien ließen sich in der Folge quasi-kontinuierliche Abflussganglinien für die betrachteten Gewässerquerschnitte berechnen, die in der vorliegenden Untersuchung einerseits als Grundlage der Erstanalyse des Abflussverhaltens (vgl. Kapitel 6) und andererseits als Grundlage der Niederschlag-Abfluss-Modellierung dienten (vgl. Kapitel 7). Eine Veränderung des Gewässerquerschnitts und die Vorlagerung einer Wehranlage (vgl. Kapitel 4.3) erforderten dabei für Pegel *P1* und *P3* die Berechnung mehrerer Regressionsgleichungen für unterschiedliche Bezugszeiträume.

Eine entscheidende Problematik bei der Erstellung der Abflusskurven bildete die geringe Datendichte im Spitzenabflussbereich. Die Wasserstands-Abfluss-Beziehungen beruhen dort auf einer sehr geringen Datenbasis, was dazu führt, dass im weiteren Verlauf Abflusswerte abgeschätzt wurden, deren Höhe in keiner durchgeführten Abflussmessung erreicht wurden. Diese Problematik ist jedoch grundsätzlich nur durch entsprechend längere Messreihen mit einer größeren Anzahl von Messungen im Spitzenabflussbereich zu umgehen.

Für sämtliche Pegel ist in der Folge zunächst eine Tabelle dargestellt, in der für alle einfließenden Messzeitpunkte Datum, Uhrzeit, Tendenz des Pegelstandes, Pegelstand und Abflussmenge angegeben sind. Des Weiteren sind zum Vergleich bereits die Prognosewerte aus dem erstellten Regressionsmodell mit den zugehörigen Residualwerten aufgeführt. An die Tabelle schließen sich das zugehörige bivariate Streudiagramm (Abfluss gegen Wasserstand), die ermittelte Regressionsgleichung sowie Ganglinie und Verteilung der Residualwerte an.

5.1.1 Abflusskurven der Pegel im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf

5.1.1.1 Abflusskurve Pegel *P1*

Zur Berechnung der Abflusskurve von Pegel *P1* wurden Messwerte aus 101 Abflussmessungen an den Messstellen *W3* und *W4* (bzw. ab August 2001 an der vorgelagerten Messstelle *W3a*) mit den jeweils zugehörigen Pegelständen herangezogen (vgl. Tabelle 5-1). Aufgrund der bereits in Kapitel 4.3 dargelegten Veränderungen des Gewässerquerschnitts bzw. der Neuanlage eines vorgelagerten Messwehres mussten für die drei Zeiträume 01.11.1999 bis 01.07.2000, 02.07.2000 bis 22.08.2001 und 23.08.2001 bis 31.10.2003 jeweils unterschiedliche Regressionsmodelle berechnet werden. Abbildung 5-1, 5-2 und 5-3 zeigen die zugrunde liegenden bivariaten Streudiagramme der Pegelstands- und Abflusswerte.

Tabelle 5-1 a Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel *P1* sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell (Teil a).

Pegelstand P1 – Abfluss W3+W4 bzw. W3a (Teil a)						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [m]	Abfluss [l/s] Direktmessung	Abfluss [l/s] Regression	Residualwert
05.11.99	10:00	O	0,125	0,082	0,317	-0,235
12.11.99	10:40	–	0,135	0,516	0,931	-0,415
19.11.99	10:20	–	0,125	0,135	0,317	-0,182
24.11.99	16:00	+	0,135	1,100	0,931	0,169
26.11.99	10:45	–	0,150	2,100	3,471	-1,371
01.12.99	16:00	–	0,125	0,250	0,317	-0,067
03.12.99	11:00	–	0,125	0,185	0,317	-0,132
08.12.99	16:00	O	0,130	0,450	0,516	-0,066
10.12.99	10:25	O	0,130	0,373	0,516	-0,143
12.12.99	17:30	–	0,190	19,000	19,746	-0,746
13.12.99	16:00	–	0,155	3,800	4,749	-0,949
14.12.99	16:00	–	0,165	5,500	7,954	-2,454
15.12.99	15:00	–	0,145	2,200	2,408	-0,208
17.12.99	15:30	–	0,140	0,580	1,561	-0,981
24.12.99	11:00	+	0,135	0,650	0,931	-0,281
25.12.99	12:10	+	0,185	16,530	16,956	-0,426
27.12.99	11:00	–	0,160	6,602	6,244	0,358
29.12.99	15:00	–	0,150	3,200	3,471	-0,271
31.12.99	10:25	O	0,145	2,000	2,408	-0,408
04.01.00	12:00	–	0,140	1,400	1,561	-0,161
07.01.00	10:50	O	0,135	0,990	0,931	0,059
11.01.00	16:00	–	0,135	0,850	0,931	-0,081
14.01.00	11:20	–	0,135	0,680	0,931	-0,251
19.01.00	16:00	–	0,135	0,600	0,931	-0,331
21.01.00	10:45	+	0,135	1,000	0,931	0,069
24.01.00	16:00	–	0,140	1,250	1,561	-0,311
28.01.00	11:45	–	0,125	0,280	0,317	-0,037
31.01.00	9:00	–	0,160	6,100	6,244	-0,144
04.02.00	10:30	–	0,140	1,750	1,561	0,189
11.02.00	10:30	–	0,150	4,250	3,471	0,779
14.02.00	15:00	–	0,140	2,200	1,561	0,639
18.02.00	11:00	–	0,140	2,100	1,561	0,539
25.02.00	15:40	–	0,160	6,830	6,244	0,586
26.02.00	17:00	–	0,140	2,500	1,561	0,939
28.02.00	14:30	+	0,140	1,700	1,561	0,139
01.03.00	10:45	+	0,150	5,500	3,471	2,030
03.03.00	15:00	+	0,145	2,313	2,408	-0,095
10.03.00	15:25	–	0,140	1,770	1,561	0,209
15.03.00	8:50	–	0,135	1,050	0,931	0,119
17.03.00	15:45	–	0,140	2,160	1,561	0,599
24.03.00	15:15	O	0,130	0,590	0,516	0,074
28.03.00	18:00	–	0,135	1,550	0,931	0,619
30.03.00	12:00	–	0,200	27,000	25,975	1,025
31.03.00	15:55	–	0,160	7,100	6,244	0,856
01.04.00	15:00	–	0,160	7,000	6,244	0,756
07.04.00	16:00	O	0,135	1,080	0,931	0,149
18.04.00	09:50	O	0,135	1,080	0,931	0,149
22.04.00	11:05	–	0,125	0,340	0,317	0,023
01.05.00	11:15	O	0,120	0,140	0,000	0,140
18.09.00	12:10	–	0,210	2,600	4,007	-1,407

+ = steigende Pegelstände
– = fallende Pegelstände
O = stagnierende Pegelstände

Tabelle 5-1 b Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel *P1* sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell (Teil b).

Pegelstand P1 – Abfluss W3+W4 bzw. W3a (Teil b)						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [m]	Abfluss [l/s] Direktmessung	Abfluss [l/s] Regression	Residualwert
06.10.00	11:30	–	0,210	2,900	4,007	-1,107
13.01.01	11:30	–	0,200	3,000	2,466	0,534
02.02.01	11:10	O	0,200	2,700	2,466	0,234
23.02.01	12:15	+	0,200	3,000	2,466	0,534
13.03.01	13:40	–	0,220	6,600	6,048	0,552
19.04.01	12:45	–	0,210	4,800	4,007	0,793
03.05.01	12:55	–	0,190	1,800	1,359	0,441
22.05.01	15:50	O	0,170	0,000	0,175	-0,175
12.06.01	14:35	–	0,150	0,000	0,000	0,000
27.06.01	14:30	–	0,160	0,000	0,000	0,000
19.07.01	16:10	–	0,180	0,000	0,618	-0,618
03.08.01	11:25	O	0,110	0,000	0,000	0,000
13.08.01	15:00	–	0,160	0,000	0,000	0,000
22.08.01	17:00	–	0,130	0,000	0,000	0,000
24.08.01	11:30	O	0,135	0,000	0,000	0,000
03.09.01	12:00	–	0,230	0,000	0,000	0,000
07.09.01	12:30	O	0,260	0,000	0,000	0,000
26.09.01	14:30	–	0,280	0,075	0,164	-0,089
01.10.01	12:20	O	0,280	0,035	0,164	-0,129
15.10.01	11:15	–	0,280	0,030	0,164	-0,134
26.10.01	10:05	–	0,290	0,300	0,689	-0,389
29.10.01	16:35	O	0,285	0,110	0,395	-0,285
09.11.01	12:12	–	0,320	4,000	4,016	-0,016
16.11.01	12:25	–	0,295	0,600	1,049	-0,449
21.11.01	13:40	–	0,285	0,230	0,395	-0,165
01.12.01	11:45	–	0,355	9,660	12,265	-2,605
12.12.01	13:00	O	0,300	1,800	1,481	0,319
02.01.02	12:15	–	0,290	0,700	0,689	0,011
19.01.02	11:05	O	0,285	0,550	0,395	0,155
23.01.02	10:50	–	0,305	2,440	1,989	0,451
28.01.02	13:30	–	0,315	3,500	3,252	0,248
01.02.02	14:55	–	0,290	1,750	0,689	1,061
08.02.02	14:50	–	0,305	2,530	1,989	0,541
10.02.02	12:25	–	0,365	14,620	15,693	-1,073
10.02.02	14:50	–	0,355	12,130	12,265	-0,135
13.02.02	14:15	–	0,385	26,460	24,215	2,245
13.02.02	17:10	–	0,375	20,960	19,664	1,296
27.02.02	14:50	–	0,355	11,400	12,265	-0,865
27.02.02	18:10	–	0,345	8,910	9,344	-0,434
04.03.02	13:00	–	0,305	2,730	1,989	0,741
11.03.02	10:55	–	0,285	1,080	0,395	0,685
20.03.02	12:00	–	0,375	18,840	19,664	-0,824
09.04.02	11:00	O	0,280	0,350	0,164	0,186
24.04.02	13:20	–	0,285	0,600	0,395	0,205
03.05.02	12:40	O	0,285	0,390	0,395	-0,005
15.05.02	11:50	–	0,300	1,580	1,481	0,099
22.05.02	12:20	O	0,255	0,025	0,000	0,025
29.05.02	12:40	–	0,240	0,025	0,000	0,025
19.06.02	12:25	–	0,175	0,000	0,000	0,000
21.07.02	09:30	–	0,180	0,000	0,000	0,000
07.08.02	16:25	–	0,125	0,000	0,000	0,000

+ = steigende Pegelstände
– = fallende Pegelstände
O = stagnierende Pegelstände

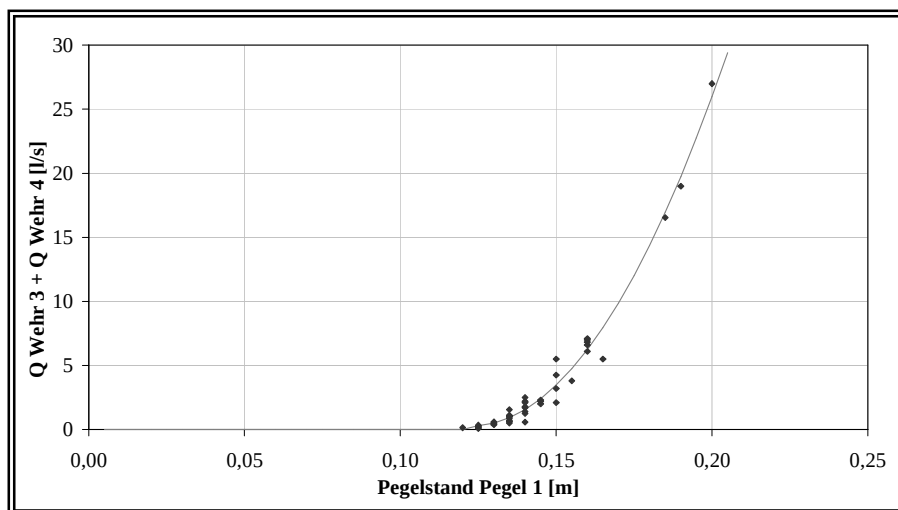


Abb. 5-1 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel P1/Abfluss W3+W4 (Zeitraum 01.11.1999 bis 01.07.2000).

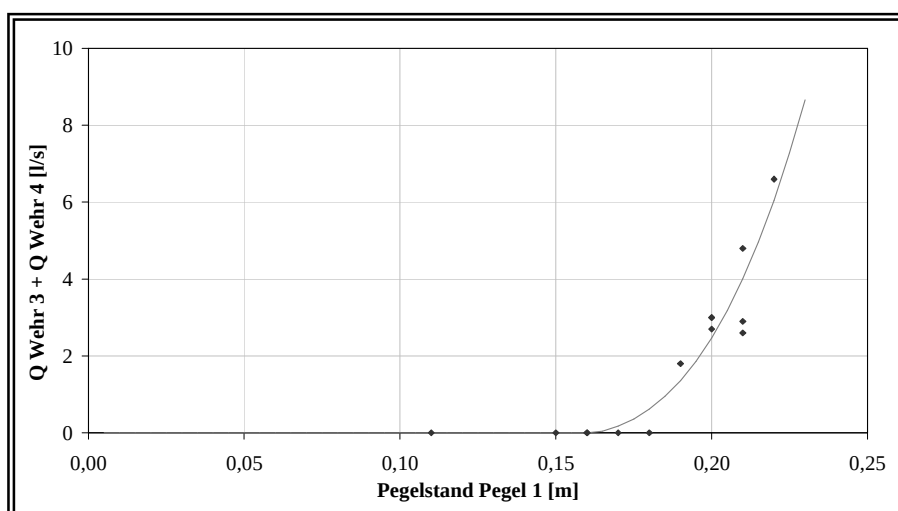


Abb. 5-2 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel P1/Abfluss W3+W4 (Zeitraum 02.07.2000 bis 22.08.2001).

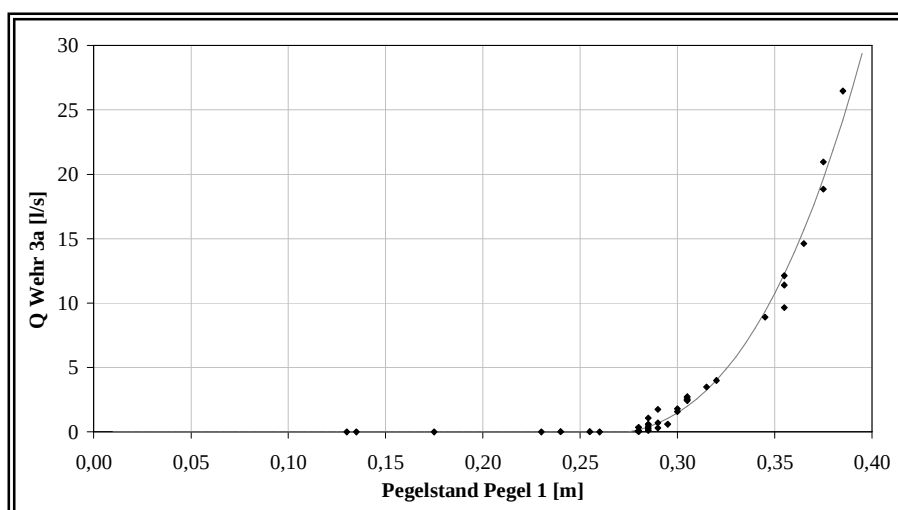
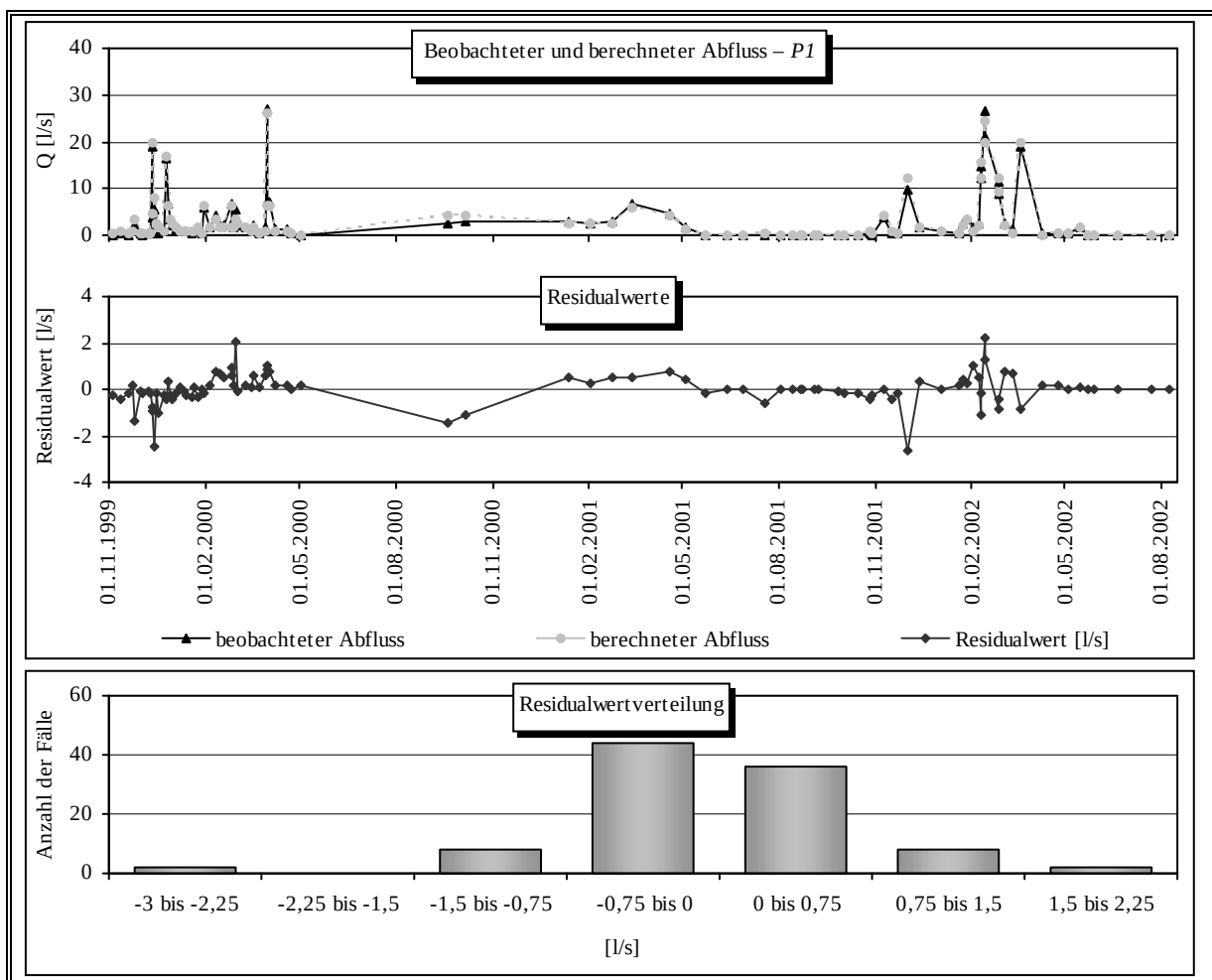


Abb. 5-3 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel P1/Abfluss W3a (Zeitraum ab 23.08.2001).

Tabelle 5-2 Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P1.

Unabhängige Variable: Pegelstand P1 [m]					
Zeitraum	abhängige Variable	Pegelstand [m]	Modell	r ²	Regressionsgleichung
01.11.1999 bis 01.07.2000	Q W3+W4	< 0,125	Pegelstände unter 0,125 m ⇒ Abfluss 0 l/s		
		≥ 0,125	quadratisch	0,983	$y = 65,539 - 1061,7x + 4319,4x^2$
02.07.2000 bis 22.08.2001	Q W3+W4	< 0,165	Pegelstände unter 0,125 m ⇒ Abfluss 0 l/s		
		≥ 0,165	kubisch	0,905	$y = -27,062 + 613,8x - 4579,5x^2 + 11244,0x^3$
23.08.2001 bis 31.10.2003	Q W3a	< 0,280	Pegelstände unter 0,280 m ⇒ Abfluss 0 l/s		
		≥ 0,280	kubisch	0,986	$y = -55,316 + 836,64x - 3997,2x^2 + 6131,6x^3$

Für alle Zeiträume konnten geeignete nicht-lineare Regressionsmodelle berechnet werden. In Tabelle 5-2 sind die resultierenden Regressionsmodelle, die zwischen 90,5 % und 98,6 % der Varianz der Abflusswerte erklären, aufgeführt. Aufgrund der Physiognomie der Grabensohle (Pfützenbildung in abflusslosen Senken; vgl. Kapitel 4.3) wurde den jeweils unteren Pegelstandsbereichen ein Abfluss von 0 l/s zugeordnet. In Abbildung 5-4 sind beobachteter und berechneter Abfluss gegenübergestellt. Die Residualwertverteilung zeigt, dass sich die Abweichungen weitgehend auf den Bereich $\pm 0,75$ l/s konzentrieren. Lediglich bei starkem Abflussgeschehen finden sich Residualwerte von bis zu 3 l/s. Die Verteilung ist leicht rechtschief. Die zeitliche Entwicklung der Residuen zeigt keine Systematik.

**Abb. 5-4** Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel P1.

Pegelstand P2 – Abfluss W8 (Teil a)						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [m]	Abfluss [l/s] Direktmessung	Abfluss [l/s] Regression	Residualwert
05.11.99	10:15	O	0,080	0,310	0,000	0,310
12.11.99	10:50	–	0,140	2,600	5,232	-2,632
19.11.99	10:30	–	0,080	0,240	0,000	0,240
24.11.99	16:00	+	0,135	1,200	4,534	-3,334
26.11.99	12:00	–	0,170	5,714	10,224	-4,510
01.12.99	16:00	–	0,090	0,500	0,000	0,500
03.12.99	11:10	–	0,095	0,550	0,326	0,224
08.12.99	16:00	O	0,130	1,500	3,874	-2,374
10.12.99	10:40	O	0,120	1,200	2,669	-1,469
12.12.99	18:30	–	0,245	30,000	28,730	1,270
13.12.99	16:00	–	0,170	7,700	10,224	-2,524
14.12.99	16:00	–	0,185	10,000	13,237	-3,237
15.12.99	15:00	–	0,145	4,000	5,969	-1,969
17.12.99	15:20	–	0,130	2,181	3,874	-1,693
24.12.99	11:00	+	0,130	2,000	3,874	-1,874
25.12.99	12:30	+	0,255	34,500	31,848	2,652
27.12.99	11:15	–	0,185	14,740	13,237	1,503
29.12.99	15:00	–	0,160	8,000	8,407	-0,407
31.12.99	10:40	O	0,150	7,188	6,743	0,445
04.01.00	12:00	–	0,135	4,000	4,534	-0,534
07.01.00	11:05	O	0,130	2,857	3,874	-1,017
11.01.00	16:00	–	0,125	2,700	3,253	-0,553
14.01.00	11:30	–	0,120	1,770	2,669	-0,899
19.01.00	16:00	–	0,115	1,600	2,124	-0,524
21.01.00	10:50	+	0,120	1,739	2,669	-0,930
24.01.00	16:00	–	0,125	2,400	3,253	-0,853
28.01.00	12:05	–	0,110	0,880	1,617	-0,737
31.01.00	09:00	–	0,170	10,000	10,224	-0,224
04.02.00	10:45	–	0,140	5,814	5,232	0,582
11.02.00	10:45	–	0,160	10,000	8,407	1,593
14.02.00	15:00	–	0,145	4,000	5,969	-1,969
18.02.00	11:10	–	0,150	6,250	6,743	-0,493
25.02.00	15:35	–	0,185	15,380	13,237	2,143
26.02.00	17:00	–	0,155	4,700	7,556	-2,856
28.02.00	17:30	+	0,145	4,500	5,969	-1,469
01.03.00	10:45	+	0,160	10,000	8,407	1,593
03.03.00	15:10	+	0,155	5,260	7,556	-2,296
10.03.00	15:35	–	0,135	4,000	4,534	-0,534
15.03.00	08:50	–	0,135	3,000	4,534	-1,534
17.03.00	16:30	–	0,145	4,080	5,969	-1,889
24.03.00	15:30	O	0,125	1,786	3,253	-1,467
28.03.00	18:00	–	0,135	2,500	4,534	-2,034
07.04.00	16:05	O	0,130	3,570	3,874	-0,304
18.04.00	10:00	O	0,130	2,410	3,874	-1,464
22.04.00	11:15	–	0,125	1,250	3,253	-2,003

+ = steigende Pegelstände
– = fallende Pegelstände
O = stagnierende Pegelstände

Tabelle 5-3 b Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P2 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell (Teil b).

Pegelstand P2 – Abfluss W8 (Teil b)						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [m]	Abfluss [l/s] Direktmessung	Abfluss [l/s] Regression	Residualwert
01.05.00	11:20	O	0,110	0,890	1,617	-0,727
11.05.00	14:00	O	0,090	0,200	0,000	0,200
26.05.00	10:30	–	0,110	1,500	1,617	-0,117
09.06.00	10:15	–	0,100	1,400	0,718	0,682
30.06.00	12:15	O	0,070	0,000	0,000	0,000
13.01.01	11:45	–	0,125	4,000	3,253	0,747
02.02.01	11:20	O	0,120	5,500	2,669	2,831
23.02.01	12:00	–	0,125	3,560	3,253	0,307
13.03.01	13:50	–	0,160	10,360	8,407	1,953
19.04.01	13:00	–	0,140	5,700	5,232	0,468
03.05.01	13:10	–	0,115	3,400	2,124	1,276
22.05.01	16:15	–	0,075	0,290	0,000	0,290
22.08.01	17:10	O	0,085	0,000	0,000	0,000
24.08.01	12:10	O	0,000	0,000	0,000	0,000
03.09.01	12:10	O	0,000	0,000	0,000	0,000
07.09.01	12:35	O	0,000	0,000	0,000	0,000
26.09.01	14:40	–	0,095	0,090	0,326	-0,236
01.10.01	12:15	O	0,085	0,040	0,000	0,040
15.10.01	11:20	–	0,090	0,060	0,000	0,060
26.10.01	10:10	–	0,105	0,390	1,149	-0,759
29.10.01	16:30	O	0,100	0,190	0,718	-0,528
09.11.01	12:30	–	0,135	5,180	4,534	0,646
16.11.01	12:30	–	0,100	1,200	0,718	0,482
21.11.01	13:45	–	0,095	0,550	0,326	0,224
01.12.01	12:00	–	0,185	17,270	13,237	4,033
12.12.01	13:15	O	0,125	2,990	3,253	-0,263
02.01.02	12:30	–	0,125	1,350	3,253	-1,903
09.01.02	12:15	O	0,100	1,000	0,718	0,282
19.01.02	11:20	O	0,100	0,850	0,718	0,132
23.01.02	11:00	–	0,125	4,120	3,253	0,867
28.01.02	13:45	–	0,135	6,330	4,534	1,796
01.02.02	15:05	–	0,115	3,280	2,124	1,156
08.02.02	15:05	–	0,125	3,500	3,253	0,247
10.02.02	12:45	–	0,210	22,800	19,023	3,777
10.02.02	14:45	–	0,195	19,000	15,437	3,563
13.02.02	14:40	–	0,295	40,710	45,849	-5,139
13.02.02	17:05	–	0,270	33,530	36,811	-3,281
27.02.02	15:10	–	0,205	20,000	17,789	2,211
27.02.02	18:05	–	0,185	16,520	13,237	3,283
04.03.02	13:15	–	0,130	5,140	3,874	1,266
11.03.02	11:05	–	0,105	2,020	1,149	0,871
20.03.02	12:25	–	0,215	28,500	20,295	8,205
09.04.02	11:10	O	0,095	1,000	0,326	0,674
24.04.02	13:37	–	0,095	1,450	0,326	1,124
03.05.02	12:45	O	0,090	1,080	0,000	1,080
15.05.02	12:10	–	0,105	2,150	1,149	1,001
22.05.02	12:30	O	0,080	0,420	0,000	0,420
29.05.02	12:45	–	0,080	0,300	0,000	0,300
19.06.02	12:35	–	0,045	0,010	0,000	0,010
21.07.02	09:45	–	0,050	0,000	0,000	0,000
07.08.02	16:30	O	0,000	0,000	0,000	0,000

+ = steigende Pegelstände
– = fallende Pegelstände
O = stagnierende Pegelstände

Zur Berechnung der Abflusskurve für Pegel *P2* wurde entsprechend der Abflusskurve für *P1* vorgegangen, wobei in diesem Fall lediglich ein Regressionsmodell für den Gesamtzeitraum erstellt werden musste. Insgesamt konnte auf die Ergebnisse aus 96 Abflussmessungen an Messstelle *W8* zurückgegriffen werden (vgl. Tabelle 5-3). Abbildung 5-5 zeigt das zugehörige Streudiagramm der Abfluss- und Pegelwerte.

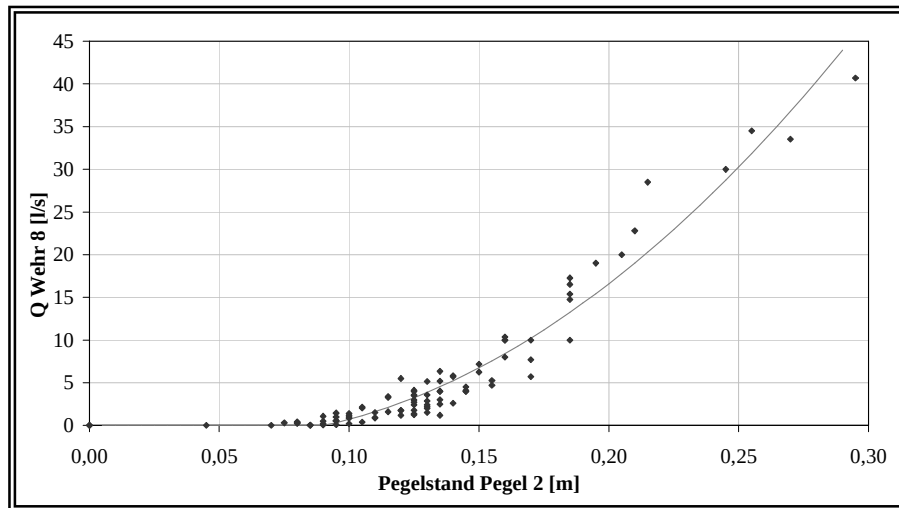


Abb. 5-5 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel *P2*/Abfluss *W8* (Zeitraum ab 01.11.1999).

Das auf Basis der Daten berechnete, quadratische Regressionsmodell ist in Tabelle 5-4 aufgeführt. Anhand des Modells können 95,7 % der Varianz der Abflusswerte erklärt werden ($r^2 = 0,957$), wobei auch hier aufgrund der Morphologie der Grabensohle Pegelständen unter 0,095 m, abweichend vom Modell, ein Abfluss von 0 l/s zugeordnet wurde (abflusslose Senken).

Tabelle 5-4 Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel *P2*.

Unabhängige Variable: Pegelstand <i>P2</i> [m]					
Zeitraum	abhängige Variable	Pegelstand [m]	Modell	r^2	Regressionsgleichung
01.11.1999 bis 31.10.2003	Q <i>W8</i>	< 0,095	Pegelstände unter 0,095 m $\Rightarrow$ Abfluss 0 l/s		
		$\geq 0,095$	quadratisch	0,957	$y = 0,1447 - 70,775x + 765,1x^2$

In Abbildung 5-6 und Tabelle 5-3 sind gemessene und geschätzte Abflusswerte graphisch und tabellarisch gegenübergestellt. Die Residualwerte sind weitgehend symmetrisch verteilt und bewegen sich zwischen den Extremwerten ± 4 l/s, wobei über 50 % der Residuen im Bereich zwischen -1 l/s und $+1$ l/s angesiedelt sind. Ein systematischer Fehler wird, auch in der zeitlichen Entwicklung, nicht deutlich. Die Verteilung der Residualwerte ist als annähernd normalverteilt anzusehen.

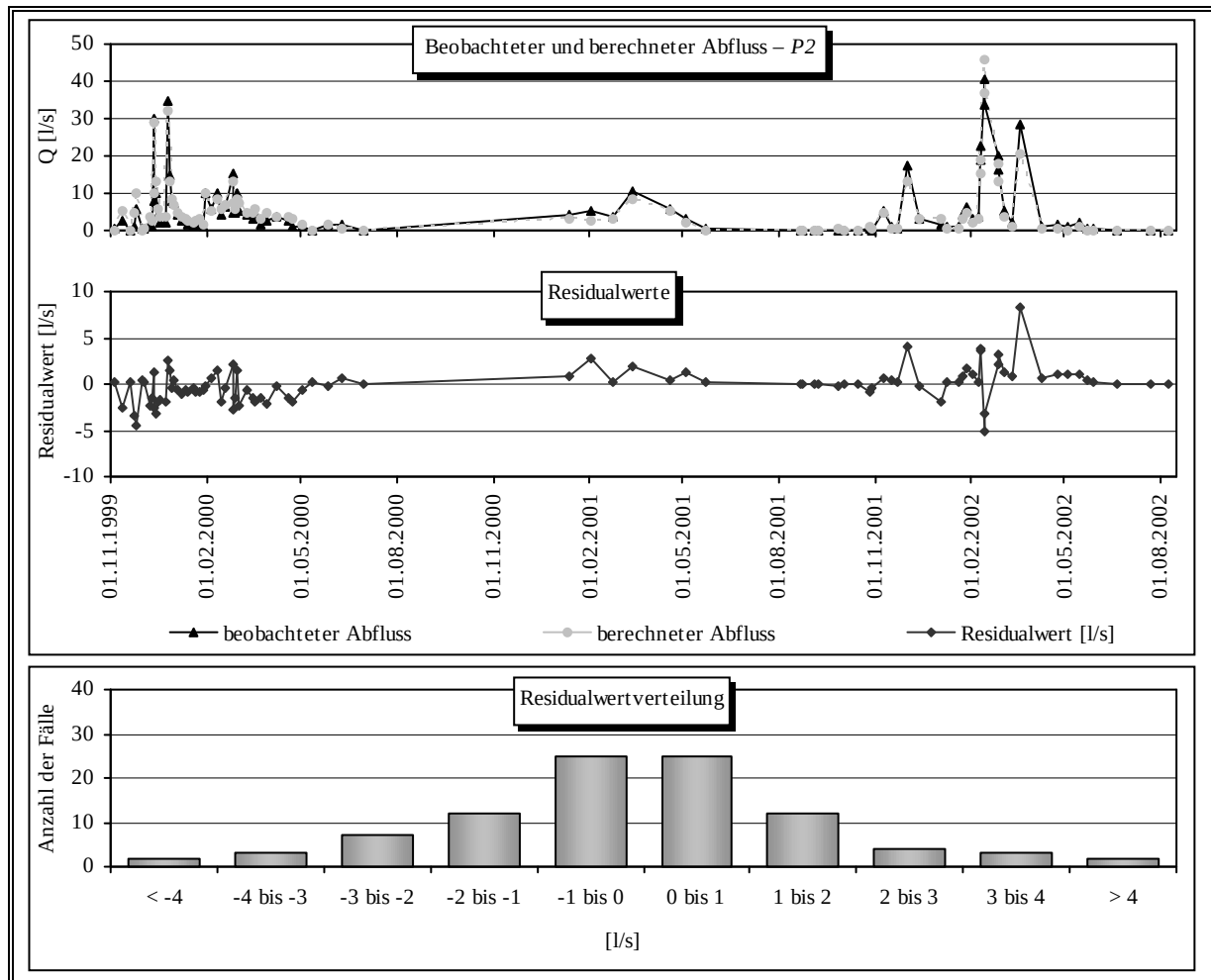


Abb. 5-6 Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel P2.

5.1.1.3 Abflusskurve Pegel P3

Bei der Berechnung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung für Pegel P3 mussten aufgrund zwischenzeitlicher Veränderungen der Gewässersohle die beiden Zeiträume 01.11.1999 bis 09.06.2001 und 10.06.2001 bis 31.10.2003 separat analysiert werden. Insgesamt flossen zu diesem Zweck die Ergebnisse aus 105 Abflussmessungen an Messstelle W12 in die Berechnung der Abflusskurven ein (vgl. Tabelle 5-5). Die beiden Abbildungen 5-7 und 5-8 zeigen die zugrunde liegenden Streudiagramme.

Zur Beschreibung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung dienen in beiden Zeiträumen nicht-lineare Regressionsmodelle, die 96,5 % bzw. 90,3 % der Varianz der Durchflusswerte erklären, so dass auch hier die Modellgüte als hinreichend angesehen werden kann (vgl. Tabelle 5-6). Den unteren Pegelständen wurden auch in diesem Fall Abflusswerte von 0 l/s zugeordnet (abflusslose Senken).

Abbildung 5-9 stellt beobachtete und anhand des Modells prognostizierte Abflusswerte gegenüber und verdeutlicht die Struktur der Residualwerte. Letztere bewegen sich zwischen -2,5 l/s und +4,5 l/s, wobei die Verteilung leicht rechtsschief ist.

Tabelle 5-5 a Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P3 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell (Teil a).

Pegelstand P3 – Abfluss W12 (Teil a)						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [m]	Abfluss [l/s] Direktmessung	Abfluss [l/s] Regression	Residualwert
05.11.99	10:30	O	0,200	1,000	1,392	-0,392
12.11.99	11:00	–	0,230	2,200	1,581	0,619
19.11.99	10:40	–	0,195	0,500	1,368	-0,868
24.11.99	16:00	+	0,215	1,500	1,419	0,081
26.11.99	12:05	–	0,240	4,000	1,892	2,108
01.12.99	16:00	–	0,210	0,800	1,408	-0,608
03.12.99	11:20	–	0,205	0,490	1,402	-0,912
08.12.99	16:00	O	0,230	1,100	1,581	-0,481
10.12.99	10:55	O	0,230	1,200	1,581	-0,381
12.12.99	18:00	–	0,330	28,000	25,313	2,687
13.12.99	16:00	–	0,270	6,500	4,650	1,850
14.12.99	16:00	–	0,285	8,000	7,532	0,468
15.12.99	15:00	–	0,255	4,000	2,856	1,144
17.12.99	15:10	–	0,230	2,000	1,581	0,419
24.12.99	11:00	+	0,235	2,300	1,709	0,591
25.12.99	12:55	+	0,330	24,666	25,313	-0,647
27.12.99	11:40	–	0,305	13,708	13,518	0,190
29.12.99	15:00	–	0,265	7,000	3,944	3,056
31.12.99	10:55	O	0,260	3,636	3,349	0,287
04.01.00	12:00	–	0,255	3,300	2,856	0,444
07.01.00	11:15	O	0,240	2,150	1,892	0,258
11.01.00	16:00	–	0,240	2,500	1,892	0,608
14.01.00	11:40	–	0,230	1,660	1,581	0,079
19.01.00	16:00	–	0,225	1,700	1,496	0,204
21.01.00	11:00	+	0,235	1,626	1,709	-0,083
24.01.00	16:00	–	0,250	2,200	2,456	-0,256
28.01.00	12:15	–	0,200	0,533	1,392	-0,859
31.01.00	09:00	–	0,305	13,000	13,518	-0,518
04.02.00	11:05	–	0,275	3,636	5,477	-1,841
11.02.00	11:00	–	0,295	7,143	10,187	-3,044
14.02.00	15:00	–	0,275	5,500	5,477	0,023
18.02.00	11:30	–	0,275	4,444	5,477	-1,033
25.02.00	16:00	–	0,315	13,333	17,603	-4,270
26.02.00	17:00	–	0,275	4,500	5,477	-0,977
28.02.00	17:30	+	0,265	4,100	3,944	0,156
01.03.00	10:45	+	0,305	10,500	13,518	-3,018
03.03.00	15:20	+	0,285	5,000	7,532	-2,532
10.03.00	15:45	–	0,260	3,279	3,349	-0,070
15.03.00	08:50	–	0,255	2,600	2,856	-0,256
17.03.00	16:45	–	0,270	3,570	4,650	-1,080
24.03.00	16:00	O	0,235	1,429	1,709	-0,280
28.03.00	18:00	–	0,260	3,000	3,349	-0,349
30.03.00	12:00	–	0,350	40,000	38,951	1,049
31.03.00	16:30	–	0,310	17,000	15,462	1,538
01.04.00	15:00	–	0,305	16,000	13,518	2,482
07.04.00	16:10	O	0,250	2,380	2,456	-0,076
18.04.00	10:15	O	0,250	2,200	2,456	-0,256
22.04.00	11:25	–	0,235	1,100	1,709	-0,609
01.05.00	11:45	O	0,195	0,800	1,368	-0,568

+ = steigende Pegelstände
– = fallende Pegelstände
O = stagnierende Pegelstände

Tabelle 5-5 b Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel *P3* sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell (Teil b).

Pegelstand P3 – Abfluss W12 (Teil b)						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [m]	Abfluss [l/s] Direktmessung	Abfluss [l/s] Regression	Residualwert
11.05.00	14:15	–	0,155	0,200	0,000	0,200
26.05.00	10:30	–	0,235	1,600	1,709	-0,109
09.06.00	10:15	–	0,230	1,000	1,581	-0,581
30.06.00	11:30	O	0,150	0,000	0,000	0,000
16.07.00	15:30	–	0,245	2,700	2,137	0,563
17.07.00	11:30	O	0,245	2,400	2,137	0,263
18.07.00	11:00	–	0,240	1,900	1,892	0,008
19.07.00	12:00	–	0,235	1,400	1,709	-0,309
20.07.00	14:30	–	0,235	1,400	1,709	-0,309
21.07.00	10:25	O	0,230	1,000	1,581	-0,581
22.07.00	10:10	–	0,220	0,800	1,445	-0,645
23.07.00	11:00	–	0,215	0,700	1,419	-0,719
14.08.00	11:30	O	0,200	0,700	1,392	-0,692
28.08.00	16:15	–	0,225	1,100	1,496	-0,396
18.09.00	11:30	–	0,265	4,100	3,944	0,156
06.10.00	12:25	–	0,270	3,900	4,650	-0,750
13.01.01	12:00	–	0,255	3,750	2,856	0,894
02.02.01	11:30	O	0,245	5,500	2,137	3,363
23.02.01	11:10	+	0,255	4,600	2,856	1,744
13.03.01	14:00	–	0,280	9,500	6,434	3,066
19.04.01	13:15	–	0,280	5,700	6,434	-0,734
03.05.01	13:20	–	0,240	2,500	1,892	0,608
22.05.01	16:30	O	0,170	0,210	0,702	-0,492
26.09.01	15:10	–	0,175	0,230	0,188	0,042
01.10.01	12:10	O	0,175	0,167	0,188	-0,021
15.10.01	11:40	–	0,185	0,200	0,260	-0,060
26.10.01	10:15	–	0,210	0,750	0,544	0,206
29.10.01	16:25	O	0,200	0,425	0,409	0,016
09.11.01	13:00	–	0,300	5,130	4,335	0,795
16.11.01	12:40	–	0,250	0,760	1,500	-0,740
21.11.01	14:00	–	0,245	0,500	1,334	-0,834
01.12.01	12:30	–	0,380	15,000	17,162	-2,162
12.12.01	13:33	O	0,290	1,850	3,559	-1,709
02.01.02	12:45	–	0,260	0,560	1,885	-1,325
19.01.02	11:40	O	0,240	0,750	1,183	-0,433
23.01.02	11:05	–	0,285	4,200	3,216	0,984
28.01.02	13:55	–	0,290	5,180	3,559	1,621
01.02.02	15:15	–	0,260	2,210	1,885	0,325
08.02.02	15:20	–	0,270	2,630	2,348	0,282
10.02.02	13:00	–	0,370	19,660	14,694	4,966
10.02.02	14:40	–	0,365	17,270	13,576	3,694
13.02.02	14:50	–	0,420	34,550	30,729	3,821
13.02.02	17:00	–	0,410	28,500	26,707	1,793
27.02.02	15:35	–	0,395	15,400	21,499	-6,099
27.02.02	18:00	–	0,385	14,250	18,518	-4,268
04.03.02	13:25	–	0,325	4,240	6,908	-2,668
11.03.02	11:15	–	0,260	1,890	1,885	0,005
09.04.02	11:20	O	0,215	0,880	0,624	0,256
24.04.02	13:45	–	0,205	1,200	0,473	0,727

+ = steigende Pegelstände
– = fallende Pegelstände
O = stagnierende Pegelstände

Tabelle 5-5 c Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P3 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell (Teil c).

Pegelstand P3 – Abfluss W12 (Teil c)						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [m]	Abfluss [l/s] Direktmessung	Abfluss [l/s] Regression	Residualwert
03.05.02	12:55	O	0,200	0,870	0,409	0,461
15.05.02	12:15	–	0,220	2,080	0,713	1,367
22.05.02	12:35	O	0,180	0,370	0,222	0,148
29.05.02	13:05	–	0,180	0,340	0,222	0,118
19.06.02	12:45	–	0,155	0,020	0,093	-0,073
21.07.02	10:00	–	0,155	0,040	0,093	-0,053
07.08.02	16:40	–	0,140	0,000	0,051	-0,051

+ = steigende Pegelstände – = fallende Pegelstände O = stagnierende Pegelstände

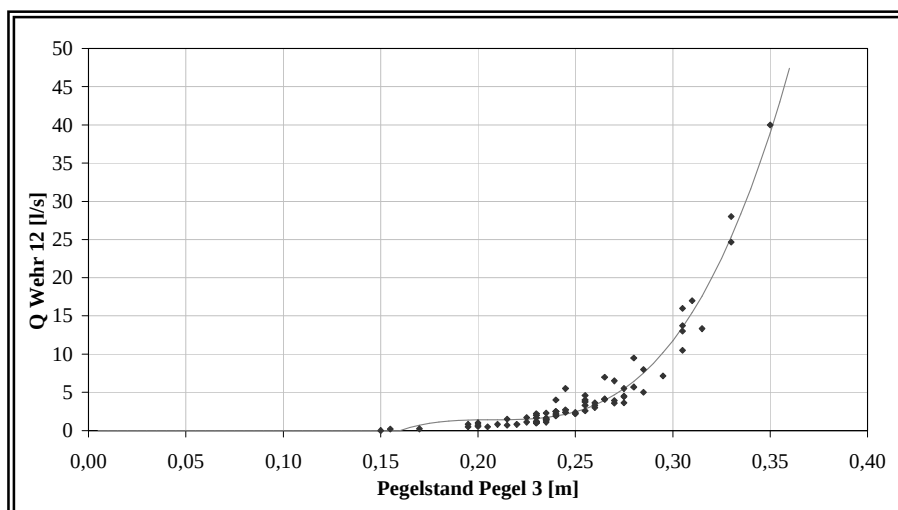


Abb. 5-7 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel P3/Abfluss W12 (Zeitraum 01.11.1999 bis 09.06.2001).

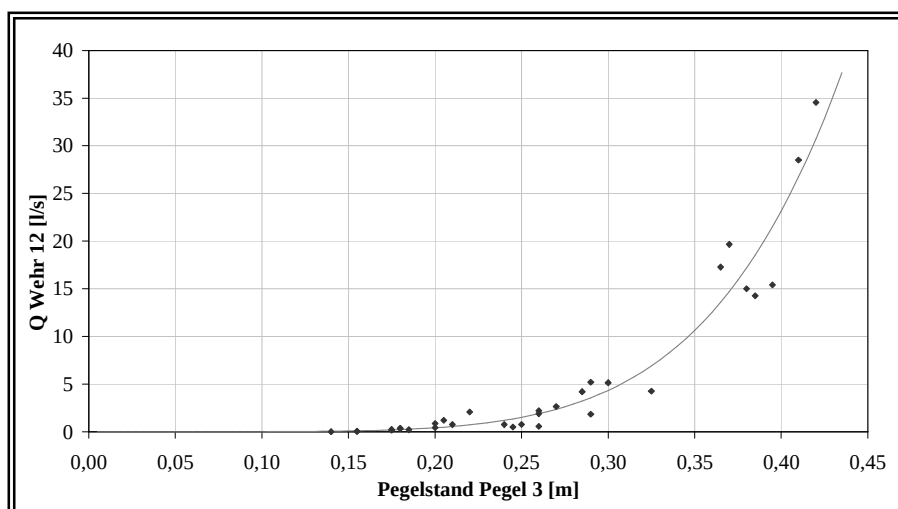
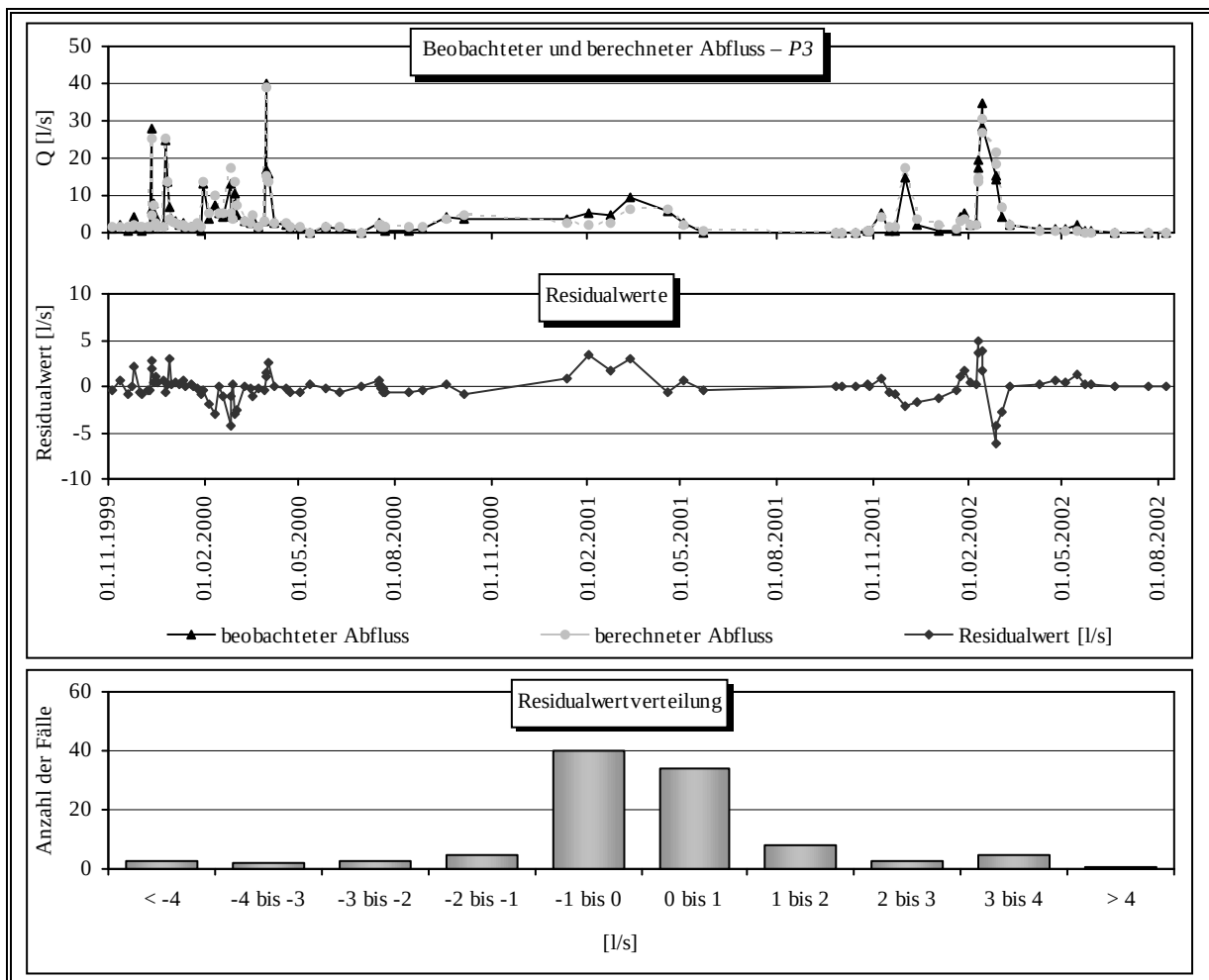


Abb. 5-8 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel P3/Abfluss W12 (Zeitraum ab 10.06.2001).

Tabelle 5-6 Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P3.

Unabhängige Variable: Pegelstand P3 [m]					
Zeitraum	abhängige Variable	Pegelstands-bereich [m]	Modell	r ²	Regressionsgleichung
01.11.1999 bis 09.06.2001	Q W12	< 0,160	Pegelstände unter 0,160 m ⇒ Abfluss 0 l/s		
		≥ 0,160	kubisch	0,965	$y = -113,16 + 1656,4x - 7988x^2 + 12849x^3$
10.06.2001 bis 31.10.2003	Q W12	< 0,005	Pegelstände unter 0,005 m ⇒ Abfluss 0 l/s		
		≥ 0,005	potenziell	0,903	$y = 4790,1x^{5,8203}$

**Abb. 5-9** Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel P3.

5.1.1.4 Abflusskurve Pegel P6

Die Abflusskurve für Pegel P6 basiert auf insgesamt 40 Abflusswerten mit den zugehörigen Wasserständen, die im Zeitraum November 2001 bis Oktober 2003 gemessen wurden. Eine Auflistung der zugrunde liegenden Daten findet sich in Tabelle 5-7 und Abbildung 5-10, das resultierende, nicht-lineare Regressionsmodell ist in Tabelle 5-8 aufgeführt. Auch in diesem Fall wurde Pegelständen unter 0,205 m, abweichend vom Regressionsmodell, eine Abflussmenge von 0 l/s zugeordnet.

Tabelle 5-7 Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P6 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.

Pegelstand P6 – Abfluss W17						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [m]	Abfluss [l/s] Direktmessung	Abfluss [l/s] Regression	Residualwert
09.11.01	13:20	–	0,260	1,000	0,619	0,381
16.11.01	12:50	O	0,225	0,320	0,302	0,018
21.11.01	14:10	O	0,220	0,250	0,259	-0,009
01.12.01	13:10	–	0,350	5,100	7,343	-2,243
12.12.01	14:05	O	0,295	1,300	1,850	-0,550
02.01.02	13:00	–	0,270	0,400	0,832	-0,432
23.01.02	11:20	–	0,295	1,400	1,850	-0,450
28.01.02	14:05	–	0,305	1,840	2,495	-0,655
01.02.02	15:25	–	0,290	1,290	1,582	-0,292
08.02.02	15:45	–	0,295	1,300	1,850	-0,550
10.02.02	13:20	–	0,350	7,750	7,343	0,407
13.02.02	15:05	–	0,385	13,750	13,190	0,560
27.02.02	16:15	–	0,355	6,890	8,078	-1,188
04.03.02	13:40	–	0,305	2,360	2,495	-0,135
11.03.02	11:40	–	0,265	1,000	0,714	0,286
20.03.02	13:05	–	0,345	9,530	6,646	2,884
09.04.02	11:30	O	0,265	0,430	0,714	-0,284
24.04.02	14:05	–	0,260	0,500	0,619	-0,119
03.05.02	13:10	–	0,250	0,390	0,484	-0,094
15.05.02	12:30	–	0,260	0,800	0,619	0,181
22.05.02	12:45	–	0,225	0,250	0,302	-0,052
29.05.02	13:15	–	0,215	0,210	0,202	0,008
19.06.02	12:55	–	0,195	0,025	0,000	0,025
21.07.02	10:15	O	0,200	0,030	0,000	0,030
07.08.02	16:55	–	0,215	0,070	0,202	-0,132
28.08.02	15:00	O	0,210	0,060	0,128	-0,068
16.09.02	11:45	O	0,215	0,065	0,202	-0,137
25.09.02	14:20	O	0,210	0,045	0,128	-0,083
14.10.02	15:10	O	0,210	0,065	0,128	-0,063
02.11.02	11:55	–	0,295	3,250	1,850	1,400
24.11.02	10:00	–	0,275	1,700	0,975	0,725
21.12.02	12:00	+	0,250	0,900	0,484	0,416
03.01.03	10:25	–	0,420	20,000	20,156	-0,156
12.03.03	12:40	O	0,275	1,200	0,975	0,225
16.04.03	10:35	O	0,240	0,150	0,400	-0,250
18.06.03	15:10	O	0,205	0,010	0,030	-0,020
01.08.03	14:30	O	0,205	0,005	0,030	-0,025
29.08.03	11:50	–	0,210	0,040	0,128	-0,088
14.10.03	11:45	O	0,215	0,080	0,202	-0,122
14.10.03	11:45	O	0,215	0,080	0,202	-0,122
+ = steigende Pegelstände – = fallende Pegelstände O = stagnierende Pegelstände						

Tabelle 5-8 Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurve für Pegel P6.

Unabhängige Variable: Pegelstand P6 [m]					
Zeitraum	abhängige Variable	Pegelstands-bereich [m]	Modell	r ²	Regressionsgleichung
01.11.2001 bis 31.10.2003	Q W17	< 0,205	Pegelstände unter 0,205 m ⇒ Abfluss 0 l/s		
		≥ 0,205	polynomisch	0,970	$y = -123,51 + 1779,5x - 9318,6x^2 + 20708x^3 - 15880x^4$

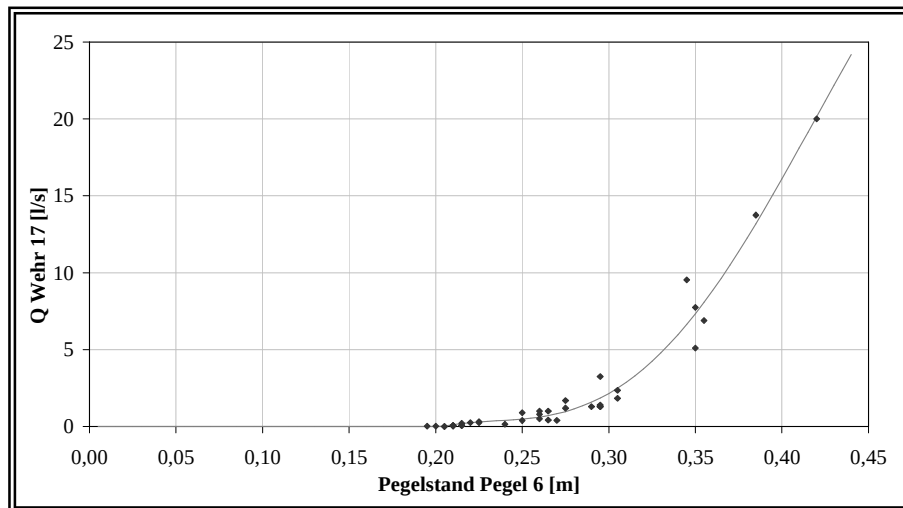


Abb. 5-10 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel P6/Abfluss W17 (Zeitraum ab 01.11.2001).

Durch das polynomische Regressionsmodell sind 97 % der Abflussvarianz begründet ($r^2 = 0,97$). Wie Abbildung 5-11 zeigt, bewegen sich die tatsächlich gemessenen Werte weitgehend im Bereich $\pm 0,75$ l/s um die Prognosewerte. Nur vereinzelt treten größere Abweichungen bis maximal 3 l/s auf. Die Residualwertverteilung ist leicht rechtsschief.

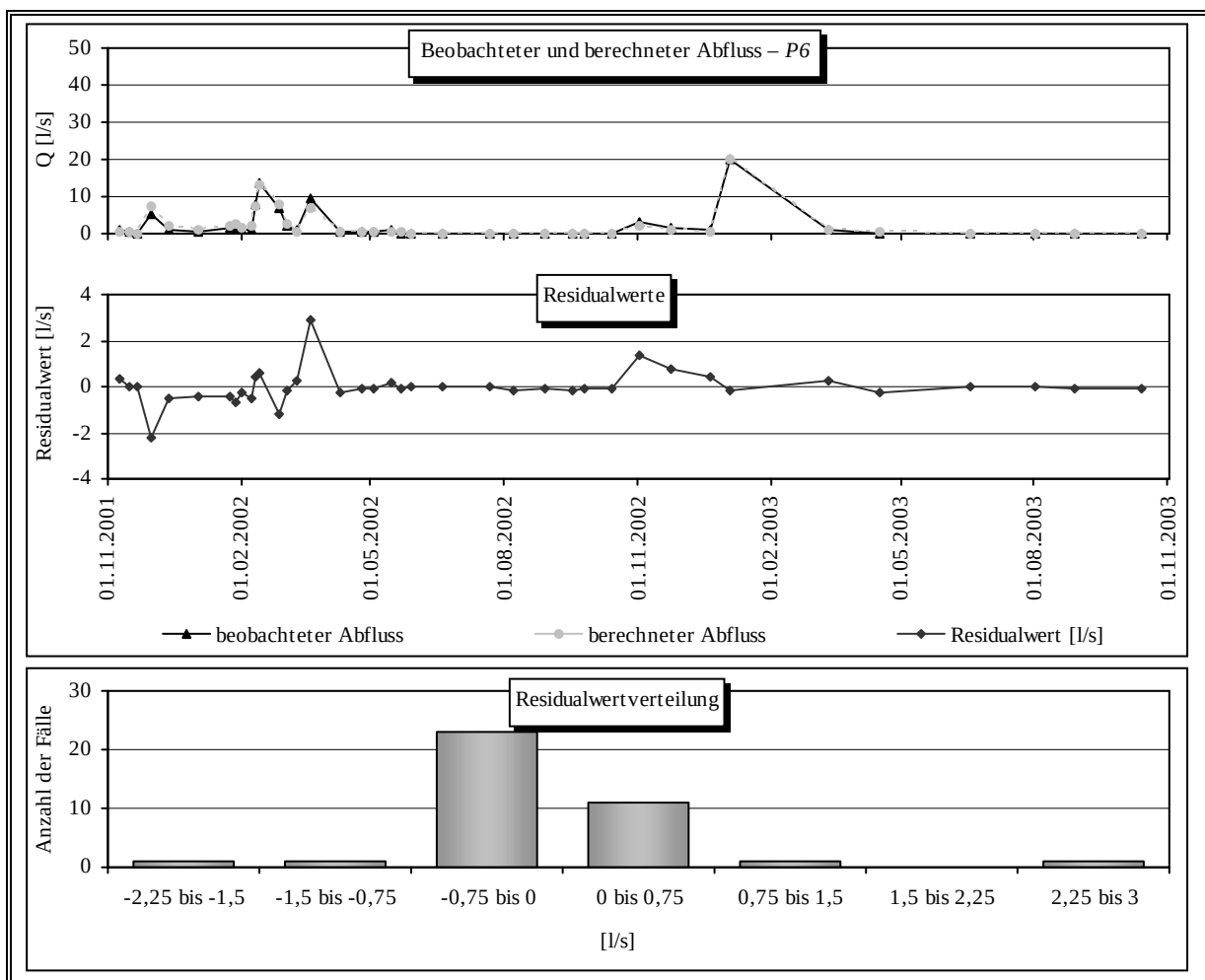


Abb. 5-11 Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel P6.

5.1.1.5 Abflusskurve Pegel P7

Die Abflusskurve für Pegel *P7* basiert auf 38 Abflussmessungen an Messwehr *W22* im Zeitraum November 2001 bis Oktober 2003 (vgl. Tabelle 5-9). Wie aus Tabelle 5-10 ersichtlich ist, handelt es sich um ein kubisches Regressionsmodell. Die Residualwerte bewegen sich zwischen $-0,75$ l/s bis $+1,0$ l/s, wobei die Verteilung auch in diesem Fall rechtsschief ist. Ob in gewissem Umfang ein systematischer Fehler vorliegt, bleibt unklar (vgl. Ganglinie der Residuen in Abbildung 5-13).

Tabelle 5-9 Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P7 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.

Pegelstand P7 – Abfluss W22						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [m]	Abfluss [l/s] Direktmessung	Abfluss [l/s] Regression	Residualwert
09.11.01	14:25	–	0,120	1,200	0,895	0,305
16.11.01	13:30	O	0,090	0,325	0,161	0,164
21.11.01	14:55	O	0,085	0,250	0,086	0,164
01.12.01	14:25	–	0,155	3,100	2,501	0,599
12.12.01	14:55	O	0,100	0,550	0,349	0,201
02.01.02	14:10	–	0,100	0,500	0,349	0,151
23.01.02	12:20	–	0,120	1,190	0,895	0,295
28.01.02	14:55	–	0,130	1,550	1,263	0,287
01.02.02	16:10	–	0,105	0,700	0,464	0,236
08.02.02	16:35	–	0,120	1,300	0,895	0,405
10.02.02	14:15	–	0,175	4,200	3,860	0,340
13.02.02	15:20	–	0,220	8,170	8,339	-0,169
04.03.02	14:30	–	0,135	1,250	1,473	-0,223
11.03.02	12:30	–	0,125	0,760	1,071	-0,311
20.03.02	13:25	–	0,190	6,075	5,121	0,954
09.04.02	11:45	O	0,120	0,380	0,895	-0,515
24.04.02	14:50	O	0,120	0,600	0,895	-0,295
03.05.02	14:00	O	0,115	0,470	0,736	-0,266
15.05.02	13:20	–	0,120	0,920	0,895	0,025
22.05.02	13:20	–	0,100	0,220	0,349	-0,129
29.05.02	14:00	–	0,100	0,220	0,349	-0,129
19.06.02	13:15	O	0,085	0,025	0,086	-0,061
21.07.02	10:30	O	0,085	0,015	0,086	-0,071
07.08.02	17:50	–	0,075	0,000	0,000	0,000
28.08.02	15:30	O	0,075	0,001	0,000	0,001
16.09.02	10:55	O	0,000	0,000	0,000	0,000
25.09.02	15:05	O	0,000	0,000	0,000	0,000
14.10.02	16:05	O	0,050	0,000	0,000	0,000
02.11.02	12:55	–	0,170	3,000	3,487	-0,487
24.11.02	10:40	–	0,110	0,650	0,592	0,058
21.12.02	12:30	+	0,130	0,800	1,263	-0,463
03.01.03	10:55	–	0,200	5,530	6,086	-0,556
12.03.03	13:30	O	0,120	0,760	0,895	-0,135
16.04.03	11:25	O	0,110	0,190	0,592	-0,402
07.05.03	13:30	O	0,100	0,080	0,349	-0,269
18.06.03	15:25	O	0,065	0,000	0,000	0,000
29.08.03	12:10	–	0,025	0,000	0,000	0,000
14.10.03	12:00	O	0,030	0,000	0,000	0,000

+ = steigende Pegelstände
– = fallende Pegelstände
O = stagnierende Pegelstände

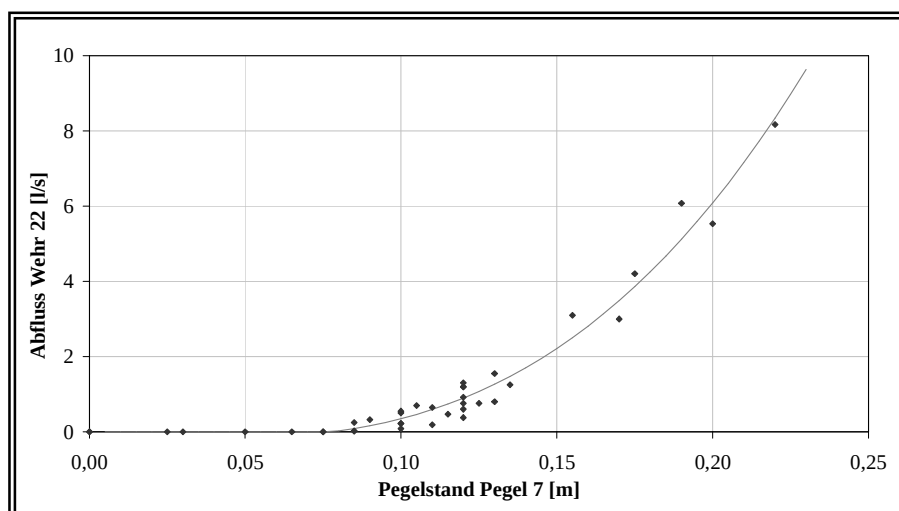


Abb. 5-12 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel P7/Abfluss W22 (Zeitraum ab 01.11.2001).

Tabelle 5-10 Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurve für Pegel P7.

Unabhängige Variable: Pegelstand P7 [m]					
Zeitraum	abhängige Variable	Pegelstands-bereich [m]	Modell	r ²	Regressionsgleichung
01.11.2001 bis 31.10.2003	Q W22	< 0,08	Pegelstände unter 0,08 m ⇒ Abfluss 0 l/s		
		≥ 0,08	kubisch	0,972	$y = 0,0941 - 7,9176x + 19,978x^2 + 847,06x^3$

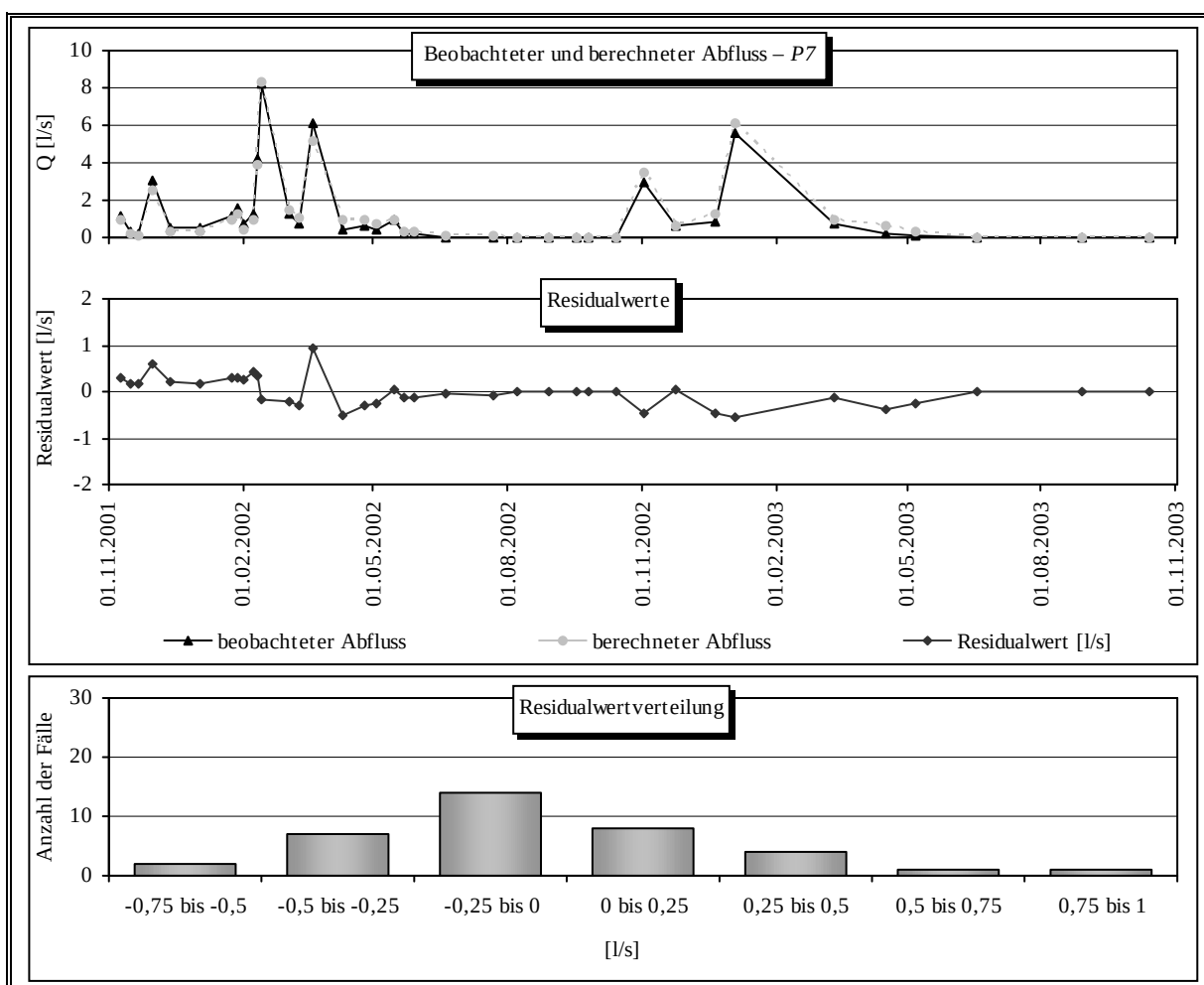


Abb. 5-13 Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel P7.

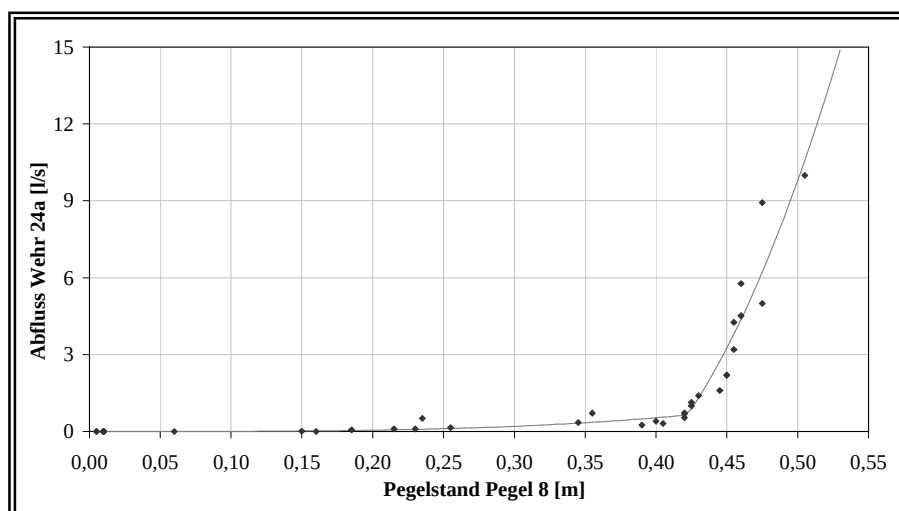


Abb. 5-14 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel P8/Abfluss W24a für den Zeitraum ab 01.11.2001.

Tabelle 5-12 Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurve für Pegel P8.

Unabhängige Variable: Pegelstand P8 [m]					
Zeitraum	abhängige Variable	Pegelstands-bereich [m]	Modell	r ²	Regressionsgleichung
01.11.2001 bis 31.10.2003	Q W24a	< 0,06	Pegelstände unter 0,06 m ⇒ Abfluss 0 l/s		
		0,06 bis 0,42	potenziell	0,844	$y = 11,876x^{3,3786}$
		> 0,42	quadratisch	0,880	$y = 52,672 - 326,32x + 481,13x^2$

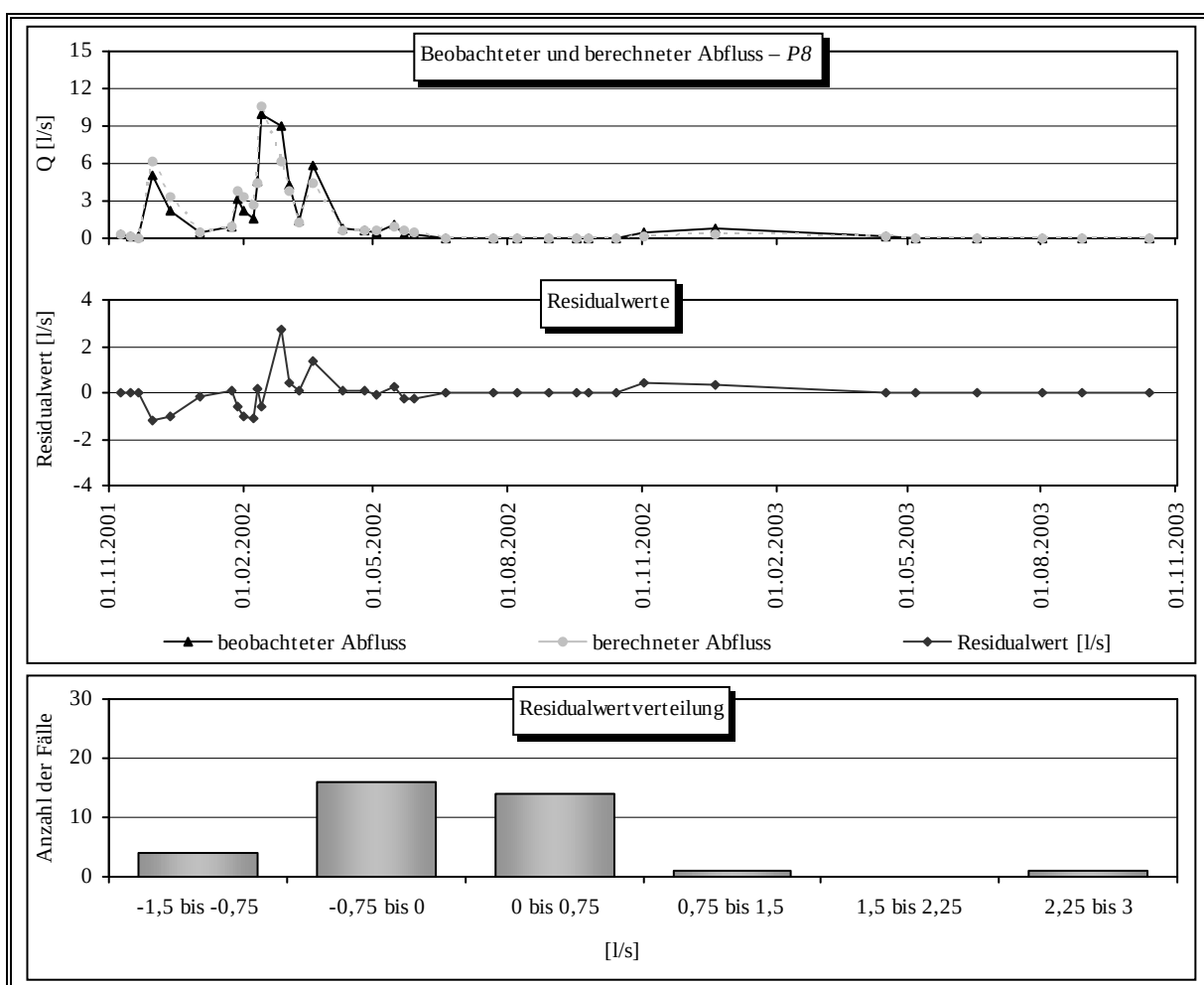


Abb. 5-15 Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel P8.

5.1.2 Abflusskurve des Pegels P5 am Gebietsauslass

Auf Basis der Ergebnisse der Abflussmessungen im Gräfenbach (vgl. Kapitel 4.2) und der zugehörigen Pegeldata von Pegel P5 (vgl. Kapitel 4.4) konnte auch für den Gebietsauslass des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches eine Abflusskurve erstellt werden. Das Regressionsmodell ermöglichte die Berechnung einer quasi-kontinuierlichen Abflussganglinie für den Gräfenbach am zugehörigen Gewässerquerschnitt, die – neben den zuvor für den Modellhang ermittelten Ergebnissen – die Basis für die aufbauenden Analysen bildete.

Tabelle 5-13 Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P5 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.

Pegelstand P5 – Abfluss Gräfenbach Pegel P5						
Datum	Uhrzeit	Pegeltendenz	Pegelstand [cm]	Abfluss [m³/s] Direktmessung	Abfluss [m³/s] Regression	Residualwert [m³/s]
22.05.02	14:00	–	39,0	0,0038	0,0046	-0,0008
29.05.02	14:30	–	40,0	0,0050	0,0085	-0,0035
19.06.02	14:30	–	35,0	0,0008	0,0007	0,0001
28.08.02	16:00	O	36,0	0,0010	0,0012	-0,0002
16.09.02	12:15	O	33,0	0,0002	0,0002	0,0000
25.09.02	15:15	O	35,5	0,0010	0,0009	0,0001
29.08.03	12:45	O	3,0	0,0000	0,0000	0,0000
08.01.04	13:00	+	57,0	0,1926	0,1644	0,0282
12.01.04	10:45	O	73,0	0,4446	0,4642	-0,0197
13.01.04	10:45	+	93,5	1,0687	1,0653	0,0034
14.01.04	10:30	–	74,0	0,5040	0,4879	0,0161
15.01.04	11:00	–	69,5	0,3841	0,3860	-0,0019
01.02.04	11:30	+	74,0	0,4813	0,4879	-0,0066
02.02.04	10:30	–	67,0	0,3288	0,3344	-0,0056
03.02.04	15:00	–	61,5	0,2346	0,2338	0,0008
05.02.04	11:00	–	55,0	0,1379	0,1374	0,0006
06.02.04	11:45	O	54,0	0,1138	0,1247	-0,0109

+ = steigende Pegelstände – = fallende Pegelstände O = stagnierende Pegelstände

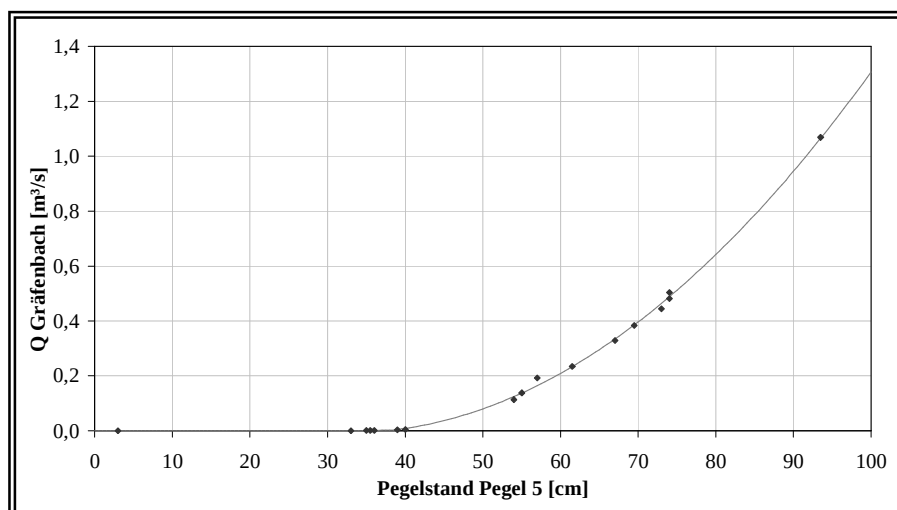


Abb. 5-16 Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstand Pegel P5/ Abfluss Gräfenbach am Gebietsauslass (Zeitraum ab 01.11.2001).

Die Abflusskurve (vgl. Abbildung 5-16) beruht auf insgesamt 17 Abflusswerten, die mit den zugehörigen Wasserständen in Tabelle 5-13 aufgeführt sind. In Abhängigkeit vom Pegelstandsbereich wird die Beziehung zwischen Pegelstand und Abfluss durch zwei quadratische Regressionsmodelle wiedergegeben. Die Gleichungen finden sich in Tabelle 5-14. Eine Unterteilung erfolgte dabei aufgrund des spezifischen Gewässerquerschnitts in die Bereiche > 39 cm, 33 bis 39 cm und < 33 cm, wobei Pegelständen unter 33 cm grundsätzlich ein Abfluss von 0 l/s zugeordnet wurde. Die Modellgüte kann als insgesamt sehr gut bezeichnet werden. 99,8 % bzw. 99,3 % der Varianz der beobachteten Abflusswerte werden durch die Regressionsmodelle erklärt. Die Residualwerte bewegen sich, wie Abbildung 5-17 verdeutlicht, zwischen $-0,02$ m³/s und $+0,03$ m³/s, wobei sich die Verteilung leicht rechtsschief darstellt. Das arithmetische Mittel der 17 beobachteten Werte beträgt 0,278 m³/s, das Mittel der berechneten Werte 0,277 m³/s.

Tabelle 5-14 Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurve für Pegel P5.

Unabhängige Variable: Pegelstand P5 [m]					
Zeitraum	abhängige Variable	Pegelstands-bereich [cm]	Modell	r ²	Regressionsgleichung
01.11.2001 bis 31.10.2003	Q P5	< 33 cm	Pegelstände unter 33 cm $\Rightarrow$ Abfluss 0 l/s		
		33 bis 39 cm	quadratisch	0,993	$y = 0,0945 - 0,0058x + 0,000089x^2$
		> 39 cm	quadratisch	0,998	$y = 0,3027 - 0,019x + 0,0003x^2$

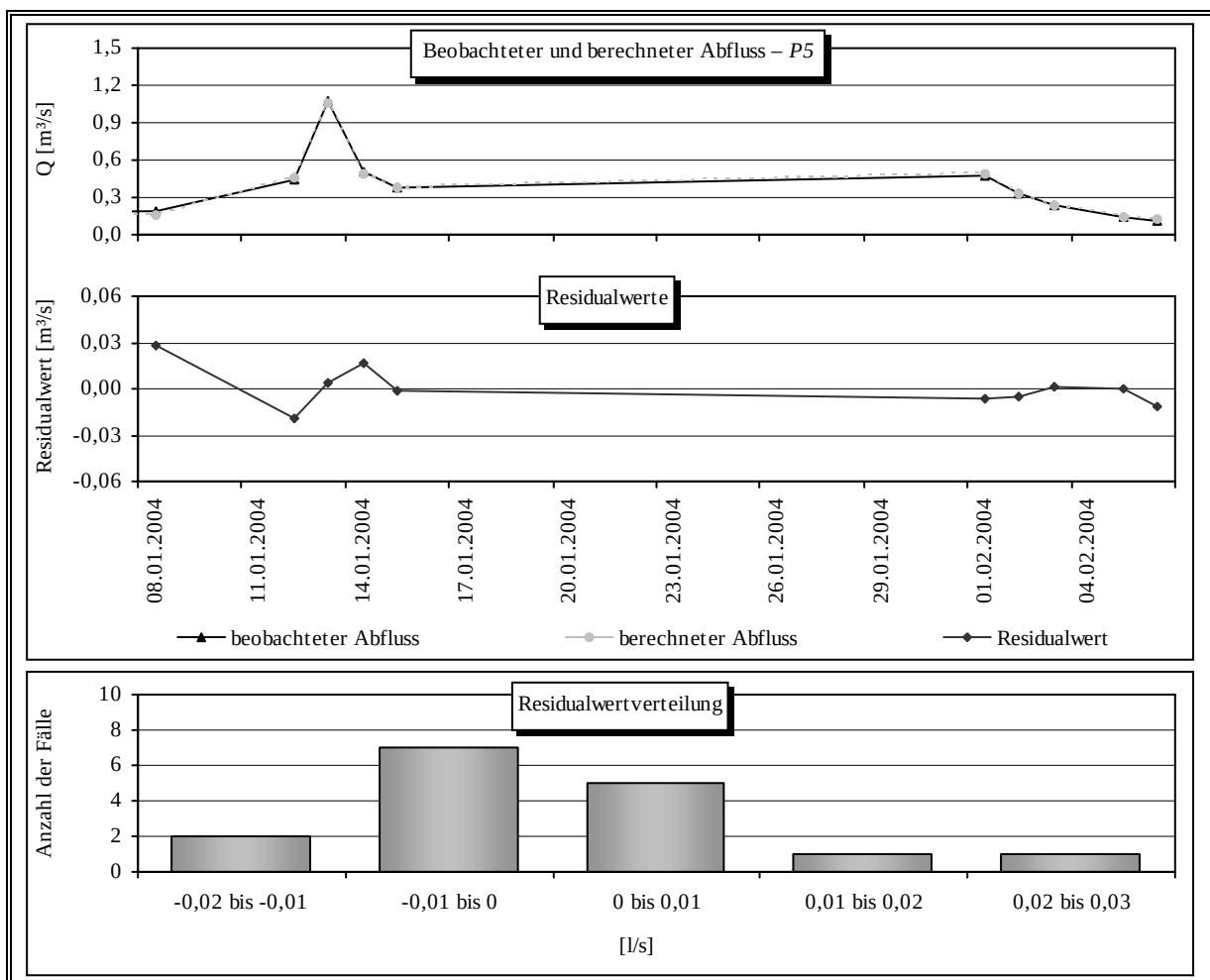


Abb. 5-17 Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel P5.

5.2 Ableitung quasi-kontinuierlicher Abflussganglinien

Aus der Anwendung der Abflusskurven auf die quasi-kontinuierlichen Wasserstandsganglinien resultieren die in den folgenden Abbildungen dargestellten quasi-kontinuierlichen Abflussganglinien, die das Abflussgeschehen am jeweiligen Gewässerquerschnitt wiedergeben. Die so ermittelten Abflussganglinien bildeten die Grundlage aller weiteren Auswertungen.

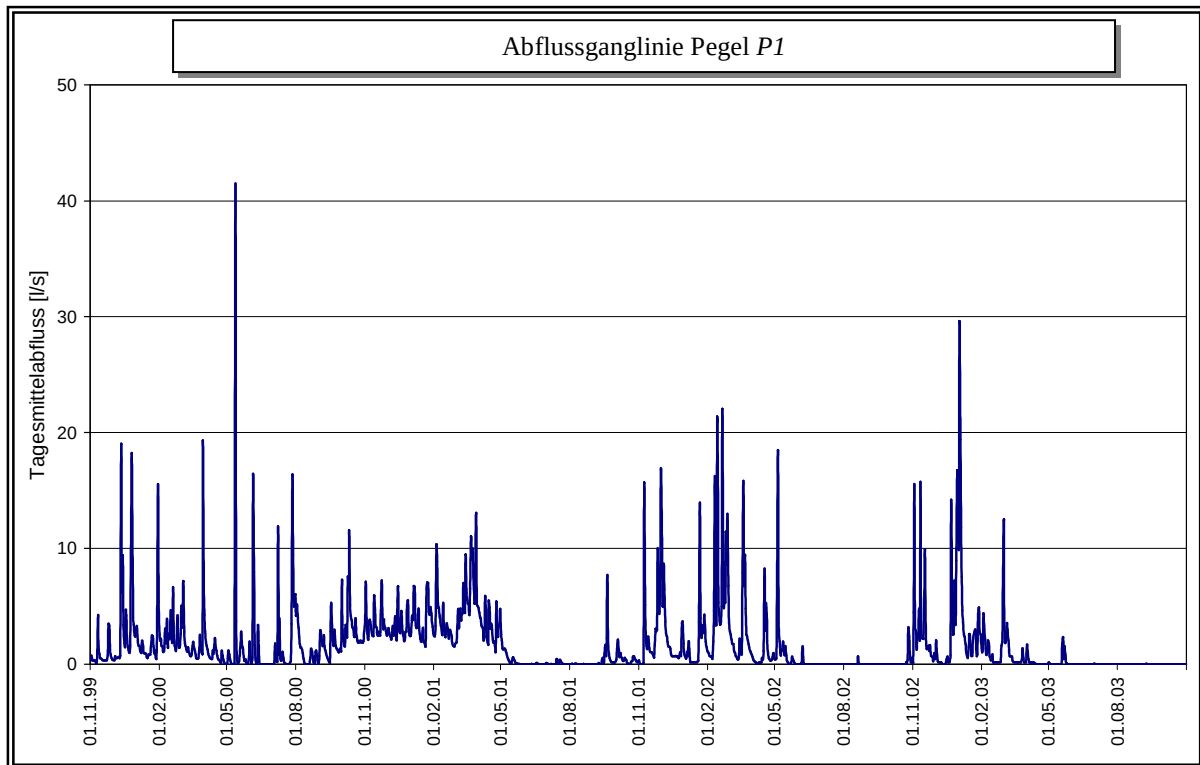


Abb. 5-18 Abflussganglinie Pegel P1 auf Tagesmittelbasis.

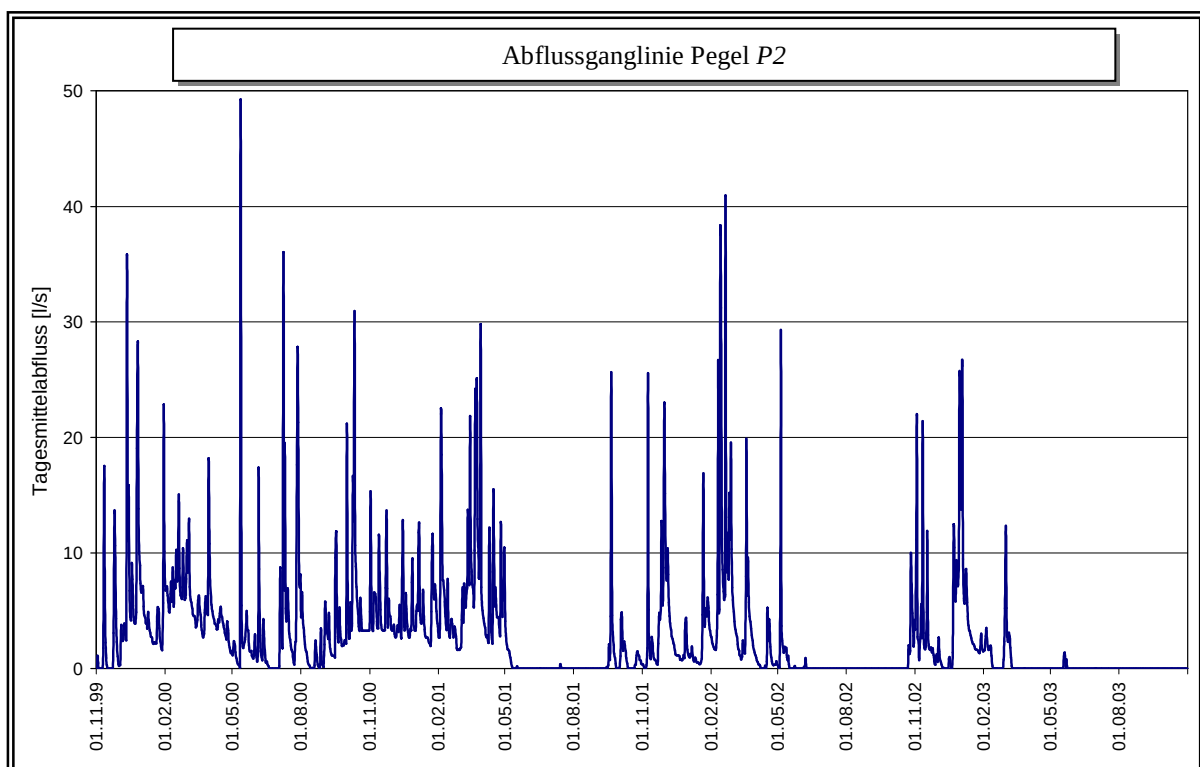


Abb. 5-19 Abflussganglinie Pegel P2 auf Tagesmittelbasis.

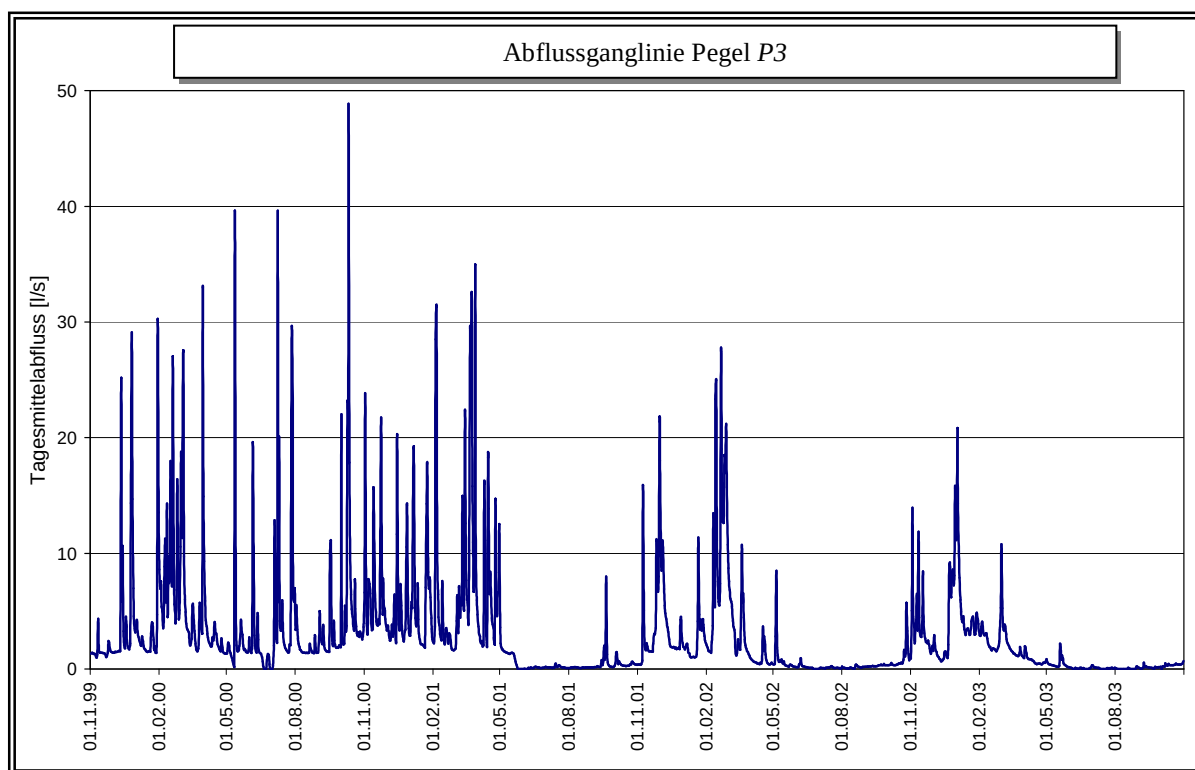


Abb. 5-20 Abflussganglinie Pegel P3 auf Tagesmittelbasis.

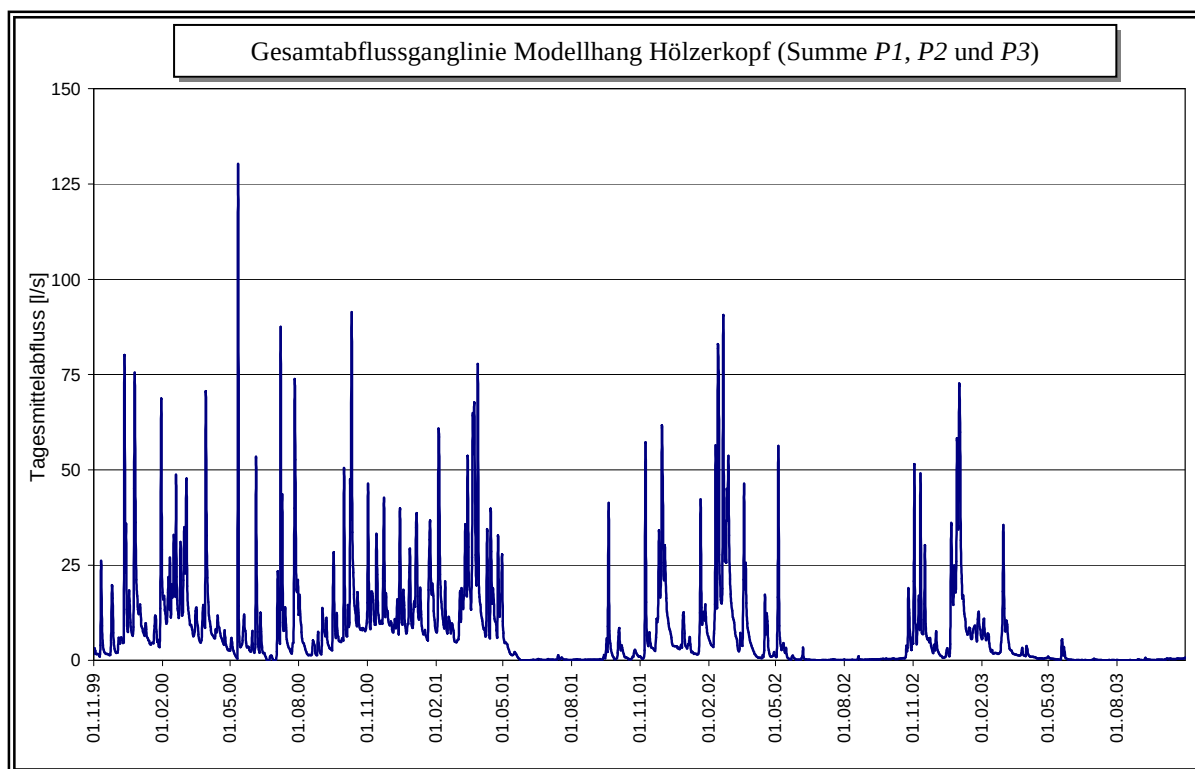


Abb. 5-21 Ganglinie des Gesamtabflusses aus dem Modellhang auf Basis der Summenwerte von Pegel P1, P2 und P3 auf Tagesmittelbasis.

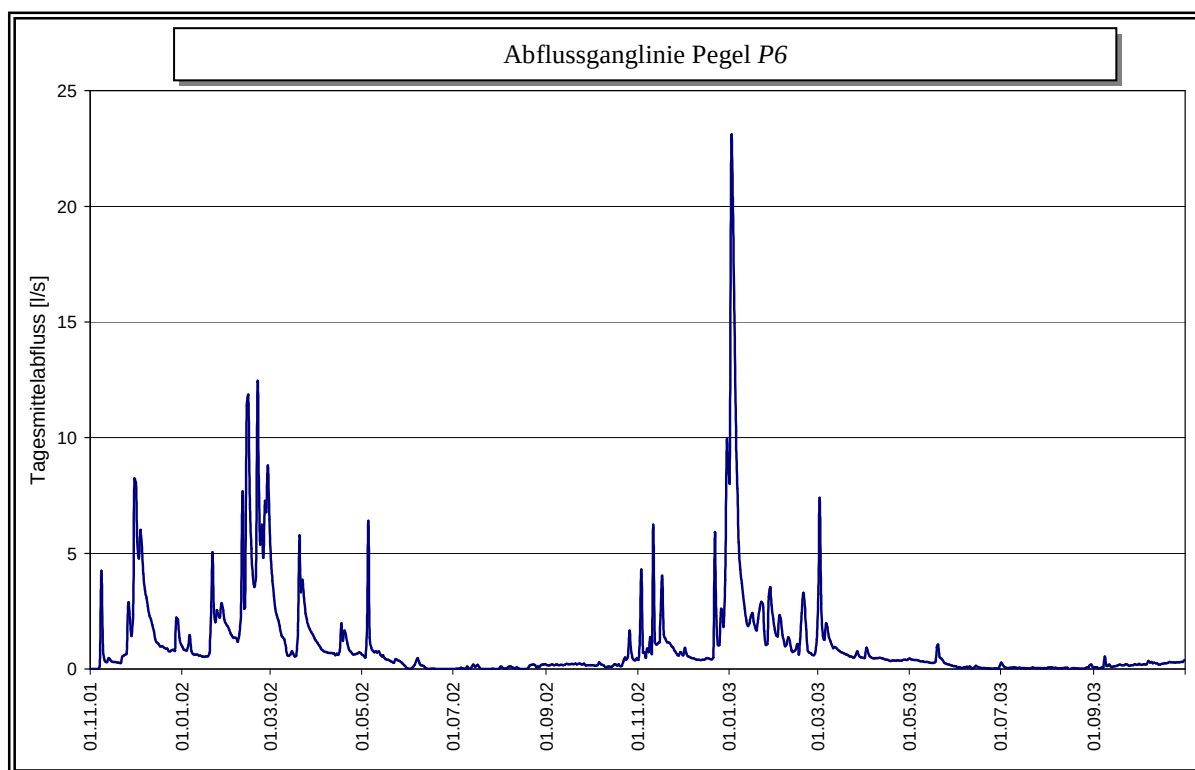


Abb. 5-22 Abflussganglinie Pegel P6 auf Tagesmittelbasis.

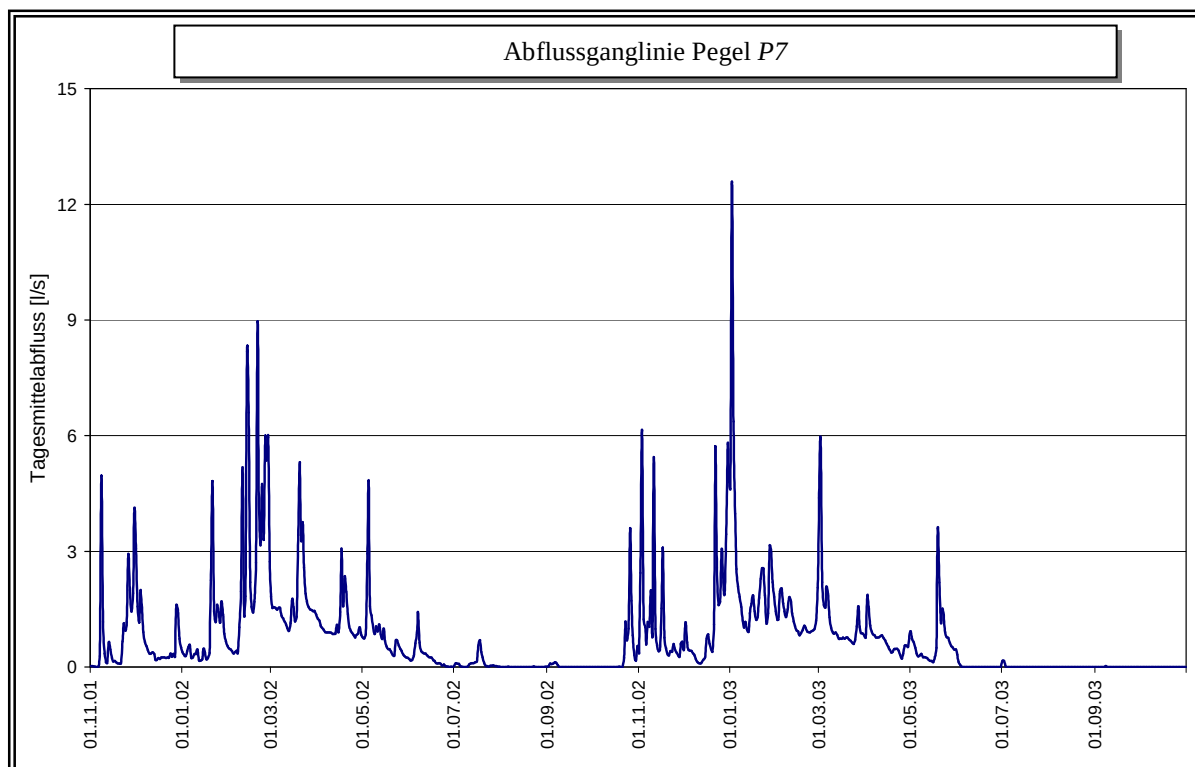


Abb. 5-23 Abflussganglinie Pegel P7 auf Tagesmittelbasis.

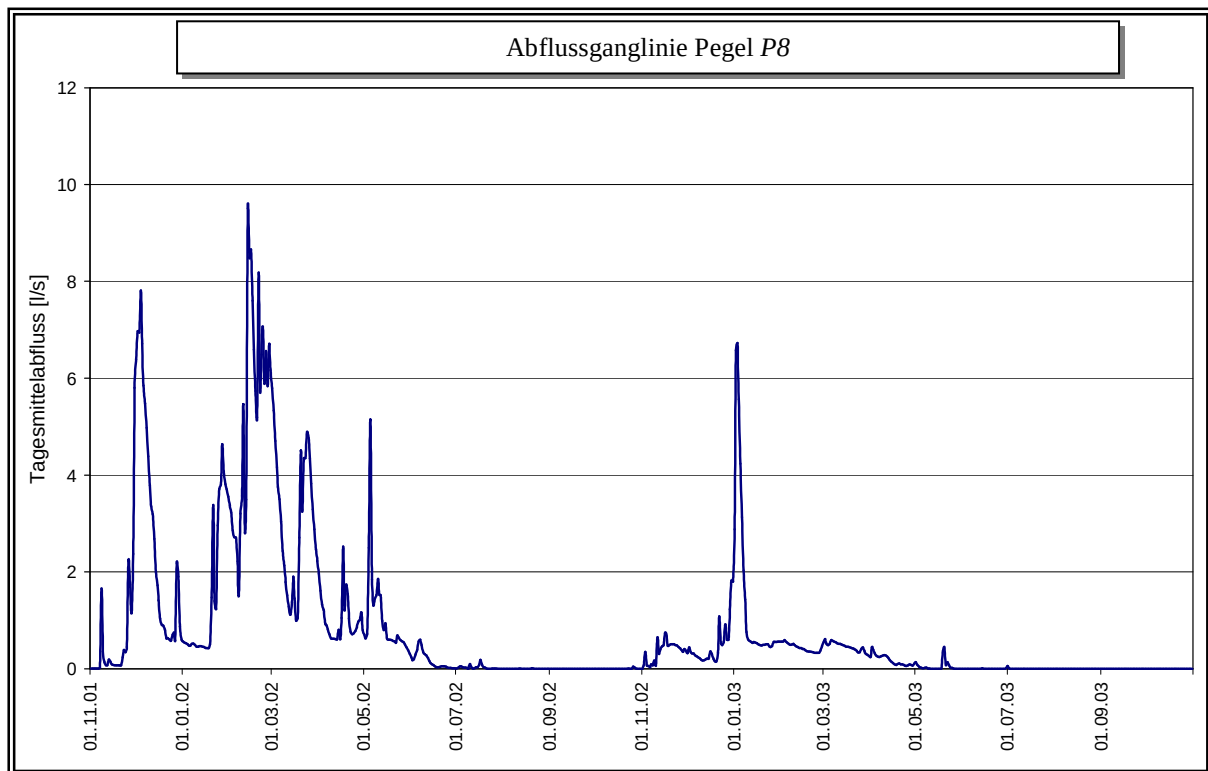


Abb. 5-24 Abflussganglinie Pegel P8 auf Tagesmittelbasis.

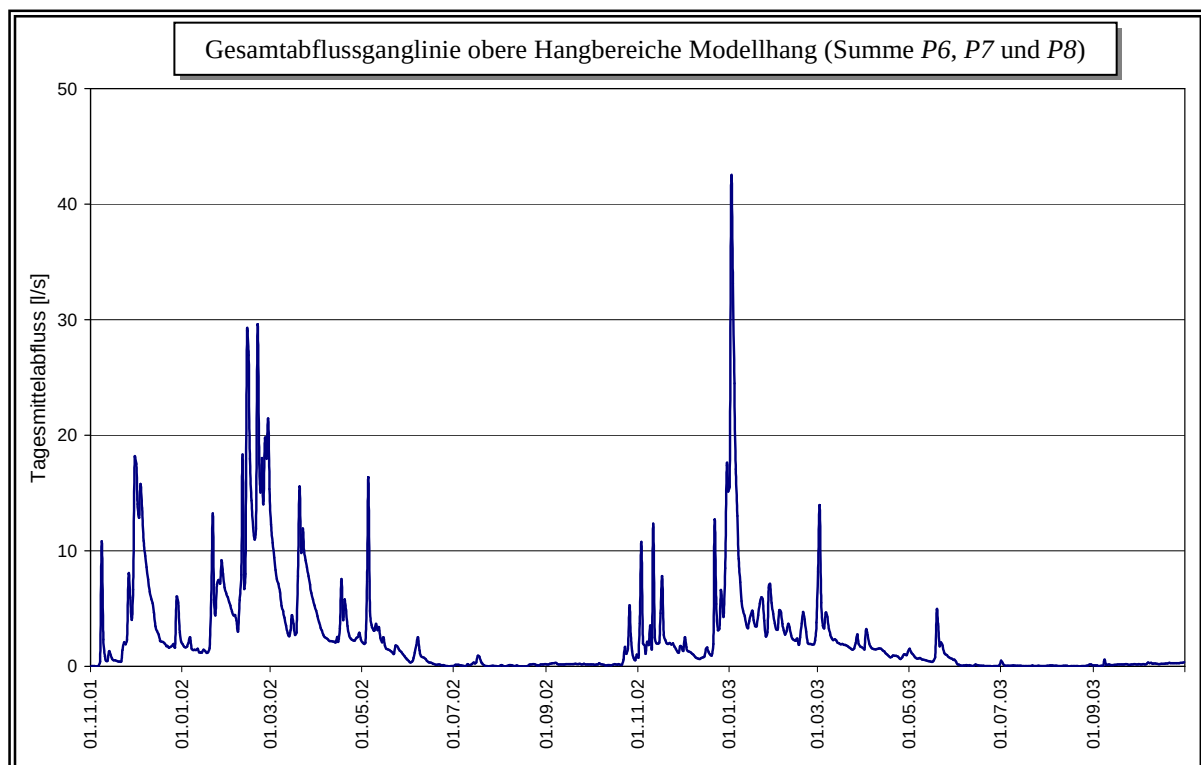


Abb. 5-25 Ganglinie des Gesamtabflusses aus dem oberen Modellhangbereich auf Basis der Summenwerte von Pegel P6, P7 und P8 auf Tagesmittelbasis.

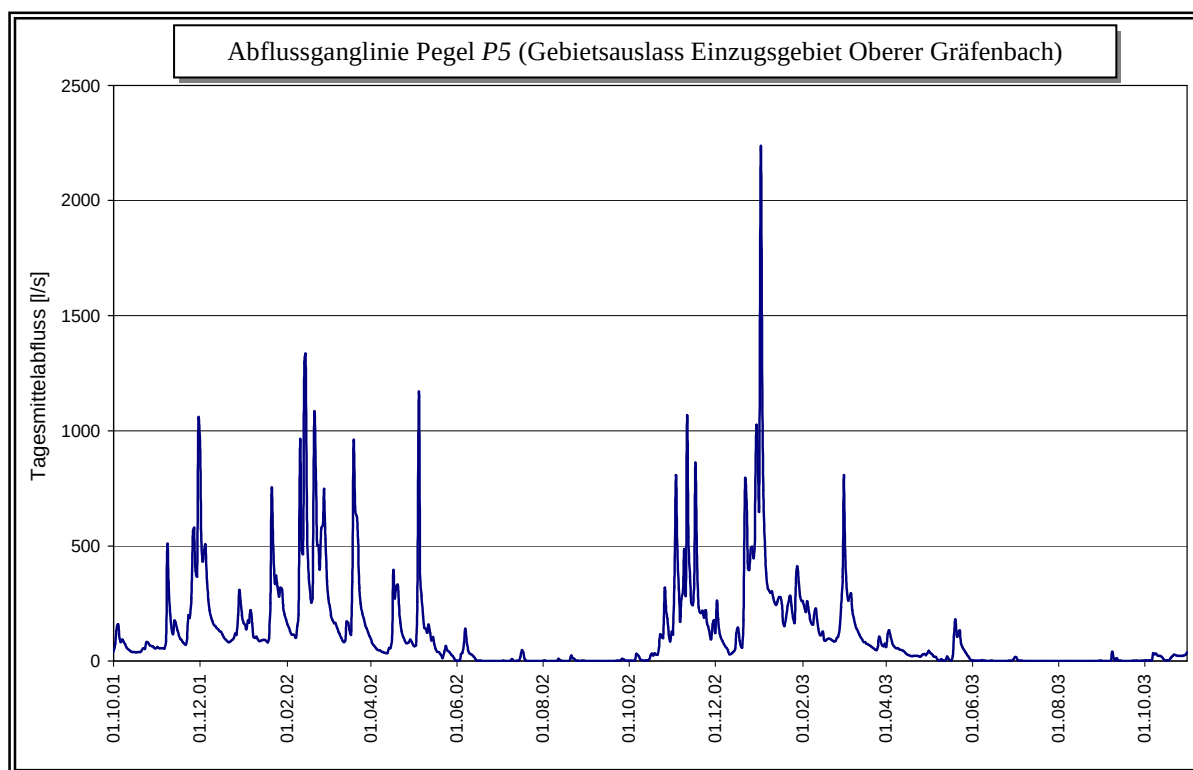


Abb. 5-26 Abflussganglinie des Gräfenbaches am Gebietsauslass des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach (Pegel P5) auf Tagesmittelbasis.

6 Darstellung und Analyse des Abflussverhaltens

Das folgende Kapitel umfasst die Ergebnisse der Auswertung der im Untersuchungsgebiet aufgenommenen hydrometeorologischen Daten. Zu diesem Zweck wird zunächst ein deskriptiver Überblick über das Abfluss- und Niederschlagsgeschehen im Untersuchungszeitraum gegeben, an den sich die Darstellung der Resultate der Abflussanalyse anschließt. Dies erfolgt in unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Dimensionen. Aus zeitlicher Sicht ist zwischen dem Jahresgang der Abflüsse und der kurzfristigen Abflussdynamik im Rahmen von Hochwasserereignissen zu unterscheiden, wobei auch in der letztgenannten Dimension jahreszeitliche Unterschiede existieren. Aus räumlicher Sicht erfolgt einerseits eine Gegenüberstellung des Abflussverhaltens von Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und Modellhang Hölzerkopf und andererseits – im Vorgriff auf die Niederschlag-Abfluss-Modellierung in Kapitel 7 – eine Erörterung der Unterschiede im Abflussverhalten einzelner Hangbereiche, d. h. eine weitergehende räumliche Differenzierung des Abflussverhaltens. Auch in diesem Zusammenhang wird die Frage diskutiert, ob sowohl saisonale Unterschiede als auch Unterschiede im kurzfristigen Ansprechen des Abflusses auf Niederschlagsereignisse zwischen einzelnen Hangsegmenten bestehen bzw. wie sich diese gegebenenfalls darstellen.

Neben den meteorologischen Zeitreihen der Wetterstation am Modellhang⁸ und der benachbarten Station Ellern-Forsthaus Thiergarten standen als Datenbasis für die Abflussanalyse, wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, zum einen die auf den quasi-kontinuierlichen Messreihen der elektronischen Pegelanlagen (15-minütliche Auflösung) aufbauenden Abflussganglinien zur Verfügung und zum anderen die Abflusswerte der volumetrischen Abflussmessungen (Gefäßmessungen) an den Messwehren des Modellhanges Hölzerkopf. Die quasi-kontinuierlichen Abflussganglinien besitzen den Vorteil einer hohen zeitlichen Auflösung, lagen jedoch lediglich für die sieben elektronischen Pegelanlagen vor. Demgegenüber besitzen die an den 30 Abflussmessstellen durch Gefäßmessungen ermittelten Abflusswerte (in der Folge auch als „direkt gemessener“ Abfluss bezeichnet) den Vorteil einer höheren räumlichen Auflösung, bei jedoch deutlich herabgesetzter zeitlicher Auflösung. Dies führte zu dem Problem, dass zwar eine Analyse des Gesamtabflusses sowohl für längerfristige zeitliche Dimensionen (Jahresgang) als auch kurzfristige zeitliche Dimensionen (Hochwasserereignisse) möglich war, jedoch die differenzierte Betrachtung des Abflussverhaltens verschiedener Hangkompartimente durch die schwächere zeitliche Auflösung der Gefäßmessungen erschwert wurde. In erster Linie bestand die Problematik einer Überlagerung des saisonalen Abflussverhaltens durch kurz- und mittelfristig wirkende Niederschlagsereignisse bzw. die Einordnung der zeitlich punktuellen Messergebnisse in die kurz- und mittelfristige Abflusssituation. Über die quantitative Datenbasis hinausgehend sind in die Untersuchungsschritte auch die Erkenntnisse aus der (qualitativen) Geländebeobachtung mit eingeflossen. Diese waren letztlich unentbehrlich für eine umfassende Abflussanalyse.

Insgesamt bot es sich nur teilweise an, die unterschiedlichen Fragestellungen separat zu untersuchen, da sie weitgehend kausal zusammenhängen. Entsprechend erfolgt auch die Darstellung der Analyseergebnisse z. T. in verzahnter Art und Weise.

⁸ Die am Modellhang erhobenen Niederschlagsdaten sind in der anhand des Modell PRMS korrigierten Form eingeflossen (vgl. Kapitel 7.3).

6.1 Überblick über das hydrologische Geschehen im Untersuchungszeitraum

An dieser Stelle soll, wie zuvor erläutert, ein Überblick über Abfluss und Niederschlag im Untersuchungszeitraum gegeben werden. Hierzu werden zunächst die vier hydrologischen Jahre 1999/2000 bis 2002/2003 separat behandelt. Für das Jahr 1999/2000 und 2000/2001 liegen lediglich Abflussdaten für den Modellhang Hölzerkopf vor, während für die Jahre 2001/2002 und 2002/2003 sowohl Daten für Modellhang als auch das gesamte Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches existieren (vgl. Kapitel 4). Zusätzlich erfolgt die Darstellung des Sommerhalbjahrs 1999, das zu Beginn der Untersuchungen mit Hilfe einer lediglich geringen Instrumentierung erfasst wurde. An die Darstellung der Einzeljahre schließt sich eine Zusammenfassung der wichtigsten Kennzahlen für den Gesamtuntersuchungszeitraum an. Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und Modellhang werden gemeinsam betrachtet.

6.1.1 Hydrologisches Sommerhalbjahr 1999

Während des hydrologischen Sommerhalbjahrs 1999 waren im Untersuchungsgebiet noch keine elektronischen Messeinrichtungen vorhanden, so dass im Rahmen der Auswertungen ausschließlich auf Niederschlagsdaten der benachbarten Station Ellern-Thiergarten und auf Abflusswerte der Gefäßmessungen zurückgegriffen werden konnte.

Mit insgesamt 396,9 mm liegt die Niederschlagshöhe im Sommerhalbjahr 1999 geringfügig unter dem langjährigen Mittel von 419 mm (Station Ellern-Thiergarten). Im Niederschlagsgang zeigen sich dabei ein deutliches Maximum im Juli mit 109,7 mm und zwei Minima in Mai und September mit 32,5 mm bzw. 33,2 mm (vgl. Abbildung 6-1).

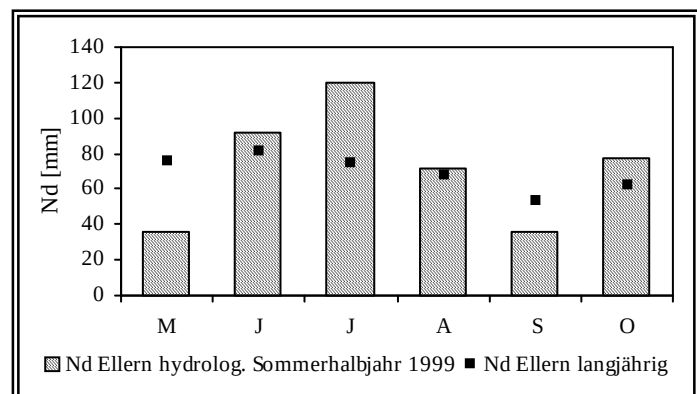


Abb. 6-1 Monatliche Niederschlagshöhe der Station Ellern im hydrologischen Sommerhalbjahr 1999.

Die relativ regenreiche Phase im Juni und Juli spiegelt sich indes kaum im Abflussgeschehen des Modellhanges wider (vgl. Abbildung 6-2). Lediglich das Starkniederschlagsereignis am 6./7. Juli 1999 mit 70 mm innerhalb von 12 h bzw. 89 mm innerhalb von 24 h führt zu extremen Hochwasserabflüssen. Bild 6-1 zeigt die Wasserführung des Gräfenbaches nördlich des Modellhanges einige Stunden nach dem Durchgang des Hochwasserscheitels. Aufgrund der geringen Instrumentierung zu diesem Zeitpunkt, die auch in der Abflussganglinie in Abbildung 6-2 zum Ausdruck kommt, konnten die maximalen Abflusswerte nur unzureichend ermittelt werden; so liegt der maximal gemessene Wert bei 95 l/s. Anhand von Niederschlagsgang und Zeitpunkt der Abflussmessungen ist jedoch auf einen

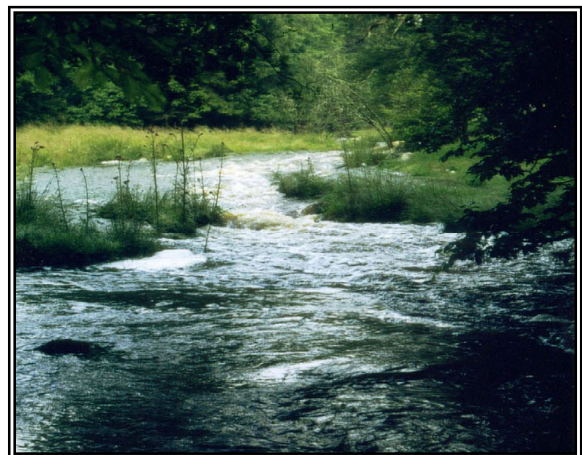


Bild 6-1 Sommerhochwasser des Gräfenbaches am 7. Juli 1999. (Foto: B. Reinke)

maximalen Abfluss zu schließen, der den beobachteten Wert um ein Mehrfaches übersteigt. Abbildung 6-3 stellt zu diesem Zweck das untersuchte Ereignis dem – aufgrund einer verbesserten Instrumentierung vollständig aufgenommenen – Hochwasserereignis am 7./8. Juli 2000 gegenüber. Bei vergleichbarer Bodenvorfeuchte und Vegetationsentwicklung, jedoch geringeren Niederschlagsmengen am 7./8. Juli 2000, beträgt der Scheitelabfluss aus dem Modellhang hier 302 l/s auf Stundenmittelbasis. Bringt man den Zeitpunkt der Abflussmessung am 7. Juli 1999 in Bezug zum Niederschlagsgang, wird deutlich, dass der Maximalabfluss im Rahmen dieses Ereignisses ebenfalls bei mindestens 300 l/s liegen muss und er somit zu den höchsten Abflussscheiteln im Untersuchungszeitraum zu rechnen ist.

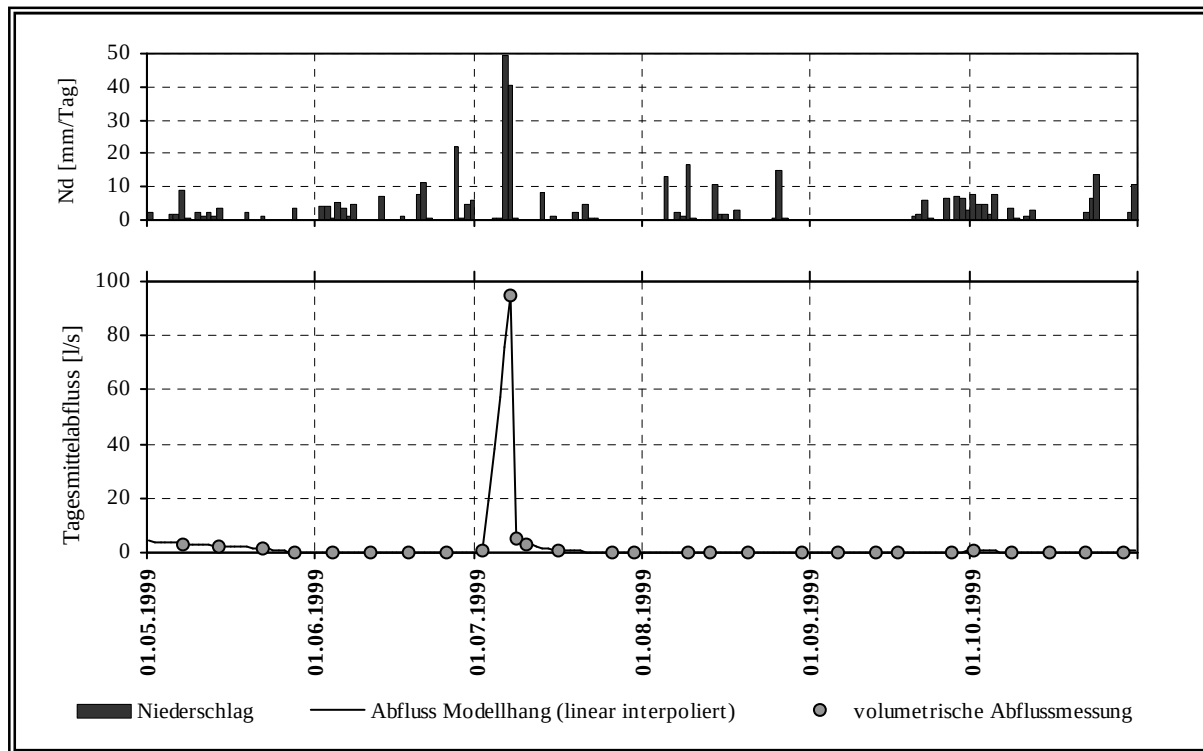


Abb. 6-2 Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf im hydrologischen Sommerhalbjahr 1999 (Werte auf Tagesbasis; Abflusswerte linear interpoliert).

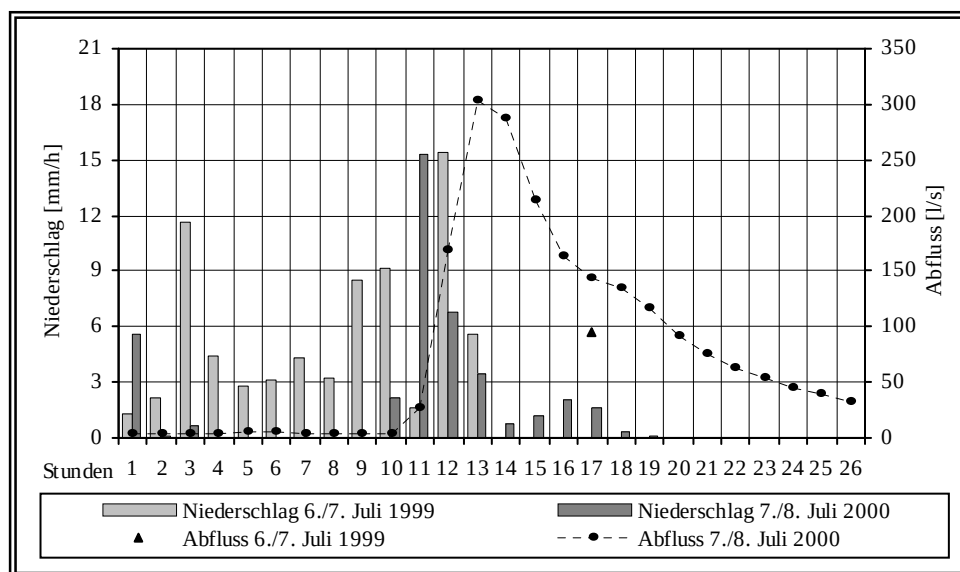


Abb. 6-3 Vergleich der Hochwasserereignisse am 6./7. Juli 1999 und 7./8. Juli 2000.

Abgesehen von dem mehrtägigen Hochwasserereignis im Juli ist der Gesamtabfluss aus dem Modellhang im hydrologischen Sommerhalbjahr 1999 zumeist unter 0,5 l/s angesiedelt. Von den insgesamt 28 durch Gefäßmessungen ermittelten Abflusswerten liegen 26 im Bereich von 0 l/s bis 5 l/s, hiervon wiederum 18 Werte unter 0,25 l/s. Dies spiegelt sich auch in den monatlichen Abflusshöhen wider, die in Tabelle 6-1 den monatlichen Niederschlagshöhen gegenübergestellt sind. Lediglich Mai und Juli besitzen mit 10 mm bzw. 48,6 mm bemerkenswerte Abflusshöhen, in den übrigen Monaten geht der Modellhangabfluss gegen null. Das Sommerhalbjahr zeigt somit zwar einerseits ein ausgeprägtes Hochwasserereignis im Juli, ist aber in der übrigen Zeit durch Trockenperioden charakterisiert. Diese Feststellung wird auch durch die ebenfalls in Tabelle 6-1 dargestellten monatlichen Abflussquotienten (Q/N_d)⁹ untermauert, die das Verhältnis von Abflusshöhe zu Niederschlagshöhe im Bezugszeitraum wiedergeben. Während der Quotient im Mai noch 0,31 beträgt, sinkt er in den Sommermonaten auf Werte nahe null bzw. null ab. Eine Ausnahme stellt lediglich der Juli mit einem Quotienten von 0,44 dar.¹⁰ Für das gesamte Sommerhalbjahr ergibt sich im Mittel ein Abflussquotient von 0,15, d. h. einer Abflusshöhe von 60,6 mm steht hier eine Niederschlagshöhe von 396,9 mm gegenüber.



Bild 6-2 Gräfenbach während der sommerlichen Trockenphase im Jahr 1999.

Tabelle 6-1 Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Sommerhalbjahr 1999 für den Modellhang Hölzerkopf.

Zeitraum	Modellhang Hölzerkopf					
	Niederschlag [mm]	Abflusshöhe [mm]	Abflussquotient (Q/N)	Abfluss [l/s]		
				MQ	NQ	HQ
05/99	32,5	10,0	0,31	2,08	0,1	3,3
06/99	84,5	0,9	0,01	0,20	0,1	0,3
07/99	109,7	48,6	0,44	10,07	0,0	95,0
08/99	66,5	0,0	0,00	0,07	0,0	0,1
09/99	33,2	0,3	0,01	0,06	0,0	0,1
10/99	70,5	0,7	0,01	0,27	0,1	0,5
Sommerhalbjahr 1999 gesamt	396,9	60,6	0,15	2,14	0,0	95,0

⁹ Der Abflussquotient bezeichnet das Verhältnis von Abflusshöhe zu Niederschlagshöhe in einem bestimmten Zeitintervall und kann auch als Abflussverhältnis bezeichnet werden (vgl. Baumgartner & Liebscher 1990). In der Literatur wird der Begriff z. T. auch für das Verhältnis Gesamtabfluss zu Grundwasserabfluss (Q/Q_g) herangezogen, soll in der vorliegenden Arbeit jedoch in seiner ursprünglichen Definition Anwendung finden.

¹⁰ An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass die Abflusswerte im Sommerhalbjahr 1999 aufgrund ihrer zeitlich punktuellen Natur bzw. der darauf aufbauenden linearen Interpolation den Abflussgang nicht optimal wiedergeben. Aufgrund der Struktur der Werte ist davon auszugehen, dass die ermittelten Abflusshöhen der Monate Mai, Juni, August, September und Oktober zu gering ausfallen, wohingegen die Abflusshöhe des Monats Juli zu hoch angesetzt ist.

6.1.2 Hydrologisches Jahr 1999/2000

Im hydrologischen Jahr 1999/2000 wurde am Modellhang eine Niederschlagshöhe von 1218,8 mm ermittelt. Der Vergleich mit dem langjährigen Wert der benachbarten Station Ellern, der sich auf 788 mm beläuft, verdeutlicht den enormen Niederschlagsreichtum dieses Jahres. Ein absolutes Maximum bildet der Juli 2000 mit 250,8 mm Niederschlag. Eine im langjährigen Vergleich unterdurchschnittliche Niederschlagsmenge zeigen in erster Linie der November 1999 sowie April und August 2000 (vgl. Abbildung 6-4).

In Übereinstimmung mit dem Niederschlagsmaximum finden sich im Juli 2000 sommerliche Spitzenabflüsse von bis zu 407 l/s auf Basis der 15-minütl. Messwerterhebung (8.7.2000) bzw. 88 l/s (27.7.2000) auf Tagesmittelbasis (vgl. Abbildung 6-5). Diese stellen die höchsten im gesamten Untersuchungszeitraum am Modellhang ermittelten Werte dar. Bemerkenswert ist weiterhin die andauernde Phase verstärkter Niederschläge im Februar und März 2000, die mit erhöhten Abflusswerten einhergeht, ohne dass jedoch absolute Spitzenabflüsse auftreten.

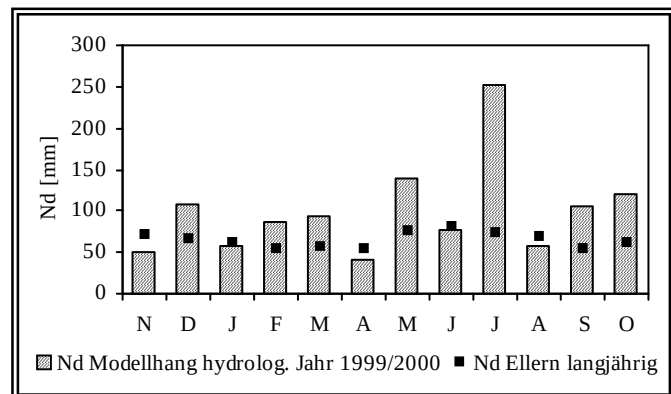


Abb. 6-4 Monatliche Niederschlagshöhen im hydrologischen Jahr 1999/2000 (Wetterstation Modellhang).

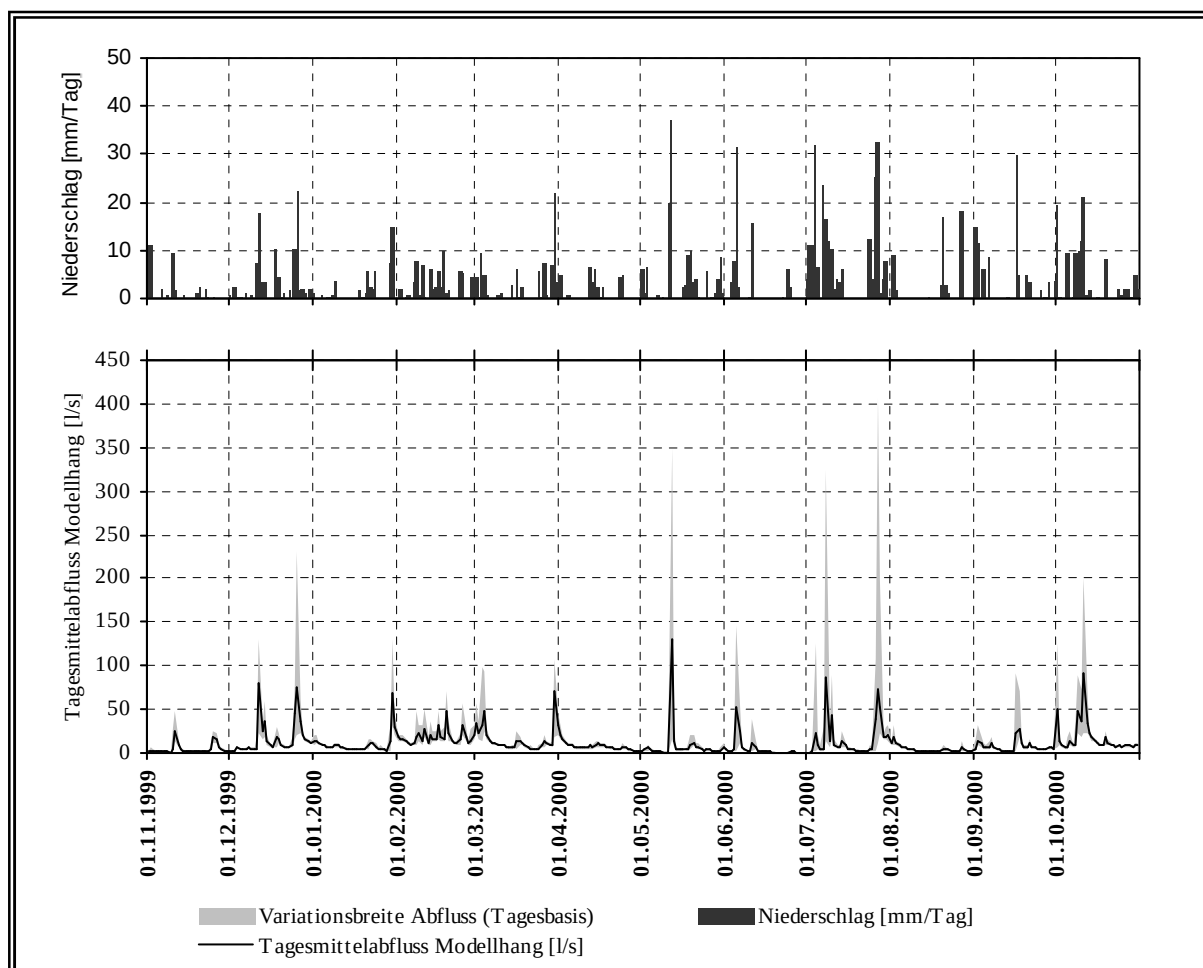


Abb. 6-5 Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 1999/2000 (Tagesbasis).

Klar ersichtlich ist zudem der erhöhte Basisabfluss im Winterhalbjahr, die Abflusswerte fallen mit Ausnahme des Monats November 1999 niemals auf 0 l/s zurück, wohingegen das Grabensystem im Sommerhalbjahr trotz extremer Scheitelabflüsse oftmals trockenfällt. Insgesamt verdeutlicht die Abflussganglinie die enorme Variabilität und die ausgeprägte Saisonalität der Modellhangabflüsse. Letztere zeigt sich auch in Abbildung 6-6, die Niederschlags- und Abflusssummenlinie gegenüberstellt. Während sich kumulierte Niederschläge und Abflüsse von November bis April weitgehend gleichförmig entwickeln, bleiben die Abflusswerte ab Mai deutlich zurück. Die in Tabelle 6-2 dargestellten monatlichen Abflussquotienten nehmen entsprechend von Januar bis April Werte über 0,8 an und fallen ab Mai auf Werte um 0,3. Erst im Oktober 2000 steigt der Quotient wieder deutlich auf 0,69 an. Insgesamt stehen 1218,8 mm Niederschlag im hydrologischen Jahr 1999/2000 621 mm Modellhangabfluss gegenüber, so dass ein Anteil von 51 % der in das System eingehenden Niederschläge den Modellhang wieder als Abfluss verlässt (Abflussquotient = 0,51). Die maximale absolute Abflusshöhe wird dabei im Oktober 2000 mit 83,4 mm erreicht, der maximale Abflussquotient im Februar 2000 mit 0,95.

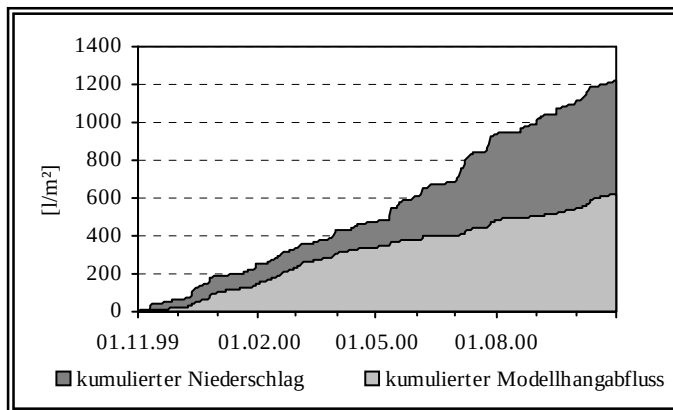


Abb. 6-6 Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 1999/2000.

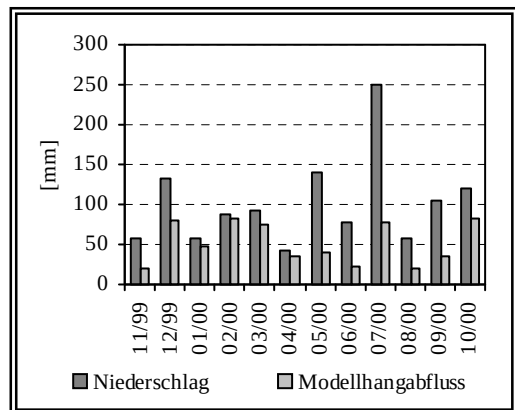


Abb. 6-7 Monatliche Niederschlags- und Abflusshöhe des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 1999/2000.

Tabelle 6-2 Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 1999/2000 für den Modellhang Hölzerkopf.

Zeitraum	Modellhang Hölzerkopf					
	Niederschlag [mm]	Abflusshöhe [mm]	Abflussquotient (Q/N)	Abfluss [l/s]		
				MQ	NQ	HQ
11/99	58,0	21,1	0,36	4,53	0,70	47,00
12/99	132,3	79,3	0,60	16,42	1,72	229,93
01/00	58,0	48,7	0,84	10,08	2,86	130,37
02/00	86,7	82,0	0,95	18,15	8,81	71,93
03/00	93,1	74,7	0,80	15,48	4,48	107,21
04/00	41,7	34,9	0,84	7,48	2,39	32,90
05/00	139,0	40,9	0,29	8,47	0,00	349,59
06/00	76,7	22,2	0,29	4,75	0,00	145,66
07/00	250,8	77,5	0,31	16,06	0,00	406,81
08/00	57,9	20,6	0,36	4,28	1,32	31,24
09/00	104,6	35,9	0,34	7,68	1,39	91,76
10/00	120,1	83,4	0,69	17,28	5,38	201,09
Hydrolog. Jahr 1999/2000	1218,8	621,0	0,51	10,90	0,00	406,81

6.1.3 Hydrologisches Jahr 2000/2001

Das hydrologische Jahr 2000/2001 ist in erster Linie durch die äußerst niederschlagsreichen Monate März (162,4 mm) und April 2001 (109,4 mm) charakterisiert, an die sich ein sehr trockener Mai mit lediglich 13,5 mm Niederschlag anschließt. Die Niederschlagshöhen der übrigen Monate weichen demgegenüber weniger stark von den langjährigen Monatsmittelwerten der Station Ellern ab, liegen jedoch v. a. im Winterhalbjahr weitgehend über diesen (Abbildung 6-8). Die Jahresniederschlagshöhe beläuft sich auf 951,2 mm, 163 mm über dem langjährigen Wert der Station Ellern.

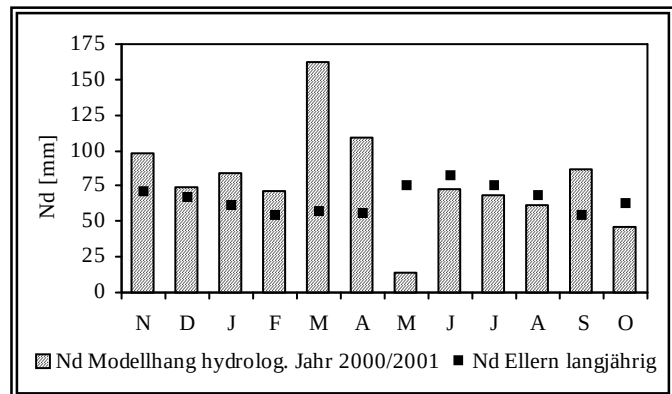


Abb. 6-8 Monatliche Niederschlagshöhen im hydrologischen Jahr 2000/2001 (Wetterstation Modellhang).

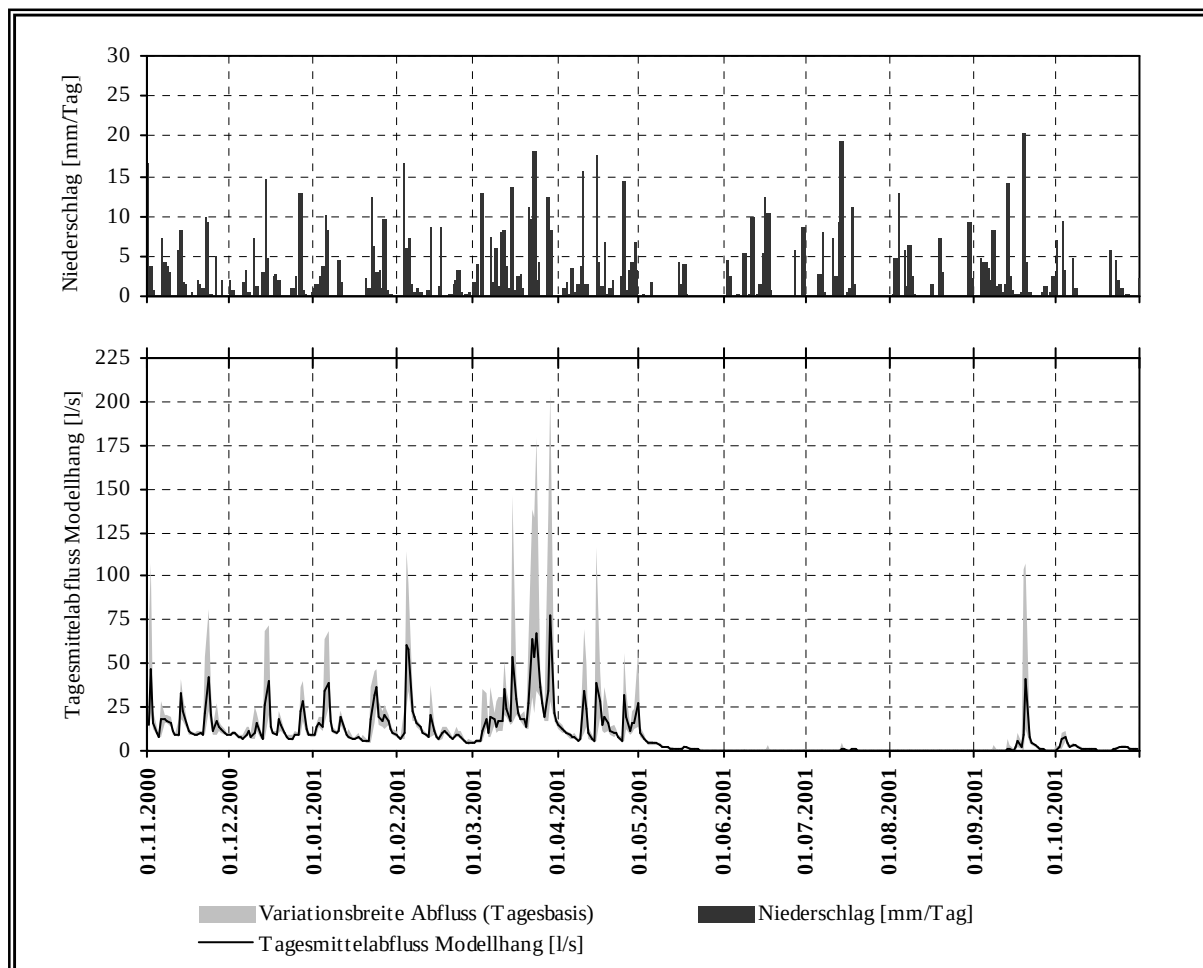


Abb. 6-9 Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2000/2001 (Tagesbasis).

Entsprechend der hohen Niederschlagsmengen im März und April findet auch der Modellhangabfluss in den entsprechenden Monaten sein Maximum. Im Gegensatz zu den auf vergleichsweise kurzen Starkregenereignissen basierenden Abflussscheiteln im Sommer 1999 und 2000 werden die erhöhten Abflusswerte hier jahreszeitenspezifisch durch ausgedehnte

Landregen hervorgerufen. Die Scheitelabflüsse sind dabei mit maximal 204 l/s eher gering ausgeprägt, wohingegen sich der Basisabfluss deutlich erhöht zeigt (vgl. Abbildung 6-9). Das Sommerhalbjahr ist durch fast vollständige Abwesenheit von Abfluss gekennzeichnet, lediglich im September führt ein stärkeres Niederschlagsereignis zu kurzzeitig erhöhten Abflussmengen. Diese Entwicklung verdeutlicht auch die in Abbildung 6-10 dargestellte Abflusssummenlinie, die bis Anfang Mai 2001 zunächst nur geringfügig von der Niederschlagssummenkurve abweicht, ab diesem Zeitpunkt jedoch – im Gegensatz zur Niederschlagssummenkurve – annähernd keinen Zuwachs mehr aufweist. Insgesamt führen die geringen Vorregenereignisse des Monats Mai in Kombination mit den unterdurchschnittlichen Niederschlägen der Sommermonate zu im Jahresvergleich deutlich reduzierten Abflussmengen. Dies spiegelt sich in den Abflussquotienten wider (vgl. Tabelle 6-3), die von November bis Mai zwischen 0,64 und 0,85 schwanken, sich in den folgenden Sommermonaten dem Wert 0 jedoch deutlich annähern. Diese saisonale Schwankung ist, bedingt durch den oben dargestellten Niederschlagsgang, deutlicher ausgeprägter als in den beiden Vorjahren (vgl. hierzu die zusammenfassende Analyse in Kapitel 6.1.6). Der Gesamtjahresniederschlagshöhe von 951,2 mm stehen 501,3 mm Abflusshöhe gegenüber, was einem Abflussanteil von 53 % des zugeführten Niederschlags entspricht. Der Anteil bewegt sich somit – bei stärker ausgeprägter intraannueller Variabilität – im Bereich des Vorjahreswertes.

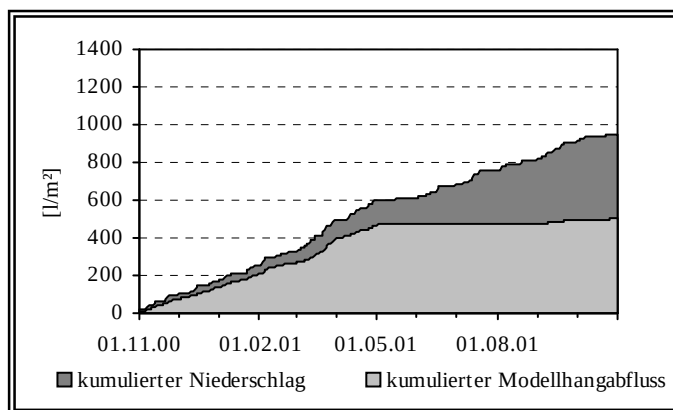


Abb. 6-10 Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2000/2001.

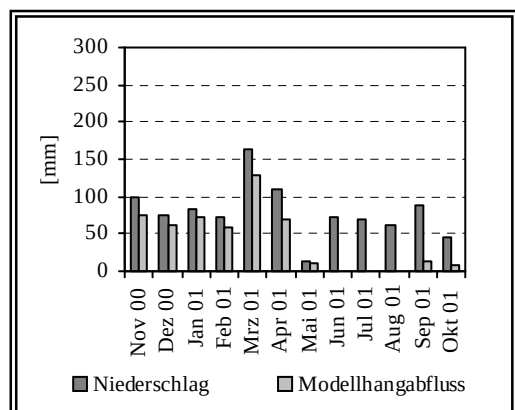


Abb. 6-11 Monatliche Niederschlags- und Abflusshöhe des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2000/2001.

Tabelle 6-3 Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2000/2001 für den Modellhang Hölzerkopf.

Zeitraum	Modellhang Hölzerkopf					
	Niederschlag [mm]	Abflusshöhe [mm]	Abflussquotient (Q/N)	Abfluss [l/s]		
				MQ	NQ	HQ
11/00	98,6	75,8	0,77	16,23	7,97	107,59
12/00	74,1	60,8	0,82	12,59	5,88	72,10
01/01	84,3	71,6	0,85	14,84	4,69	68,30
02/01	71,1	59,8	0,84	13,73	3,52	113,74
03/01	162,4	127,6	0,79	26,44	4,56	204,21
04/01	109,4	70,3	0,64	15,06	4,69	116,63
05/01	13,5	10,5	0,78	2,18	0,00	13,89
06/01	73,3	0,5	0,01	0,10	0,00	3,02
07/01	69,3	1,2	0,02	0,26	0,08	4,98
08/01	61,9	0,6	0,01	0,13	0,08	1,49
09/01	87,5	13,4	0,15	2,86	0,11	107,53
10/01	45,8	9,1	0,20	1,89	0,19	11,21
Hydrolog. Jahr 2000/2001	951,2	501,3	0,53	8,82	0,00	204,21

6.1.4 Hydrologisches Jahr 2001/2002

Das Jahr 2001/2002 ist mit einer Niederschlagshöhe von 837,6 mm im Vergleich zum langjährigen Mittel von 788 mm (Station Ellern) überdurchschnittlich niederschlagsreich. Die in Abbildung 6-12 dargestellte monatliche Verteilung verdeutlicht jedoch, dass dies in erster Linie auf den hohen Niederschlägen der Monate November 2001, Februar 2002 und Oktober 2002 beruht, während die Sommermonate des Jahres 2002 relativ niederschlagsarm sind. Da im Gegensatz zu den Vorjahren zudem Starkniederschlagsereignisse in den Sommermonaten weitgehend ausbleiben, zeigen auch die in Abbildung 6-13

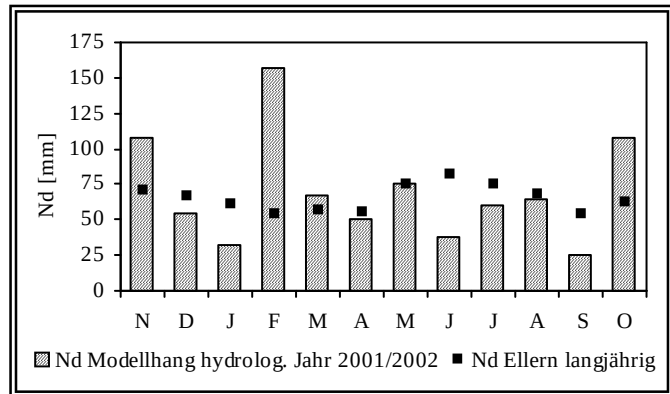


Abb. 6-12 Monatliche Niederschlagshöhen im hydrologischen Jahr 2001/2002 (Wetterstation Modellhang).

dargestellten Abflussganglinien des Modellhanges Hölzerkopf und des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches keine signifikanten Abflussspitzen im entsprechenden Zeitraum (für das hydrologische Jahr 2001/2002 liegen erstmals auch Abflussdaten für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches in einer quasi-kontinuierlichen Ganglinie vor; vgl. Kapitel 4 und 5). Sowohl die Gräben des Modellhanges, als auch der Gräfenbach selbst fallen über weite Strecken des Sommers trocken. Dem stehen jedoch durchaus hohe Abflussmengen der Wintermonate, hier v. a. Februar und März, gegenüber. Die Tagesmittelabflüsse erreichen Werte von 90,5 l/s (20.02.2002) für den Modellhang Hölzerkopf und 961 l/s (10.02.2002) für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. Die Spitzenabflüsse auf Basis der 15-minütlichen Datenerhebung betragen dabei 156 l/s bzw. 1890 l/s. Insgesamt zeigt sich auch im Jahr 2001/2002 eine ausgeprägte Saisonalität des Abflussgeschehens am Modellhang Hölzerkopf. Das erstmals beobachtete Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches weist ein weitgehend identisches Verhalten auf. Verdeutlicht wird dies anhand der Abflusssummenlinien von Modellhang und Einzugsgebiet in Abbildung 6-14 und 6-15, die, nach Standardisierung der Abflusswerte in die Abflusshöhe [l/m²], einen ähnlichen Verlauf zeigen, wobei die Abflusssumme des Einzugsgebietes eine im direkten Vergleich weniger sprunghafte Entwicklung aufweist, d. h. die Variabilität der Abflüsse herabgesetzt ist. Eine weitergehende Gegenüberstellung und Analyse des Abflussverhaltens der Gebiete erfolgt in Kapitel 6.2.



Bild 6-3 Gräfenbach nordwestlich des Modellhanges – außerhalb seines eigentlichen Flussbettes (Niederschlagsphase im Februar 2002).



Bild 6-4 Glashütter Wiesen im Norden des Modellhanges Hölzerkopf während der Niederschlagsphase im Februar 2002.

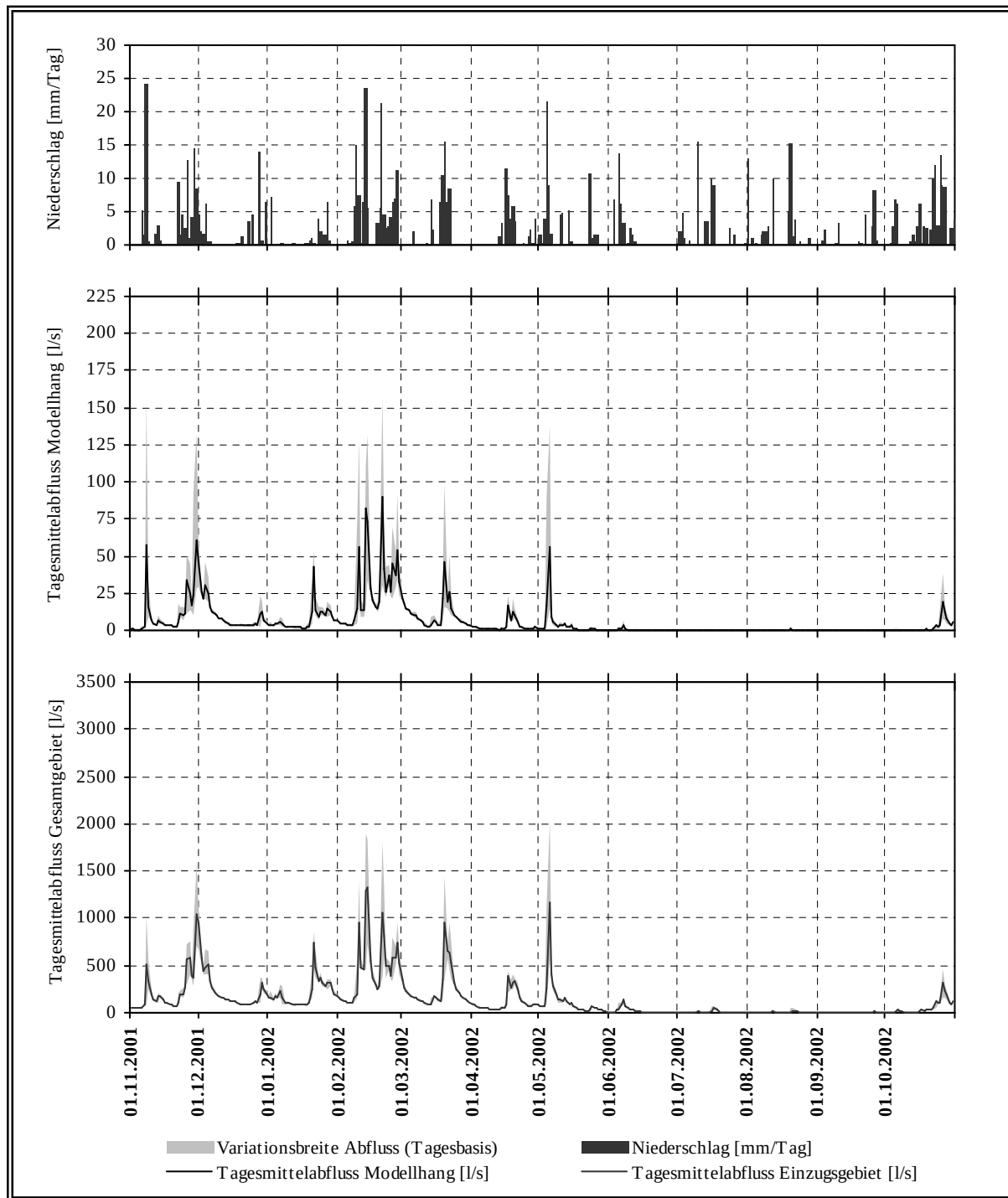


Abb. 6-13 Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches im hydrologischen Jahr 2001/2002 (Tagesbasis).

Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5 fassen die Kennzahlen zum Wasserhaushalt des Modellhanges Hölzerkopf und des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach nochmals auf Monatsbasis zusammen. Die aufgeführten Abflussquotienten, die sich für den Modellhang zwischen 0,01 und 1,05 bewegen bzw. für das Einzugsgebiet zwischen 0,02 und 1,37, verdeutlichen nochmals die ausgeprägte Saisonalität des Abflussgeschehens. Die Abflussquotienten größer 1 finden sich in beiden Gebieten im Januar 2001 und können durch die in diesem Monat sehr geringe Niederschlagshöhe in Kombination mit der verzögerten Wasserabgabe aus Boden- und Grundwasserspeicher erklärt werden (vgl. Kapitel 6-2). Auf Jahresbasis ergibt sich ein Anteil des oberirdischen Abflusses am Niederschlagsinput von 42 % für den Modellhang Hölzerkopf und 41 % für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

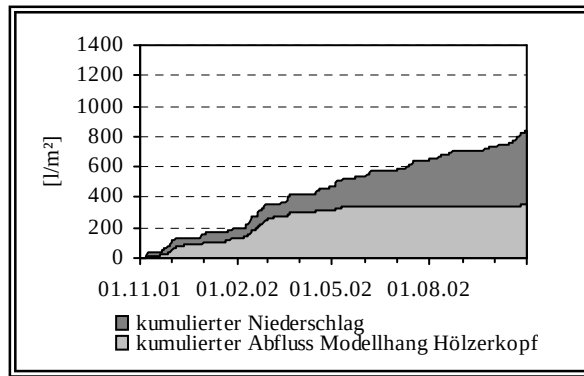


Abb. 6-14 Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2001/2002.

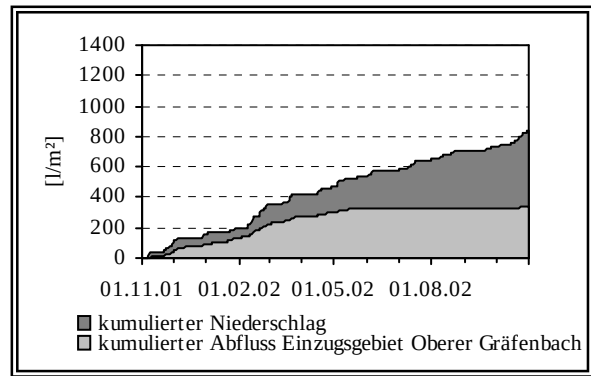


Abb. 6-15 Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach im hydrologischen Jahr 2001/2002.

Tabelle 6-4 Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2001/2002 für den Modellhang Hölzerkopf.

Zeitraum	Modellhang Hölzerkopf					
	Niederschlag [mm]	Abflusshöhe [mm]	Abflussquotient (Q/N)	Abfluss [l/s]		
				MQ	NQ	HQ
11/01	107,8	51,0	0,47	10,90	0,35	157,36
12/01	54,0	48,6	0,90	10,10	2,38	62,35
01/02	31,7	33,4	1,05	6,91	1,37	54,14
02/02	156,5	120,9	0,77	27,72	2,88	155,97
03/02	66,9	50,8	0,76	10,54	2,07	99,08
04/02	50,6	13,3	0,26	2,85	0,41	23,78
05/02	74,9	19,5	0,26	4,03	0,13	137,45
06/02	37,6	1,3	0,04	0,28	0,00	6,37
07/02	59,7	0,5	0,01	0,10	0,00	1,06
08/02	64,4	0,6	0,01	0,13	0,05	2,53
09/02	25,5	1,3	0,05	0,28	0,16	0,62
10/02	108,0	11,0	0,10	2,27	0,30	38,63
Hydrolog. Jahr 2001/2002	837,6	352,1	0,42	6,20	0,00	157,36

Tabelle 6-5 Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2001/2002 für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

Zeitraum	Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach					
	Niederschlag [mm]	Abflusshöhe [mm]	Abflussquotient (Q/N)	Abfluss [l/s]		
				MQ	NQ	HQ
11/01	107,8	43,74	0,41	214,48	47,50	1571,50
12/01	54,0	47,54	0,88	226,26	81,90	1130,40
01/02	31,7	43,29	1,37	205,77	72,40	855,20
02/02	156,5	89,87	0,57	472,87	102,70	1890,00
03/02	66,9	50,94	0,76	242,23	81,90	1444,00
04/02	50,6	22,75	0,45	111,75	33,90	442,70
05/02	74,9	26,94	0,36	128,09	1,70	2035,50
06/02	37,6	3,65	0,10	17,92	0,00	165,20
07/02	59,7	0,91	0,02	4,30	0,00	63,50
08/02	64,4	0,54	0,01	2,56	0,00	55,20
09/02	25,5	0,22	0,01	1,07	0,00	28,00
10/02	108,0	11,68	0,11	55,45	1,00	466,00
Hydrolog. Jahr 2001/2002	837,6	342,1	0,41	138,09	0,00	2035,50

6.1.5 Hydrologisches Jahr 2002/2003

Das Jahr 2002/2003 bildet mit einer Niederschlagshöhe von 674,2 mm das niederschlagsärmste der beobachteten Jahre. Die in Abbildung 6-16 dargestellte Niederschlagsverteilung verdeutlicht die durchweg geringen Werte von Februar 2003 bis Oktober 2003. Lediglich die ersten drei Monate des Betrachtungszeitraumes weisen überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen auf, v. a. der November 2002 und der Januar 2003 heben sich mit 118,5 mm bzw. 92,9 mm von den langjährigen Werten ab. Da bereits der

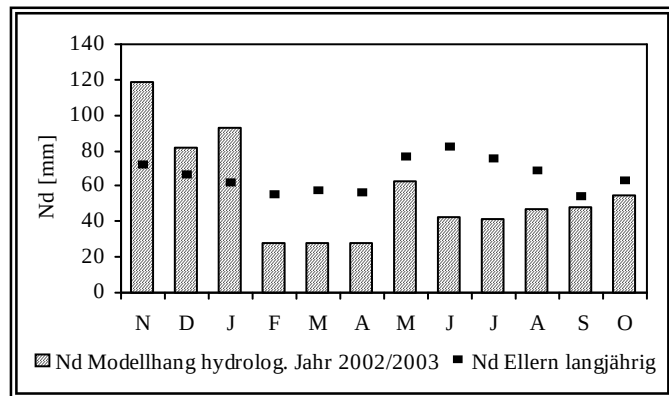


Abb. 6-16 Monatliche Niederschlagshöhen im hydrologischen Jahr 2001/2002 (Wetterstation Modellhang).

Oktober 2002 mit 108 mm vergleichsweise niederschlagsreich ist, erfahren sowohl der Bodenwasserspeicher, der jedoch über die Monatssummen hinaus vorwiegend von der täglichen Niederschlagsverteilung abhängt, als auch der Grundwasserspeicher zu Beginn des Winterhalbjahres eine starke Füllung. Dies führt zu einem zunächst verstärkten Abflussgeschehen und einem vergleichsweise hohen Stauwasserspiegel (vgl. Kapitel 6-2). Aufgrund der in den Folgemonaten eintretenden Niederschlagsarmut resultiert, wie Abbildung 6-17 belegt, nichtsdestotrotz sowohl für den Modellhang Hölzerkopf als auch für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches eine über weite Zeiträume des betrachteten Jahres stark herabgesetzte Abflussmenge im Vergleich zu den vorangegangenen Jahren. Vor allem von Mitte Januar bis Ende Mai 2003, in den vorhergehenden Jahren stets ein Zeitraum hoher Abflüsse, zeigen sich deutlich geringere Werte. Ab Juni 2003 ist in beiden Gebieten, bei insgesamt wenig ergiebigen Niederschlägen, annähernd kein Abfluss mehr zu beobachten, so dass von einer ausgeprägten Sommertrockenheit gesprochen werden kann. Aufgrund der starken Entleerung des Bodenwasserspeichers führen hier selbst vereinzelt auftretende Gewitterniederschläge zu keiner signifikanten Abflusserhöhung, so dass die maximal erreichte Abflussmenge im hydrologischen Sommerhalbjahr für den Modellhang Hölzerkopf bei lediglich 15,4 l/s und für das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach bei 226 l/s liegt (jeweils am 20. Mai 2003).

Dementsprechend zeigen die in Abbildung 6-18 und 6-19 dargestellten Abflusssummenlinien beider Gebiete ab April 2003 keinen nennenswerten Zuwachs mehr, während die Niederschlagssummenlinie weiterhin moderat ansteigt. Bemerkenswert ist der im Vergleich stärkere Anstieg der Abflusssumme des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach von Dezember 2002 bis März 2003. Im Vorjahreszeitraum konnte diese überdurchschnittliche Entwicklung gegenüber der Abflusssumme des Modellhanges Hölzerkopf nicht in entsprechender Form beobachtet werden. Dies stellt einen ersten Hinweis auf die nur eingeschränkte Übertragbarkeit der Abflussbildungsmechanismen bzw. der Anteile der einzelnen Abflusskomponenten am Gesamt-abfluss des Modellhangbereiches auf das Gesamteinzugsgebiet dar (vgl. Kapitel 6-2).

Insgesamt steht der Niederschlagshöhe von 674,2 mm im hydrologischen Jahr 2002/2003 eine Abflusshöhe von 235,2 mm aus dem Modellhang Hölzerkopf bzw. 291,8 mm aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches gegenüber. Dies entspricht einem Abflussquotienten von 0,35 bzw. 0,43 auf Jahresbasis. Die Werte schwanken dabei – unter Aufweisen der bereits beschriebenen Saisonalität – zwischen 0,003 (August 2003) und 0,86 (März 2003) für den Modellhang bzw. 0,005 (August 2003) und 1,21 (März 2003) für das Einzugsgebiet Oberer

Gräfenbach (vgl. Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7). Der über 1 angesiedelte Wert für das Einzugsgebiet kann, wie bereits im vorangegangenen Jahr, anhand der verzögerten Speicherentleerung in Kombination mit dem spezifischen Niederschlagsgang erklärt werden.

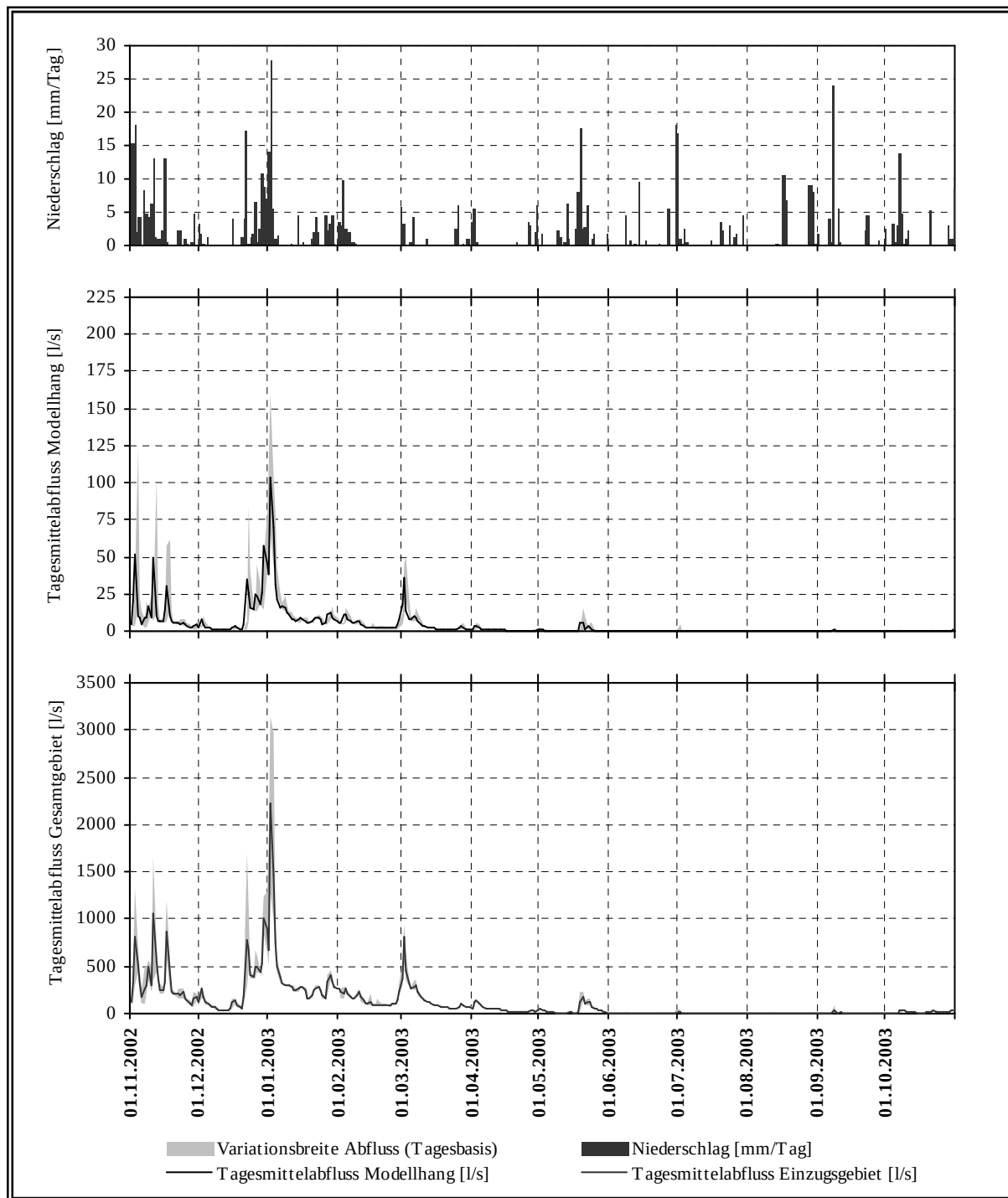


Abb. 6-17 Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches im hydrologischen Jahr 2002/2003 (Tagesbasis).

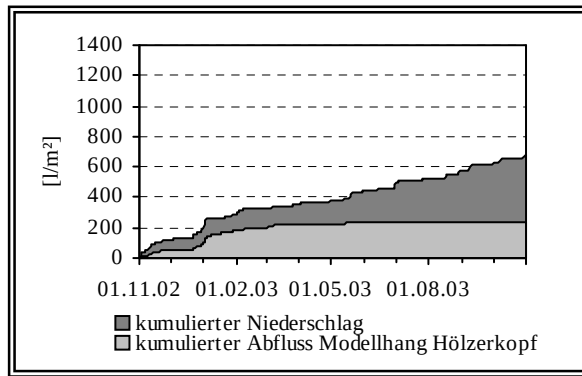


Abb. 6-18 Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2002/2003.

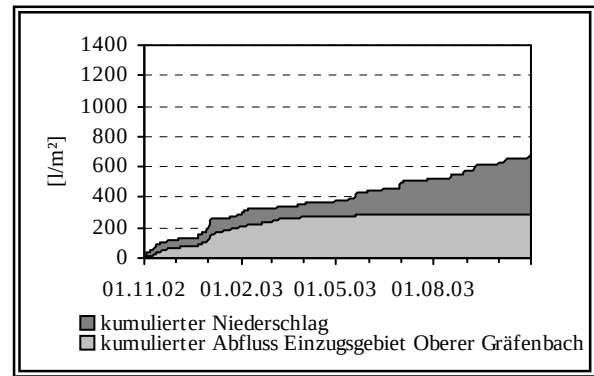


Abb. 6-19 Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach im hydrologischen Jahr 2002/2003.

Tabelle 6-6 Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2002/2003 für den Modellhang Hölzerkopf.

Zeitraum	Modellhang Hölzerkopf					
	Niederschlag [mm]	Abflusshöhe [mm]	Abflussquotient (Q/N)	Abfluss [l/s]		
				MQ	NQ	HQ
11/02	118,5	51,76	0,44	11,08	1,35	123,17
12/02	81,9	51,38	0,63	10,63	0,54	84,27
01/03	92,9	77,85	0,84	16,13	4,31	161,16
02/03	28,4	18,73	0,66	4,29	1,35	16,27
03/03	28,2	24,09	0,86	4,99	1,05	50,88
04/03	27,9	4,21	0,15	0,90	0,35	5,25
05/03	62,3	4,15	0,07	0,86	0,11	15,40
06/03	43,0	0,25	0,01	0,05	0,00	2,73
07/03	41,5	0,36	0,01	0,07	0,00	4,38
08/03	47,2	0,14	0,00	0,03	0,00	0,54
09/03	47,8	0,62	0,01	0,13	0,00	2,27
10/03	54,7	1,71	0,03	0,35	0,00	1,18
Hydrolog. Jahr 2002/2003	674,2	235,2	0,35	4,14	0,00	161,16

Tabelle 6-7 Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2002/2003 für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

Zeitraum	Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach					
	Niederschlag [mm]	Abflusshöhe [mm]	Abflussquotient (Q/N)	Abfluss [l/s]		
				MQ	NQ	HQ
11/02	118,5	66,70	0,56	327,61	72,40	1659,50
12/02	81,9	54,98	0,67	261,14	22,70	1704,40
01/03	92,9	85,19	0,92	405,06	151,50	3143,50
02/03	28,4	28,55	1,01	150,22	72,40	315,50
03/03	28,2	34,18	1,21	162,55	47,50	953,90
04/03	27,9	9,33	0,33	45,81	18,00	138,40
05/03	62,3	8,22	0,13	39,09	1,70	226,00
06/03	43,0	0,21	0,00	1,02	0,00	28,00
07/03	41,5	0,29	0,01	1,40	0,00	55,20
08/03	47,2	0,02	0,00	0,08	0,00	2,60
09/03	47,8	0,56	0,01	2,73	0,00	81,90
10/03	54,7	3,58	0,07	16,98	1,00	55,20
Hydrolog. Jahr 2002/2003	674,2	291,8	0,43	117,80	0,00	3143,50

6.1.6 Zusammenfassender Überblick über den beobachteten Zeitraum

Im Anschluss an die jahresspezifischen Beschreibungen des hydrologischen Geschehens am Modellhang Hölzerkopf und im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches soll im Folgenden ein zusammenfassender Überblick über den Gesamtuntersuchungszeitraum – hydrologisches Jahr 1999/2000 bis hydrologisches Jahr 2002/2003 – gegeben werden. Zu diesem Zweck werden in erster Linie die Daten des Modellhanges Hölzerkopf herangezogen, da diese, im Gegensatz zu den Daten des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches, durchgängig vorliegen (vgl. Kapitel 4). Eine darüber hinausgehende analytische Gegenüberstellung beider Gebiete erfolgt in Kapitel 6-2.

Wie Abbildung 6-20 verdeutlicht, nimmt die jährliche Niederschlagshöhe ausgehend vom hydrologischen Jahr 1999/2000 mit 1219 mm zum hydrologischen Jahr 2002/2003 mit 674 mm stetig ab, wobei das langjährige Mittel der benachbarten Station Ellern-Thiergarten (754 mm) nur im letzten der genannten Jahre unterschritten wird, und somit als überdurchschnittlich niederschlagsarm zu bezeichnen ist. Entsprechend zeigt auch die jährliche Abflusshöhe des Modellhanges eine stetige Abnahme von 621 mm im Jahr 1999/2000 auf 235 mm im Jahr 2002/2003. Der daraus resultierende Abflussquotient weist dabei eine leicht modifizierte Entwicklung auf. Während im Jahr 1999/2000 51 % des eingehenden Niederschlags den Modellhang wieder als Abfluss verlassen, steigt der Anteil im Jahr 2000/2001 zunächst auf 53 % an. In beiden folgenden Jahren ist jedoch eine signifikante Abnahme auf 42 % bzw. 35 % festzustellen. Zwei Gründe können für die tendenzielle Abnahme des Abflussanteils (Abflussquotient) bei abnehmenden absoluten Niederschlags- und Abflusshöhen genannt werden. Zum einen führen insgesamt geringere Niederschlagsmengen in Kombination mit dem „Grundbedarf“ der Vegetation an Wasserversorgung zu einem erhöhten Anteil von Zeiten mit geringer Bodenfeuchte im Gebiet, was wiederum eine prinzipiell dämpfende Wirkung auf die Abflussentstehung besitzt. Ein zweiter Grund für die Abnahme des Abflussquotienten über den Untersuchungszeitraum findet sich in der v. a. in den Jahren 2001/2002 und 2002/2003 deutlich zurückgehenden Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen, hier v. a. hochintensiver konvektiver Niederschläge in den Sommermonaten, die sich in den Jahren 1999/2000 und 2000/2001 für die Entstehung extremer Abflussscheitel verantwortlich zeigen. Gerade diese Starkniederschläge, deren Wasserinput im System nicht zurückgehalten werden kann, gehen jedoch mit einer deutlichen, kurzfristigen Erhöhung der Abflusswerte (auch relativ zum Niederschlagsinput) einher. Demgegenüber führen weniger intensive Niederschlagsereignisse in den Sommermonaten, wie sie in den Jahren 2001/2002 und 2002/2003 ausschließlich zu beobachten sind, nicht zu einer nennenswerten Abflussentstehung, da die Bodenfeuchte (Bodenvorfeuchte), als einer der entscheidenden Faktoren der Abflussgenese, durch den Einfluss der Vegetation in dieser Periode vergleichsweise schnell wieder abgesenkt wird. Durch die permanent erhöhte Bodenfeuchte in den Wintermonaten wird dagegen bereits bei geringeren Niederschlagsintensitäten ein erhöhtes Abflussvolumen deutlich (vgl. Kapitel 6-2). Der zum Gesamtjahr 2000/2001 ansteigende Abflussquotient ist auf die hohe Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr 2000/2001 sowie die starke Füllung der Grund- und Bodenwasserspeicher durch den

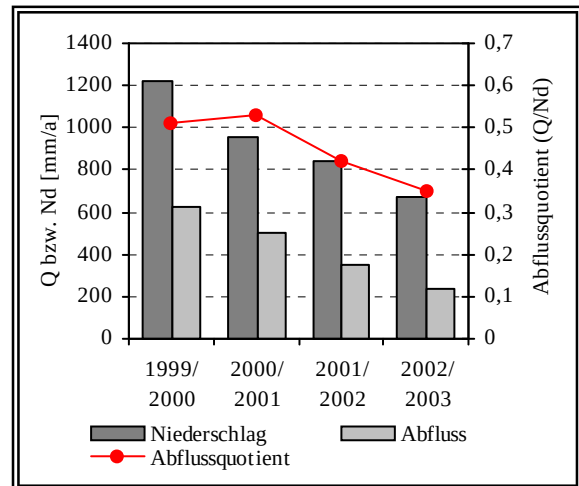


Abb. 6-20 Jährliche Niederschlags- und Abflusshöhe des Modellhanges Hölzerkopf mit resultierendem Abflussquotienten.

Niederschlagsreichtum des Spätjahres 2000 zurückzuführen (vgl. Abbildung 6-21 und 6-22), die konstant hohe Abflussvolumina mit einem erhöhten Basisabfluss bis Anfang Mai hervorrufen. Das Sommerhalbjahr 2001 fällt demgegenüber trocken aus, was auf die Jahresabflusshöhe aus dem Modellhang jedoch nur untergeordneten Einfluss besitzt, da der Basisabfluss in den Sommerhalbjahren ohnehin herabgesetzt ist.

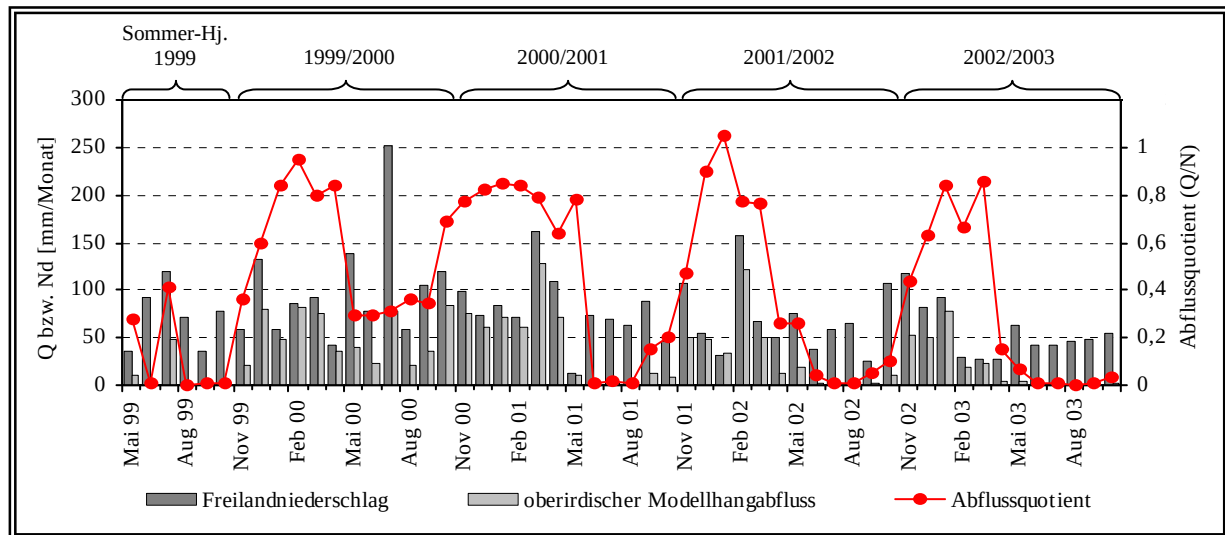


Abb. 6-21 Monatliche Niederschlags- und Abflusshöhe des Modellhangs Hölzerkopf mit resultierendem Abflussquotienten.

Die monatliche Abflusshöhe und der monatliche Abflussquotient zeigen, wie bereits im Rahmen der Beschreibung der einzelnen Halbjahre hervorgehoben, eine stark ausgeprägte Saisonalität auf, die sowohl in Abbildung 6-21 als auch in den Abbildungen 6-22 und 6-23, die einen jahrweisen Vergleich ermöglichen, ersichtlich ist. Im Mittel der vier beobachteten hydrologischen Jahre besitzt die monatliche Abflusshöhe aus dem Modellhang Hölzerkopf ihr Maximum im Februar mit einem Wert von 70,35 mm, wohingegen der August mit durchschnittlich 5,5 mm Abfluss den geringsten Wert aufweist. Es handelt sich somit um das typische Abflussregime von Gebieten mit jahreszeitlich relativ ausgeglichener Niederschlagsverteilung ohne beständige Schneedecke (Grimm 1968). Der Abflussquotient besitzt im 4-jährigen Durchschnitt im Januar mit 0,90 sein Maximum und im Juli mit 0,08 sein Minimum. Die monatliche Abflusshöhe weist ein Maximum der interannuellen Variabilität (Maßzahl: Relative Variabilität) im Monat Juli (144,8 % des 4-jährigen Mittels) und ein Minimum im Dezember (16,7 % des 4-jährigen Mittels) auf. Die relative interannuelle Streuung der monatlichen Abflussquotienten ist demgegenüber im August mit 138,2 % des 4-jährigen Mittelwertes am stärksten und im März mit 3,5 % am geringsten ausgeprägt. Wie Abbildung 6-24 verdeutlicht, zeigt die Maßzahl sowohl für die Abflusshöhe als auch für den Abflussquotienten eine vergleichbare saisonale Entwicklung mit geringer Variabilität im Winterhalbjahr (bei hohen absoluten Abflusswerten) und hoher Variabilität im Sommerhalbjahr (bei geringen absoluten Abflusswerten). Deutlichere Unterschiede finden sich lediglich im Zeitraum Januar bis März, in dem die Variabilität des Abflussquotienten vergleichsweise geringere Werte annimmt. Dies lässt darauf schließen, dass der Abflussquotient in diesem Zeitraum, auf einem insgesamt höheren Niveau, weniger stark von der absoluten Niederschlagsmenge beeinflusst wird. Als Gründe können die hohen Bodenfeuchtwerte und der gefüllte Grundwasserspeicher zum Ausgang des Winterhalbjahres vermutet werden.

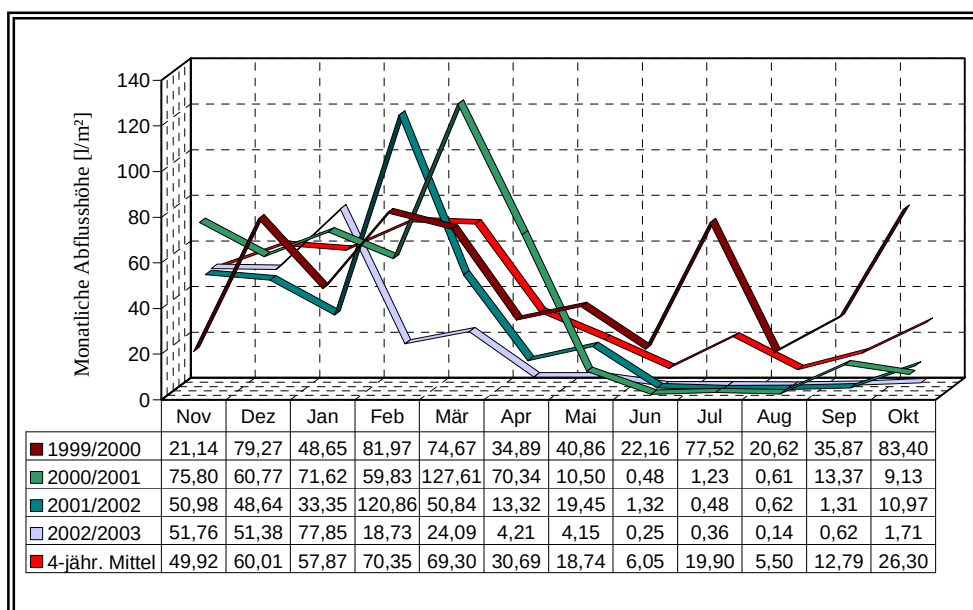


Abb. 6-22 Monatliche Abflusshöhen aus dem Modellhang Hölzerkopf in den hydrologischen Jahren 1999/2000 bis 2002/2003 und im 4-jährigen Mittel.

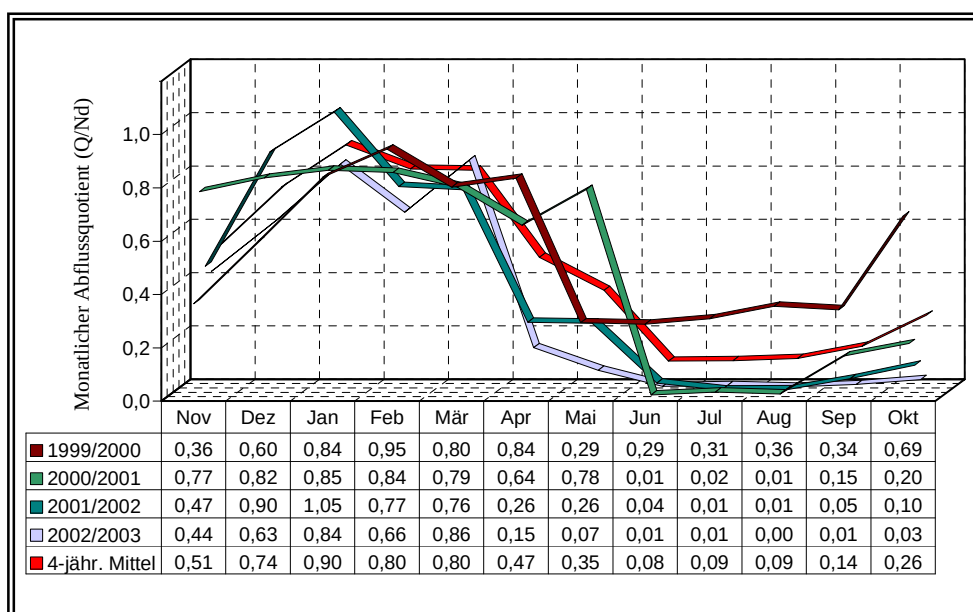


Abb. 6-23 Monatliche Abflussquotienten am Modellhang Hölzerkopf in den hydrologischen Jahren 1999/2000 bis 2002/2003 und im 4-jährigen Mittel.

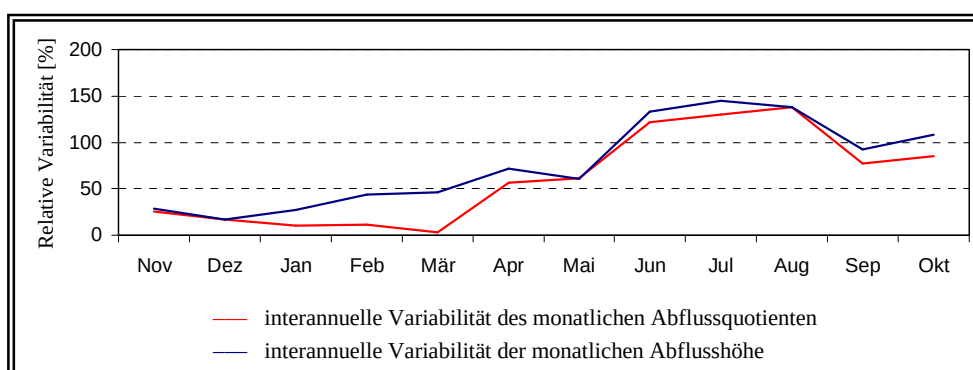


Abb. 6-24 Interannuelle Variabilität der monatlichen Abflusshöhe und des monatlichen Abflussquotienten in den vier beobachteten hydrologischen Jahren (Maß: Relative Variabilität).

Die Abfluss- und Niederschlagssummenkurven in Abbildung 6-25 und 6-26 illustrieren einerseits nochmals die jährlich abnehmenden Niederschlags- und Abflusssummen im Verlauf der Untersuchung, andererseits wird deutlich, dass einzig im hydrologischen Jahr 1999/2000 auch im Sommer sehr hohe Abflussvolumina aus dem Modellhang Hölzerkopf auftreten, was am fast linearen Anstieg der zugehörigen Abflusssummenkurve ersichtlich ist. Demgegenüber weisen die Abflusskurven der übrigen Jahre alle eine – in ihrem Eintrittszeitraum jedoch variable – Stagnation der Abflusssumme in den Sommermonaten auf. Vor allem im Jahr 2002/2003 tritt eine Abflachung der Summenkurve bereits sehr früh ein, wohingegen im Jahr 2000/2001 ein vergleichsweise später Eintritt deutlich wird, der, wie bereits angesprochen, zum einen auf das sehr niederschlagsreiche Vorjahr und zum anderen auf die hohen Niederschläge im Spätwinter und Frühjahr zurückgeführt werden kann (vgl. Abbildung 6-26).

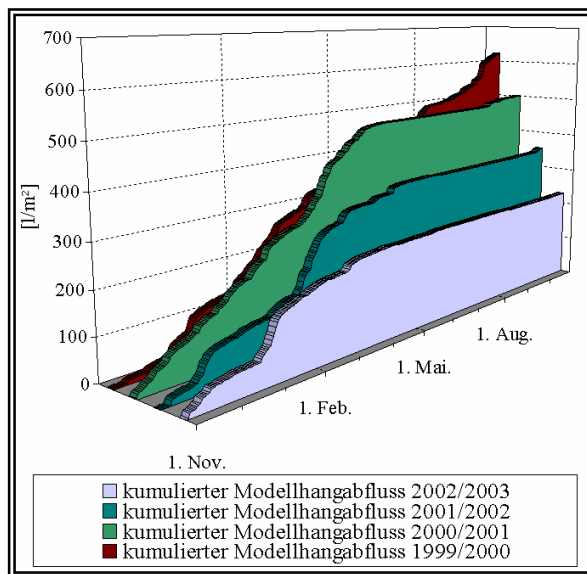


Abb. 6-25 Summenkurven des Modellhangabflusses in den Jahren 1999/2000 bis 2002/2003.

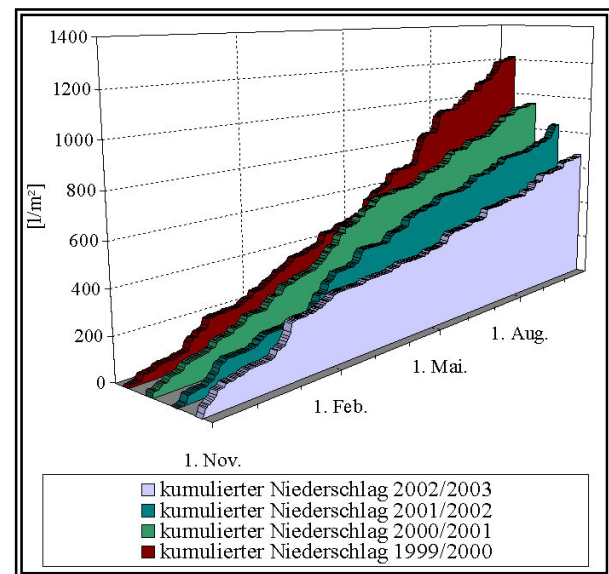


Abb. 6-26 Summenkurven des Niederschlags in den Jahren 1999/2000 bis 2002/2003.

Die zugehörigen Abflussdauerlinien (Abbildung 6-27) verdeutlichen, dass, im Gegensatz zu den übrigen hydrologischen Jahren, im Jahr 1999/2000 eine mittlere Abflussmenge von 1 l/s nur an wenigen Tagen unterschritten wird. Dies belegt, dass das im betrachteten Jahr insgesamt hohe Abflussvolumen aus dem Modellhang nicht ausschließlich auf ausgeprägten Spitzenabflüssen basiert, wenngleich diese mit bis zu 130 l/s auf Tagesmittelbasis bzw. 733 l/s auf 15-minütlicher Basis im Jahresvergleich ebenfalls hoch angesiedelt sind. Stattdessen beruht das enorme Abflussvolumen auch auf einer Erhöhung des Basisabflusses. Diese Erhöhung betrifft in erster Linie die Sommermonate, und wird durch die ver-

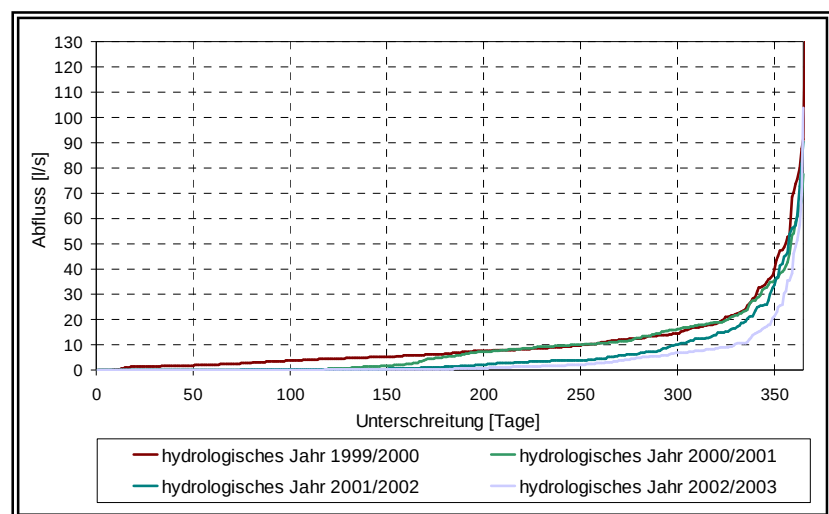


Abb. 6-27 Dauerlinie des Modellhangabflusses in den Jahren 1999/2000 bis 2002/2003.

stärkte Grundwasserschüttung entlang der Quellzone am Übergang von Mittel- zu Oberhang sowie den verzögerten Interflow (Matrixfeuchtefluss) getragen (vgl. Kapitel 3). Die hohe Ergiebigkeit der Grundwasserquelle beruht auf der starken Füllung des Grundwasserspeichers, d. h. letztlich auf den ergiebigen Niederschlägen des vorangegangenen Winterhalbjahres, während der erhöhte Interflowabfluss¹¹ eine direkte Reaktion auf die hohen Sommerniederschläge darstellt.

Tabelle 6-8 fasst abschließend einige ausgewählte gewässerkundliche Kennwerte für den Modellhang Hölzerkopf und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches zusammen. Die Abbildungen 6-28 und 6-29 stellen die Abflussganglinien für Modellhang und Einzugsgebiet auf Basis der Tagesmittelabflüsse zusammenhängend für den gesamten Untersuchungszeitraum dar. Hier wird nochmals die deutlich erhöhte Zahl von Abflussspitzen in den hydrologischen Jahren 1999/2000 und 2000/2001 deutlich. Wie in Kapitel 4 beschrieben, liegen die zugehörigen Messwerte in diesem Zeitraum jedoch ausschließlich für den Modellhang Hölzerkopf vor.

Tabelle 6-8 Ausgewählte gewässerkundliche Kennwerte für den Modellhang (Untersuchungszeitraum 11/1999 bis 10/2003) und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (Untersuchungszeitraum 11/2001 bis 10/2003).

	Gewässerkundl. Hauptzahl	Beschreibung der Hauptzahl	Einzugsgebiet Gräfenbach	Modellhang Hölzerkopf
Gesamt-zeitraum	HQ _{gesamt} [l/s]	maximaler Abfluss im Gesamtzeitraum	3143,5	406,81
	MQ _{gesamt} [l/s]	mittlerer Abfluss im Gesamtzeitraum	127,95	7,48
	NQ _{gesamt} [l/s]	minimaler Abfluss im Gesamtzeitraum	0,00	0,00
	Hq _{gesamt} [l/(s·km ²)]	maximale Abflussspende im Gesamtzeitraum	246,92	732,97
	Mq _{gesamt} [l/(s·km ²)]	mittlere Abflussspende im Gesamtzeitraum	10,05	13,49
	Nq _{gesamt} [l/(s·km ²)]	minimale Abflussspende im Gesamtzeitraum	0,00	0,00
Hydrologisches Jahr	1999/2000	HQ _{1999/2000} [l/s]	-	406,81
		MQ _{1999/2000} [l/s]	-	10,90
		NQ _{1999/2000} [l/s]	-	0,00
		Hq _{1999/2000} [l/(s·km ²)]	-	732,97
		Mq _{1999/2000} [l/(s·km ²)]	-	19,64
		Nq _{1999/2000} [l/(s·km ²)]	-	0,00
	2000/2001	HQ _{2000/2001} [l/s]	-	204,21
		MQ _{2000/2001} [l/s]	-	8,82
		NQ _{2000/2001} [l/s]	-	0,00
		Hq _{2000/2001} [l/(s·km ²)]	-	367,93
		Mq _{2000/2001} [l/(s·km ²)]	-	15,90
		Nq _{2000/2001} [l/(s·km ²)]	-	0,00
	2001/2002	HQ _{2001/2002} [l/s]	2035,50	157,36
		MQ _{2001/2002} [l/s]	138,09	6,20
		NQ _{2001/2002} [l/s]	0,00	0,00
		Hq _{2001/2002} [l/(s·km ²)]	159,89	283,53
		Mq _{2001/2002} [l/(s·km ²)]	10,85	11,17
		Nq _{2001/2002} [l/(s·km ²)]	0,00	0,00
	2002/2003	HQ _{2002/2003} [l/s]	3143,50	161,16
		MQ _{2002/2003} [l/s]	117,81	4,14
		NQ _{2002/2003} [l/s]	0,00	0,00
		Hq _{2002/2003} [l/(s·km ²)]	246,92	290,38
		Mq _{2002/2003} [l/(s·km ²)]	9,25	7,46
		Nq _{2002/2003} [l/(s·km ²)]	0,00	0,00

¹¹ Streng genommen handelt es sich um Returnflow, bei dem der Interflow wieder an die Oberfläche bzw. in das Grabensystem austritt; für die Abflussverzögerung ist jedoch der zunächst stattfindende unterirdische, laterale Abfluss in den oberen Bodenhorizonten verantwortlich (vgl. Kapitel 3).

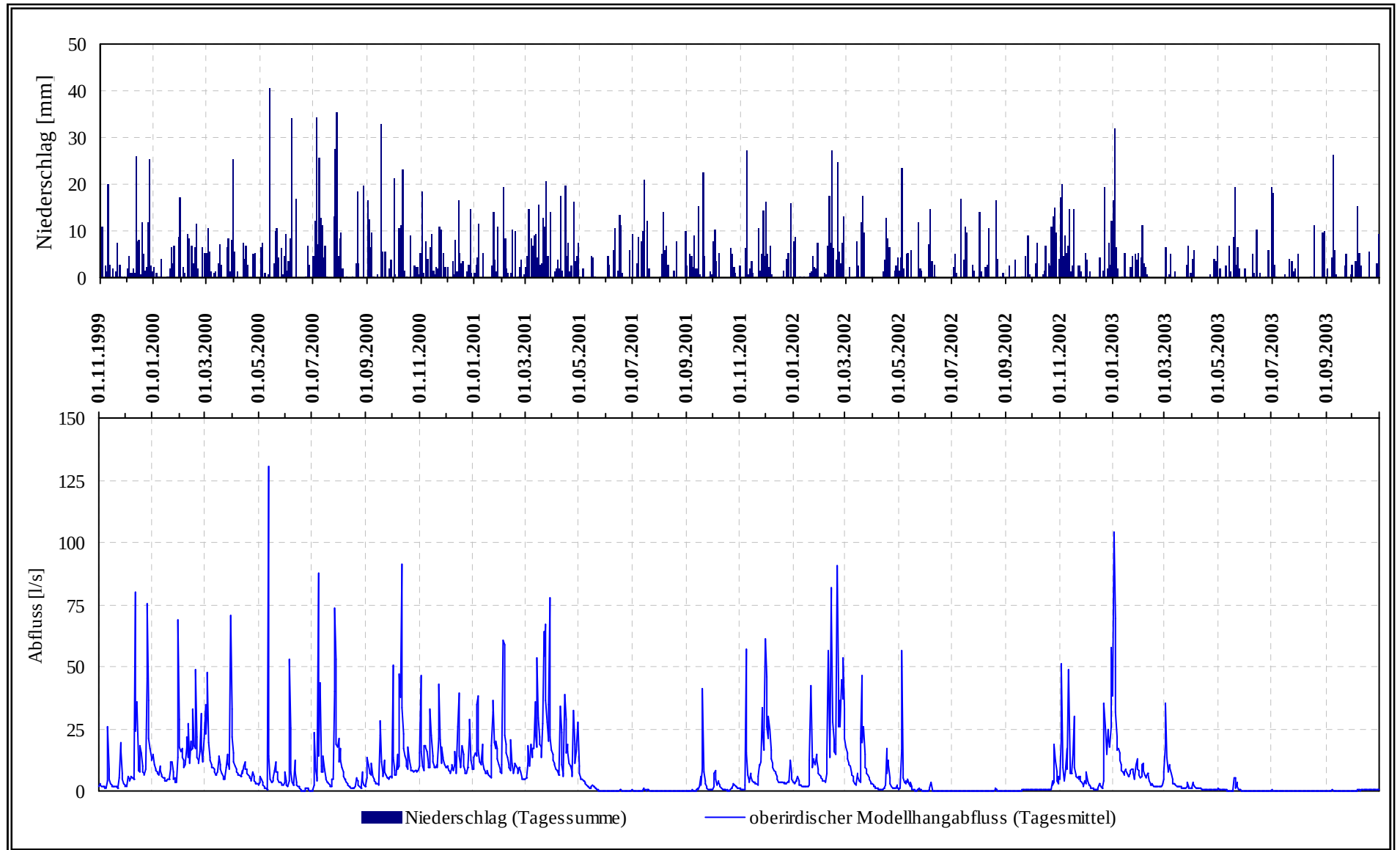


Abb. 6-28 Tägliche Niederschlagshöhe und Ganglinie des Tagesmittelabflusses aus dem Modellhang Hölzerkopf von 01.11.1999 bis 31.10.2003.

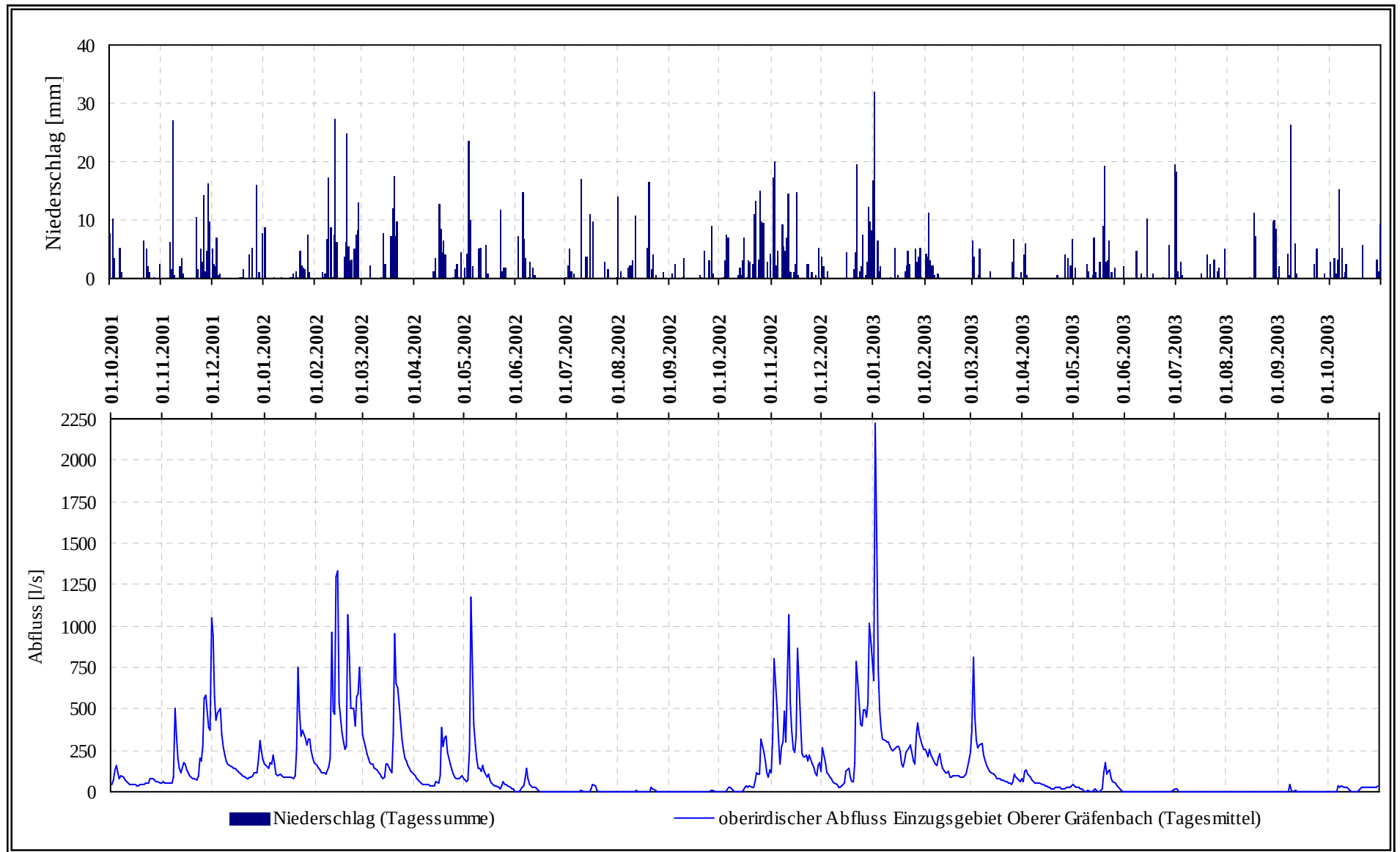


Abb. 6-29 Tägliche Niederschlagshöhe und Ganglinie des Tagesmittelabflusses aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches von 01.10.2001 bis 31.10.2003.

6.2 Analyse des Abflussverhaltens in unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Dimensionen

In Kapitel 6.2 erfolgt die Ergebnisdarstellung der Abflussanalyse in unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Dimensionen. Zunächst wird zu diesem Zweck das Abflussverhalten von Modellhang Hölzerkopf und Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches einander gegenübergestellt (Kapitel 6.2.1), wobei die Gegenüberstellung zum einen den Jahresgang und zum anderen den kurzfristigen Ablauf von Hochwasserereignissen umfasst. Da die zugrunde liegende Analyse – aufgrund der Heterogenität der naturräumlichen Ausstattung innerhalb beider Gebiete – jedoch nur in sehr eingeschränktem Maße eine Aufarbeitung aus abflussgenetischer Sicht ermöglichte, wird die Ergebnisdarstellung kurz gehalten.

Der in Kapitel 6.2.1 dargestellten Analyse steht in Kapitel 6.2.2 der Vergleich zwischen Abflussgeschehen in den unteren Hangbereichen einerseits und den mittleren und oberen Hangbereichen des Modellhanges Hölzerkopf andererseits gegenüber. Durch klar definierbare Abweichungen in der physiogeographischen Gebietsausstattung beider Räume konnten deutliche Unterschiede in der Abflusssentstehung und dem hieraus resultierenden Abflussgeschehen herausgearbeitet werden, die in erster Linie für die spätere Modellkalibrierung des hydrologischen Modells (vgl. Kapitel 7) von Bedeutung waren. Auch hier wurden sowohl der Jahresgang des Abflusses als auch kurzzeitig auftretende Hochwasserereignisse untersucht. Im Rahmen beider Vergleiche, dem Vergleich Modellhang Hölzerkopf – Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach und Unterhang – Ober- und Mittelhang, konnte auf quasi-kontinuierliche Abflussdaten der elektronischen Pegel zurückgegriffen werden, deren Anordnung im Untersuchungsgebiet entsprechend der genannten Fragestellungen erfolgte (vgl. Kapitel 4).

In einem abschließenden Untersuchungsschritt, dessen Ergebnisse in Kapitel 6.2.3 dargestellt sind, folgte eine weitere Flächendifferenzierung des Modellhanges Hölzerkopf in 10 Teilräume. Die Kompartimentierung erfolgte in Einzugsgebiete ausgewählter Abflussmessstellen, für deren Abflussanalyse (Vergleich des Abflussverhaltens der einzelnen Kompartimente) auf die Daten der Gefäßmessung zurückgegriffen werden konnte. Zusammen mit den Ergebnissen der Geländebeobachtungen sollten auch in diesem Fall eventuell existierende Unterschiede im Abflussverhalten in Abhängigkeit von der jeweiligen Gebietsausstattung aufgedeckt werden. Dem Vorteil der weitergehenden Flächendifferenzierung stand hier jedoch der Nachteil einer schwächeren Datenbasis gegenüber, da keine quasi-kontinuierlichen Abflussdaten in entsprechend hoher räumlicher Auflösung vorlagen, sondern, wie erwähnt, lediglich die Ergebnisse der volumetrischen Abflussmessungen (vgl. Kapitel 4).

6.2.1 Abflussverhalten von Modellhang Hölzerkopf und Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches

Wie in der Einführung erläutert, wird zunächst der Vergleich des Abflussverhaltens von Modellhang Hölzerkopf und Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches dargelegt. In Abbildung 6-30 ist zu diesem Zweck zunächst die in Kapitel 3 erarbeitete, grundlegende physiogeographische Ausstattung beider Räume gegenübergestellt.

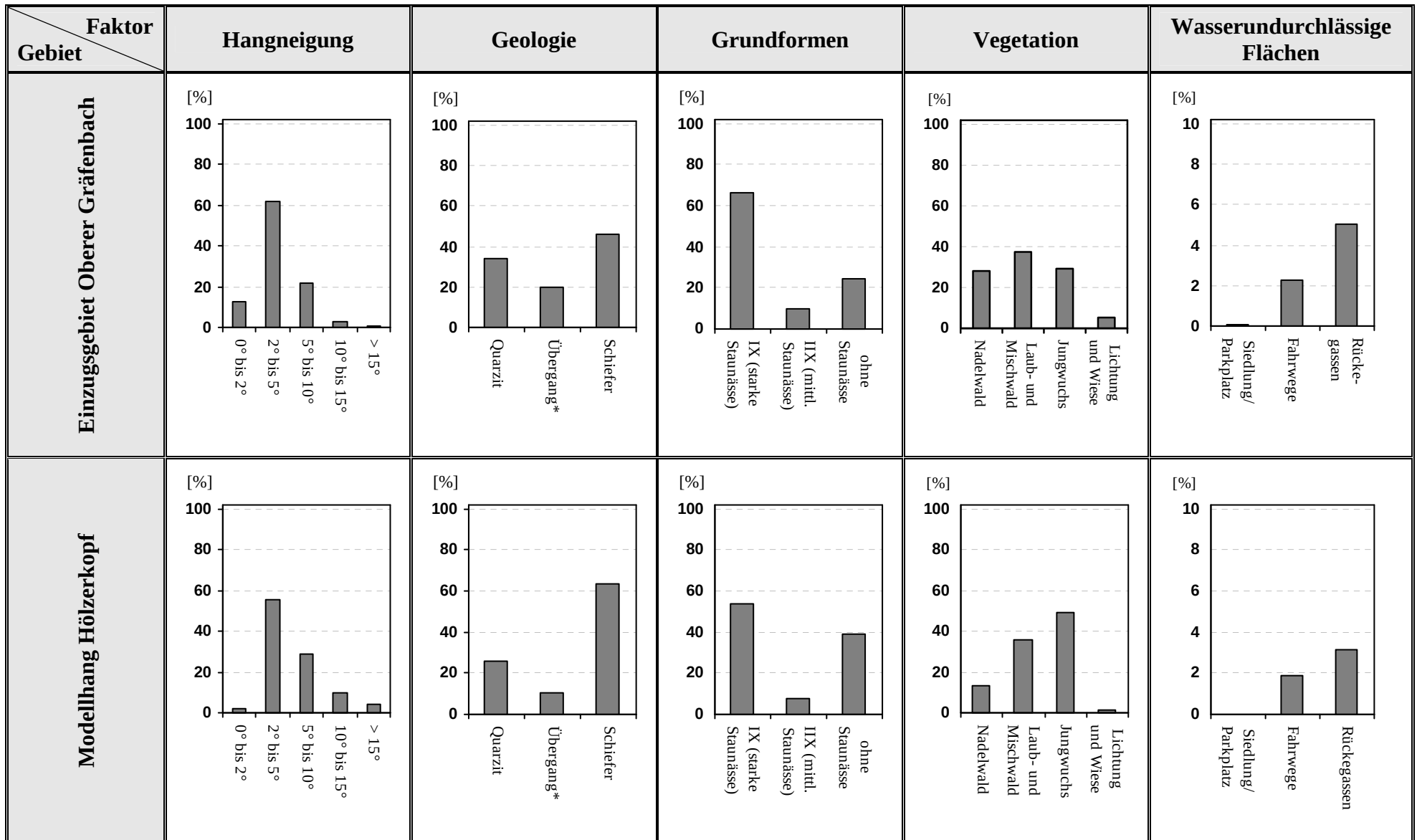


Abb. 6-30 Vergleich der physiogeographischen Ausstattung des Modellhanges Hölzerkopf und des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach anhand ausgewählter Faktoren. Darstellung über Flächenanteile am jeweiligen Gebiet (* „Übergang“ = Übergangsschichten zwischen Taunusquarzit und Hunsrückschiefer. Diese zeichnen sich durch Zunahme von Tonschiefereinlagerungen aus).

Es wird deutlich, dass bezüglich der ausgewählten Faktoren Hangneigung, Geologie, Grundformen (die weitgehend auf spezielle Bodentypen schließen lassen, vgl. Kapitel 3) und Vegetation eine generelle Übereinstimmung in den jeweiligen Flächenanteilen beider Gebiete besteht, wodurch nochmals der repräsentative Charakter des Modellhanges Hölzerkopf untermauert wird. Lediglich bezüglich des in Abbildung 6-30 nicht aufgeführten Versiegelungsgrades existieren ausgeprägtere Unterschiede: Das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches besitzt gegenüber dem Modellhang einen deutlich erhöhten Anteil vollständig bzw. weitgehend wasserundurchlässiger Flächen, der in erster Linie auf einer höheren Dichte an Rückegassen und -wegen beruht (ein exakter Überblick über die Flächenanteile findet sich im Rahmen der Parametrisierung des Modells PRMS in Kapitel 7.3.3.2).

Entsprechend der in Kapitel 2 dargelegten Grundvorstellungen zur hydrologischen Prozessdynamik ist somit zu erwarten, dass Modellhang Hölzerkopf und Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches, bedingt durch ihre vergleichbare naturräumliche Ausstattung, ein zumindest in Grundzügen ähnliches Abflussverhalten aufweisen. Dies sollte sowohl den Jahresgang (Kapitel 6.2.1.1) als auch Hochwasserabflüsse (Kapitel 6.2.1.2) betreffen.

6.2.1.1 Längerfristiges Abflussverhalten und Saisonalität des Abflussverhaltens

Wie Abbildung 6-31 illustriert, bewegen sich die jährlichen Abflusshöhen von Modellhang Hölzerkopf und Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches im Jahr 2001/2002 mit 352 mm bzw. 342 mm auf fast identischem Niveau, wohingegen im sehr niederschlagsarmen Jahr 2002/2003 die Abflusshöhe des Modellhanges Hölzerkopf mit 235 mm 57 mm unter der des Einzugsgebietes zurückbleibt. Auf Basis der Jahreswerte werden somit zunächst keine systematischen Abweichungen im Abflussverhalten der Gebiete sichtbar. Die auftretenden Unterschiede sind offenbar jahresspezifisch, und werden durch die Verteilung von Temperatur und v. a. Niederschlag hervorgerufen.

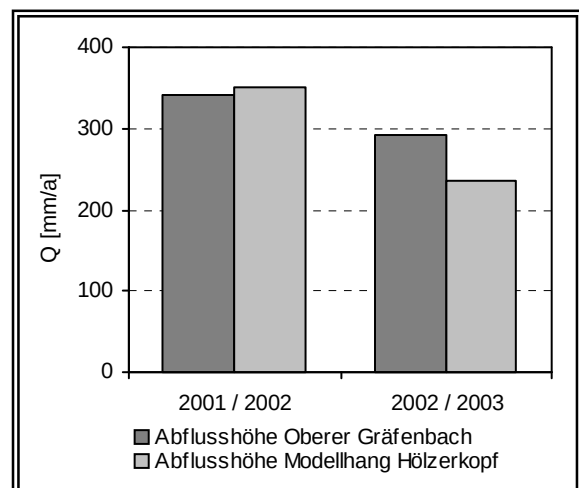


Abb. 6-31 Jährliche Abflusshöhe aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und dem Modellhang Hölzerkopf in den hydrologischen Jahren 2001/2002 und 2002/2003.

Die Analyse der in Abbildung 6-32 dargestellten monatlichen Abflusshöhe aus Modellhang Hölzerkopf und Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches in den hydrologischen Jahren 2001/2002 und 2002/2003 deckt, wie erwartet, eine sehr hohe Korrelation zwischen den monatlichen Abflusshöhen beider Areale auf ($r = +0,96$). Entsprechend zeigt auch das Einzugsgebiet die für den Modellhang bereits in Kapitel 6.1. dargelegte Saisonalität im Abflussverhalten, mit geringen Werten in den Sommermonaten. Vor allem im Winterhalbjahr – Ausnahmen bilden hier die beiden niederschlagsreichen Monate November 2001 und Februar 2002 – übertrifft die Abflusshöhe des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach die des Modellhanges Hölzerkopf.

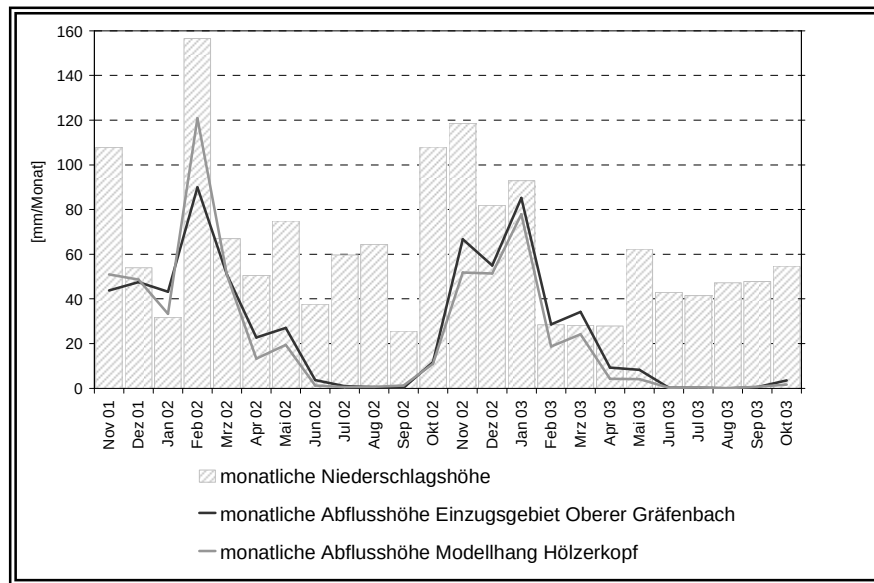


Abb. 6-32 Monatsliche Abflusshöhe aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und dem Modellhang Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.

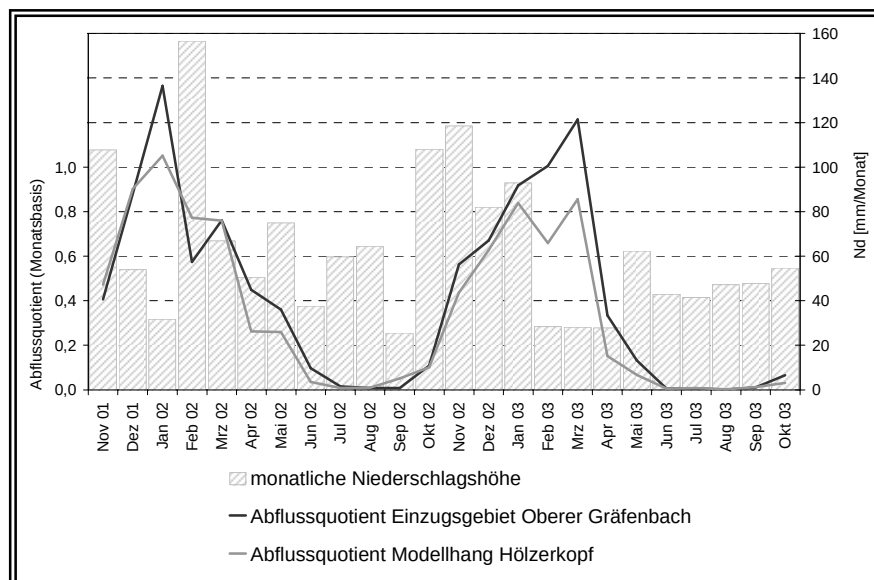


Abb. 6-33 Monatsliche Abflussquotienten des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.

Aufgrund des identischen Niederschlagsgeschehens am Modellhang Hölzerkopf und im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches¹² zeigen auch die direkt aus den Abflusshöhen ableitbaren monatlichen Abflussquotienten eine entsprechende Korrelation von $r = +0,96$ zwischen beiden Gebieten. Wie Abbildung 6-33 verdeutlicht, weist der monatliche Abflussquotient des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches somit den bereits in Kapitel 6.1 skizzierten saisonalen Gang des Modellhanges auf (mit einem deutlichen Maximum im Winterhalbjahr). Vor allem im hydrologischen Jahr 2002/2003 findet sich jedoch im Spätwinter und Frühjahr ein vergleichsweise höherer Abflussquotient im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches, der im März 2003 sogar den Wert 1 übertrifft. Dies deutet darauf hin, dass den verzögerten Abflusskomponenten Matrixfeuchtefluss und Grundwasserschüttung im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches eine im Vergleich zum Modellhang bedeutendere Stellung zukommt.

¹² Aufgrund der geringen Einzugsgebietsgröße von 12,7 km² wurde eine einfache Übertragung der am Modellhang punktuell erfassten Niederschlagsdaten auf das Gesamtgebiet als ausreichend angesehen (vgl. Maniak 1997).

Durch entsprechend verlangsamte Entleerung der Boden- und Grundwasserspeicher ist auch der erhöhte Abflussquotient im Januar 2002 bedingt, der mit einer sehr geringen monatlichen Niederschlagshöhe von 31,7 mm einhergeht. Unterstützend wirken sich dabei höhere Niederschlagsintensitäten in der vorangegangenen zweiten Dezemberhälfte aus.

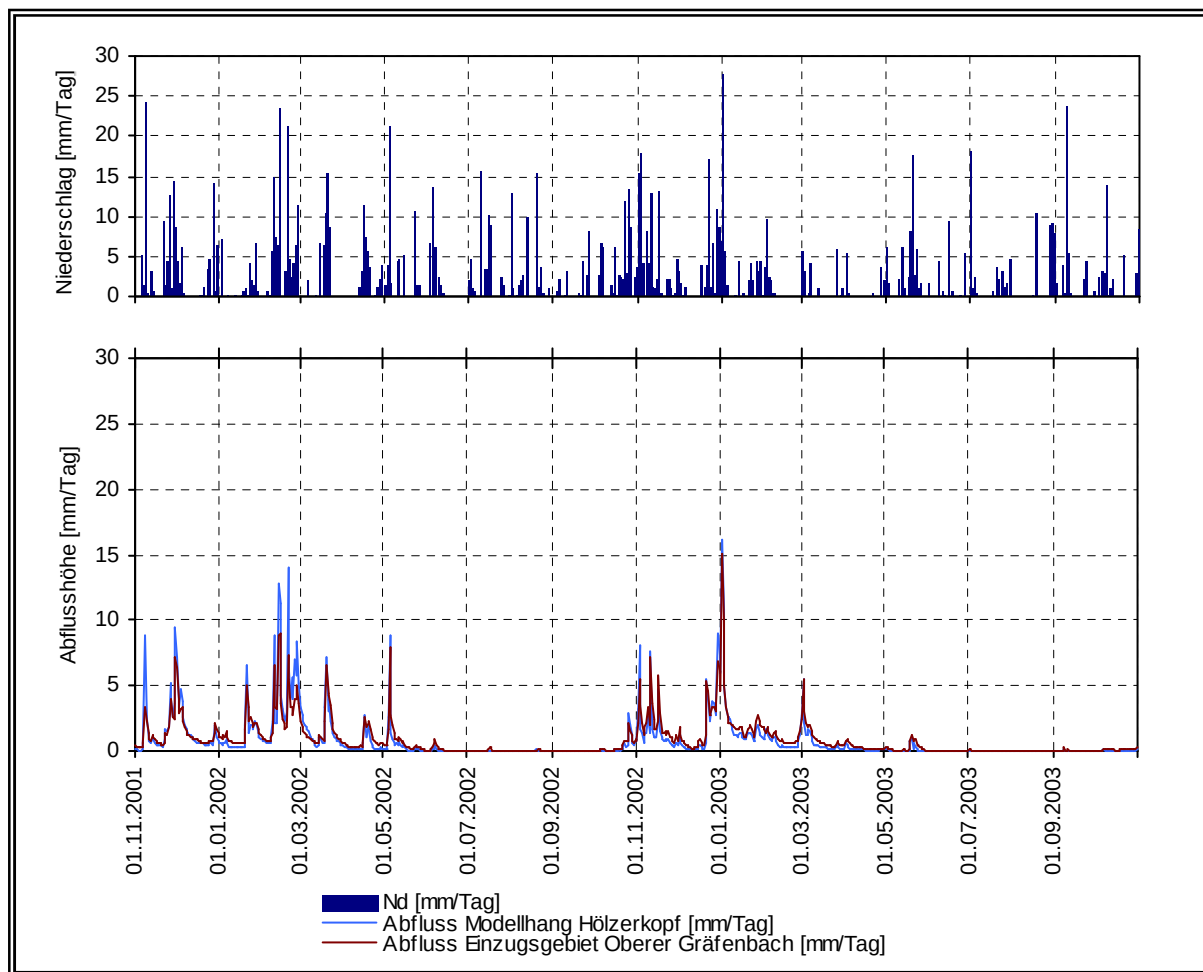


Abb. 6-34 Ganglinie der täglichen Abflusshöhe des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.

Auch die Ganglinie der täglichen Abflusshöhe (vgl. Abbildung 6-34) untermauert die prinzipielle Übereinstimmung im Abflussverhalten beider Gebiete, wobei jedoch ein etwas ausgeglichenerer Abflussgang des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach zum Vorschein kommt: Einem leicht erhöhten Basisabfluss stehen im Allgemeinen weniger ausgeprägte Abflussscheitel gegenüber. Diese Tatsache spiegelt auch das Streudiagramm in Abbildung 6-35 wider, dass die Abflussspende des Modellhanges jener des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach gegenüberstellt. Es werden keine systematischen jahreszeiteinspezifischen Unterschiede im Abflussverhalten beider Gebiete deutlich. Insgesamt ist die intraannuelle Abflussvariabilität des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches gegenüber dem Modellhang Hölzerkopf jedoch herabgesetzt (vgl. Tabelle 6-9).

Tabelle 6-9 Intraannuelle Abflussvariabilität des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und des Modellhanges Hölzerkopf 1999/2000 bis 2002/2003 (Datenbasis: Stundenmittel).

Hydrologisches Jahr	Intraannuelle Abflussvariabilität (Maßzahl: Relative Variabilität [%])	
	Einzugsgebiet	Modellhang
1999/2000	-	80,7
2000/2001	-	94,9
2001/2002	99,2	118,7
2002/2003	112,2	126,5

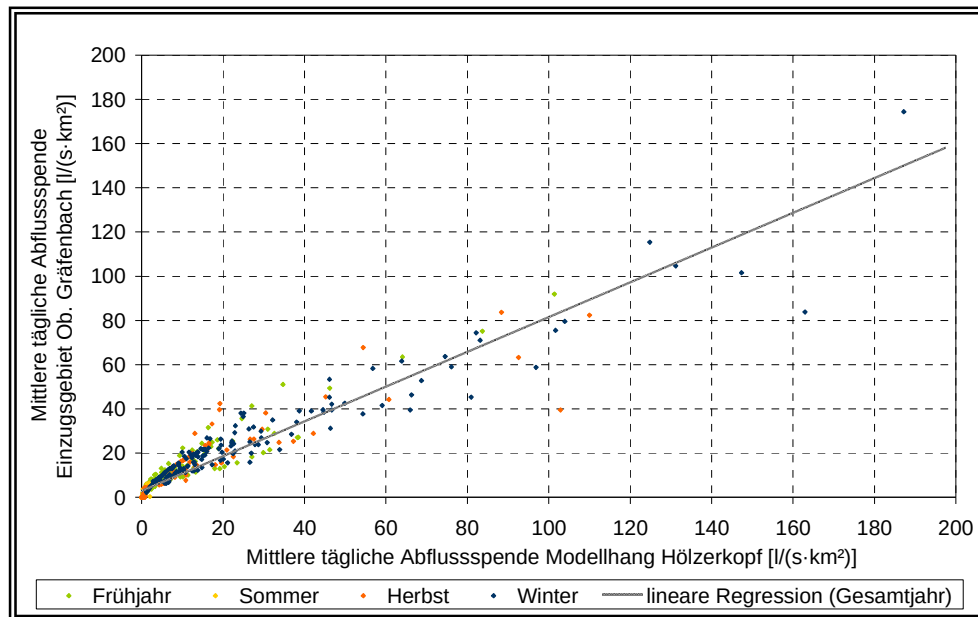


Abb. 6-35 Bivariates Streudiagramm der mittleren täglichen Abflussspende des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003 ($r = +0,951$).

Unter der gegebenen Voraussetzung, dass beide Gebiete durch ein ähnlich dichtes Netz an Drainagegräben erschlossen sind (vgl. Karte 3-11), kann dies letztlich auf zwei Faktoren zurückgeführt werden: Zum einen bewirkt die größere Gebietsfläche des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach verlängerte Laufzeiten im offenen Gerinne. Aufgrund der mit maximal 4,5 km insgesamt dennoch kurzen Fließwege muss diese Tatsache als zweitrangig und nur in geringem Maße verzögernd auf den Gebietsabfluss am Auslasspunkt des Gebietes (Pegel 5) angesehen werden. Der zweite beeinflussende Faktor, dem eine ungleich größere Bedeutung zuzumessen ist, besteht in dem bereits erwähnten verstärkten Auftreten verzögerter Abflusskomponenten im gesamten Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches gegenüber dem Modellhang Hölzerkopf. Diese Abflussverzögerung spiegelt sich entsprechend in der Abflussganglinie wider. Gerade nach längeren Niederschlagsperioden ist der Basisabfluss im Vergleich zum Modellhang deutlich erhöht, die Wasserspeicher zeigen somit eine erkennbare Verzögerung bei der Entleerung. Eine weitergehende Diskussion des Einflusses der Naturraumausstattung auf das Auftreten der verzögerten Abflusskomponenten erfolgt im Rahmen von Kapitel 6.2.2 (Abflussverhalten unterer und mittlerer/oberer Hangbereiche). Dort wird das Abflussverhalten zweier grundsätzlich unterschiedlich ausgestatteter Räume verglichen.

6.2.1.2 Hochwasserereignisse

Im Gegensatz zum Jahresgang der Abflüsse werden bei der Betrachtung einzelner Hochwasserereignisse stärkere Unterschiede im Abflussgang von Modellhang Hölzerkopf und Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches deutlich. Exemplarisch ist in Abbildung 6-36 zunächst das Hochwasserereignis am 04./05. Mai 2002 dargestellt. Bei geringer Bodenvorfeuchte (21-Tage-Vorregenindex = 12,7; vgl. Tabelle 6-10) führen hier 26,2 mm Niederschlag innerhalb von zwölf Stunden zu Spitzenabflüssen von 137 l/s aus dem Modellhang Hölzerkopf bzw. 2036 l/s aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. Dies entspricht einer maximalen Abflussspende von 248 l/(s·km²) für den Modellhangbereich bzw. 160 l/(s·km²) für das Einzugsgebiet. Der Abflussscheitel tritt jeweils ca. 12 h nach Beginn der Niederschläge ein. Gegenüber der deutlichen Diskrepanz in der Scheitelhöhe zeigt das zeitliche Eintreffen der Spitzenabflüsse mit 15 Minuten lediglich geringe Unterschiede. Wie zuvor bereits dargelegt, ist bei einer vergleichbaren Dichte des Grabensystems beider Gebiete und einer mit 12,7 km² letztlich geringen Fläche des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches, die mit maximalen Fließwegen im offenen Gerinne von 4,5 km einhergeht (Modellhang: 1,2 km), davon auszugehen, dass die existierenden Unterschiede im Hochwasserverlauf nur in untergeordnetem Maße durch die abweichende Fläche der Gebiete, sondern vielmehr durch Unterschiede in der Naturraumausstattung bedingt sind. Weitere Aussagen sind erst im Rahmen einer Abflussmodellierung möglich.

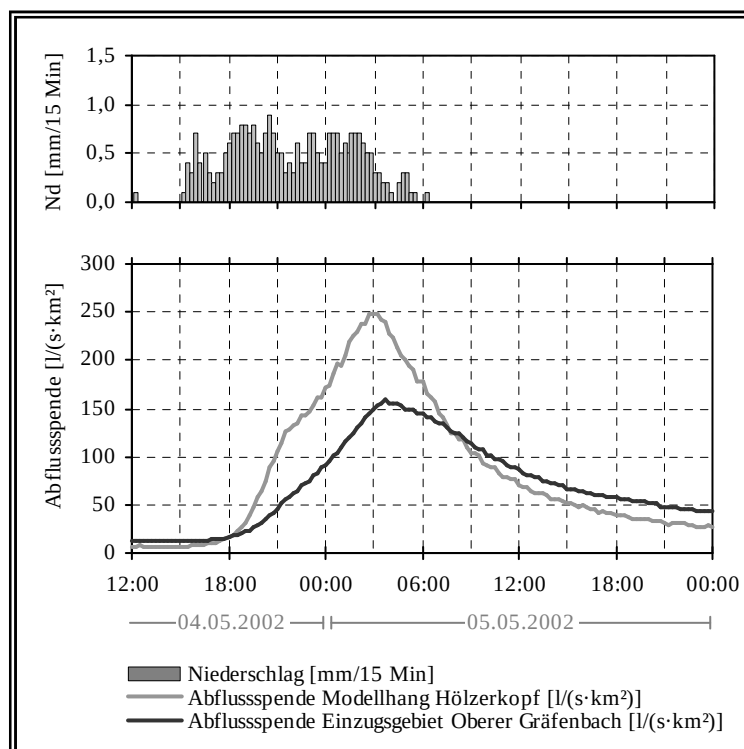


Abb. 6-36 Abflussgang aus dem Modellhang Hölzerkopf und dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches am 04./05. Mai 2002. (Werte standardisiert auf Abflussspende l/(s·km²)).

Abbildung 6-37 zeigt Abfluss- und Niederschlagssummenlinien beider Gebiete für das dargestellte Hochwasserereignis. Einem Niederschlagsinput von 27,8 l/m² stehen 9,3 l/m² Abfluss aus dem Einzugsgebiet bzw. 11,1 l/m² aus dem Modellhang innerhalb von 33 Stunden nach Beginn der hochwassererzeugenden Niederschläge gegenüber. Wie Kapitel 6.2.2 zeigt, bestehen dabei in erster Linie Differenzen im Retentionsvermögen unterschiedlicher Hangbereiche.

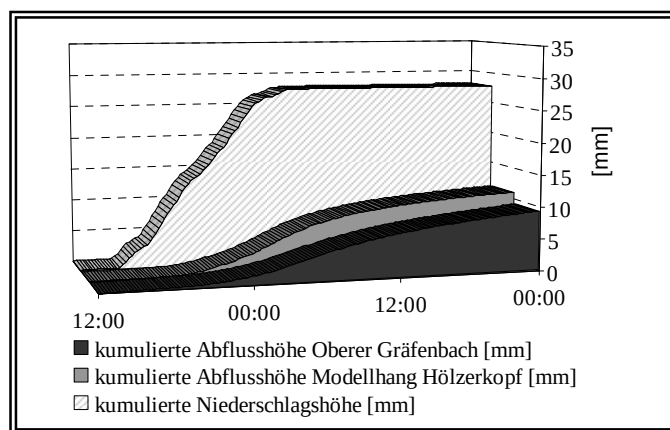


Abb. 6-37 Niederschlags- und Abflusssummenlinien für den Modellhang Hölzerkopf und das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach. Hochwasserereignis am 04./05. Mai 2002.

Das in Abbildung 6-38 dargestellte Hochwasserereignis am 13./14. Februar 2002 steht exemplarisch für eine andere Konstellation der Rahmenbedingungen: Bei hoher Bodenvorfeuchte (21-Tage-Vorregenindex = 22,2; vgl. Tabelle 6-10) erfolgt ein schnellerer Anstieg der Abflussmengen. Auch hier belegt ein Vergleich beider Gebiete, dass die Abflussscheitel (aufgrund des Niederschlagsgangs sind mehrere Abflussspitzen ausgebildet) aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches zurückbleiben. Es fällt auf, dass vor allem die erste Abflussspitze im Einzugsgebiet mit deutlicher zeitlicher Verzögerung eintritt und die zweite Abflussspitze im Gegensatz zum Modellhang keinen weiteren Abflusszuwachs mit sich bringt.

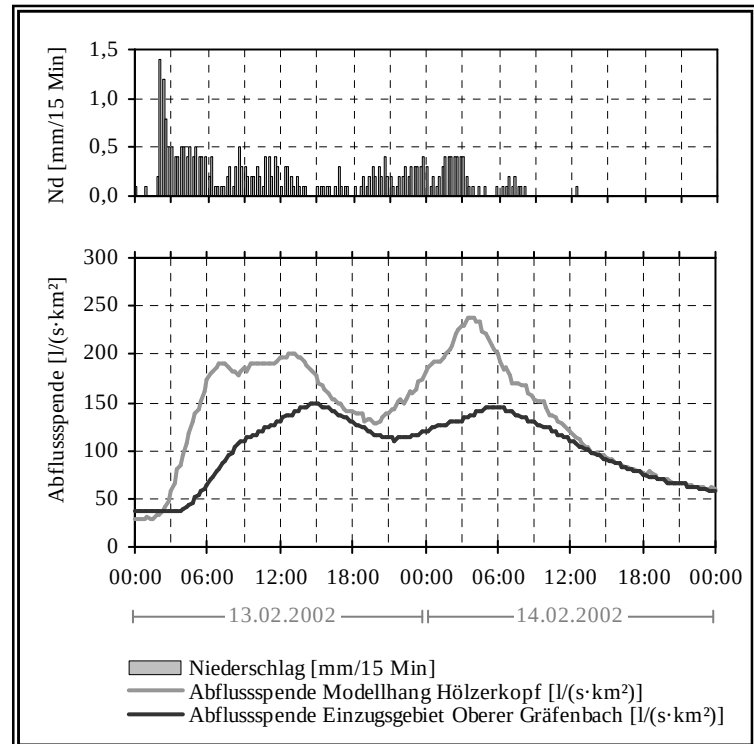


Abb. 6-38 Abflussgang aus dem Modellhang Hölzerkopf und dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches am 13./14. Feb. 2002. (Werte standardisiert auf Abflussspende $l/(s \cdot km^2)$).

Der Vergleich von Abflusssummenlinien mit zugehöriger Niederschlagssummenlinie für das entsprechende Hochwasserereignis (Abb. 6-39) zeigt, dass im Gegensatz zum Hochwasserereignis im Mai 2002 der Anteil des zurückgehaltenen Niederschlags stark herabgesetzt ist: 29,2 mm Niederschlag stehen hier 24,2 mm Abfluss aus dem Modellhang Hölzerkopf bzw. 17,8 mm aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches gegenüber. Trotz abweichender Niederschlagsverteilung wird somit ein im Vergleich stark erhöhter Abflussanteil deutlich. Während beim Ereignis im Mai lediglich 33 % (Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach) bzw. 40 % (Modellhang Hölzerkopf) des Niederschlags in der entsprechenden Zeitspanne das Gebiet wieder als Abfluss verlassen, sind es im November 61 % bzw. 83 %. Der Einfluss der Vegetation bzw. deren Entwicklungsstadium auf den Abflussgang und das Retentionsvermögen wird auch beim direkten Vergleich der Hochwasserereignisse am 26.12.1999 und 21.08.2002 für den Modellhang sichtbar (vgl. Abbildung 6-40). Beim winterlichen Ereignis rufen 18,0 mm Niederschlag innerhalb von fünf Stunden ein Abflussmaximum von 230 l/s hervor, wohingegen ähnliche Niederschläge im Sommer (15,3 mm in fünf Stunden) lediglich eine minimale Erhöhung der Abflussvolumina auf 2,5 l/s bewirken. Neben dem unmittelbaren Vegetationseinfluss sind moderat erhöhte

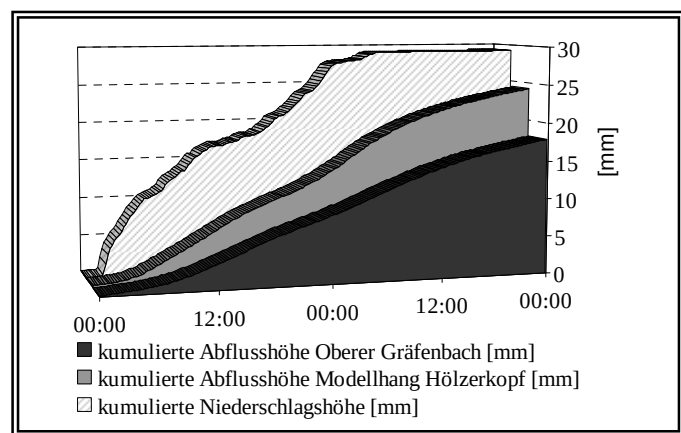


Abb. 6-39 Niederschlags- und Abflusssummenlinien für den Modellhang Hölzerkopf und das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach. Hochwasserereignis am 13./14. Feb. 2002.

Während beim Ereignis im Mai lediglich 33 % (Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach) bzw. 40 % (Modellhang Hölzerkopf) des Niederschlags in der entsprechenden Zeitspanne das Gebiet wieder als Abfluss verlassen, sind es im November 61 % bzw. 83 %. Der Einfluss der Vegetation bzw. deren Entwicklungsstadium auf den Abflussgang und das Retentionsvermögen wird auch beim direkten Vergleich der Hochwasserereignisse am 26.12.1999 und 21.08.2002 für den Modellhang sichtbar (vgl. Abbildung 6-40). Beim winterlichen Ereignis rufen 18,0 mm Niederschlag innerhalb von fünf Stunden ein Abflussmaximum von 230 l/s hervor, wohingegen ähnliche Niederschläge im Sommer (15,3 mm in fünf Stunden) lediglich eine minimale Erhöhung der Abflussvolumina auf 2,5 l/s bewirken. Neben dem unmittelbaren Vegetationseinfluss sind moderat erhöhte

Bodenfeuchtwerte und ein bereits erhöhter Basisabfluss beim Winterereignis zu berücksichtigen. Lediglich in den beiden niederschlagsreichen Sommern 1999 und 2000 werden im Rahmen hochintensiver konvektiver Niederschläge Abflussscheitel hervorgerufen, die den maximalen Abflussscheiteln winterlicher Hochwasserereignisse entsprechen. Entscheidend ist dabei zum einen die Tatsache, dass bei vollständiger Füllung der Interzeptionsspeicher diesen kein weiteres Retentionsvermögen mehr zukommt und weitere Niederschläge so direkt abflusswirksam werden. Zum anderen können, wie die in Abbildung 6-41 dargestellte Ganglinie des Modellhangabflusses von 01.07. bis 10.07.2000 verdeutlicht, innerhalb einer kurzen Zeitspanne wiederholt auftretende Starkniederschläge auch in den Sommermonaten, trotz verstärkter Wasseraufnahme bzw. Transpiration der Vegetation, durch sukzessive Erhöhung der Bodenfeuchte (einhergehend mit einer Sättigung der Interzeptionsspeicher) zu einem fortschreitenden Anstieg der Abflussscheitel führen. So rufen die ersten stärkeren Niederschlagsereignisse am 1., 2. und 3. Juli noch kaum eine Abflussreaktion hervor, während die Niederschläge am 4. Juli (28,1 mm in drei Stunden) bereits zu einem Scheitelabfluss von 126 l/s führen. Bei einem Interzeptionspeichervolumen von ca. 4 mm in Fichtenaltbeständen wird das unmittelbare Retentionsvermögen der Vegetation somit bereits hier deutlich überschritten.¹³ Dennoch führen die nur unwesentlich intensiveren Niederschläge am 7. und 8. Juli zu einer drastischen Erhöhung des Abflussscheitels auf 323 l/s. Dies ist, bei ähnlicher Niederschlagsverteilung, auf die deutlich erhöhte Bodenvorfeuchte zurückzuführen, durch die in den unteren Hangbereichen der Sättigungsflächenabfluss (vgl. Bild 3-16) und in den mittleren und oberen Hangbereichen der schnelle Interflow (vgl. Bild 3-14), dessen Auftreten ebenfalls von einem hohen Bodenwassergehalt abhängig ist, verstärkt wird. Entsprechende Beobachtungen konnten im betreffenden Zeitraum im Gelände gemacht werden.

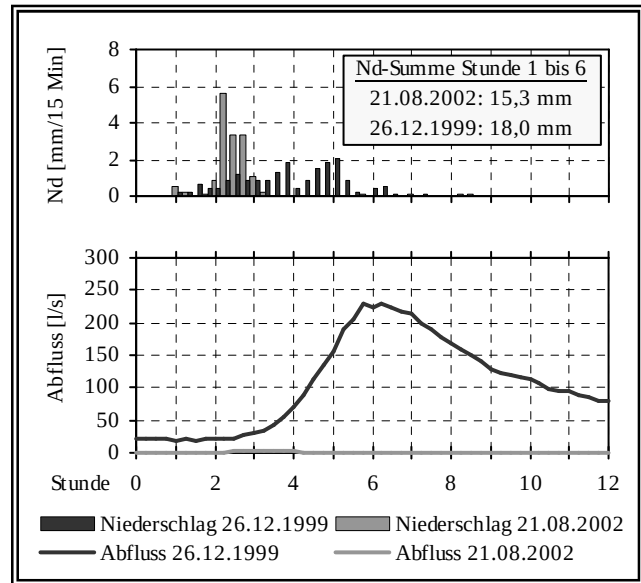


Abb. 6-40 Abfluss- und Niederschlagsgang für den Modellhang Hölzerkopf am 26.12.1999 und 21.08.2002.

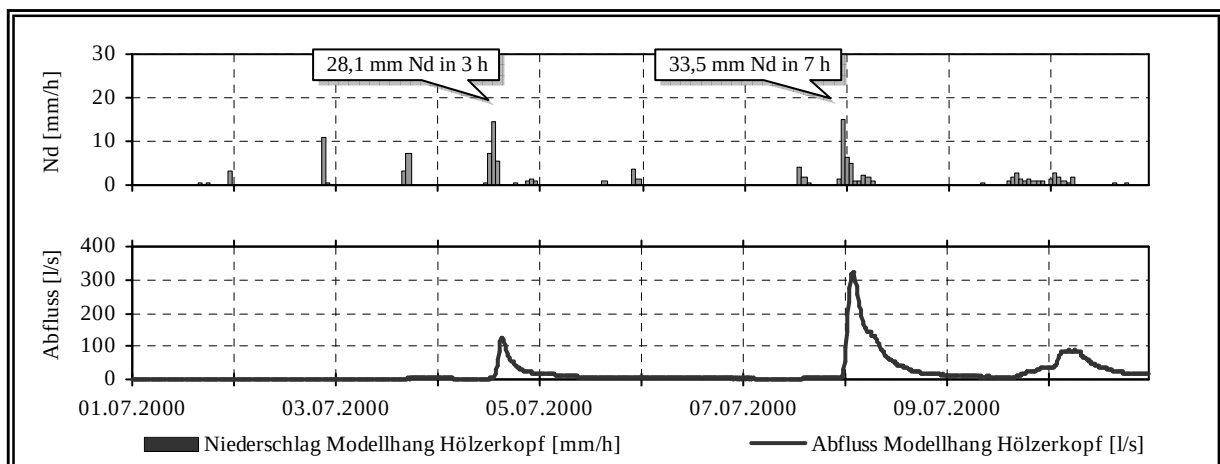


Abb. 6-41 Abfluss- und Niederschlagsgang für den Modellhang Hölzerkopf von 01.07.2000 bis 10.07.2000.

¹³ Vgl. Parametrisierung des Modells PRMS in Kapitel 7; das maximale Speichervolumen schwankt sehr stark in Abhängigkeit von der Bestandesart und den exakten Bestandescharakteristika.

Tabelle 6-10 gibt einen zusammenfassenden Überblick über ausgewählte Kenngrößen zu 18 Abflussereignissen¹⁴ im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches bzw. am Modellhang Hölzerkopf, von denen 13 in der Vegetationsruhezeit liegen. Abbildung 6-42 stellt darauf aufbauend die Abflussspendenscheitel von Einzugsgebiet und Modellhang graphisch gegenüber. Es wird deutlich, dass die Scheitel des Modellhanges im direkten Vergleich durchschnittlich um 100 % höher liegen. Wie zuvor bereits dargelegt, ist davon auszugehen, dass die Abweichungen in erster Linie auf den Unterschieden in der Naturraumausrüstung beruhen. Die Annahme konnte durch die Modellierung bestätigt werden (Kapitel 7).

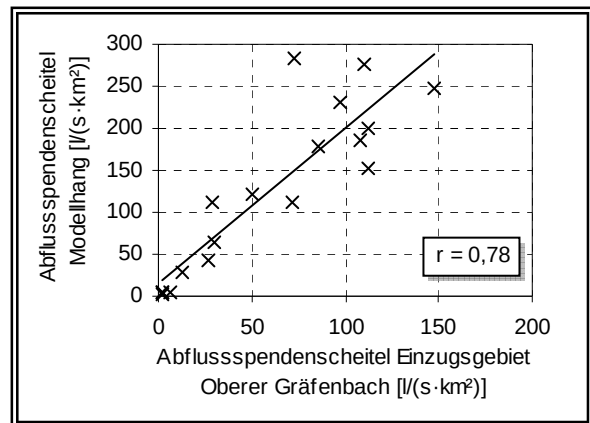


Abb. 6-42 Zusammenhang zwischen dem Abflussspendenscheitel $[l/(s \cdot km^2)]$ von Einzugsgebiet und Modellhang (18 Abflussereignisse).

Tabelle 6-10 Kennwerte ausgewählter Abflussereignisse (n = 18) der Jahre 2001/2002 und 2002/2003 für das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach und Modellhang Hölzerkopf.
 = Vegetationszeit  = Vegetationsruhe

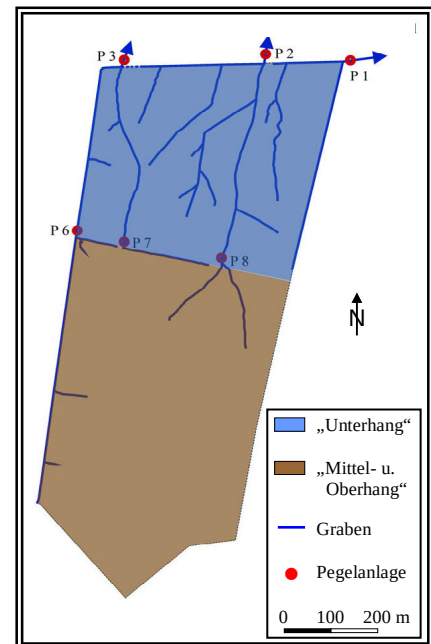
	21-Tage-Vorregenindex	Einzugsgebiet			Modellhang		
		Nd bis zum Eintreten der Scheitelabflüsse[mm]	Niederschlagsintensität [mm/h]	Scheitelabfluss $[l/(s \cdot km^2)]$	Nd bis zum Eintreten der Scheitelabflüsse[mm]	Niederschlagsintensität [mm/h]	Scheitelabfluss $[l/(s \cdot km^2)]$
08.11.2001	6,6	24,1	1,9	80,3	22,4	2,0	283,5
01.12.2001	31,6	8,9	0,6	88,8	8,4	0,7	112,3
10.02.2002	8,5	18,4	1,6	110,2	18,0	1,8	231,4
13.02.2002	22,2	16,8	1,3	148,5	16,2	1,4	200,4
20.02.2002	23,8	19,2	1,3	141,1	18,7	1,4	276,9
19.03.2002	17,8	12,8	1,4	113,4	11,8	1,7	178,5
17.04.2002	8,4	11,2	0,7	34,8	11,0	0,8	42,1
05.05.2002	12,7	26,5	2,1	159,9	25,5	2,2	247,7
10.07.2002	3,0	15,6	4,8	2,7	9,2	7,4	1,9
02.11.2002	20,4	12,5	1,6	38,5	12,5	1,6	64,2
11.11.2002	32,7	16,2	2,2	130,4	16,2	2,2	185,8
17.11.2002	25,0	10,9	1,3	94,7	10,9	1,3	111,0
22.12.2002	6,6	16,3	1,9	133,9	14,1	2,0	151,8
31.12.2002	26,4	6,7	1,9	100,7	4,9	1,8	122,1
19.05.2003	18,9	11,4	1,0	17,8	10,0	1,3	27,7
30.06.2003	4,2	17,2	13,8	2,2	17,2	13,8	4,9
01.07.2003	20,7	13,0	13,0	2,7	13,0	13,0	3,7
08.09.2003	9,0	23,4	4,7	6,4	19,6	5,6	4,1

¹⁴ Bezüglich der Auswahlkriterien vgl. Kapitel 6.2.2.2.

6.2.2 Abflussverhalten unterschiedlicher Hangbereiche

Aus abflussgenetischer Sicht stellt sich der Vergleich unterschiedlicher Hangbereiche interessanter dar als der vorangegangene Vergleich Modellhang Hölzerkopf–Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach, da hier signifikante Unterschiede in der Naturraumausstattung auftreten (vgl. Kapitel 3). Wie sich zeigt, kann eine entsprechende Aufteilung des Gebietes als erster Schritt Richtung Untergliederung des Raumes in hydrologisch homogen reagierende Einheiten verstanden werden.

Für den Modellhang Hölzerkopf wird eine entsprechende Betrachtung des Abflussverhaltens unterschiedlicher Hangbereiche durch den annähernd höhenlinienparallel verlaufenden Drainagegraben entlang des mittleren Querweges im Grenzbereich von Unter- und Mittelhang ermöglicht (vgl. Bild 6-5). Dieser schneidet den Boden bis weit unter den in ca. 40 cm u. GOF anstehenden, kaum wasserwegsamem Sd-Horizont auf, so dass der gesamte, aus den oberhalb gelegenen Hangbereichen stammende Interflow und ggf. auftretender Oberflächenabfluss an dieser Stelle in das Grabensystem überführt werden. Bild 6-6 zeigt den Austritt des Interflows aus dem Boden in das Grabensystem im Bereich zwischen den Pegelanlagen P6 und P7 während der Starkniederschläge im Juli 1999. Die gezielte Anordnung der Pegel im Grabensystem des Grenzbereichs (vgl. Karte 6-1) ermöglicht so die vollständige Erfassung des oberirdischen Abflusses¹⁵ aus dem Unterhangbereich einerseits und den oberhalb gelegenen Hangbereichen andererseits. Letztere, im weiteren Verlauf als „Mittel- u. Oberhang“ bezeichnet, umfassen neben dem namensgebenden Mittel- und Oberhang auch den Kammbereich. Wie Abbildung 6-43 verdeutlicht, entfallen vom insgesamt 0,555 km² umfassenden Modellhang 0,233 km² (42 % der Fläche) auf den „Unterhang“ und 0,322 km² (58 %) auf „Mittel- u. Oberhang“. Es ist zu beachten, dass die Bezeichnungen nicht streng auf morphologischen Kriterien beruhen, sondern vielmehr als schematische Bezeichnungen zu verstehen sind, die aus der Lage der Pegel abgeleitet sind.



Karte 6-1 Pegelanlagen am Modellhang Hölzerkopf mit schematischer Aufteilung in Hangbereiche.

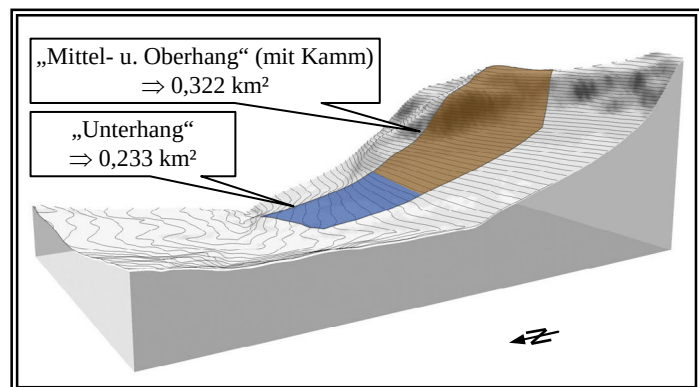


Abb. 6-43 Schematische Aufteilung des Modellhangs Hölzerkopf in „Unterhang“ und „Mittel- u. Oberhang“ (5-fach überhöht).

¹⁵ Wie in Kapitel 3 bereits dargestellt wurde, ist nicht mit unterirdischem Zu- und Abfluss zu rechnen.

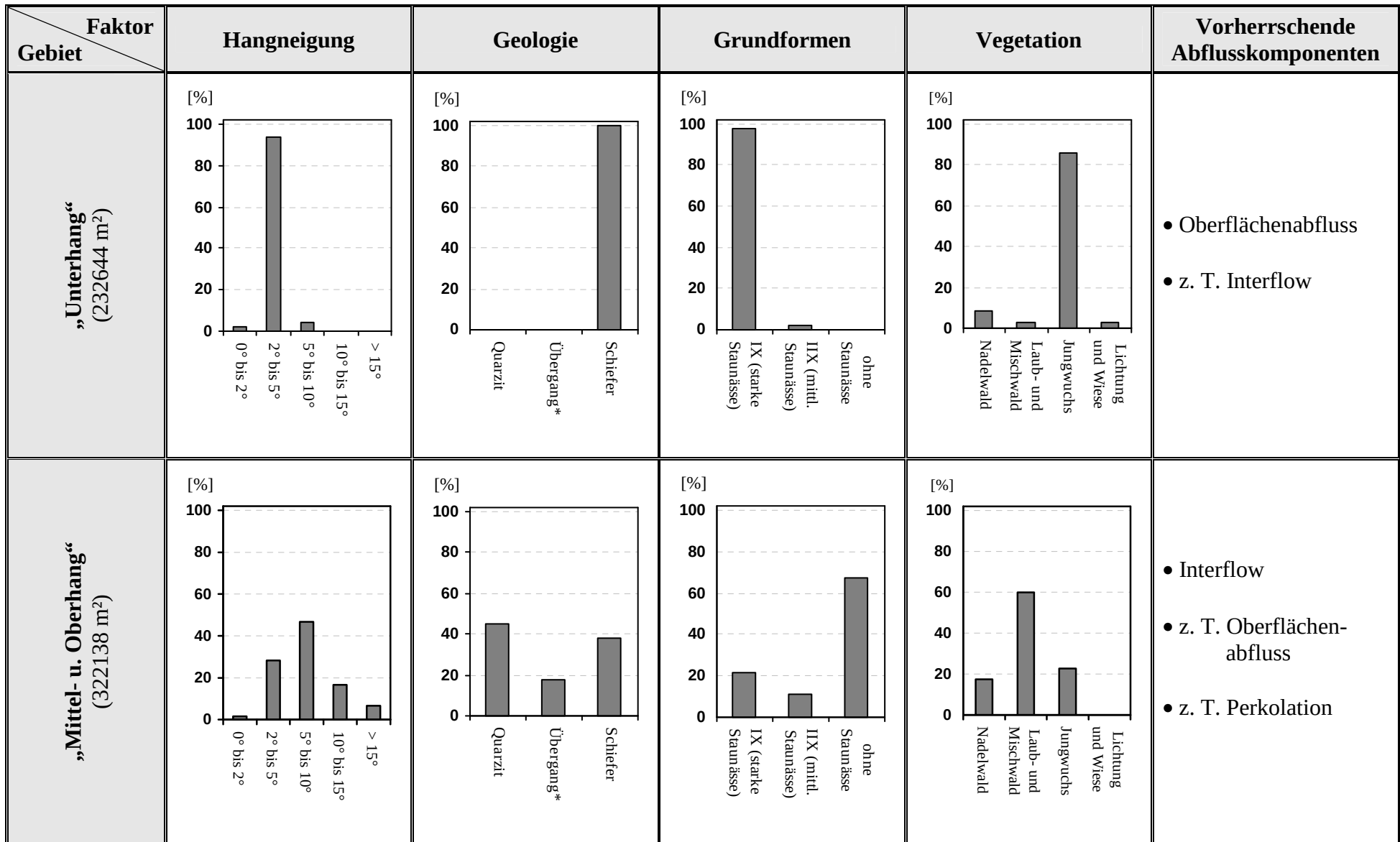


Abb. 6-44 Vergleich der physiogeographischen Ausstattung der unteren und oberen Hangbereiche des Modellhanges Hölzerkopf anhand ausgewählter Faktoren. Darstellung über Flächenanteile am jeweiligen Gebiet (* „Übergang“ = Übergangsschichten zwischen Taunusquarzit und Hunsrückschiefer. Diese zeichnen sich durch Zunahme von Tonschieferinlagerungen aus).



Bild 6-5 Entwässerungsgraben entlang des mittleren Querweges des Modellhanges Hölzerkopf.

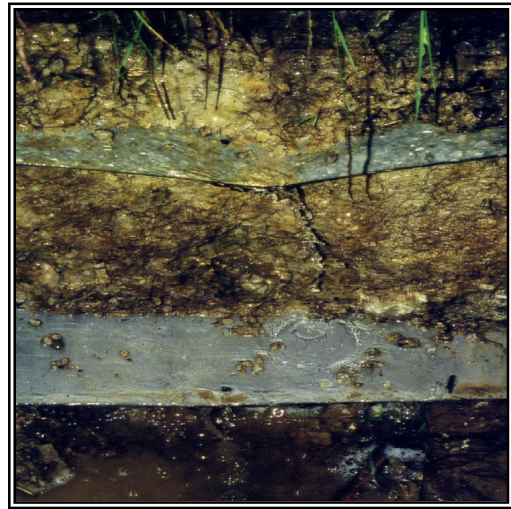


Bild 6-6 Interflowaustritt in das Grabensystem infolge von Starkniederschlägen (Foto: Reinke).

Die beiden Teilbereiche des Hanges unterscheiden sich, wie Abbildung 6-44 verdeutlicht, grundlegend in ihrer physiogeographischen Ausstattung. Während der Unterhang mit 2° bis 5° Hangneigung vorwiegend schwach geneigt ist (95 % der Fläche), finden sich in den oberhalb gelegenen Bereichen mit 5° bis 10° vorwiegend mittlere Neigungen (47 % der Fläche). Bezüglich des geologischen Untergrundes liegen am Unterhang ausschließlich Tonschiefer vor, wohingegen an „Mittel- u. Oberhang“ weiträumig Quarzite und Übergangsschichten zwischen Quarzit und Schiefer auftreten. Dementsprechend sind die aufbauenden Böden des Unterhanges fast ausnahmslos stark staunässebeeinflusst, wohingegen in den oberen Bereichen Böden ohne Staunässeinfluss vorherrschen. Auch die forstlichen Bestände zeigen Abweichungen: Ein Anteil von 86 % der Fläche des Unterhanges ist mit Jungwuchs bestanden, während die oberen Hangbereiche lediglich einen Jungwuchsanteil von 23 % aufweisen. Hier finden sich auf 60 % der Fläche Laub- und Mischwaldaltbestände.

Entsprechend den bereits in Kapitel 4 skizzierten hydrologischen Eigenschaften des Modellhanges Hölzerkopf zeigen beide untersuchten Hangabschnitte deutliche Unterschiede in der Abflussentstehung. Diese Unterschiede basieren auf den spezifischen naturräumlichen Gegebenheiten und spiegeln sich zum einen in den ermittelten Abflussganglinien wider und können andererseits durch Beobachtung qualitativ nachgewiesen werden. So stellt Interflow in den oberen Hangbereichen die vorherrschende Abflusskomponente dar, wohingegen dem Oberflächenabfluss lediglich eine untergeordnete Rolle zukommt. Letzterer tritt v. a. im Bereich von Rückegassen und anderen Fahrwegen auf und wird in erster Linie dann schnell zum Vorfluter Gräfenbach weitergeleitet, wenn eine direkte Vernetzung mit den angrenzenden Drainagegräben besteht (vgl. Bild 3-20). Ist dieser direkte Anschluss nicht gegeben, d. h. wenn eine Ableitung in die Fläche erfolgt, so geht der Oberflächenabfluss wieder in Interflow über. Dieser wird letztlich an den Einschnittstellen des Drainagesystems ins offene Gerinne überführt. Im Unterhangbereich, der wenig tiefgründige, tonreiche Böden aufweist, die, wie oben beschrieben, fast gänzlich einen starken Staunässeinfluss aufzeigen, herrscht demgegenüber Oberflächenabfluss (Sättigungsflächenabfluss) als Abflusskomponente vor (vgl. Bild 3-16). Eine hochwasserverschärfende Wirkung kommt dabei der hohen Dichte an Drainagegräben in diesem Bereich zu, die eine schnelle Überführung des Oberflächenabflusses (und des ebenfalls beobachteten Matrixfeuchteflusses) ins offene Gerinne bewirkt und somit auch den Muldenrückhalt in der Fläche minimiert. Der Oberflächenabfluss in den unteren Hangbereichen wird weiterhin durch den hohen Anteil an Jungwuchsbeständen mit ihrem vergleichsweise geringen Deckungsgrad verstärkt.

6.2.2.1 Längerfristiges Abflussverhalten und Saisonalität des Abflussverhaltens

Die im Gelände beobachteten Unterschiede bezüglich der vorherrschenden Abflusskomponenten in unteren und mittleren bzw. oberen Hangbereichen des Modellhanges Hölzerkopf spiegeln sich in den resultierenden Abflussganglinien wider. Abbildung 6-45 stellt hierzu zunächst die jährlichen Abflusshöhen gegenüber. Es zeigt sich in beiden beobachteten Jahren ein Ungleichgewicht in der Abflusshöhe beider Hangsegmente, wobei der Abfluss aus dem Unterhang 120 mm bzw. 110 mm über jenem von Mittel- und Oberhang liegt. Am Unterhang wird somit ein bedeutend höherer Anteil des Niederschlagsinputs in Abfluss transformiert.

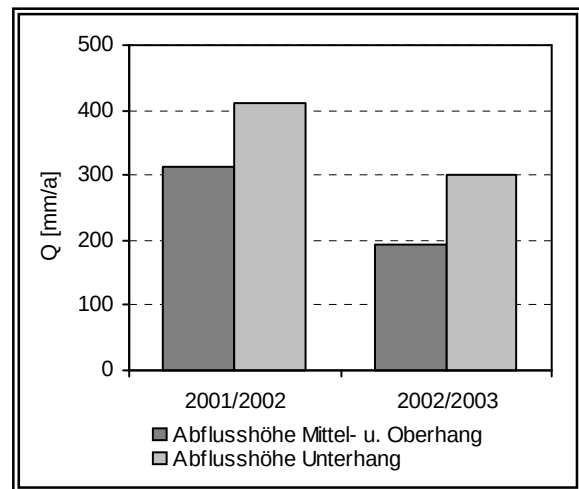


Abb. 6-45 Jährliche Abflusshöhe aus den unteren bzw. mittleren- und oberen Hangbereichen des Modellhanges Hölzerkopf.

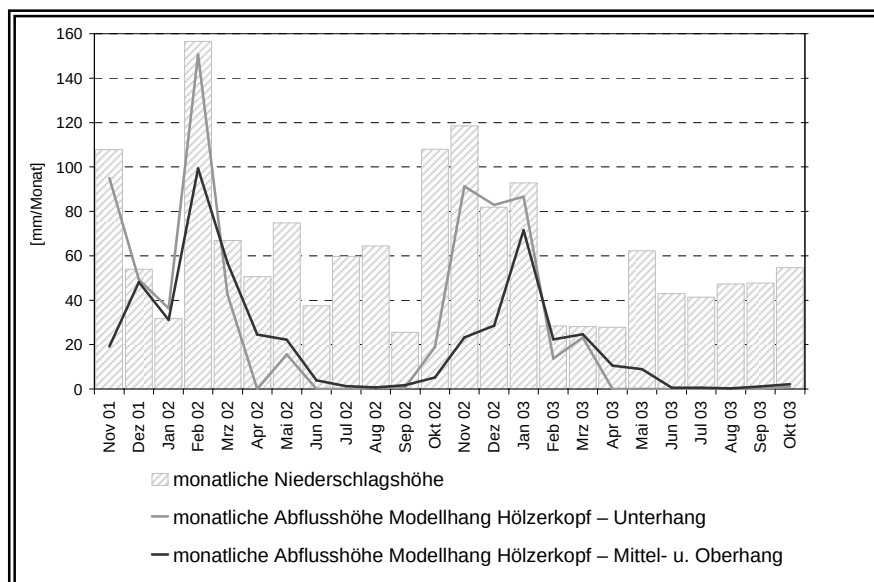


Abb. 6-46 Monatliche Abflusshöhe aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.

Abbildung 6-46 stellt darüber hinausgehend die monatlichen Abflusshöhen beider Hangbereiche von November 2001 bis Oktober 2003 gegenüber. Beide Segmente zeigen im betrachteten Zeitraum eine in ihrer Grundstruktur ähnliche Saisonalität der Abflüsse mit deutlichem Maximum in den Wintermonaten. Es ist jedoch ersichtlich, dass die monatliche Abflusshöhe aus dem Unterhangbereich eine vergleichsweise höhere Variabilität aufweist. Der Variationskoeffizient beträgt 139 % für den Unterhang und 117 % für Mittel- u. Oberhang. Von entscheidender Bedeutung sind v. a. die signifikant erhöhten Abflusssummen des Unterhanges in niederschlagsreichen Wintermonaten, wohingegen für beide Hangbereiche die sommerlichen Abflussmengen gegen null gehen. Über diese Unterschiede hinaus zeigt sich eine Verschiebung im Abflussgang beider Hangbereiche, der besonders im hydrologischen Jahr 2002/2003 sichtbar wird: Während, in Abhängigkeit von der jahresspezifischen Niederschlagsverteilung, die Abflussvolumina aus dem Unterhangbereich zu Beginn des Winterhalbjahres schnell und deutlich ansteigen, zeigen Mittel- und Oberhang einen verzögerten Anstieg. Andererseits geht der Abfluss aus dem Unterhang gegen Ende des Winterhalbjahres

wieder rasch zurück, während Mittel u. Oberhang bis Mai/Juni noch eine verstärkte Abflussaktivität aufweisen. Die oberen Hangbereiche besitzen somit offensichtlich ein deutlich erhöhtes Retentionsvermögen, das bereits in diesem zeitlichen Betrachtungsmaßstab deutlich wird.

Die in Abbildung 6-47 dargestellten monatlichen Abflussquotienten bestätigen die Beobachtungen bezüglich der zeitlichen Verzögerung im Abflussgeschehen und der in enger kausaler Beziehung stehenden Unterschiede in der Variabilität der monatlichen Abflusshöhen. Auch die monatlichen Abflussquotienten liegen zu Beginn des Winterhalbjahres für den Unterhang deutlich höher als in den oberhalb gelegenen Hangbereichen und erreichen größere Maximalwerte, gehen jedoch gegen Ende des Winterhalbjahres rascher zurück. Insgesamt gehen im Zeitraum November 2001 bis Oktober 2003 aus dem Unterhang 46 % der zugeführten Niederschlagsmenge wieder als Abfluss ab, aus Mittel- und Oberhang dagegen lediglich 34 %. Der im Januar 2002 für den Unterhang ermittelte Abflussquotient > 1 beruht, wie schon für das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach dargelegt, auf der spezifischen Niederschlagsverteilung (hohe Niederschläge in der zweiten Dezemberhälfte 2001 und geringe Niederschläge im Januar 2002) in Kombination mit einem auch in diesem Hangbereich vorhandenen, wenn auch weniger stark ausgeprägten Retentionsvermögen.

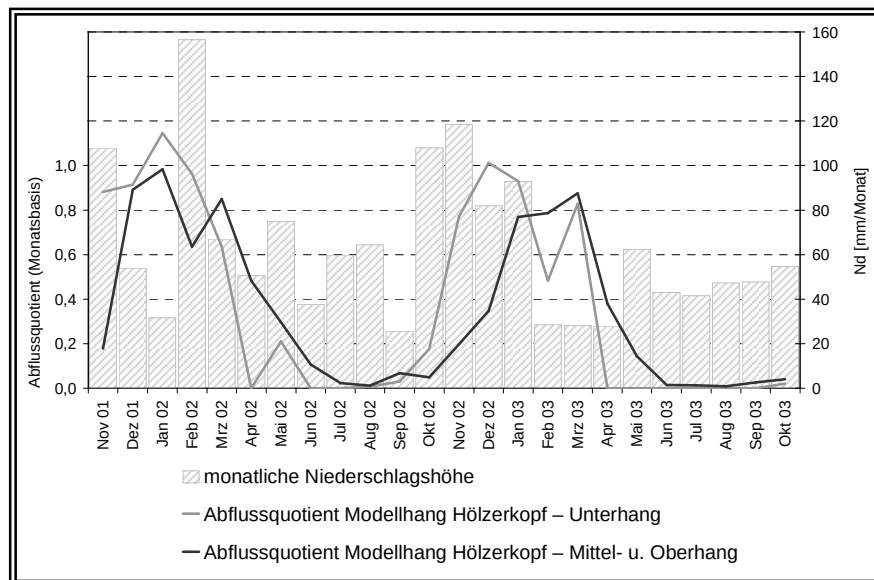


Abb. 6-47 Monatliche Abflussquotienten von Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf (November 2001 bis Oktober 2003).

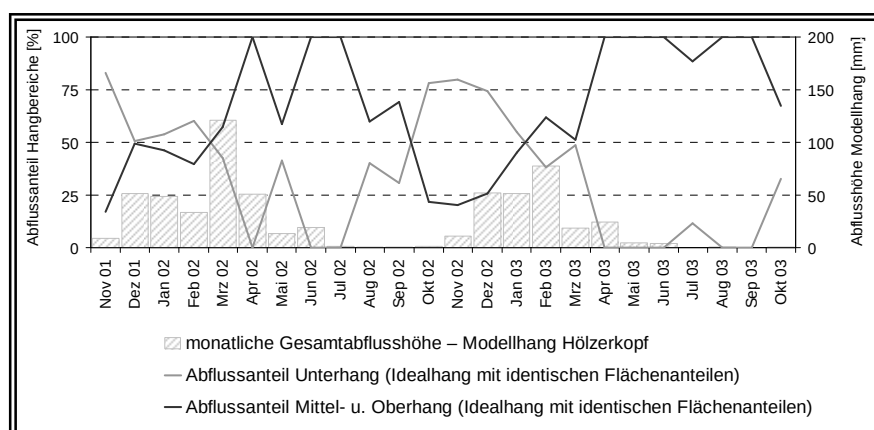


Abb. 6-48 Monatlicher Abflussanteil von Unterhang und Mittel- u. Oberhang am Gesamt-abfluss des Modellhanges Hölzerkopf (November 2001 bis Oktober 2003; standardisierte Flächenanteile beider Hangbereiche).

Abbildung 6-48 zeigt die Abflussanteile beider Hangbereiche am Gesamtabfluss des Modellhanges Hölzerkopf in den untersuchten Monaten. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sind die Flächen der Hangbereiche standardisiert, die Auswertung bezieht sich auf einen hypothetischen Flächenanteil beider Hangbereiche von 50 % am Gesamthang. Es zeigt sich eine deutliche saisonale Verschiebung in der Herkunft des Gesamtmodellhangabflusses, die die zuvor getroffenen Aussagen bekräftigt: Zu Beginn beider untersuchter Winterhalbjahre stammt der überwiegende Anteil des Modellhangabflusses aus dem Unterhang. In Abhängigkeit von der jahresspezifischen Niederschlagsverteilung ist jedoch in der zweiten Hälfte des Winterhalbjahres eine Verschiebung der Herkunft zu Mittel- und Oberhang festzustellen, so dass ab Februar bzw. März der größere Teil des Abflusses diesen Bereichen entstammt. Im hydrologischen Sommerhalbjahr findet, bei geringen absoluten Abflussmengen aus dem Modellhang, weitgehend nur noch in den oberen Hangbereichen eine Abflussbildung statt. Diesen Sachverhalt verdeutlicht auch Abbildung 6-49, die exemplarisch für das Jahr 2001/2002 die Summenlinien der täglichen Abflusshöhe beider Hangbereiche (Abb. 6-49a) und die resultierende Doppelsummenlinie (Abb. 6-49b) darstellt.

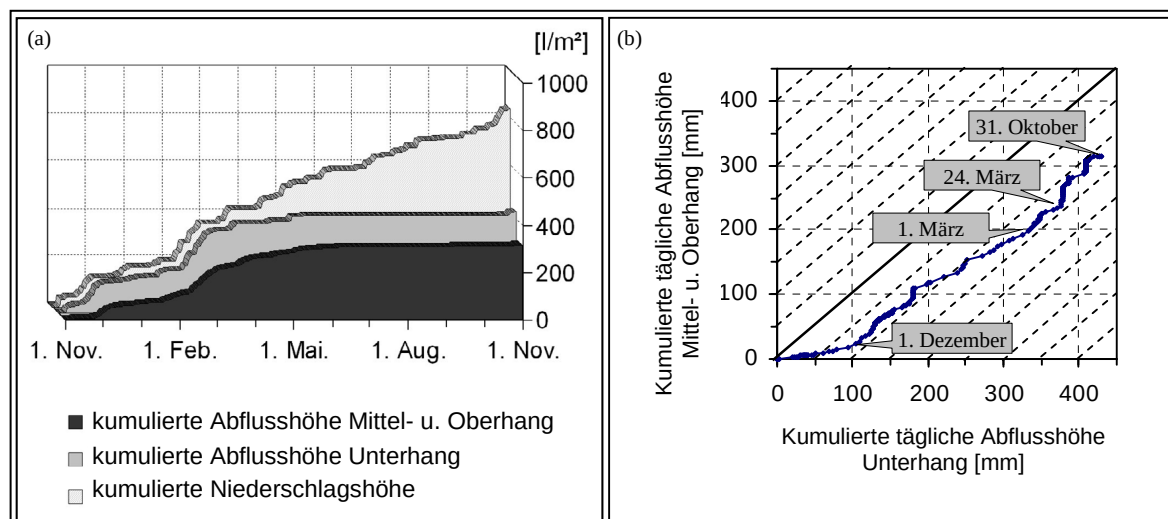


Abb. 6-49 Summenlinien der täglichen Abflusshöhe aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges mit Niederschlagssummenlinie (a) und resultierende Doppelsummenlinie der Abflusshöhe beider Hangbereiche (b) für das hydrologische Jahr 2001/2002.

Auch bei Betrachtung der Ganglinie der täglichen Abflusshöhe (Abbildung 6-50) werden die Unterschiede im Abflussverhalten zwischen unteren und mittleren/oberen Hangbereichen deutlich. Starke Niederschlagsereignisse bewirken überproportional hohe Abflussspitzen aus dem Unterhang. So führen beispielsweise 27,8 mm Niederschlag am 2. Januar 2003, bei im Vorfeld bereits hoher Bodenfeuchte, zu einer Tagesabflusshöhe von 23 mm aus dem Unterhang gegenüber lediglich 11,2 mm aus Mittel- und Oberhang. Die Spitzenwerte des Unterhangs übertreffen die der oberen Hangbereiche um bis zu 500 %, wobei das exakte Ausmaß von der spezifischen Kombination der Faktoren Niederschlagsintensität und Niederschlagsdauer, Bodenvorfeuchte und Jahreszeit abhängt (die Jahreszeit ist dabei wiederum z. B. mit der Vegetationsentwicklung und der Höhe der potenziellen Verdunstung korreliert). Gegenüber den Abflussspitzen zeigt der Basisabfluss eine weniger komplexe Systematik der saisonalen Abweichungen zwischen beiden Hangbereichen. Während er zu Beginn der beiden beobachteten Winterhalbjahre am Unterhang im Allgemeinen höher angesiedelt ist als an Mittel- und Oberhang, ist gegen Ende des Winterhalbjahres und im Sommerhalbjahr ein erhöhter Basisabfluss aus Mittel- und Oberhang festzustellen.

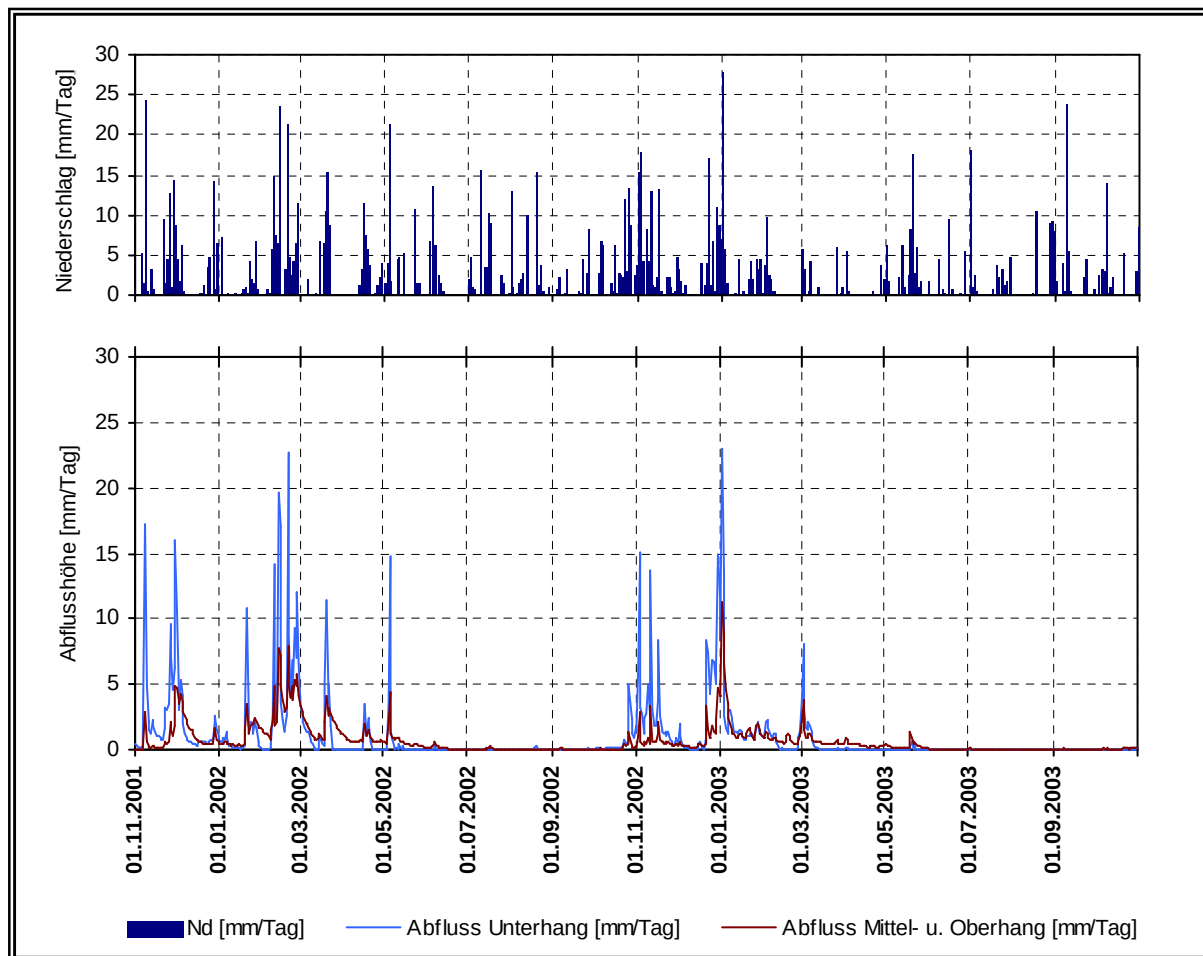


Abb. 6-50 Ganglinie der täglichen Abflusshöhe aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhangs Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.

Die dargelegten saisonalen Unterschiede im Abflussverhalten beider Hangbereiche unterstreicht auch die Analyse der jahreszeiteinspezifischen Beziehung von Abflussanteil der oberen Hangbereiche am Gesamtabfluss des Modellhangs Hölzerkopf einerseits¹⁶ und absoluter Höhe des Modellhangabflusses andererseits (vgl. Abbildung 6-51; Werte auf Tagesbasis). Mit Ausnahme des Sommers zeigt sich, dass der Anteil des Abflusses aus Mittel- und Oberhang am Gesamtabfluss mit steigenden absoluten Abflussmengen deutlich abnimmt, wobei die Intensität der Abnahme jahreszeiteinspezifisch ist. Am ausgeprägtesten stellt sie sich im Herbst dar. Hier geht der Anteil der Mittel- und Oberhangabflüsse am Modellhangabfluss bereits bei nur unwesentlich verstärktem Abflussgeschehen auf unter 25 % zurück. In Winter und Frühjahr dagegen wird ein Wert von 25 % kaum unterschritten, wobei bei geringer absoluter Abflusshöhe dem Anteil aus Mittel- und Oberhang eine dominierende Stellung zukommt. Dies spiegelt den vergleichsweise hohen Basisabfluss des Hangsegmentes wider. Der Zusammenhang zwischen den Variablen (Maßzahl: Rang-Korrelationskoeffizient nach Spearman) ist in den drei genannten Jahreszeiten jeweils vergleichsweise stark ausgebildet ($r_{s\text{-Herbst}} = -0,84$, $r_{s\text{-Winter}} = -0,61$, $r_{s\text{-Frühjahr}} = -0,76$), nur im Sommer findet sich kein deutlicher Zusammenhang ($r_{s\text{-Sommer}} = -0,1$).

Entsprechend weisen die mittlere tägliche Abflussspende von unteren Hangbereichen einerseits und mittleren/oberen Hangbereichen andererseits einen ausgeprägten Zusammenhang auf (vgl. Abbildung 6-52). Dieser unterliegt auch in diesem Fall einer jahreszeitlichen Variation. Während er im Sommer vergleichsweise schwach ausgeprägt ist ($r = +0,43$), stellt

¹⁶ Bezogen auf einen Idealhang mit 50 % Flächenanteil beider Hangbereiche (vgl. Abbildung 6-51).

er sich in den übrigen Jahreszeiten stärker dar. Bei intensiverem Abflussgeschehen übertrifft die Abflussspende der unteren Hangbereiche die der mittleren und oberen Hangbereiche von Herbst bis Frühjahr deutlich, wobei der Proportionalitätsfaktor jahreszeitlich variiert. Vor allem im Herbst zeigt der Unterhang erhöhte Abflüsse, die jene von Mittel- und Oberhang durchschnittlich um das 4,7-fache übersteigen. Abbildung 6-52 illustriert zudem nochmals den erhöhten Basisabfluss der oberen Hangbereiche in Winter und Frühjahr (Ordinaten-schnittpunkt der Regressionsgerade).

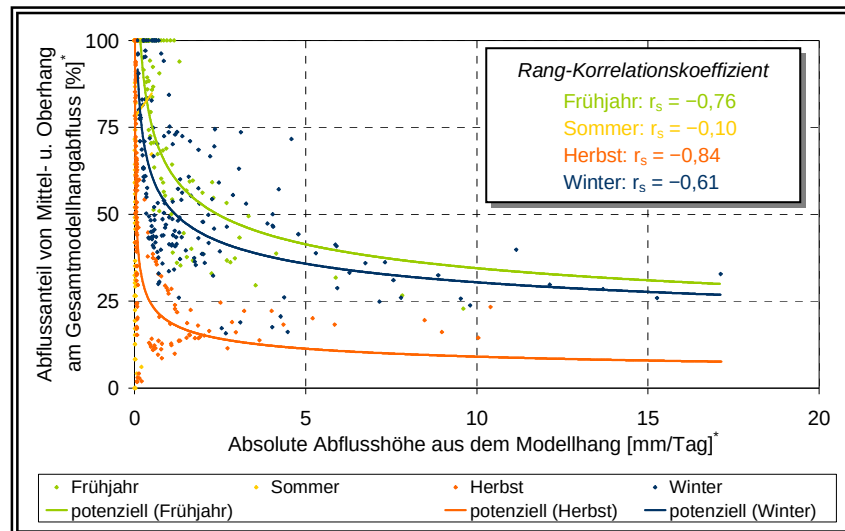


Abb. 6-51 Zusammenhang zwischen dem Anteil des Mittel- u. Oberhangabflusses am Gesamtabfluss des Modellhangs Hölzerkopf und der absoluten Abflusshöhe aus dem Modellhang Hölzerkopf (Tageswerte) (* bezogen auf einen Idealhang mit 50 % Flächenanteil beider Hangbereiche).

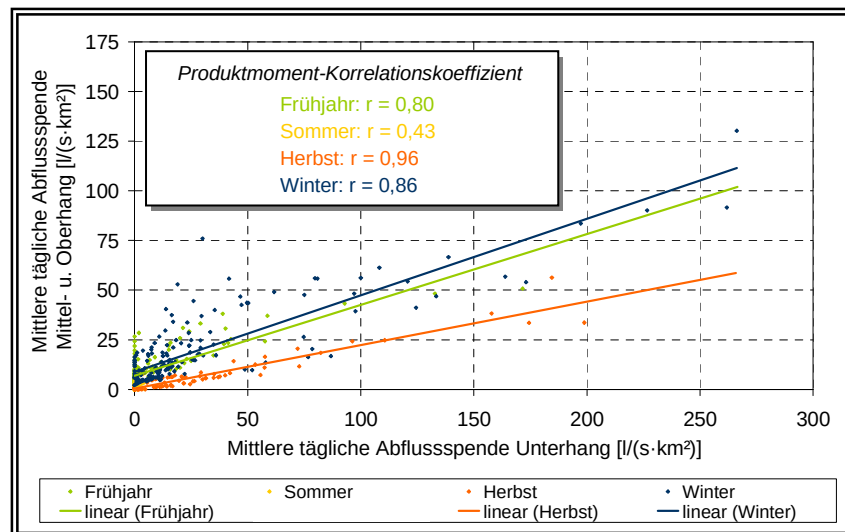


Abb. 6-52 Zusammenhang zwischen der mittleren täglichen Abflussspende von Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhangs Hölzerkopf (Zeitraum November 2001 bis Oktober 2003).

In beiden Modellhangteilen existiert ein jahreszeitlich variierender, gebietsspezifischer Zusammenhang zwischen täglicher Abfluss- und Niederschlagshöhe (Abbildung 6-53 und 6-54). Der Erklärungsanteil der Niederschläge an der Varianz der Tagesabflüsse ist im Winter maximal, er beträgt für den Unterhang 55 % und für Mittel- und Oberhang 42 %. Gleichzeitig wird deutlich, dass identische Niederschläge höhere Abflüsse am Unterhang hervorrufen. Letzteres Phänomen betrifft auch die Jahreszeiten Herbst und Frühjahr, in denen die Abflusswerte im Gegensatz zum Winter mit höheren Niederschlägen jedoch weniger stark steigen.

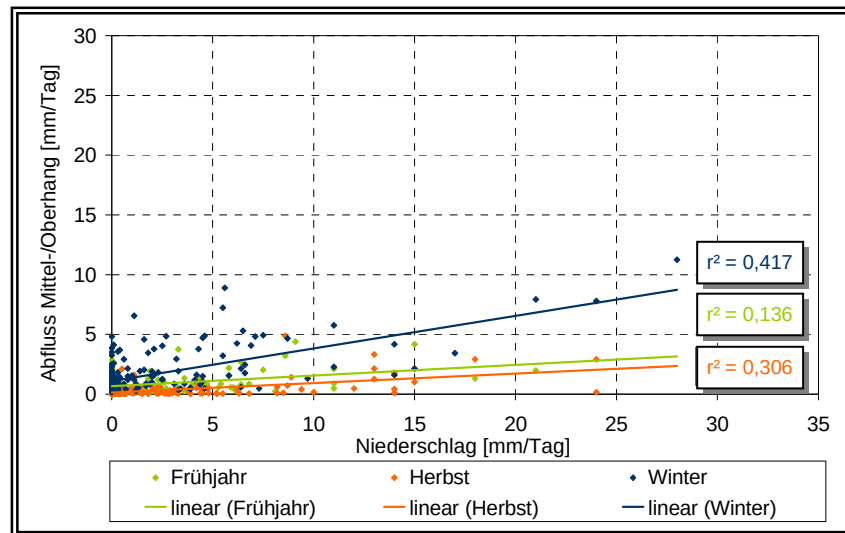


Abb. 6-53 Zusammenhang zwischen täglicher Abflusshöhe aus Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf und täglicher Niederschlagshöhe in Herbst, Winter und Frühjahr (hydrologisches Jahr 2001/2002 und 2002/2003).

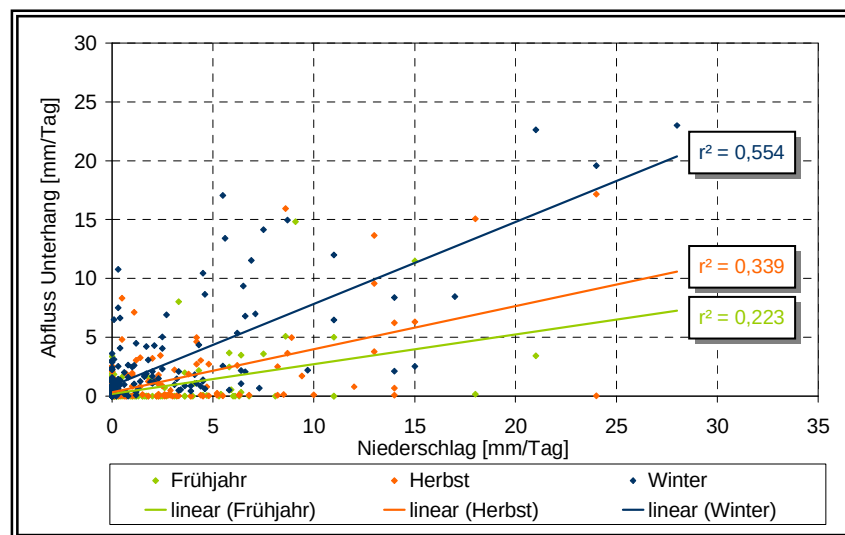


Abb. 6-54 Zusammenhang zwischen täglicher Abflusshöhe aus dem Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf und täglicher Niederschlagshöhe in Herbst, Winter und Frühjahr (hydrologisches Jahr 2001/2002 und 2002/2003).

Betrachtet man neben dem Einfluss der aktuellen Tagesniederschläge auf die Abflusshöhe den Einfluss vorangegangener Niederschläge, dies ist z. B. anhand des 21-Tage-Vorregenindex¹⁷ möglich, der auch als jahreszeitenspezifisches Maß für die Bodenvorfeuchte aufgefasst werden kann, so wird deutlich, dass auch hier ein jahreszeiten- und gebietsspezifischer Zusammenhang existiert (vgl. Abbildung 6-55 und 6-56). Der Zusammenhang zwischen Vorregenindex und täglicher Abflusshöhe zeigt sich dabei vor allem im Winter sehr stark ausgeprägt. Er beträgt für Mittel- und Oberhang $r = +0,79$ und für den Unterhang $r = +0,58$. In den übrigen Jahreszeiten ist der Einfluss vorangegangener Niederschläge dagegen herabgesetzt, wobei er stets an Mittel- und Oberhang stärker ausgebildet ist. Es wird jedoch deutlich, dass, mit Ausnahme des Sommers, mit steigendem Vorregenindex die tägliche Abflusshöhe des Unterhanges im Vergleich zu der des Mittel- und Oberhanges stärker zunimmt.

¹⁷ Vgl. hierzu Kapitel 6.2.2.2.

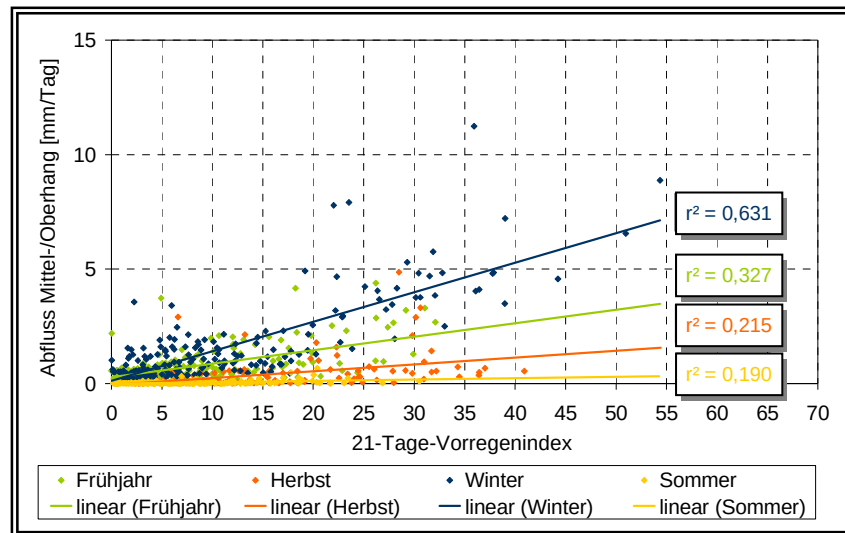


Abb. 6-55 Zusammenhang zwischen täglicher Abflusshöhe aus Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf und dem 21-Tage-Vorregenindex (hydrologisches Jahr 2001/2002 und 2002/2003).

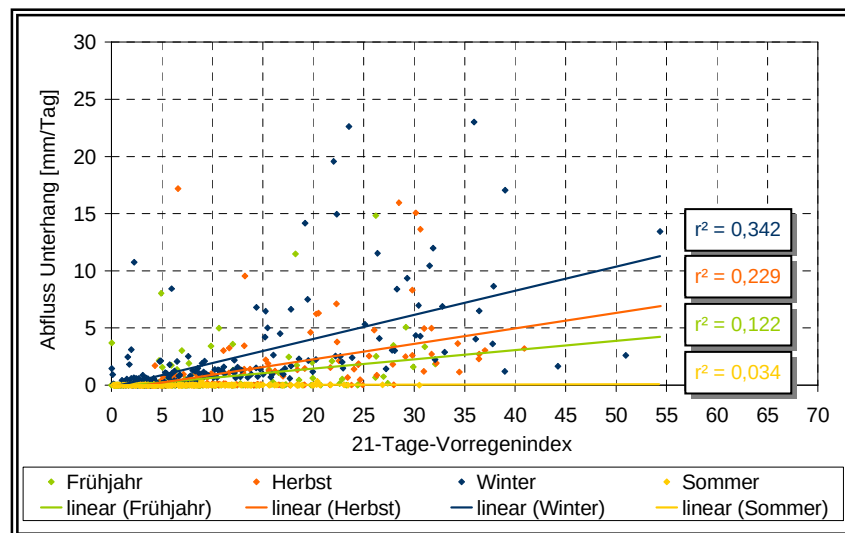


Abb. 6-56 Zusammenhang zwischen täglicher Abflusshöhe aus dem Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf und dem 21-Tage-Vorregenindex (hydrologisches Jahr 2001/2002 und 2002/2003).

Tabelle 6-11 fasst den Einfluss der untersuchten Faktoren auf die tägliche Abflusshöhe der unterschiedlichen Hangbereiche zusammen. Es zeigt sich, dass sowohl die aktuellen Tagesniederschläge als auch der Vorregenindex im Winter ihren maximalen Erklärungsanteil an der täglichen Abflusshöhe aufweisen. Dies betrifft sowohl den Unterhang, in dem ein Anteil von 69 % der Abflussvarianz durch beide Variablen begründet ist, als auch das Gebiet von Mittel- und Oberhang, für den der Erklärungsanteil sogar bei 81 % liegt. In den Übergangsjahreszeiten nimmt der Erklärungsanteil für beide Gebiete deutlich ab und findet im Sommer sein jeweiliges Minimum mit 11 % für den Unterhang und 23 % für Mittel- und Oberhang. Insgesamt wird deutlich, dass am Unterhang zu jeder Jahreszeit der aktuelle Tagesniederschlag den Haupterklärungsanteil an der Abflusshöhe besitzt, wohingegen an Mittel- und Oberhang stets der 21-Tage-Vorengenindex den größeren Einfluss aufweist. Letztlich belegt dies wieder das deutlich höhere Retentionsvermögen von Mittel- und Oberhang.

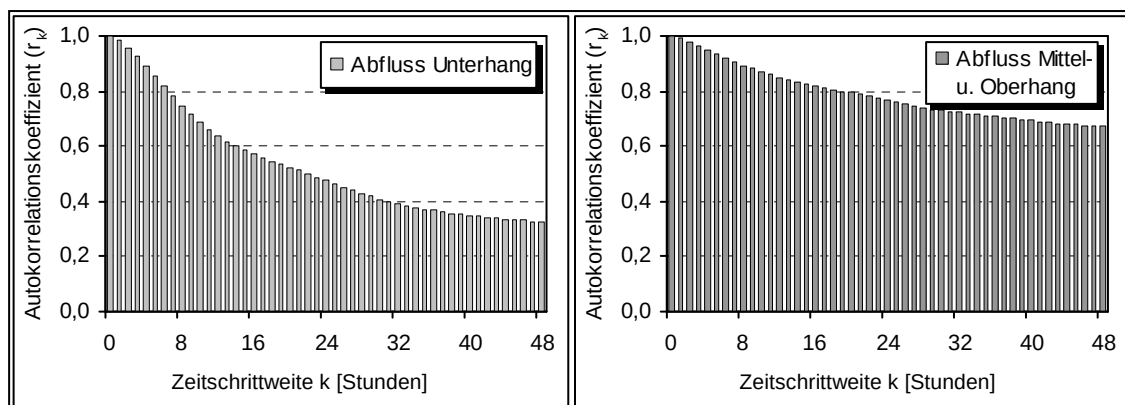
Tabelle 6-11 Einfluss der Faktoren Tagesniederschlagshöhe und 21-Tage-Vorregenindex auf die Tagesabflusshöhe von Unterhang und Mittel- u. Oberhang in den verschiedenen Jahreszeiten (Maßzahl = Bestimmtheitsmaß r^2).

		Tagesabflusshöhe Mittel- u. Oberhang				Tagesabflusshöhe Unterhang			
		Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
Einflussfaktor	aktueller Tages-Nd	$r^2 = 0,14$	$r^2 = 0,05$	$r^2 = 0,31$	$r^2 = 0,42$	$r^2 = 0,22$	$r^2 = 0,03$	$r^2 = 0,34$	$r^2 = 0,55$
	21-Tage-Vorregenindex	$r^2 = 0,33$	$r^2 = 0,19$	$r^2 = 0,33$	$r^2 = 0,63$	$r^2 = 0,12$	$r^2 = 0,09$	$r^2 = 0,23$	$r^2 = 0,34$
	aktueller Tages-Nd und 21-Tage-Vorregenindex	$r^2 = 0,41$	$r^2 = 0,23$	$r^2 = 0,42$	$r^2 = 0,81$	$r^2 = 0,31$	$r^2 = 0,11$	$r^2 = 0,46$	$r^2 = 0,69$

Die genannten Unterschiede im Retentionsvermögen beider Hangbereiche spiegeln auch die in Abbildung 6-57 dargestellten Autokorrelogramme der stündlichen Abflusswerte wider. Das Grundintervall der gewählten Zeitschrittweite beträgt eine Stunde. Der bei zunehmendem Zeitversatz deutlich langsamere Abfall des Autokorrelationskoeffizienten von Mittel- und Oberhang zeigt die erheblich höhere Erhaltungsneigung (Beharrungstendenz) hydrologischer Prozesse in diesem Hangbereich (vgl. Bahrenberg et al. 1992). Dieser erhöhte Persistenzgrad beschreibt dabei letztlich das ausgeprägtere Retentionsvermögen von Mittel- und Oberhang (Dyck & Peschke 1995, Langguth & Voigt 1980, Maniak 1997), wohingegen der Unterhang eine vergleichsweise geringere Beharrungstendenz hydrologischer Prozesse und somit ein prinzipiell geringeres Retentionsvermögen aufweist. Insgesamt ergibt sich für die unteren Hangbereiche eine entsprechend erhöhte Variabilität des Abflussgeschehens über das Gesamtjahr gegenüber Mittel- und Oberhang (vgl. Tabelle 6-12).

Tabelle 6-12 Intraannuelle Abflussvariabilität des Modellhangs und seiner Hangbereiche auf Basis von Stundenmittelwerten.

Hydrologisches Jahr	Intraannuelle Abflussvariabilität (Maßzahl: Relative Variabilität [%])		
	Modellhang (gesamt)	Unterhang	Mittel- u. Oberhang
1999/2000	80,7	-	-
2000/2001	94,9	-	-
2001/2002	118,7	148,0	104,5
2002/2003	126,5	154,2	102,1

**Abb. 6-57** Autokorrelogramme des mittleren stündlichen Abflusses für den Unterhang und den Mittel- u. Oberhang des Modellhangs Hölzerkopf. Alle Koeffizienten sind auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ signifikant.

Die signifikanten Unterschiede im Abflussverhalten beider Hangbereiche basieren auf grundlegenden Differenzen ihrer naturräumlichen Ausstattung. Die wenig tiefgründigen, tonreichen Böden des Unterhangs sind durch einen auf der Basislage aufbauenden, bereits in ca. 30 bis 40 cm u. GOF anstehenden Sd-Horizont charakterisiert. Zusammen mit der geringen Leitfähigkeit (k_f) des hangenden Bodenhorizontes führt dies bereits bei Niederschlägen geringer bis mittlerer Intensität zur ausgeprägten Genese von Oberflächenabfluss (vgl. Bild 3-16). Entscheidende Bedeutung kommt dem Sättigungsflächenabfluss zu, der v. a. im Winterhalbjahr bei stets hohem Stauwasserspiegel (vgl. Abbildung 6-58) auftritt. Das vornehmliche Auftreten von Oberflächenabfluss spiegelt sich durch schnell ansteigende Abflussvolumina, vergleichsweise hohe Scheitelwerte und eine ausgeprägte Steilheit des abfallenden Asts der Ganglinie wider. Im Gegensatz dazu sind die oberen Hangbereiche durch tiefgründigere Braunerden und Pseudogley-Braunerden charakterisiert. Ungestörte Flächen weisen hier eine Infiltrationskapazität von durchschnittlich 172 mm/h auf (vgl. Kapitel 3.3.4). Entsprechend tritt selbst bei hochintensiven Niederschlägen kein Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationsüberschuss auf. Vorherrschende Abflusskomponente ist v. a. im Bereich der Pseudogley-Braunerden der Interflow. Er wird in erster Linie an der Grenze zum stauenden Sd-Horizont, d. h. im Bereich einer sprunghaften Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit generiert. Dieser Grenzbereich steht, in Abhängigkeit von der Lage am Hang, ab ca. 100 cm u. GOF an. Die laterale, dem Hanggefälle folgende Wasserbewegung findet dabei sowohl im Makroporen- als auch im Mikroporensystem statt (vgl. Kapitel 2) und ist an den Austrittsstellen im Bereich der Drainagegräben zu beobachten. Durch den bimodalen Charakter des Interflows wird erklärbar, dass infolge von Niederschlagsereignissen einerseits deutlich sichtbare Abflussscheitel auftreten (schneller Makroporenfluss, vgl. Bild 3-14), andererseits jedoch auch der Basisabfluss über einen längeren Zeitraum erhöht ist (langsamer Matrixfeuchtefluss, vgl. Bild 3-15). Wie Beven & Germann (1982) darlegen, tritt v. a. der schnelle Makroporenfluss in der Regel erst bei vollständiger Wassersättigung des entsprechenden Bodenhorizonts auf. Seine Entstehung ist somit an hohe Niederschlagsintensitäten oder eine bereits hohe Bodenvorfeuchte gebunden. Wie Abbildung 6-58 zeigt, existiert in den Wintermonaten auch an Mittel- und Oberhang eine Zone stetiger Wassersättigung über dem Stauhorizont und bietet somit die Voraussetzung für das Auftreten des schnellen Interflows im Makroporensystem. In den Sommermonaten, in denen außerhalb des Unterhangs in der Regel keine längerfristig wassergesättigten Horizonte existieren, ist die entsprechende Voraussetzung dazu nicht erfüllt, so dass hier lediglich sehr ergiebige Niederschläge schnellen Interflow generieren können. Die Erhöhung des Basisabflusses in den Wintermonaten beruht neben einem verstärkten Matrixfeuchtefluss noch auf einer verstärkten Schüttung am Quellhorizont entlang der Störungszone zwischen Mittel- und Oberhang. Hier geht – mit entsprechend hoher zeitlicher Verzögerung – der am Kambereich tiefenversickerte Wasseranteil in Interflow über. Wie in Kapitel 3 dargelegt, ist die Störungszone zumindest teilweise durch Staunässezeiger lokalisierbar, punktuell erfolgt auch eine Schüttung an die Oberfläche. Schuwirth (2001) konnte anhand hydrochemischer Untersuchungen die Annahme der Grundwasserbürtigkeit der Schüttung untermauern.

Wie zuvor verdeutlicht, steht das Ausmaß vorangegangener Niederschläge (21-Tage-Vorregenindex) bzw. die Bodenvorfeuchte in direktem kausalem Zusammenhang mit dem Abflussgang (auf Basis der Tagesmittelwerte). Vor allem bei vollständiger Wassersättigung einzelner Bodenhorizonte (bzw. Teilen davon) kommt es zur Verstärkung der Abflussbildung: am Unterhang durch Sättigungsflächenabfluss, an Mittel- und Oberhang durch schnellen Interflow. Diese Zonen vollständiger Wassersättigung treten am Modellhang Hölzerkopf zeitlich und räumlich variabel auf. Anhand elf im Gebiet installierter Rohrpegel (s. Kapitel 4) war eine messtechnisch vergleichsweise einfache Ermittlung der Ausdehnung dieser Bereiche durch die Erfassung des Stauwasserspiegels möglich. Exemplarisch sind in Abbildung 6-58

die Messwerte von drei in unterschiedlichen Hangpositionen lokalisierten Messstellen von November 2001 bis Januar 2003 abgetragen. Im Bereich aller drei Pegel unterliegt der Stauwasserspiegel einer starken saisonalen Schwankung. Dabei variiert zum einen – aufgrund der Lage des Stauhorizontes – der Schwankungsbereich sehr deutlich, zum anderen zeigt sich, dass im stauwasserführenden Horizont des Mittelhangs (Messstellen *IF 8* und *IF 10*) in den Sommermonaten keine vollständig wassergesättigten Zonen mehr existieren,¹⁸ wohingegen am Unterhang (Messstelle *IF 5*) während des gesamten Zeitraumes November 2001 bis Januar 2003 Stauwasser auftritt. Am Unterhang steht das Stauwasser in den Wintermonaten regelmäßig an der Oberfläche an, so dass hier bei Niederschlagsereignissen eine direkte Bildung von Sättigungsflächenabfluss erfolgt.

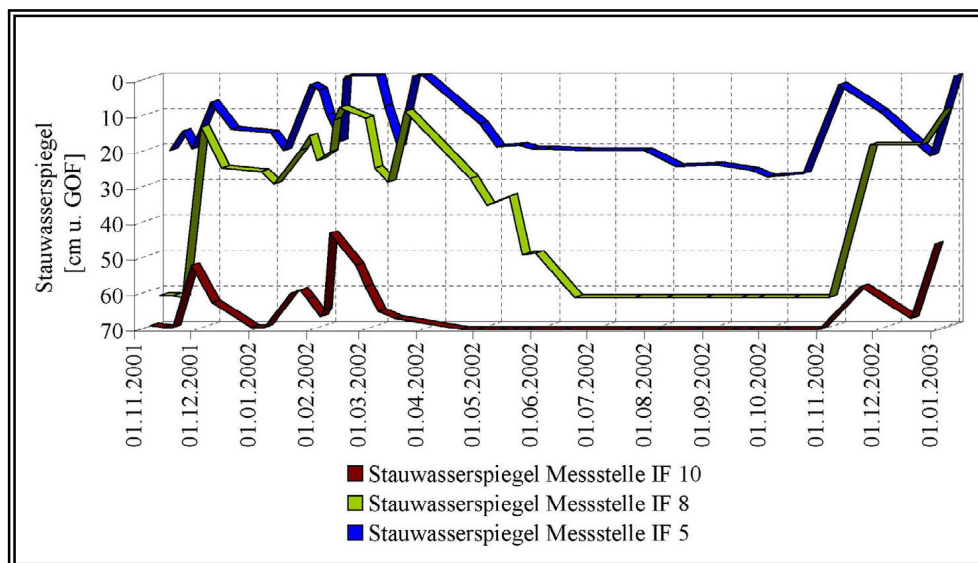


Abb. 6-58 Ganglinie des Stauwasserspiegels in unterschiedlichen Positionen des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Januar 2003.

Messstelle *IF 5*: oberer Unterhang – Stauhorizont in 40 cm u. GOF

Messstelle *IF 8*: unterer Mittelhang – Stauhorizont in 61,5 cm u. GOF

Messstelle *IF 10*: oberer Mittelhang – maximale Tiefe des Rohrpegels 69,5 cm u. GOF

¹⁸ Aufgrund des hohen Schuttanteils konnte mit Rohrpegel *IF 10* der in ca. 120 cm Tiefe lokalisierte Stauhorizont nicht aufgeschlossen werden. In der benachbarten Profilgrube C5 der „Catena West“, die bis 140 cm u. GOF reicht, konnte in den Sommermonaten jedoch ebenfalls kein Stauwasser mehr beobachtet werden.

6.2.2.2 Hochwasserereignisse

Neben den Unterschieden im Jahresgang des Abflusses zwischen unteren und mittleren/oberen Hangbereichen des Modellhanges Hölzerkopf bestehen signifikante Unterschiede im Ablauf von Hochwasserereignissen in beiden Hangsegmenten. In der Folge sind zunächst exemplarisch die Hochwasserereignisse am 4./5. Mai 2002 und 13./14. Februar 2002 wiedergegeben. Es schließt sich die Ergebnisdarstellung einer Analyse 18 ausgewählter Ereignisse der hydrologischen Jahre 2001/2002 und 2002/2003 an.

Das bereits im Rahmen des Vergleichs Modellhang Hölzerkopf–Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach dargestellte Frühjahrshochwasser am 5. Mai 2002 (Abbildung 6-59) beruht auf 15-stündigen Niederschlägen einer mittleren Intensität von 2,1 mm/h und einer Gesamthöhe von 26,1 mm. Bei relativ geringer Vorfeuchte (21-Tage-Vorregenindex = 12,8 mm; siehe Tabelle 6-13) ist der am Unterhang auftretende Abflussscheitel mit $447 \text{ l/(s·km}^2\text{)}$ um den Faktor vier gegenüber Mittel- und Oberhang erhöht, tritt im direkten Vergleich jedoch mit einer Verzögerung von 30 Minuten auf (12,25 h nach Beginn der Niederschläge).

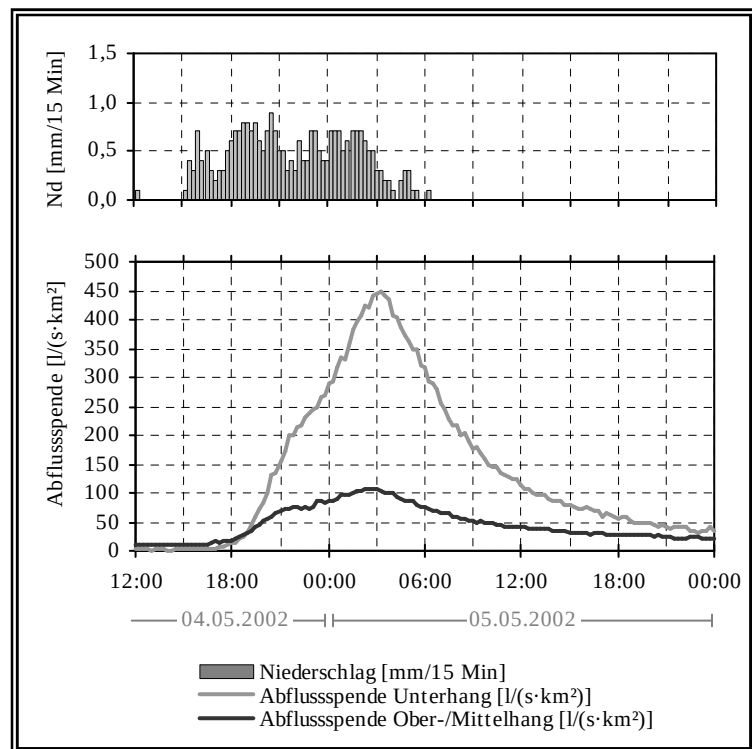


Abb. 6-59 Abflussgang aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf am 4./5. Mai 2002 (Werte standardisiert auf Abflussspende $\text{l/(s·km}^2\text{)}$).

Trotz des früheren Eintrittszeitpunktes der Spitzenabflüsse besitzen Mittel- und Oberhang somit ein deutlich erhöhtes Wasserrückhaltevermögen im Vergleich zum Unterhang. Dieser Sachverhalt kommt auch in Abbildung 6-60 zum Ausdruck: Während 33 Stunden nach Beginn der hochwassergenerierenden Niederschläge aus dem Unterhang mit 18,3 mm bereits 70 % des Niederschlagsinputs wieder als Abfluss aus dem Gebiet abgegangen sind, beträgt der Anteil aus Mittel- und Oberhang lediglich 23 % (6 mm).

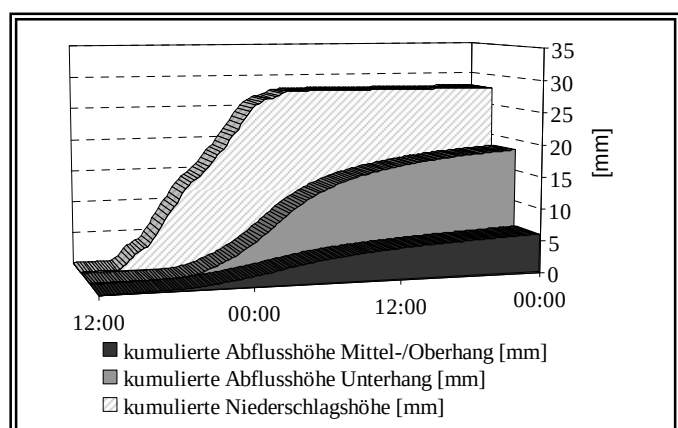


Abb. 6-60 Niederschlags- und Abflusssummenlinien für Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf. Hochwasserereignis am 4./5. Mai 2002.

Auch anhand des Hochwassers am 13./14. Februar 2002 wird das erhöhte Retentionsvermögen von Mittel- und Oberhang deutlich. Während das Abflussvolumen aus dem Unterhangbereich bis auf $400 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ ansteigt, tritt in den oberhalb gelegenen Hangteilen lediglich ein Scheitelabfluss von $125 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ auf. Bei – aufgrund hoher Niederschläge im Vorfeld (21-Tage-Vorregenindex = 22,2; vgl. Tabelle 6-13) – signifikant erhöhtem Basisabfluss gehen von der im Rahmen des Ereignisses gefallenen Niederschlagsmenge aus dem Unterhang bereits nach 32 h wieder 100 % als Abfluss ab, während der Anteil aus Mittel- und Oberhang lediglich 38 % beträgt (vgl. Abbildung 6-62).

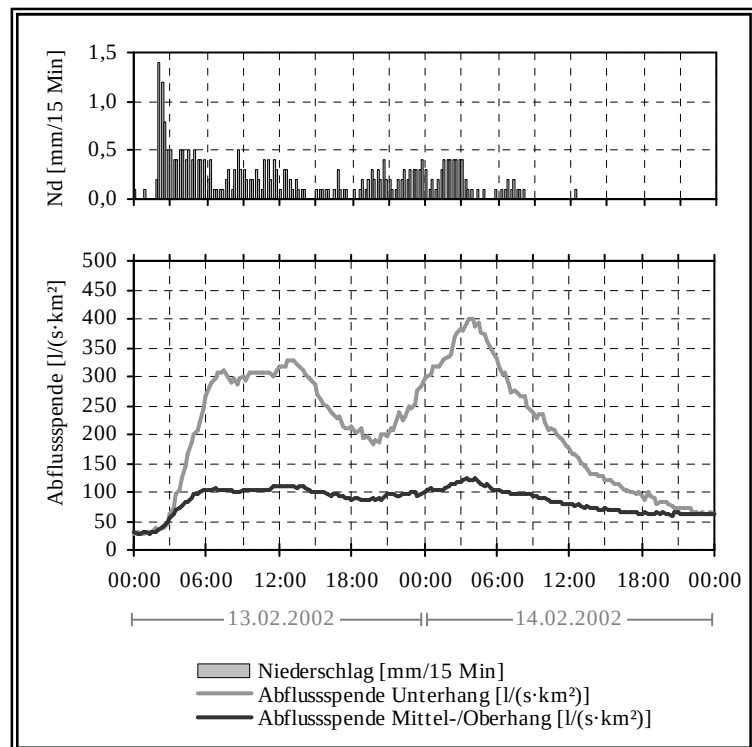


Abb. 6-61 Abflussgang aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf am 13./14. Februar 2002 (Werte standardisiert auf Abflusspende $\text{l/(s}\cdot\text{km}^2)$).

Zur Überprüfung der Allgemeingültigkeit der zuvor exemplarisch erörterten Unterschiede im ereignisbezogenen Abflussverhalten der Hangsegmente bzw. zur aufbauenden Analyse des Abflussverhaltens ist in der Folge die Auswertung von 18 Niederschlags-Abflussereignissen der hydrologischen Jahre 2001/2002 und 2002/2003 dargestellt. Es wurden ausschließlich Ereignisse berücksichtigt, deren Scheitelabfluss über $30 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ oder, deren Niederschlagsintensität über 5 mm/h liegt.¹⁹ Keine Berücksichtigung fanden zudem durch Schneeschmelze modifizierte Ereignisse. Tabelle 6-13 beinhaltet folgende Kennwerte:

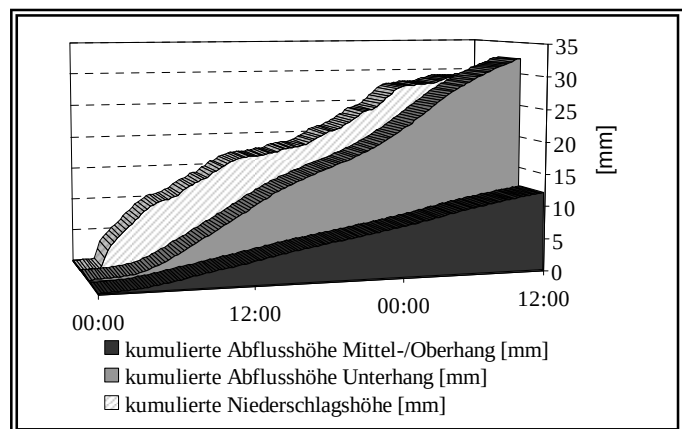


Abb. 6-62 Niederschlags- und Abflusssummenlinien für Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf. Hochwasserereignis am 13./14. Februar 2002.

- 21-Tage-Vorregenindex (VN_{21}): $VN_{21} = b_1 \cdot N_1 + b_2 \cdot N_2 + \dots + b_{21} \cdot N_{21}$

mit

N_n : Nd in mm, n Tage vor dem hochwassergenerierenden Nd

b_n : Koeffizient ($b_n = 0,85^n$)

¹⁹ Das Hochwasserereignis am 02.01.2003 wurde nicht berücksichtigt, da Pegel 3 zum Zeitpunkt der Scheitelabflüsse defekt war. Die Werte für Pegel 3 wurden aus einer Regression mit Pegel 2 gewonnen (vgl. Kapitel 5), um evtl. auftretende Ungenauigkeiten zu vermeiden, wurde das Ereignis nicht berücksichtigt.

- **Niederschlagshöhe (Nd):** Höhe des Niederschlags bis zum Eintritt des Abflussscheitels [mm]
- **Niederschlagsintensität:** Intensität des Niederschlags bis zum Eintritt des Abflussscheitels [mm/h]
- **Niederschlagsprodukt:** Produkt aus Niederschlagsintensität und Niederschlagshöhe des hochwassergenerierenden Niederschlags [mm²/h]²⁰
- **Scheitelabfluss:** Abflussspendenscheitel im Rahmen des Ereignisses [l/(s·km²)]
- **Abflusszuwachs:** Differenz aus Abflussspendenscheitel und Basisabfluss vor Beginn des hochwassergenerierenden Niederschlags [l/(s·km²)]²¹
- **Abflusszuwachsintensität:** Abflusszuwachs pro Zeiteinheit [l/(s·km²)·h⁻¹]²²

Tabelle 6-13 Kennwerte ausgewählter Abflussereignisse (n = 18) der hydrologischen Jahre 2001/2002 und 2002/2003 für unterschiedliche Bereiche des Modellhanges Hölzerkopf. (Definition der Kennwerte vgl. Text.)

■ = Vegetationszeit □ = Vegetationsruhe

	21-Tage-Vorregenindex	Unterhang						Mittel- u. Oberhang					
		Niederschlag [mm]	Niederschlagsintensität [mm/h]	Niederschlagsprodukt [mm ² /h]	Scheitelabfluss [l/(s·km ²)]	Abflusszuwachs [l/(s·km ²)]	Abflusszuwachsintensität [l/(s·km ²)·h ⁻¹]	Niederschlag [mm]	Niederschlagsintensität [mm/h]	Niederschlagsprodukt [mm ² /h]	Scheitelabfluss [l/(s·km ²)]	Abflusszuwachs [l/(s·km ²)]	Abflusszuwachsintensität [l/(s·km ²)·h ⁻¹]
08.11.2001	6,6	22,4	2,0	44,6	537,5	526,6	45,8	21,7	2,1	44,8	111,5	109,7	10,5
01.12.2001	31,6	7,9	0,7	5,3	178,6	97,9	8,3	8,4	0,7	5,6	67,1	32,6	2,6
10.02.2002	8,5	18,0	1,8	31,6	402,3	397,2	38,8	17,0	1,8	31,2	115,3	101,9	10,7
13.02.2002	22,2	16,2	1,4	23,3	327,4	298,0	26,5	15,3	1,5	22,8	111,2	81,9	8,0
20.02.2002	23,8	18,7	1,4	25,9	472,4	410,7	28,8	18,7	1,4	25,9	139,0	89,9	6,4
19.03.2002	17,8	11,8	1,7	20,6	319,1	276,3	39,5	11,0	1,9	21,0	85,6	65,1	11,3
17.04.2002	8,4	11,2	0,7	8,1	62,5	62,5	4,0	9,9	0,8	8,0	32,7	22,8	1,9
05.05.2002	12,7	26,1	2,1	56,1	447,8	444,2	36,3	25,5	2,2	55,3	107,9	98,2	8,4
10.07.2002	3,0	9,2	7,4	67,7	2,3	2,3	1,9	15,5	5,2	80,1	3,0	3,0	1,0
02.11.2002	20,4	12,5	1,6	19,5	121,0	108,4	11,1	12,5	1,6	19,5	25,5	23,6	2,9
11.11.2002	32,7	16,2	2,2	35,0	330,6	301,1	33,5	16,2	2,2	35,0	94,5	89,5	11,2
17.11.2002	25,0	10,9	1,3	14,0	191,8	162,7	17,6	10,9	1,3	14,0	56,0	46,7	5,3
22.12.2002	6,6	14,1	2,0	28,4	213,8	191,1	27,3	14,1	2,0	28,4	107,1	99,9	14,3
31.12.2002	26,4	6,7	1,9	12,8	193,5	92,1	21,7	5,4	1,8	9,7	76,9	41,4	13,8
19.05.2003	18,9	10,0	1,3	13,3	30,0	30,0	3,2	10,0	1,3	13,3	29,5	21,2	2,5
30.06.2003	4,2	17,2	13,8	236,7	4,8	4,8	3,9	17,2	13,8	236,7	5,0	4,9	3,9
01.07.2003	20,7	13,0	13,0	169,0	2,5	2,5	1,7	13,0	13,0	169,0	11,7	11,3	15,1
08.09.2003	9,0	19,6	5,6	109,8	2,5	2,2	0,6	19,6	5,6	109,8	5,2	5,1	1,5

²⁰ Das Produkt aus Niederschlagshöhe und Niederschlagsintensität berücksichtigt die Tatsache, dass die Abflussgenese von der Niederschlagsintensität und der absoluten Niederschlagshöhe abhängig ist.

²¹ Der Abflusszuwachs berücksichtigt im Gegensatz zur reinen Betrachtung des Abflussscheitels die spezifische Abflusssituation vor Beginn des hochwassergenerierenden Niederschlags.

²² Die Abflusszuwachsintensität gibt die Intensität des Abflussanstiegs wieder.

Stellt man die Scheitelabflüsse beider Hangsegmente gegenüber (vgl. Abbildung 6-63a), zeigt sich mit $r = +0,93$ eine starke Korrelation zwischen beiden Teilräumen. Dabei sind die Abflussmaxima aus dem Unterhang bei verstärktem Abflussgeschehen jedoch stets deutlich gegenüber Mittel- und Oberhang erhöht. Folgender Zusammenhang lässt sich festhalten:

$$\text{Scheitel Mittel- u. Oberhang } [l/(s \cdot km^2)] = 15,265 + 0,237 \cdot \text{Scheitel Unterhang } [l/(s \cdot km^2)]$$

Betrachtet man darüber hinausgehend den ereignisbezogenen Zuwachs der Abflussspende in beiden Hangbereichen (vgl. Abbildung 6-63b), zeigt sich ein ebenso starker Zusammenhang ($r = +0,93$), der bei leicht modifiziertem Proportionalitätsfaktor eine ähnliche Form aufweist.

$$\text{Zuwachs Mittel- u. Oberhang } [l/(s \cdot km^2)] = 12,920 + 0,210 \cdot \text{Zuwachs Unterhang } [l/(s \cdot km^2)]$$

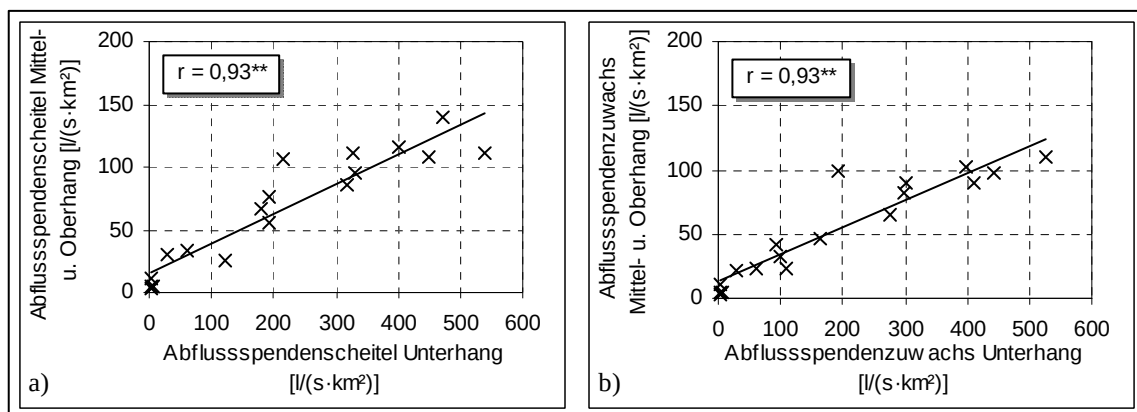


Abb. 6-63 Zusammenhang zwischen Abflussspendenscheitel $[l/(s \cdot km^2)]$ von Unterhang und Mittel- u. Oberhang (a) und Zusammenhang zwischen dem ereignisbezogenen Zuwachs der Abflussspende von Unterhang und Mittel- u. Oberhang (b) für 18 ausgewählte Abflussereignisse.
(** Die Korrelation ist auf dem Niveau $\alpha = 0,01$ (zweiseitig) signifikant.)

Sowohl absolute Ausprägung des Abflussscheitels als auch ereignisbezogener Zuwachs der Abflussmengen des Unterhangs sind somit gegenüber Mittel- und Oberhang deutlich erhöht. Lediglich im Rahmen schwach ausgeprägter Abflussereignisse stellt sich der Abfluss aus Mittel- und Oberhang überproportional hoch dar. Die beiden eingangs gezeigten Hochwasserereignisse 4./5. Mai 2002 und 13./14. Februar 2002 können somit als weitgehend exemplarisch eingestuft werden.

Betrachtet man für beide Hangsegmente jeweils den Zusammenhang zwischen Ausprägung des Abflussscheitels und Höhe des zugrunde liegenden Niederschlagsereignisses, so wird deutlich (vgl. Abbildung 6-64a und 6-65a), dass sich das Entwicklungsstadium der Vegetation (Vegetationszeit bzw. Vegetationsruhezeit²³) wie erwartet stark modifizierend auswirkt. Während in der Vegetationszeit für beide Hangbereiche, allerdings bei geringem Stichprobenumfang ($n = 5$), kein signifikanter Zusammenhang zwischen Höhe des Abflussscheitels und Niederschlagshöhe existiert, findet sich in der Vegetationsruhezeit jeweils eine signifikante Korrelation (vgl. Tabelle 6-14). Diese beträgt für den Unterhang $r = +0,82$, für Mittel- und Oberhang $r = +0,63$. Vergleichbare Niederschläge bewirken dabei am Unterhang deutlich höhere Abflussmaxima als an Mittel- und Oberhang, d. h. das Retentionsvermögen ist am Unterhang stark herabgesetzt.

²³ Die Dauer der jahresspezifischen, klimatologischen Vegetationszeit wurde nach dem Ansatz von Chen (1994) bestimmt. Als klimatische Vegetationszeit gilt dabei der Zeitraum vom Überschreiten (Frühjahr) bis zum Unterschreiten (Herbst) der Tagesmitteltemperatur von $10^\circ C$, bestimmt anhand des fünftägigen gleitenden Mittels.

Der 21-Tage-Vorregenindex weist während der Vegetationsruhezeit weder für den Unterhang ($r = -0,202$) noch für Mittel- und Oberhang ($r = -0,151$) eine signifikante Korrelation zur Scheitelhöhe auf (vgl. Abbildung 6-64b, 6-65b und Tabelle 6-14). Während der Vegetationszeit ist der Zusammenhang mit $r = +0,50$ bzw. $r = +0,75$ zwar enger, aufgrund des mit $n = 5$ geringen Stichprobenumfanges jedoch auch hier jeweils nicht signifikant. Die Ergebnisse stehen im Gegensatz zum zuvor ermittelten Zusammenhang bei Betrachtung aller Untersuchungstage (d. h. nicht ausschließlich Hochwasserereignisse, vgl. Kapitel 6.2.2.1). Die Unterschiede weisen darauf hin, dass bei ergiebigen Niederschlägen der Einfluss vorangegangener Niederschläge (Bodenfeuchte) in allen Hangbereichen in den Hintergrund tritt, d. h. weitgehend die Niederschlagscharakteristika (Höhe, Intensität) für den Abfluss entscheidend sind.

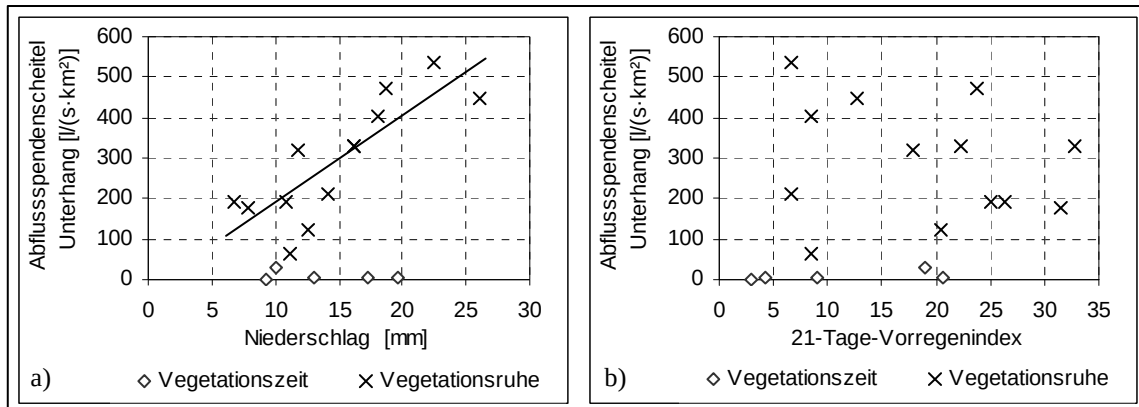


Abb. 6-64 Zusammenhang zwischen Abflusspendenscheitel $l/(s \cdot km^2)$ und Höhe des zugrunde liegenden Niederschlagsereignisses [mm] (a) bzw. Abflusspendenscheitel $l/(s \cdot km^2)$ und 21-Tage-Vorregenindex (b) für den Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf ($n = 18$).

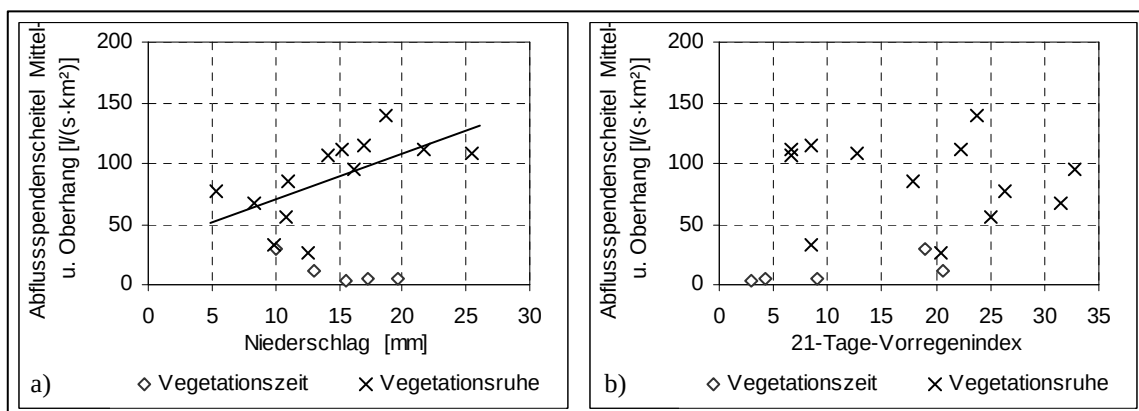


Abb. 6-65 Zusammenhang zwischen Abflusspendenscheitel $l/(s \cdot km^2)$ und Höhe des zugrunde liegenden Niederschlagsereignisses [mm] (a) bzw. Abflusspendenscheitel $l/(s \cdot km^2)$ und 21-Tage-Vorregenindex (b) für Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf ($n = 18$).

Tabelle 6-14 Hangbereichsspezifische Stärke des linearen Zusammenhangs (r) zwischen verschiedenen Variablen für 13 Hochwasserereignisse in der Vegetationsruhezeit.

* auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ (zweiseitig) signifikant ** auf dem Niveau $\alpha = 0,01$ (zweiseitig) signifikant

Korrelationskoeffizienten (r) Vegetationsruhezeit		21-Tage- Vorregenindex	Nd [mm]	Nd-Intensität [mm/h]	Nd-Produkt [mm ² /h]
Unter- hang	Scheitelabfluss $l/(s \cdot km^2)$	-0,202	0,820**	0,543	0,788**
	Abflusszuwachs $l/(s \cdot km^2)$	-0,330	0,898**	0,551	0,850**
	Zuwachsintensität $l/(s \cdot km^2) \cdot h^{-1}$	-0,311	0,684**	0,775**	0,784**
Mittel- u. Oberhang	Scheitelabfluss $l/(s \cdot km^2)$	-0,151	0,629*	0,506	0,606*
	Abflusszuwachs $l/(s \cdot km^2)$	-0,378	0,789**	0,715**	0,826**
	Zuwachsintensität $l/(s \cdot km^2) \cdot h^{-1}$	-0,192	-0,151	0,806**	0,404

Die ereignisbezogene Intensität des Abflusszuwachses [$l/(s \cdot km^2) \cdot h^{-1}$] ist dabei in beiden Hangbereichen stark positiv mit der Intensität der abflussgenerierenden Niederschlagsereignisse korreliert, d. h. je intensiver ein Niederschlagsereignis, desto stärker der Anstieg des Abflussvolumens pro Zeiteinheit. Anhand der in Abbildung 6-66 abgetragenen potenziellen Regressionsmodelle zeigt sich, dass für beide Hangbereiche jeweils ein Anteil von 72 % der Varianz der Abflusszuwachstintensität durch die Niederschlagsintensität determiniert sind. Entscheidender Unterschied zwischen beiden Hangbereichen ist jedoch die Tatsache, dass steigende Niederschlagsintensitäten am Unterhang zu einer deutlich höheren Intensität des Abflusszuwachses führen. Dies belegt wiederum das ausgeprägtere Retentionsvermögen von Mittel- und Oberhang.

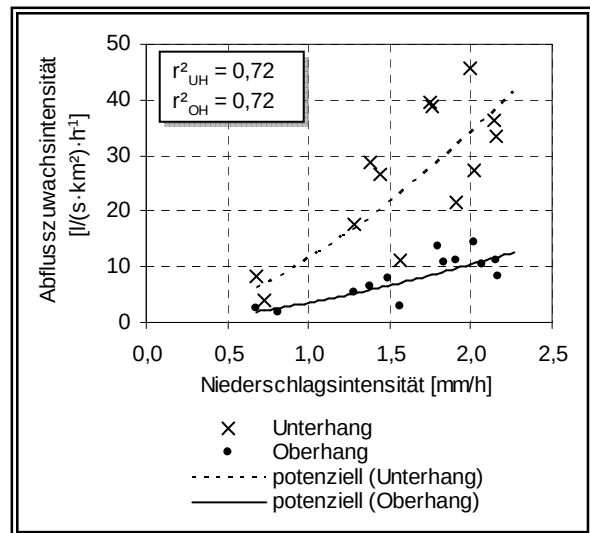


Abb. 6-66 Zusammenhang zwischen Intensität des Abflusszuwachses [$l/(s \cdot km^2) \cdot h^{-1}$] und Intensität der Niederschlagsereignisse [mm/h] an Unterhang und Mittel- u. Oberhang während der Vegetationsruhezeit ($n = 13$).

6.2.3 Abflussverhalten einzelner Hangkompartimente des Modellhanges Hölzerkopf

Zur flächendetaillierteren Betrachtung des Abflussverhaltens des Modellhanges wurde auf Basis der Abflussmessstellen (W1 bis W39) eine weitere Hangkompartimentierung durchgeführt. Die ausgewiesenen Kompartimente stellen dabei Teileinzugsgebiete des Hanges dar, deren Abfluss durch die Gefäßmessungen an den Messstellen quantifizierbar ist. D. h. es handelt sich um Einzugsgebiete von Knotenpunkte des Grabensystems, deren Abflussvolumina pro Zeiteinheit in zeitlich vergleichsweise geringer Auflösung vorliegen. Die exakte Abgrenzung der Teileinzugsgebiete beruht auf den Faktoren Exposition, Hangneigung und Verlauf des Grabensystems. Die zehn von E1 bis E10 benannten Räume sind in Abbildung 6-67 schematisch dargestellt, in Tabelle 6-15 finden sich die zugehörigen Gebietsgrößen und die Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der jeweiligen Abflusspende.

Anhand einer Clusteranalyse konnten die Teilgebiete des Modellhanges in Gruppen ähnlichen Abflussverhaltens zusammengefasst werden. Als Basis der Clusterbildung dienten 107 der insgesamt 156 Abflussmessreihen (Variable = Abflusspende des Teilgebietes am Tag x), die übrigen Messreihen fanden aufgrund von Fehlwerten keine Berücksichtigung

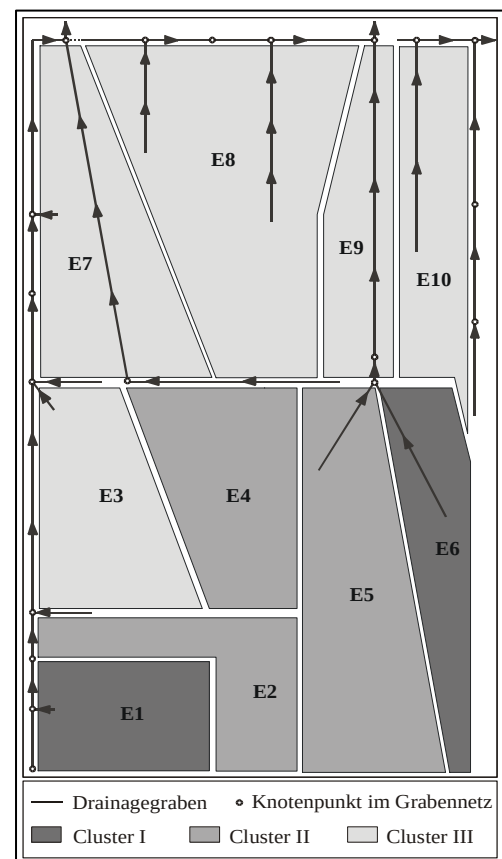


Abb. 6-67 Schematischer Überblick über die Teileinzugsgebiete des Modellhanges mit resultierender Clusterzugehörigkeit.

(vgl. Tabelle 6-16). Um den Einfluss eventueller Fehler in der Ausweisung der Gebietsflächen zu minimieren, wurde jeweils auf die z-transformierten Abflussmesswerte zurückgegriffen, so dass die absolute Höhe der Gebietsabflüsse letztlich kein Kriterium der Gruppenbildung darstellte, sondern diese auf dem relativen Abflussverhalten der Gebiete zueinander basierte.

Tabelle 6-15 Überblick über die 10 Teileinzugsgebiete des Modellhanges Hölzerkopf mit Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der zugehörigen Abflusssspende auf Basis der Gefäßmessungen an den Abflussmessstellen.

Teileinzugsgebiet des Modellhanges	Fläche des Teileinzugsgebietes [m ²]	Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der Abflusssspende q [l/(s·km ²)] des Teileinzugsgebietes
<i>E1</i>	45500	$q_{E1} = (Q_{W37b} - Q_{W38}) / 0,0455$
<i>E2</i>	70800	$q_{E2} = (Q_{W34} + Q_{W35} - Q_{W37b}) / 0,0708$
<i>E3</i>	45400	$q_{E3} = ((Q_{W20} + Q_{W21} + Q_{W39}) - (Q_{W34} + Q_{W35})) / 0,0454$
<i>E4</i>	65100	$q_{E4} = (Q_{W22}) / 0,0651$
<i>E5</i>	62600	$q_{E5} = (Q_{W23}) / 0,0626$
<i>E6</i>	27800	$q_{E6} = (Q_{W24}) / 0,0278$
<i>E7</i>	50300	$q_{E7} = ((Q_{W13} + Q_{W11}) - (Q_{W20} + Q_{W21} + Q_{W39} + Q_{W22})) / 0,0503$
<i>E8</i>	58700	$q_{E8} = (Q_{W7} - (Q_{W13} + Q_{W11} - Q_{W12})) / 0,0587$
<i>E9</i>	61300	$q_{E9} = (Q_{W6} - Q_{W24a}) / 0,0613$
<i>E10</i>	74800	$q_{E10} = (Q_{W3} + Q_{W4}) / 0,0748$ bzw. $q_{E10} = Q_{W3a} / 0,0748$

Tabelle 6-16 Erhebungszeitpunkte der 107 in die Clusteranalyse eingeflossenen Abflussmessreihen.

Datum	Datum	Datum	Datum	Datum	Datum
30.04.1999	13.09.1999	07.01.2000	16.07.2000	26.09.2001	24.04.2002
07.05.1999	17.09.1999	14.01.2000	21.07.2000	15.10.2001	03.05.2002
14.05.1999	27.09.1999	21.01.2000	22.07.2000	26.10.2001	15.05.2002
22.05.1999	01.10.1999	28.01.2000	23.07.2000	09.11.2001	22.05.2002
28.05.1999	08.10.1999	04.02.2000	14.08.2000	16.11.2001	29.05.2002
04.06.1999	15.10.1999	11.02.2000	28.08.2000	21.11.2001	19.06.2002
11.06.1999	22.10.1999	18.02.2000	06.10.2000	01.12.2001	21.07.2002
18.06.1999	29.10.1999	25.02.2000	23.02.2001	12.12.2001	07.08.2002
25.06.1999	05.11.1999	03.03.2000	13.03.2001	23.01.2002	28.08.2002
02.07.1999	12.11.1999	10.03.2000	19.04.2001	28.01.2002	16.09.2002
10.07.1999	19.11.1999	17.03.2000	03.05.2001	01.02.2002	25.09.2002
16.07.1999	26.11.1999	24.03.2000	22.05.2001	08.02.2002	14.10.2002
30.07.1999	03.12.1999	31.03.2000	12.06.2001	10.02.2002	02.11.2002
09.08.1999	10.12.1999	07.04.2000	19.07.2001	13.02.2002	18.06.2003
13.08.1999	17.12.1999	22.04.2000	03.08.2001	27.02.2002	01.08.2003
20.08.1999	25.12.1999	01.05.2000	13.08.2001	04.03.2002	29.08.2003
30.08.1999	27.12.1999	11.05.2000	24.08.2001	11.03.2002	14.10.2003
06.09.1999	31.12.1999	26.05.2000	07.09.2001	20.03.2002	

Die Klassifizierung der Teilgebiete erfolgte mit Hilfe der Ward-Methode auf Basis des Distanzmaßes „Quadierte Euklidische Distanz“ (vgl. Bahrenberg et al. 1992, Bortz 2004). Die Ergebnisse dieses auf minimalem Innergruppendifferenz basierenden, hierarchischen Verfahrens sind in den Tabellen 6-17 bis 6-19 und Abbildung 6-68 dargestellt.

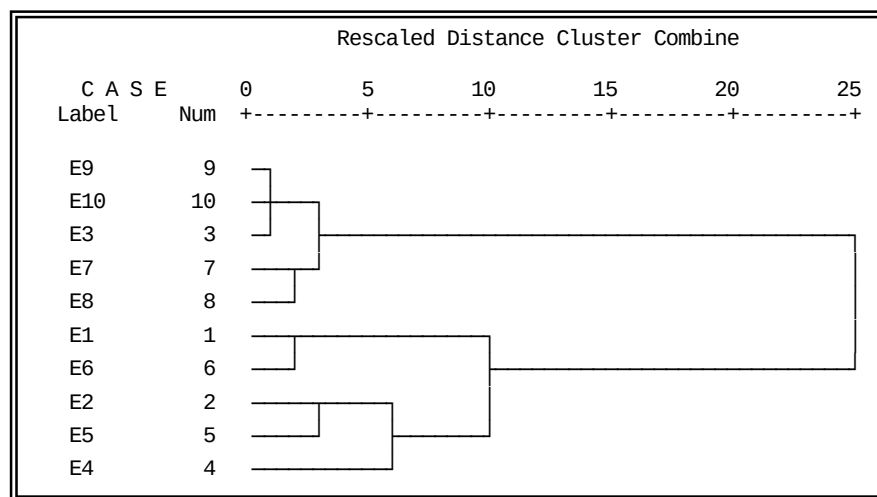
Tabelle 6-17 Unähnlichkeitsmatrix der Gebiete E1 bis E10 bezüglich des Abflussverhaltens (107 Messreihen) auf Basis der Maßzahl „Quadierte Euklidische Distanz“.

	Gebiet E1	Gebiet E2	Gebiet E3	Gebiet E4	Gebiet E5	Gebiet E6	Gebiet E7	Gebiet E8	Gebiet E9	Gebiet E10
Gebiet E1		312,9	416,4	256,1	246,6	90,7	593,5	589,0	473,1	321,0
Gebiet E2	312,9		135,1	184,4	128,1	211,4	198,2	202,6	123,4	108,5
Gebiet E3	416,4	135,1		183,6	165,3	264,0	83,7	95,4	46,6	46,6
Gebiet E4	256,1	184,4	183,6		193,3	153,9	382,2	326,7	226,6	150,9
Gebiet E5	246,6	128,1	165,3	193,3		173,8	222,2	271,8	153,6	94,7
Gebiet E6	90,7	211,4	264,0	153,9	173,8		433,6	424,2	331,2	206,4
Gebiet E7	593,5	198,2	83,7	382,2	222,2	433,6		80,9	43,6	82,9
Gebiet E8	589,0	202,6	95,4	326,7	271,8	424,2	80,9		69,7	98,9
Gebiet E9	473,1	123,4	46,6	226,6	153,6	331,2	43,6	69,7		32,7
Gebiet E10	321,0	108,5	46,6	150,9	94,7	206,4	82,9	98,9	32,7	

größte Unähnlichkeiten
 geringste Unähnlichkeiten

Cluster-anzahl	Innergruppen-distanzsumme
9	16,3
8	42,0
7	82,4
6	127,8
5	181,5
4	245,6
3	350,1
2	526,5
1	963,0

ausgewählte Lösung

Tabelle 6-18 Innergruppen-distanzsummen.**Abb. 6-68** Dendrogramm der hierarchischen Clusteranalyse.**Tabelle 6-19** Clusterzugehörigkeiten der Teileinzugsgebiete für verschiedene Lösungen mit jeweiligem Anteil an der Gesamtinnergruppendifferenzsumme.

Anzahl der Cluster	Clusterzugehörigkeit										% der Gesamtinnergruppen-distanzsumme
	Gebiet E1	Gebiet E2	Gebiet E3	Gebiet E4	Gebiet E5	Gebiet E6	Gebiet E7	Gebiet E8	Gebiet E9	Gebiet E10	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100,0 %
2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	54,7 %
3	1	2	3	2	2	1	3	3	3	3	36,4 %
4	1	2	3	4	2	1	3	3	3	3	25,5 %
5	1	2	3	4	5	1	3	3	3	3	18,9 %

ausgewählte Lösung

Bereits die Unähnlichkeitsmatrix (Tabelle 6-17) verdeutlicht, dass die in den unteren Hangbereichen lokalisierten Teilgebiete einerseits und jene in den mittleren und oberen Hangbereichen andererseits untereinander vergleichsweise geringere Unähnlichkeiten im Abflussverhalten aufweisen. Einzig Gebiet E3 zeigt, trotz teilweiser Lage am Mittelhang, deutliche

Ähnlichkeit zum Abflussverhalten des Unterhanges auf. Diese Segmentierung des Modellhanges findet sich in den resultierenden Clusterzugehörigkeiten wieder (vgl. Tabelle 6-19). Die Lösung mit 2 Clustern führt die Teilgebiete *E1*, *E2*, *E4*, *E5* und *E6* sowie die Teilgebiete *E3*, *E7*, *E8*, *E9* und *E10* in jeweils einer Gruppe zusammen, und verdeutlicht somit den Zusammenhang zwischen Abflussverhalten und Hangposition der Gebiete. Letztlich erweist sich im Rahmen der Clusterfusionierung die 3-Klassen-Lösung, bei der ein Anteil von 36,4 % der maximalen Innergruppendifferenz erreicht ist (vgl. Tabelle 6-18 und 6-19), als sinnvoll. Die in den mittleren und oberen Hangbereichen lokalisierten Teileinzugsgebiete sind bei dieser Klassenaufteilung nochmals in zwei Abflussklassen unterteilt. Die in Klasse I zusammengefassten Gebiete liegen am nordwestlichen bzw. nordöstlichen Rand des Modellhanges, die in Klasse II zusammengefassten Gebiete im zentralen Bereich der oberen Hangbereiche. Es ergeben sich folgende Clusterzugehörigkeiten (vgl. Tabelle 6-19 und Abbildung 6-67), die im Rahmen einer aufbauenden Diskriminanzanalyse bestätigt wurden:

- Klasse I: *E1*, *E6*
- Klasse II: *E2*, *E4*, *E5*
- Klasse III: *E3*, *E7*, *E8*, *E9*, *E10*

Zur Auswertung des Abflussverhaltens der Klassen wurden in der Folge die direkten volumetrischen Abflussmessungen herangezogen.²⁴ Die in Abbildung 6-69 dargestellten durchschnittlichen jährlichen Abflusshöhen der Klassen (Klassenmittelwerte) zeigen ein eher uneinheitliches Bild: Während Klasse II stets die geringste Abflusshöhe aufweist, schwankt das Verhältnis zwischen Klasse I und Klasse III deutlich. Vor allem im hydrologischen Jahr 2001/2002 zeigt Klasse III einen überproportional hohen Abfluss. Diese Entwicklung wird von den ausgeprägten Niederschlägen im Februar und März 2002

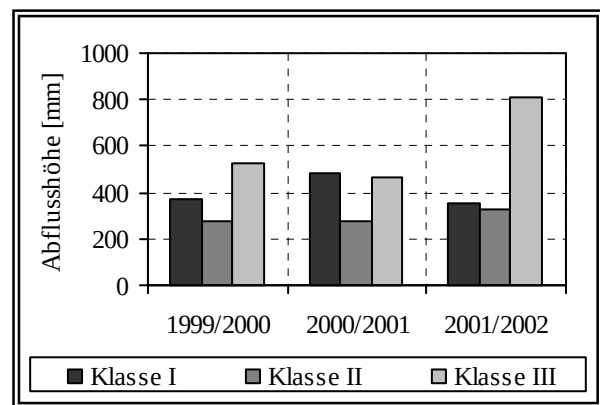


Abb. 6-69 Klassenmittel der jährlichen Abflusshöhe in den hydrologischen Jahren 1999/2000 bis 2001/2002.

getragen, die in erster Linie bei den in dieser Zeit ohnehin abflussstarken Teilgebieten der Klasse I zu einer erheblichen Abflussverstärkung führen. Bei Betrachtung der klassenspezifischen Saisonalität des Abflussgangs (vgl. Abbildung 6-70 und 6-71), wird deutlich, dass die intraannuelle Variabilität der Abflusswerte in den Teilräumen der Klasse III durchschnittlich am stärksten und in den Teilräumen der Klasse I am schwächsten ausgeprägt ist. Alle drei Klassen weisen jedoch eine ähnliche Grundstruktur im saisonalen Abflussverhalten auf (vgl. Abbildung 6-70). Geht man von der Betrachtung der absoluten Werte zur Betrachtung der klassenspezifischen Anteile am monatlichen Gesamtabfluss aus dem Modellhang²⁵ über (vgl. Abbildung 6-71), werden jedoch beträchtliche Unterschiede sichtbar. Während die Gebiete der Klasse III von September bis März einen vergleichsweise hohen

²⁴ Aufgrund ihres zeitlich diskreten Charakters (vgl. Kapitel 5) wurden die Ergebnisse der direkten volumetrischen Abflussmessungen vereinfachend als Tagesmittelwerte aufgefasst. Die darauf aufbauende Berechnung von Abflusssummen erfolgte stets anhand der auf Tagesbasis interpolierten Abflussganglinien. Durch die so entstandenen Ungenauigkeiten erschien eine Gegenüberstellung von Abfluss- und Niederschlagssummen nicht sinnvoll. Die Gegenüberstellung der Abflusskennwerte zwischen den Hangkompartimenten bzw. den Klassen blieb von dieser Problematik weitgehend unberührt. Lediglich das Jahr 2002/2003 wurde in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt, da hier eine vergleichsweise geringe Anzahl direkter volumetrischer Abflussmessungen erfolgte und die notwendige (lineare) Interpolation der Werte zur Gewinnung der Abflussganglinien zu überproportional starken Verzerrungen geführt hätte.

²⁵ Bezogen auf den Ideallhang mit identischen Flächenanteilen aller Gebietsklassen (bessere Vergleichbarkeit).

Beitrag zum Gesamtabflussvolumen beisteuern, fällt der Anteil im Frühjahr und Sommer deutlich ab. In diesem abflussärmeren Zeitraum steigt in erster Linie der Abflussanteil aus den in Klasse I zusammengefassten Gebieten deutlich an. Die Gebiete in Klasse II besitzen den ausgeglichensten Abflussgang und nehmen in keinem Monat den größten Anteil am Modellhangabfluss ein.

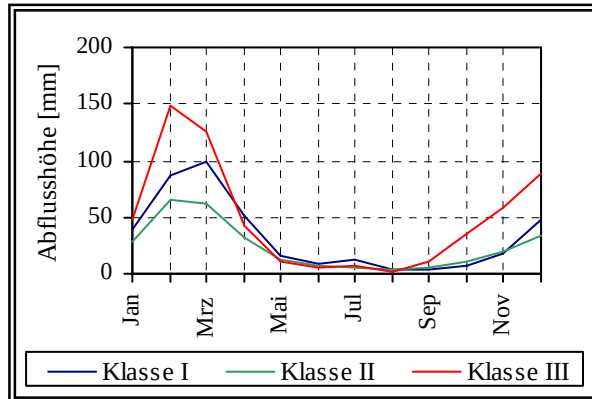


Abb. 6-70 Ganglinien der mittleren monatlichen Abflusshöhe der 3 Gebietsklassen (Bezugszeitraum: Mai 1999 bis Oktober 2002).

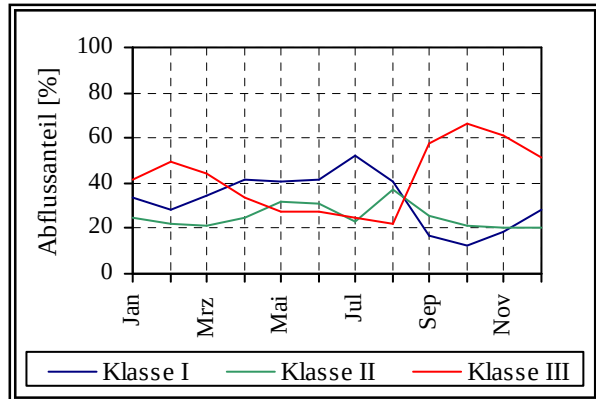


Abb. 6-71 Ganglinien des mittleren monatlichen Anteils am Gesamtabfluss bezogen auf den Idealhang mit identischen Flächenanteilen der Klassen (Bezugszeitraum: Mai 1999 bis Oktober 2002).

Bei ereignisbezogener Betrachtung des klassenspezifischen Abflussgeschehens, die exemplarisch anhand der beiden Hochwasser am 12.12.1999 (vgl. Abbildung 6-72) und 30.03.2000 (vgl. Abbildung 6-73) erfolgt, werden ebenfalls signifikante Unterschiede im Abflussverhalten der Modellhangkompartimente deutlich. Bei beiden Ereignissen zeigen die Gebiete der Klasse III einen überproportional starken Anstieg der Abflussspende in Reaktion auf die Niederschläge. Innerhalb der Klasse schwanken die ermittelten Abflussscheitel zwischen 130 bis 330 l/(s·km²) am 12.12.1999 und 200 bis 380 l/(s·km²) am 30.03.2000. Demgegenüber weisen die Teilgebiete der Klasse II und vor allem jene der Klasse I deutlich geringere Spitzenabflüsse auf. Innerhalb Klasse II schwanken diese zwischen 11 und 92 l/(s·km²) am 12.12.1999 bzw. 55 und 155 l/(s·km²) am 30.03.2000; für Klasse I (nur ein Teilgebiet mit vollständigen Messreihen bei beiden Ereignissen) beträgt der Abflussscheitel lediglich 9 l/(s·km²) am 12.12.1999 und 11 l/(s·km²) am 30.03.2000.

Im Rahmen beider Hochwasserereignisse fallen die Abflussmengen aus den Teilgebieten der Klasse III zum jeweils folgenden Tag wieder deutlich ab, so dass sich auch in der ereignisbezogenen Betrachtung eine erhöhte Variabilität im Abflussgeschehen der Teilgebiete der Klasse III gegenüber den Teilgebieten der beiden anderen Klassen zeigt. Am ausgeglichensten stellt sich diesbezüglich Klasse I dar. Beim Hochwasser am 30.03.2000 tritt hier der Abflussscheitel erst mehrere Tage nach den hochwassergenerierenden Niederschlägen ein, während die Abflussmengen der übrigen Teilgebiete zu diesem Zeitpunkt bereits wieder annähernd auf ihr Basisniveau zurückgekehrt sind. Insgesamt zeigt sich auch in diesem zeitlichen Betrachtungsmaßstab das stark herabgesetzte Retentionsvermögen der in Klasse III zusammengefassten Teilgebiete des Modellhanges Hölzerkopf und das hohe Retentionsvermögen der Teilgebiete der Klasse I. Die Gebiete der Klasse II nehmen eine Zwischenstellung ein.

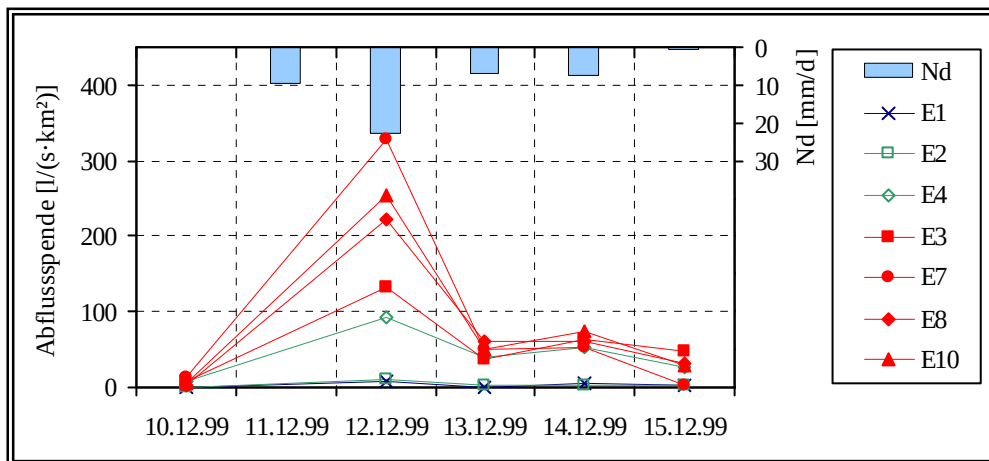


Abb. 6-72 Abflussspenden der 10 Teilgebiete des Modellhanges Hölzerkopf von 10.12. bis 15.12.1999.
(— Gebiete der Klasse I / — Gebiete der Klasse II / — Gebiete der Klasse III)

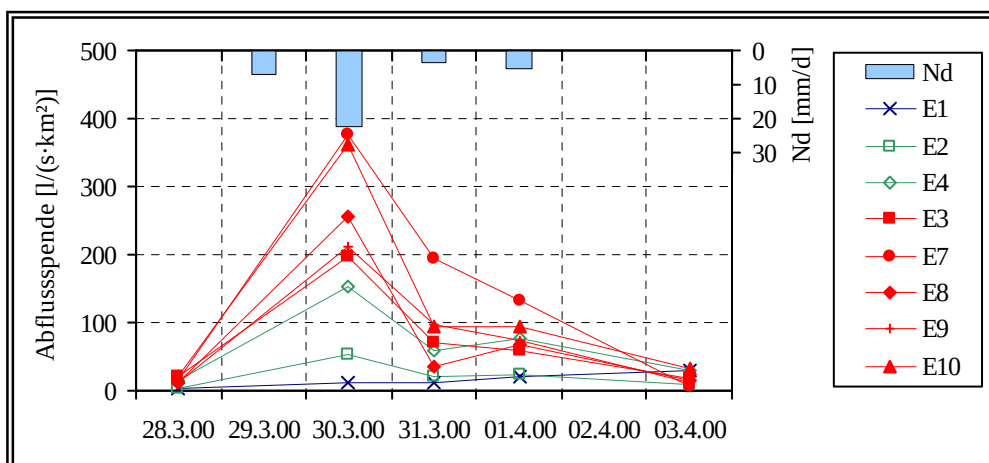


Abb. 6-73 Abflussspenden der 10 Teilgebiete des Modellhanges Hölzerkopf von 28.03. bis 03.04.2000.
(— Gebiete der Klasse I / — Gebiete der Klasse II / — Gebiete der Klasse III)

Eine Betrachtung der naturräumlichen Ausstattung der einzelnen Klassen bzw. deren Teilgebiete (vgl. Tabelle 6-20) zeigt, dass die Teilräume der Klassen I und II erhebliche Ähnlichkeiten aufweisen. Unterschiede bestehen lediglich in der größeren Heterogenität der Klasse II, die vor allem den geologischen Untergrund und die aufbauenden Böden betrifft. Die Teilräume der Klasse II weisen dabei zusätzlich zu den Braunerden und Pseudogley-Braunerden der Klasse I noch Braunerde-Pseudogleye auf und sind somit z. T. stärkerem Staunäse-einfluss unterworfen. Die Gebiete beider Klassen stimmen jedoch bezüglich der Lage in Kamm-, Ober- und Mittelhangbereich, ihrer überwiegend mittleren bis starken Hangneigungen, der geringen Grabennetzdichte und dem Vorherrschen von Laub- und Mischwaldbeständen überein. Demgegenüber sind die Unterschiede in der Gebietsausstattung zwischen Klasse I und Klasse III sowie zwischen Klasse II und III erheblich stärker ausgeprägt. So zeigen die Teilräume der Klasse III bezüglich aller in Tabelle 6-20 aufgeführter Faktoren starke Abweichungen zu den beiden anderen Gebietsklassen: Bei weitgehender Lage am Unterhang herrschen hier schwache Hangneigungen vor. Es finden sich ausschließlich flachgründige Pseudogleye mit deutlichem Staunäseeinfluss, die bei einer hohen Grabennetzdichte vorwiegend mit Jungwuchs und Dickung bestanden sind.

Tabelle 6-20 Naturräumliche Ausstattung und hydrologische Eigenschaften der drei ausgewiesenen Gebietsklassen.

Klasse	Teil-räume	Lage am Hang und naturräumliche Eigenschaften	Hydrologische Eigenschaften
I	E1 E6	• Lage: Kamm, Ober- und Mittelhang • Hangneigung: vorwiegend mittel bis stark • Geologie: vorwiegend Taunusquarzit • Bodentyp: Braunerde/Pseudogley-Braunerde • Vegetation: vorwiegend Laub- und Mischwald • Grabennetz: geringe Dichte	• mittlere Jahresabflusssummen • deutlich ausgeprägte Saisonalität des Abflussganges (Maximum: März) • größter Anteil am Gesamtabfluss des Modellhanges von April bis August • schwach ausgeprägte Abflussscheitel • hohes Retentionsvermögen • vorwiegende Abflusskomponenten: z. T. Interflow, z. T. Perkolation
II	E2 E4 E5	• Lage: Kamm, Ober- und Mittelhang • Hangneigung: vorwiegend mittel bis stark • Geologie: vorwiegend Taunusquarzit und Übergangsschichten zum Schiefer • Bodentyp: Braunerde, Pseudogley-Braunerde und Braunerde-Pseudogley • Vegetation: vorwiegend Laub- und Mischwald • Grabennetz: geringe Dichte	• stets geringste Jahresabflusssumme • geringste Saisonalität des Abflussganges (Maximum: Februar) • zu keiner Zeit größter Anteil am Gesamtabfluss des Modellhanges • Scheitelabflüsse mittlerer Höhe • hohes Retentionsvermögen • Abflusskomponenten: z. T. Interflow, z. T. Perkolation
III	E3 E7 E8 E9 E10	• Lage: Unterhang und z. T. unterer Mittelhang • Hangneigung: vorwiegend schwach • Geologie: Hunsrückschiefer • Bodentyp: vorwiegend Pseudogley • Vegetation: vorwiegend Jungwuchs/Dickung • Grabennetz: hohe Dichte	• stets höchste Jahresabflusssumme • stärkste Saisonalität des Abflussganges (Maximum: Februar) • größter Anteil am Gesamtabfluss des Modellhanges von September bis März • sehr hohe Scheitelabflüsse • sehr geringes Retentionsvermögen • Abflusskomponenten: Sättigungsflächenabfluss, z. T. oberflächennaher Interflow

Auf Basis der Abflussanalyse wird – aufbauend auf den Gebietscharakteristika – deutlich, dass die Unterschiede bezüglich des Abflussverhaltens zwischen Unterhang (Teilgebiete der Klasse III) einerseits und den oberhalb gelegenen Hangbereichen (Teilgebiete der Klassen I und II) andererseits deutlich ausgeprägter sind als die Unterschiede innerhalb der genannten Hangbereiche.²⁶

Die am Unterhang lokalisierten Teilgebiete weisen eine vergleichsweise deutliche jahreszeitliche Schwankung der Abflussintensität auf, wobei im Winter und bei sommerlich sehr intensiven Niederschlägen hohe Abflusswerte generiert werden und bei sommerlicher Trockenheit der Abfluss weitgehend entfällt. Genetisch kann dies in erster Linie durch die geringe Hangneigung in Verbindung mit der sommerlichen Transpirationsleistung der vorherrschenden Birken-Erlen-Jungwuchsbestände erklärt werden. Bei schwachen Hangneigungen entsteht bei mittelfristig geringer Wasserzufuhr weder Interflow noch Oberflächenabfluss. Weniger hohe Niederschlagsmengen können vom wenig mächtigen Sw-Horizont aufgenommen und in der Folge sukzessiv durch Evapotranspiration aufgebraucht werden. Ergiebige Niederschlagsereignisse rufen dagegen rasch Sättigungsflächenabfluss hervor.

²⁶ Soweit eine Untergliederung anhand von Teileinzugsgebieten möglich ist.

Auch die in den mittleren und oberen Bereichen gelegenen Gebietsklassen zeigen sommerlich geringe, jedoch im Vergleich zum Unterhang auf erhöhtem Niveau angesiedelte Abflusswerte. Im Winter bleiben die Abflüsse deutlich hinter denen des Unterhanges zurück, weisen zum Frühjahr allerdings noch längere Zeit hohe Werte auf. Die insgesamt geringeren Abflussvolumina sind in erster Linie auf die schwächere und nicht flächendeckende Ausprägung des Stauhorizontes zurückzuführen, die in Kombination mit den klüftigen Taunusquarziten der oberen Hangbereiche Perkulationsbewegungen ermöglichen. In den Wintermonaten kommt es so neben lateralen Wasserbewegungen in begrenztem Umfang zur Grundwasserneubildung. Durch die begrenzte räumliche Ausdehnung des Grundwasserkörpers (wenig wasserwegsame Hunsrückschiefer in den unteren Bereichen des Mittelhangs und am Unterhang), erfolgt im Bereich der Störungslinie am Mittelhang eine Grundwasserschüttung, so dass sich einerseits ein im Gegensatz zum Unterhang erhöhtes Retentionsvermögen zeigt und andererseits sommerlich leicht erhöhte Abflussmengen auftreten. Beides ist auch auf das verstärkte Auftreten der Abflusskomponente Interflow zurückzuführen, deren langsamer Anteil, wie die Beobachtungen im Gebiet zeigen, stark verzögert ins Grabensystem gelangt. Die Entstehung von Interflow beruht auf dem z. T. deutlich, jedoch bei weitem nicht flächendeckend ausgebildeten Stauhorizont und der im Vergleich zum Unterhang stärkeren Hangneigung in Kombination mit einer höheren Wasserleitfähigkeit der stauwasserführenden Bodenhorizonte (vgl. Kapitel 4). Besondere Bedeutung kommt dabei der Grenzschrift zwischen Sd- und Sw-Horizont zu, die weitgehend identisch mit der Grenzschrift Basis- zu Hauptlage ist. Die in diesem Bereich häufig auftretende Wassersättigung führt zusammen mit dem hohen Skelettanteil zu Entstehung schneller lateraler Wasserbewegungen, dem schnellen Interflow. Da die beiden Gebietsklassen, die für Mittel- und Oberhang ausgewiesen werden konnten, bezüglich ihres Vegetationsbestandes kaum Unterschiede aufweisen, sondern lediglich in ihren morphologischen Gegebenheiten und den Untergrundeigenschaften graduell variieren, sind die beobachteten Unterschiede im Abflussverhalten beider Klassen, die bei weitem nicht so stark ausfallen wie die jeweiligen Unterschiede zu Klasse III (Unterhang), als Indiz für den lediglich nachrangigen Einfluss der Vegetation auf die Abflussentstehung im Gebiet zu werten. Eine weitergehende Analyse erfolgte anhand der Niederschlags-Abfluss-Modellierung auf Basis hydrologisch homogen reagierender Flächen (Hydrological Response Units). Die Ergebnisse werden in Kapitel 7 vorgestellt.

7 Modellierung des Wasserhaushaltes

7.1 Einführung in die hydrologische Modellierung

7.1.1 Überblick über hydrologische Modelle

Hydrologische Modelle versuchen die hochkomplexen hydrologischen Abläufe realer Systeme, die Gefüge sich gegenseitig beeinflussender Prozesse darstellen, vereinfachend nachzubilden. Wie Singh (1995) verdeutlicht, kann ganz allgemein zwischen rein gedanklichen Modellen²⁷, analogen Modellen und mathematischen Modellen unterschieden werden. Letztere beschreiben reale Systeme durch Parameter und bilden die ablaufenden Prozesse anhand eines geschlossenen Satzes mathematischer Gleichungen nach. Mathematische Modelle, die anhand analytischer Verfahren zu lösen sind, werden dabei als analytische Modelle bezeichnet; mathematische Modelle, die aufgrund ihrer Komplexität nur mit Hilfe numerischer Methoden auszuwerten sind, werden als Computermodelle bzw. numerische Modelle bezeichnet. Aufgrund der Komplexität der nachzubildenden Realsysteme kommen in der Hydrologie oftmals rechnergestützte numerische Modelle zum Einsatz. Die zugrunde liegenden Zielsetzungen der Modellbildung und Modellanwendung in der Hydrologie sind dabei vielfältig und reichen von der Erstellung hydrologischer Übersichtsbilanzen über Hochwasservorhersagen bis zur Prognose der Auswirkung von Landnutzungs- und Klimaänderungen. Prinzipiell lassen sich die Anwendungsbereiche in drei Gruppen gliedern (DVWK 1999):

- Simulation des Verhaltens realer Systeme unter Verwendung gemessener Ein- und Ausgangsgrößen sowie bekannter Systemparameter
- Prognoserechnung bei unveränderten Systemparametern, jedoch veränderten Eingangsgrößen
- Prognoserechnung mit veränderten Systemparametern, mit oder ohne Veränderung der Eingangsgrößen

In Abhängigkeit von der exakten Zielsetzung kommt, mangels eines universellen Modells, eine Vielzahl unterschiedlicher mathematischer Modelle zum Einsatz (Bronstert et al. 2001). Versuche zur Klassifikation der Modelle sind vielfältig und finden sich in Fleming (1975), Pfützner (1989), Pfützner et al. (1992), Singh (1995, 2002) und UNESCO (1985). Dabei stehen neben dem Anwendungsbereich eines Modells im Allgemeinen drei Klassifizierungsmerkmale im Vordergrund:

- Grad der Kausalität bzw. Art der Prozessbeschreibung
- räumliche Betrachtungsebene
- zeitliche Betrachtungsebene

²⁷ Gedankliche Modelle bilden letztlich die Grundlage aller aufbauenden analogen oder mathematischen Modelle.

Bezüglich des Kausalitätsgrades können grundsätzlich stochastische Modelle und deterministische Modelle unterschieden werden (Singh 1995). Während stochastische Modelle die Beobachtungsgrößen als Zufallsvariablen auffassen und diese auf Basis langjähriger hydro-meteorologischer Messreihen bzw. darauf aufbauenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreiben, berücksichtigen deterministische Modelle das im Realsystem existierende Ursache-Wirkungs-Gefüge (Maniak 1997). Letztere bilden hierzu die ablaufenden Prozesse anhand von Formeln nach. Innerhalb der deterministischen Modelle lassen sich nach dem Komplexitätsgrad nochmals drei Modelltypen unterscheiden (vgl. Abbildung 7-1; Jürgens 2001, Pfützner 1989, Pfützner et al. 1992, Singh 1995):

- Prozessmodelle (White-Box-Modelle) versuchen die im Realsystem auftretenden Prozesse möglichst detailliert und exakt anhand mikroskaliger Gleichungen nachzubilden, die direkt aus physikalischen Gesetzmäßigkeiten abzuleiten sind. Sie werden daher auch als physikalische Modelle bezeichnet. Bei Prozessmodellen ist (zumindest theoretisch) eine weitgehende messtechnische Erfassung der Modellparameter im Gelände möglich, was im Allgemeinen jedoch bereits an der Vielzahl der zu erhebenden Kenngrößen scheitert.
- Empirische Modelle (Black-Box-Modelle) arbeiten dagegen nicht mit direkt aus physikalischen Gesetzmäßigkeiten ableitbaren Formeln, sondern mit einfachen Übertragungsfunktionen. Anhand derer soll das Systemverhalten (Umsetzung des Systeminputs in Systemoutput) so gut wie möglich abgebildet werden, wobei die Einzelprozesse nicht spezifisch nachvollzogen werden. Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgt anhand des Vergleiches von beobachtetem und simuliertem Output.
- Konzeptionelle Modelle (Grey-Box-Modelle) stellen eine Übergangsform zwischen Prozessmodellen und empirischen Modellen dar, die sowohl exakte physikalische Komponenten als auch empirische Komponenten enthält. Sie können entweder durch sinnvolle Vereinfachung aus Prozessmodellen hervorgehen oder die hydrologischen Vorgänge mit Hilfe von Speicheranalogien beschreiben. Die Modellparameter weisen entsprechend nur zum Teil einen direkt messbaren physikalischen Bezug auf. Einige Modellparameter müssen anhand von hydrologischen Messreihen kalibriert werden.

Ein weiteres Klassifizierungsmerkmal hydrologischer Modelle ist der betrachtete räumliche Maßstab. Die Betrachtungsebene reicht hier von der lokalen Skala (Bodensäule), in der vorwiegend vertikale Prozesse abgebildet werden, über die Hangskala, in der auch laterale Fließprozesse im Boden von Bedeutung sind, bis zur Einzugsgebiets- und Flussgebietsskala, in denen den Fließprozessen im Vorfluter eine zunehmende Bedeutung zukommt (Singh 1995). Eng damit verbunden ist auch die Frage nach den modellspezifischen Möglichkeiten der räumlichen Diskretisierung des untersuchten Gebietes (vgl. Abbildung 7-1). Grundsätzlich sind dabei Blockmodelle (lumped models) und flächendetaillierte Modelle (distributed models) zu unterscheiden. Während Blockmodelle den betrachteten Raum als ungegliederte Einheit und somit undifferenziert abbilden, erfolgt anhand flächendetaillierter Modelle eine Aufteilung in Teilflächen, für die jeweils separat ein Parametersatz zur Verfügung gestellt werden muss (Singh 1995). Die räumliche Diskretisierung bildet somit eine Annäherung an die räumliche Heterogenität des Realsystems (Pfützner et al. 1992). Verschiedene Ansätze zur räumlichen Gliederung hydrologischer Untersuchungsgebiete werden in Kapitel 7.1.2 vorgestellt.

Ein drittes Klassifizierungsmerkmal hydrologischer Modelle stellt die betrachtete zeitliche Ebene dar. Hier kann zwischen Modellen für die ereignisbezogene Betrachtung und Langfristmodellen unterschieden werden (Pfützner 1989). Während die Berechnung von

Einzelereignissen eine zeitlich hochaufgelöste Verarbeitung von Daten und eine hohe zeitliche Auflösung der Eingabedaten voraussetzt (z. B. 15 Minuten, 1 Stunde), werden bei langfristigen Betrachtungen häufig weniger hochaufgelöste Daten verarbeitet (z. B. Tageswerte). Letzteres ist jedoch nicht zwingend erforderlich, sondern wird durch die Rechnerkapazität oder die Art der Prozessbeschreibung vorgegeben (Singh 1995).

Wie Abbildung 7-1 verdeutlicht, existiert eine Vielzahl von Modellansätzen mit den unterschiedlichsten Kombinationen bezüglich Prozessbeschreibung sowie räumlicher und zeitlicher Betrachtungsebene. Einige Kombinationen schließen sich dabei a priori aus. So macht es keinen Sinn, ein Black-Box-Modell zu entwickeln, um in diesem eine hochaufgelöste räumliche Diskretisierung zu ermöglichen. Auch die Anwendung eines hochkomplexen physikalisch basierten Modells auf einen Hang ohne weitere Flächendiskretisierung erscheint nicht zweckmäßig. Darüber hinaus ist jedoch auch der Versuch, das zuvor genannte physikalisch basierte Modell bei adäquatem räumlichen Differenzierungsgrad auf ein Einzugsgebiet oder Flussgebiet auszuweiten, zumeist zum Scheitern verurteilt. Der Parametrisierungs- und Rechenaufwand ist zu hoch, das Modell ist nicht mehr handhabbar (Bronstert et al. 2001). Letztlich folgt, dass die physikalische Genauigkeit bzw. die Modellkomplexität mit zunehmender Gebietsgröße abnehmen muss (Kleeberg 1999) und der konzeptionelle Ansatz in den Vordergrund tritt.

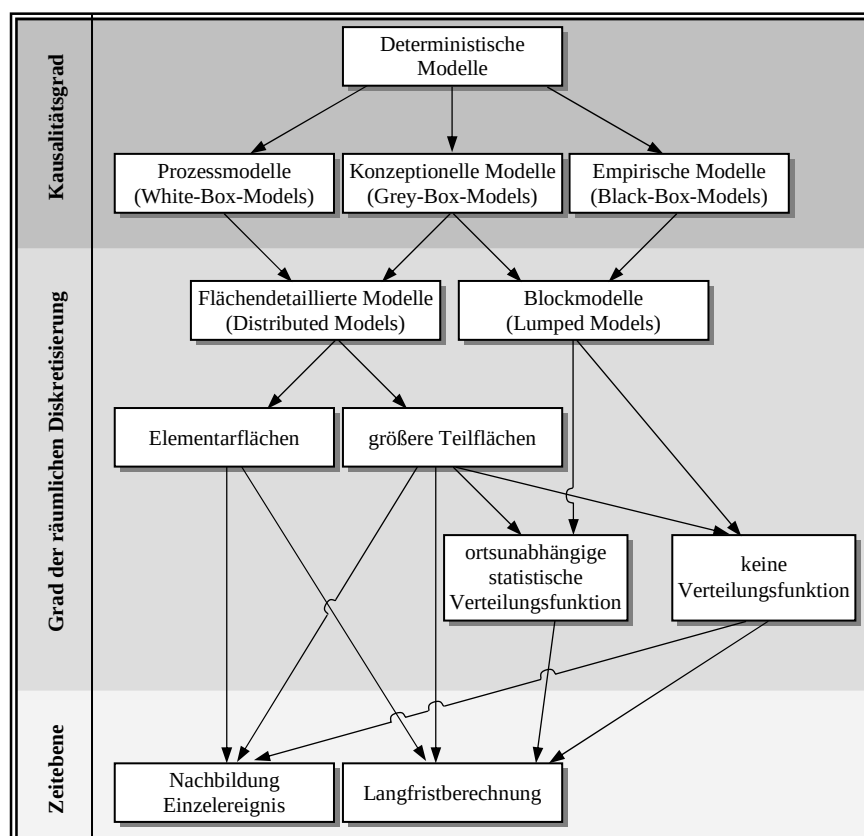


Abb. 7-1 Klassifikation hydrologischer Modelle (leicht verändert nach Pfützner 1989 und Jürgens 2001).

Neben dem Einfluss der reinen Handhabbarkeit eines Modells im Hinblick auf unterschiedliche räumliche Betrachtungsebenen wirkt sich auch die Skalenabhängigkeit hydrologischer Prozesse aus (vgl. Kapitel 2). Diese führt zwingend dazu, dass auch die Nachbildung der Prozesse in einem Modell skalenabhängig sein muss (Bronstert et al. 2001). Einen einführenden Überblick über prozessnahe Gleichungen in unterschiedlichen Skalen der hydrologischen Modellierung bieten Blöschl & Sivapalan (1995) und Bronstert et al. (2001).

Mit der Problematik der Übertragbarkeit hydrologischer Prozesse über Skalengrenzen hinweg beschäftigte sich u. a. das DFG-Schwerpunktprogramm „Regionalisierung in der Hydrologie“ von 1992 bis 1998 (vgl. Kleeberg 1992, 1999). Die Vielfalt der existierenden Modelle ist somit (auch) eine Antwort auf die Vielzahl von Anwendungsbereichen (Bronstert et al. 2001).

Die prinzipielle Güte eines Modells kann nach Miller et al. (1999) aus der spezifischen Kombination von dessen Abstraktionsgrad und seiner Ähnlichkeit zum Realsystem in Abhängigkeit zum Anwendungsziel abgeleitet werden (vgl. Abbildung 7-2). Schlechte Modelle ermöglichen trotz eines geringen Abstraktionsgrades lediglich eine sehr unscharfe Nachbildung des Realsystems, wohingegen Modelle hoher Güte für den entsprechenden Abstraktionsgrad eine relativ hohe Ähnlichkeit in der Abbildung des Realsystems ermöglichen. Prinzipiell sollte mit zunehmendem Abstraktionsgrad der Arbeitsaufwand für den Modellanwender abnehmen (Weingartner 1999). Müller & Peschke (2000) kritisieren diesbezüglich vor allem die große Zahl überparametrisierter und schwer kalibrierbarer Modelle, die letztlich kaum handhabbar sind. Dabei kommt vor allem auch dem Grad der räumlichen Diskretisierung des Untersuchungsgebietes eine entscheidende Rolle zu. Nach Müller & Peschke (2000) sollte bereits im Rahmen des Preprocessing, d. h. der der Modellanwendung vorangestellten Regionalisierung des untersuchten Gebietes, der späteren Handhabbarkeit Rechnung getragen werden, indem die Anzahl der Modellierungseinheiten adäquat reduziert wird. Adäquate Reduktion bedeutet dabei, eine Kompromisslösung zwischen Generalisierung und Parametrisierbarkeit des Modells zu finden.

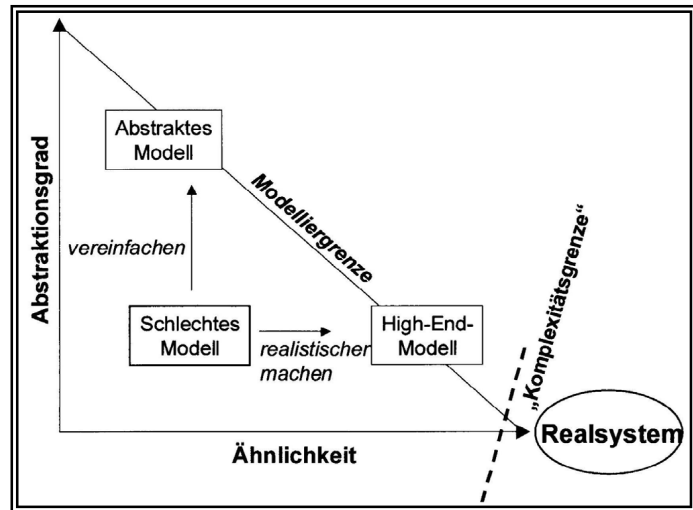


Abb. 7-2 Übersicht über verschiedene Modellansätze (Miller et al. 1999, verändert durch Casper 2002).

Insgesamt sind für den Anwender bei der Auswahl eines geeigneten Modells eine Reihe von Kriterien von Bedeutung. Der in Abb. 7-3 ausgewiesene, in Anlehnung an Bronstert et al. (2001) entwickelte Kriterienkatalog reicht vom grundlegenden Einfluss des Anwendungszwecks eines Modells über den räumlichen und zeitlichen Betrachtungsmaßstab bis zu den Kosten, die durch Modellbeschaffung und Modellanwendung entstehen. Letztlich besitzt auch die potenziell erreichbare Modellgüte entscheidenden Einfluss auf die Modellauswahl.

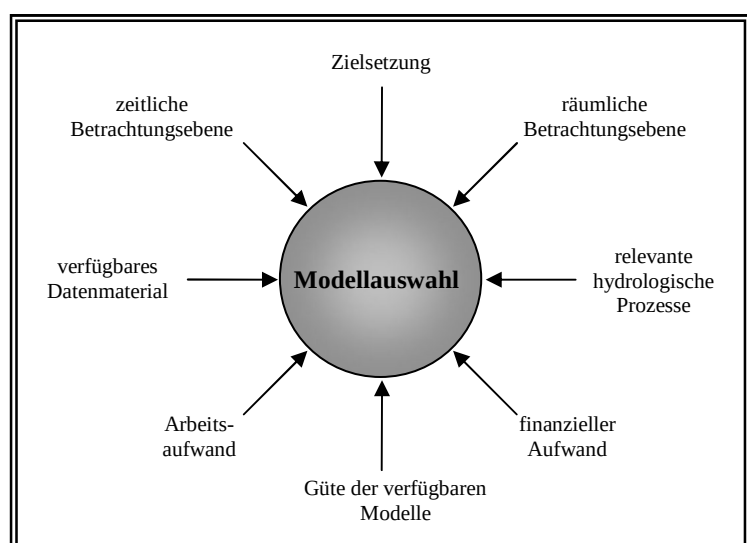


Abb. 7-3 Kriterien bei der Modellauswahl.

Eine Vielzahl von Modellen stellt eine Mischung konzeptioneller und physikalisch basierter Ansätze dar. Im Idealfall handelt es sich um modular aufgebaute Systeme. Bei diesen bestehen oftmals bereits zwischen den einzelnen Modulen Unterschiede im Abstraktionsgrad der ablaufenden Prozesse, so dass eine eindeutige Zuordnung des Gesamtmodells nicht möglich ist. Bronstert et al. (2001) stellen einige von verschiedenen Autoren (u. a. Beven 1996, Kirnbauer et al. 1996 und O'Connell & Todini 1996) festgestellte Vor- und Nachteile konzeptionell orientierter und physikalisch basierter Modelle, auch im Hinblick auf die Eignung für die Simulation von Landnutzungsänderungen, gegenüber. Er kommt zum nahe liegenden Schluss, dass rein prozessorientierte Modelle aufgrund der Komplexität der Realsysteme unübersehbar an „[...] die Grenzen einer mathematischen ›Nachahmung‹ der einzelnen Prozesse [...]“ stoßen, wohingegen stark vereinfachende konzeptionelle Modelle zwar durch geeignete Kalibrierungspraktiken sinnvoll zur Nachbildung bestehender Realsysteme heranzuziehen sind, aufgrund ihrer mangelnden physikalischen Basis jedoch nur unzureichend auf veränderte Gebietscharakteristika extrapoliert werden können. Letztlich sind somit auch hier geeignete Kompromisslösungen zwischen physikalischer Verankerung und Abstraktionsgrad notwendig, wie sie in entsprechenden Mischmodellen zu finden sind. Für die korrekte Anwendung von Modellen ist dabei das Verständnis der im Gebiet ablaufenden hydrologischen Prozesse von essentieller Bedeutung, da, wie sowohl O'Connell & Todini (1996) als auch Müller & Peschke (2000) betonen, gerade bei konzeptionellen Modellen, deren Kalibrierung oftmals lediglich anhand der prozessintegrierenden Abflussganglinie aus dem Gebiet erfolgt, häufig eine Vielzahl von Parametersätzen zu gleichen Abflussvorhersagen führen, obwohl die simulierten Abflussbildungsprozesse in Abhängigkeit vom angewandten Parametersatz deutlich differieren.

7.1.2 Konzepte zur Ausweisung von Modellierungseinheiten

Die in einem geographischen Raum ablaufenden Prozesse unterliegen im Allgemeinen einer starken räumlichen Differenziertheit. Um bei der Nachbildung der real ablaufenden Prozesse durch prozessorientierte mathematische Modelle eine zu starke Generalisierung zu vermeiden bzw. um eine hohe Modellgüte zu erreichen, muss diese räumliche Heterogenität des betrachteten Raumes im Rahmen der Prozessnachbildung Berücksichtigung finden. Dies bedeutet, dass der nachgebildete Raum sinnvoll untergliedert werden muss. Hierzu existieren zunächst zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze: die streng formale Unterteilung des Gebietes z. B. in Raster oder Dreiecksnetze einerseits und die Einteilung in polygonale, strukturell oder funktional begründete Einheiten andererseits.²⁸ Letzteres stellt eine Regionalisierung im klassischen Sinne dar (Dyck & Peschke 1995, Kleeberg 1999, Müller & Peschke 2000, Schröder et al. 1992 u. 1994), wobei die ausgewiesenen Teilgebiete nach Schröder et al. (1992) dadurch gekennzeichnet sind, dass sie im Bezug auf die ausgewählten, diskriminierenden Merkmale „[...] in sich möglichst homogen, untereinander jedoch hinreichend unterschiedlich sein sollen [...]“. Dabei ergeben sich zwei grundlegende Probleme: Einerseits müssen geeignete diskriminierende Merkmale vom Betrachter ausgewählt werden, andererseits stellen reale Landschaften räumliche Kontinua dar, so dass es keine per se existierenden Raumindividuen gibt. Letztlich muss somit sowohl die Selektion von Merkmalen als auch die Ausgliederung von Teilflächen auf Basis dieser Merkmale, d. h. die Klassifikation des Raumes, immer als subjektiver und künstlicher Prozess angesehen

²⁸ Es existieren auch inhaltliche Übergangsformen wie z. B. die Ausweisung von Hangsegmenten (vgl. z. B. Fürst 2004, Müller & Peschke 2000). Weiterhin können beide Diskretisierungsansätze ggf. ineinander überführt oder verknüpft werden. Die Auswahl eines Ansatzes steht immer direkt mit der Modellauswahl in Verbindung.

werden (Hormann 1981). Regionalisierungsergebnisse bleiben dadurch stets diskutabel, gerade aus diesem Grund kommt jedoch einer exakten und begründeten Definition von Abgrenzungskriterien eine entscheidende Bedeutung zu.

Aus den vorangegangenen Ausführungen folgt letztlich auch, dass die Diskretisierung eines Raumes immer problembezogen erfolgen muss, wodurch die Auswahl der diskriminierenden Merkmale gegebenenfalls eingeschränkt werden kann. Weiterhin folgt, dass die betrachtete räumliche Skala (vgl. Kapitel 2) in Verbindung mit den möglichen Ausprägungen der betrachteten Merkmale in die Überlegungen zur Klassifikation mit einbezogen werden muss. Für die Aufteilung eines Raumes im Rahmen der hydrologischen Betrachtung scheiden somit ganzheitliche Landschaftsgliederungsansätze wie die Ausweisung von Ökotope²⁹ aufgrund ihres umfassenden Charakters aus. Stattdessen muss das Augenmerk auf hydrologisch relevante Teilaspekte gerichtet werden, so dass eine Ausweisung von Hydrotopen, die nach Dyck & Peschke (1995) hydrologisch homogene Teilgebiete darstellen, notwendig ist. Leser (1991) definiert ein Hydrotop als „die für die hydroökologische und geoökologische Betrachtung relevante kleinste hydrologische Raumeinheit, die von einheitlich verlaufenden und einheitlich gerichteten Prozessen des Hydrosystems bestimmt ist und die demzufolge ein einheitliches Wasserhaushaltregime aufweist“. Daraus ergeben sich letztlich, wie bereits zuvor bei der Ökotopausweisung dargelegt, die beiden Probleme der Kriterienselektion und des vertretbaren Generalisierungsgrades. Letzterer ist auch in direktem Zusammenhang mit den Möglichkeiten der Parametrisierung der Einheiten und der verfügbaren Datengrundlage zu sehen. Es muss also festgehalten werden, dass auch im hydrologischen Kontext keine real existierenden homogenen Teilgebiete vorzufinden sind, d. h. die Abgrenzung auch in diesem Fall immer künstlich erfolgt. Konzepte zur Abgrenzung hydrologisch homogener Teilgebiete sind zahlreich und wurden in der Vergangenheit vielfach diskutiert. Sie unterscheiden sich einerseits in den betrachteten Merkmalen zur Abgrenzung der Teilgebiete, andererseits in der Vorgehensweise zur Ermittlung der Teilgebiete auf Basis der ausgewählten Merkmale. Das Spektrum der Konzepte umfasst u. a. die Ausweisung von Representative Elementary Units (REAs; Wood et al. 1988), Hydrological Similar Units (HSUs; Su et al. 1992, Schumann & Schultz 1995) und Hydrological Response Units (HRUs; Leavesley et al. 1983, Flügel 1995a). Die Ansätze zeigen dabei teilweise erhebliche Ähnlichkeiten. Eine Diskussion über Unterschiede und Übereinstimmung bzw. Stärken und Schwächen der verschiedenen Ansätze findet sich in Bongartz (2001). Die in dieser Untersuchung zur Anwendung gekommenen Hydrological Response Units (HRUs) wurden durch Leavesley et al. (1983) zunächst zur eher strukturell begründeten räumlichen Diskretisierung eingeführt, d. h. im Vordergrund der Regionalisierung stand zunächst nicht die hydrologisch-funktionale Homogenität der Teilflächen, sondern vielmehr strukturelle Ähnlichkeiten von z. B. Relief, Boden und Landnutzung (Leavesley et al. 1983, Müller & Peschke 2000). In ihrer Weiterentwicklung durch Flügel (Flügel 1995a, 1995b, 1996a, 1996b) werden HRUs dagegen in erster Linie als hydrologisch-funktionale Einheiten angesehen. Hier steht die Homogenität der hydrologischen Prozesse als Abgrenzungskriterium der Teilflächen im Vordergrund. Flügel (1996b) definiert HRUs wie folgt:

„Hydrological Response Units are distributed, heterogeneously structured entities having a common climate, land use and underlying pedo-topo-geological associations controlling their hydrological transport dynamics.“

Eine HRU ist dabei, wie bereits bei Leavesley et al. (1983) deutlich wird, nicht als Elementarfläche zu verstehen, sondern als Flächenklasse, die aus einer Vielzahl von nicht zusammenhängenden, in ihrer hydrologischen Prozessdynamik jedoch homogenen Elementarflächen

²⁹ Zur historischen Entwicklung des Begriffs Ökotope vgl. z. B. Finke (1994) und Leser (1991).

aufgebaut ist (vgl. Abbildung 7-4). Somit können HRUs alternativ auch als HRU-Klassen bezeichnet werden, die aus HRU-Teilflächen (Elementarflächen) aufgebaut sind. Die prozessuale Homogenität der HRUs drückt sich letztlich dadurch aus, dass die Variabilität der hydrologischen Prozesse innerhalb einer HRU möglichst gering ausfällt, wohingegen diese zu den übrigen HRUs möglichst große Unterschiede in der Prozessdynamik aufweisen soll (Flügel 1996b). Nichtsdestotrotz muss die HRU-Ausweisung auf Basis der prozessdeterminierenden naturräumlichen Gebietsausstattung erfolgen, so dass ein großes Maß an Verständnis der im Untersuchungsgebiet ablaufenden hydrologischen Prozesse unabdingbar ist. Dieses ist jedoch, wie Müller & Peschke (2000) feststellen, im Rahmen der Anwendung hydrologischer Modelle, v. a. konzeptioneller Modelle, ohnehin erforderlich, da nur so die Kongruenz zwischen den im Realsystem ablaufenden Prozessen und den simulierten Prozessen sichergestellt werden kann. Oftmals kann nämlich, wie zuvor bereits dargelegt, eine Vielzahl von Parametersätzen, bezogen auf die integrale Validierungsgröße „Gebietsabfluss“, zu identischen Ergebnissen führen (O’Connell & Todini 1995, Müller & Peschke 2000).

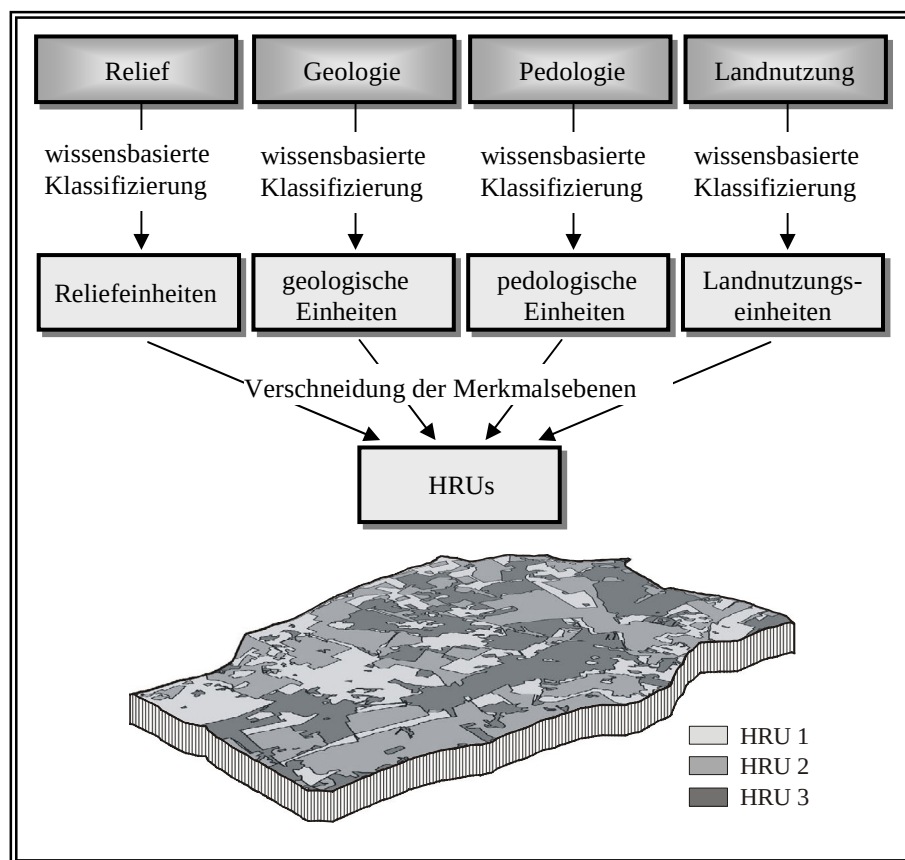


Abb. 7-4 Schema der HRU-Ausweisung. Die resultierenden HRUs bestehen aus einer Vielzahl nicht-zusammenhängender Einzelflächen (Die Karte stellt zur Vereinfachung lediglich drei unterschiedliche HRUs dar).

Die in Abbildung 7-4 dargestellte Methodik der HRU-Ausweisung beruht letztlich auf der Annahme, dass keine Korrelation zwischen den einzelnen Gebietsparametern besteht. Im Rahmen der Regionalisierung erfolgt daher zunächst eine, im Hinblick auf die Wiedergabe der Prozessdynamik, als „wissensbasiert“ (Staudenrausch 2000) zu bezeichnende Reklassifizierung hydrologisch bedeutsamer physiogeographischer Ausstattungsmerkmale des Gebietes. Erst aufbauend erfolgt eine Flächenverschneidung (Overlay) mit Hilfe Geographischer Informationssysteme und somit die eigentliche Gliederung des Untersuchungsgebietes in

HRUs.³⁰ Eine hydrologische Bedeutung wird, abhängig von der Raumstruktur, den Faktoren Relief, Geologie, Boden sowie Landnutzung zugeschrieben. Gegebenenfalls sind darüber hinaus auch klimatische Variationen zu berücksichtigen. Bei der Verschneidung der klassifizierten Merkmalsebenen bietet es sich nach Flügel (1996b) an, aufgrund deren starker inhaltlicher Verknüpfung zunächst aus Relief-, pedologischen und geologischen Einheiten sogenannte „pedo-topographical associations“, d. h. pedogeologische Einheiten zu bilden. Diese wiederum sind als Grundlage für die weitere Verschneidung mit den Landnutzungseinheiten heranzuziehen. Die resultierende räumliche Verteilung der HRUs bleibt jedoch unberührt von der gewählten Abfolge.

Im Rahmen der Prozesssimulation wird allen Elementarflächen einer Klasse aufgrund ihres hydrologisch homogenen Charakters der identische Parametersatz zugewiesen. Bei geeigneter Reduktion der HRU-Anzahl, die freilich mit einer entsprechenden Generalisierung einhergeht, kann so der von O’Connell & Todini (1995) und Müller & Peschke (2000) bemängelten Überparametrisierung vieler hydrologischer Modelle entgegengewirkt werden. Das Modell bleibt handhabbar. Dennoch ergeben sich durch den gewählten Ansatz auch Probleme: Bei ausschließlicher Betrachtung der HRU-Klassen im Rahmen der Modellierung ist aufgrund deren Aufbaus aus einer Vielzahl räumlich verteilter Elementarflächen weder eine eindeutige Verknüpfung mit angeschlossenen Gewässersegmenten (Vorfluterbeziehung), noch eine Weitergabe lateraler Abflüsse an benachbarte Gebiete möglich (Polygonkaskaden). Letztlich kann in diesem Fall lediglich ein flächengewichtetes Abflussmittel aller Elementarflächen einer HRU berechnet werden. Dieser einfachste Modellansatz (halbverteiltes Modell) ist bei kleinen Einzugsgebieten zumeist weniger problematisch, beeinträchtigt jedoch die Ergebnisgüte bei Betrachtung größerer Gebiete deutlich.³¹ Exakte Angaben bezüglich der räumlichen Dimensionen finden sich in der Literatur nicht, Kirkby (1993) betont lediglich, dass bei Einzugsgebieten ab ca. 50 km² die Vorfluterprozesse gegenüber den Prozessen im Hang in den Vordergrund treten. Vor allem in kleinen Einzugsgebieten mit einer sehr hohen Dichte an Drainagegräben und kurzen Fließwegen im Gerinne, wie dies z. B. im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches gegeben ist, sind auch ohne Berücksichtigung beider Übergabebeziehungen gute Ergebnisse zu erzielen (eine Diskussion hierzu folgt in Kapitel 7.3). Bezieht man in einem nächsten Schritt die Elementarflächen mit in die Simulation ein, wird zwar der Anschluss an ein Gewässersegment möglich, jedoch ist auch in diesem Fall die Übergabe lateraler Abflusskomponenten an benachbarte Flächen problematisch. Begründet ist dies dadurch, dass die Ausweisung der Elementarflächen im Rahmen des HRU-Konzeptes nicht ausschließlich reliefgestützt erfolgt, sondern auch andere Faktoren wie Landnutzung und Böden Berücksichtigung finden. Wie auch bei ähnlichen Verfahren der Hydrotopausweisung existiert so letztlich keine eindeutige Übergabebeziehung (vgl. auch Staudenrausch 2000).

³⁰ Dies steht im Gegensatz zu einer Reihe anderer Ausweisungskonzepte, bei denen zunächst die Flächenverschneidung erfolgt und aufbauend die Reklassifizierung.

³¹ Neben dem räumlichen Betrachtungsmaßstab ist in diesem Zusammenhang auch die zeitliche Diskretisierungsstufe von entscheidender Bedeutung. Bei Auswahl kleinerer Zeitintervalle (z. B. Stunde) wird das Simulationsergebnis deutlich stärker beeinflusst als bei Auswahl größerer Zeitintervalle (z. B. Tag, Woche).

7.2 Ausgliederung von Hydrological Response Units (HRUs)

Als Modellierungseinheiten für das Modell MMS/PRMS wurden die in Kapitel 7.1.2 beschriebenen Hydrological Response Units (HRUs) in Anlehnung an Flügel (1995a–b, 1996a–b) herangezogen. Um dabei einerseits dem Problem der Modellüberparametrisierung entgegenzuwirken (vgl. O’Connell & Todini 1995, Müller & Peschke 2000) und andererseits den Rechenaufwand in überschaubaren Grenzen zu halten, sollte die Anzahl der ausgewiesenen HRUs gering gehalten werden. Nichtsdestotrotz sollten die HRUs hydrologisch homogene Einheiten darstellen, innerhalb derer die Variabilität der hydrologischen Prozessdynamik geringer ist als zwischen verschiedenen HRUs, so dass letztlich sowohl die Selektion relevanter Regionalisierungskriterien als auch ihre Klassifizierung möglichst prozessorientiert erfolgen musste.

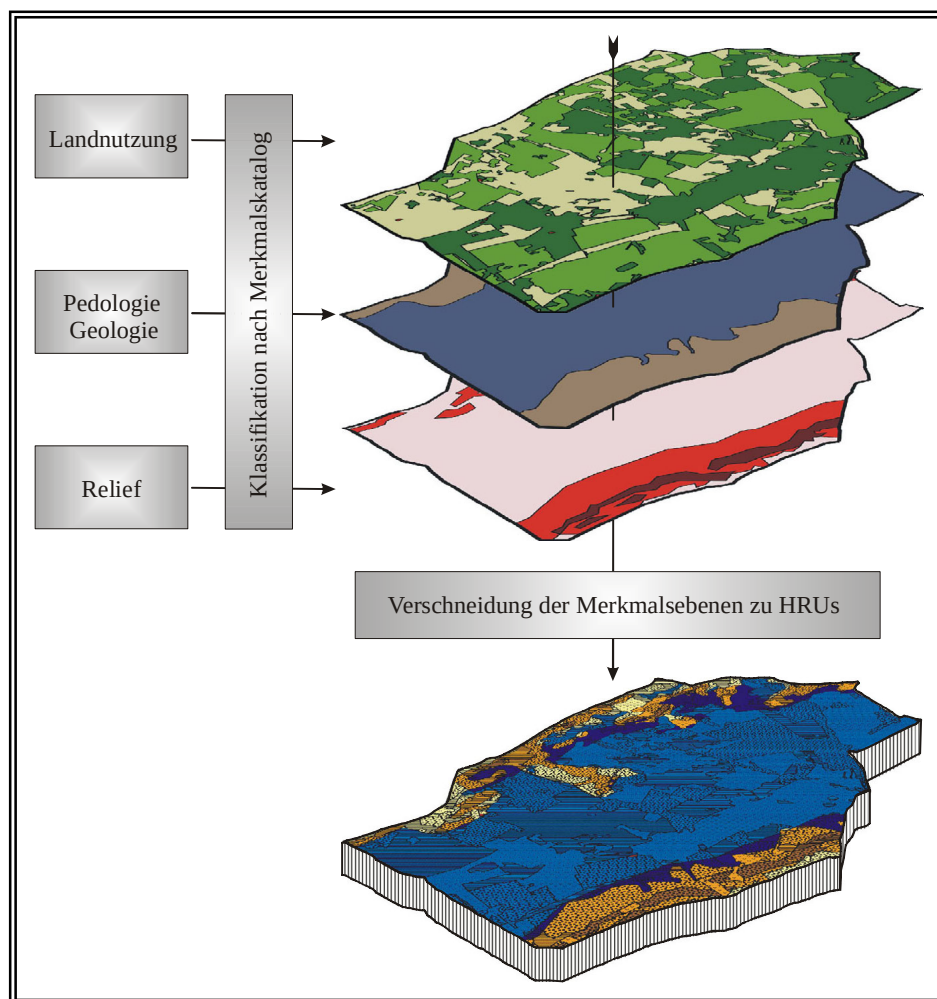


Abb. 7-5 HRU-Ausweisung auf Basis von Relief, Geologie, Pedologie und Landnutzung.

Die Ausweisung der HRU-Klassen lehnte sich an das in Kapitel 7.1.2 dargestellte Schema an (vgl. Abbildung 7-4), d. h. es wurde zunächst eine Klassifikation der hydrologisch relevanten Merkmale durchgeführt, an die sich eine Verschneidung der klassifizierten Merkmalsebenen mit Hilfe Geographischer Informationssysteme (ArcView, ArcGis) anschloss. Hydrologische Relevanz wurde in diesem Zusammenhang dem Relief, dem geologischen Untergrund, den Böden und der Landnutzung zugesprochen (vgl. Abbildung 7-5). Die Klassifikation der vier Merkmalsebenen, die zur Bildung von Reliefeinheiten, pedologisch-geologischen Einheiten

und Landnutzungseinheiten führte,³² erfolgte auf Basis des in Tabelle 7-1 dargestellten Regelwerkes. Die räumliche Niederschlagsverteilung innerhalb des Gebietes wurde aufgrund der mit 12,73 km² geringen Gebietsgröße als homogen angesehen,³³ höhenabhängige Temperaturunterschiede sowie reliefabhängige Einstrahlungsunterschiede konnten innerhalb des Modells PRMS anhand einfließender Reliefparameter direkt berücksichtigt werden, so dass keine Notwendigkeit zur gesonderten Ausweisung hydrometeorologischer Teilräume bestand.

Tabelle 7-1 Kriterienkatalog zur Klassifizierung der hydrologisch bedeutsamen Gebietseigenschaften.

^a vgl. Kapitel 1.2

^b In der abschließenden Ausweisung der Reliefeinheiten blieb die Exposition unberücksichtigt, da sie lediglich zu einer unerheblichen Verbesserung der Simulationsergebnisse führte.

^c Die Ausweisung der Landnutzungseinheiten erfolgte ohne Berücksichtigung linienhafter Strukturen wie öffentlicher Straßen oder Forstwege. Diese flossen im Modell PRMS flächenanteilig in die HRUs ein.

Ebene	Datenquelle ^a	Klassifizierung des Merkmals	Vorwiegend beeinflusste hydrologische Komponente
Relief	DGM 20	Neigung	Interflow und Oberflächenabfluss
		< 5° (nicht bis schwach geneigt)	
		5° bis 10° (mittel geneigt)	
		> 10° (stark bis sehr stark geneigt)	Abbau von Schneedecken
		Exposition ^b	
		292,5° bis 112,5° (Schattseite)	Abbau von Schneedecken
		112,5° bis 292,5° (Sonnseite)	
Geologie	geologisches Strukturmodell (5 Ausgangsgesteine)	Die geologischen Teilräume werden weitgehend durch die aufbauenden Böden widerspiegelt, daher wurde bei der HRU-Ausweisung keine separate Merkmalsebene „Geologie“ berücksichtigt.	Verhalten des Grundwasserkörpers
Boden	Grundformenkarte (4 Grundformen), eigene Kartierung	Böden ohne Staunäseeinfluss	gesamte Abflussbildung im Bodenkörper
		Böden mit Staunäseeinfluss	
Landnutzung	Luftbilder, Forstkarten, eigene Kartierung (21 Arten der Landnutzung)	Nadelwald	Interzeption und Evapotranspiration
		Laub- und Mischwald	
		Jungwuchs, Wiese und Buschbrache	
		Verkehrs- und Siedlungsflächen ^c	

Das Georelief besitzt einen unumstritten starken Einfluss auf die Abflussbildung, so dass sich eine Berücksichtigung der Reliefeigenschaften bei der HRU-Ausweisung als unumgänglich darstellte. Wie in Tabelle 7-1 dargelegt, basierten die zu diesem Zweck ursprünglich ausgegliederten Reliefeinheiten auf den beiden Merkmalen Hangneigung und Exposition, denen im Bezug auf die Abflussgenese eine entscheidende Bedeutung zufällt. Auf eine weitergehende Reliefgliederung konnte im Hinblick auf die Modellanwendung verzichtet werden,

³² Eine „Einheit“ ist in diesem Zusammenhang als Gesamtheit nicht-zusammenhängender Teilflächen zu verstehen, die für das untersuchte Merkmal eine identische Ausprägung bzw. Klassenzugehörigkeit aufweist.

³³ Nach Maniak (1997) ist bei Einzugsgebieten mit einer Fläche bis ca. 10 km² eine direkte Übertragung der an einem Messpunkt erhobenen Niederschlagswerte auf das Gesamtgebiet sinnvoll möglich. Wie in Kapitel 4.6 dargelegt, wurden innerhalb des Untersuchungsgebietes lediglich im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf Niederschlagsdaten erfasst. Im nördlichen Grenzbereich des untersuchten Einzugsgebietes findet sich darüber hinaus die DWD Niederschlagsstation 1192 (Ellern-Thiergarten). Aufgrund der Kombination aus geringer Stationsdichte und ungünstiger räumlicher Anordnung wurde im weiteren Verlauf eine direkte Übertragung der am Modellhang erfassten Daten auf das gesamte Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches favorisiert.

da zum einen die Übergabe lateraler Abflüsse von einer Teilfläche zur anderen nicht nachgebildet werden sollte (Diskussion in Kapitel 7.3), und die Muldenspeicherung in PRMS allenfalls indirekt Berücksichtigung findet. Über die Lage einer HRU-Teilfläche am Hang gibt zudem bereits die Merkmalskombination von Hangneigung und Boden/Geologie Auskunft. So tritt beispielsweise die Kombination „schwache Neigung“ und „Böden ohne Staunäseeinfluss“ ausschließlich im Kammbereich auf, wohingegen die Kombination „schwache Neigung“ und „Böden mit Staunäseeinfluss“ stets auf Unterhang und Tallagen beschränkt ist. Eine prozessorientierte Klassifizierung der Hangneigung erwies sich letztlich als schwierig, da zwar einerseits klar ist, dass die Hangneigung großen Einfluss auf die Abflussbildung besitzt (vgl. u. a. Dikau & Schmidt 1999 und Dyck & Peschke 1995), andererseits jedoch keine festen Grenzwerte für die Genese einzelner Abflusskomponenten existieren. So konnten Kneidl & Bennecke (1990) an unterschiedlichen Standorten im Soonwald bei lediglich 2° bis 4° Hangneigung noch die Entstehung von Interflow nachweisen. Aus diesem Grund wurde zur Klassifizierung der Neigung auf einen pragmatischen, strukturell orientierten Ansatz zurückgegriffen, der zur Ausweisung der drei Klassen „nicht bis schwach geneigt (< 5°)“, „mittel geneigt (5° bis 10°)“ und „stark bis sehr stark geneigt (> 10°)“ führte (AG Boden 2005). Die Exposition wirkt sich aus hydrologischer Sicht in erster Linie (jedoch nicht ausschließlich) auf den Schneedeckenabbau aus (vgl. Brechtel & Balázs 1976, Hofmann 1963, Leavesley et al. 1983, Obled & Harder 1978, Obled & Rosse 1977). Aus diesem Grund wurde die Exposition bei der ursprünglichen Ausweisung der Reliefeinheiten durch Ausgliederung der Merkmalsklassen „Schattseite (292,5° bis 112,5°)“ und „Sonnseite (112,5° bis 292,5°)“ mit einbezogen. Im Rahmen der Modellanwendung zeigte sich jedoch, dass die Berücksichtigung der Exposition, trotz einer Verdopplung der resultierenden HRU-Anzahl, zu keiner nennenswerten Verbesserung der Simulationsergebnisse führt.³⁴ Um die Handhabbarkeit des Modells zu optimieren (möglichst geringe Anzahl an HRUs), wurde im Rahmen der endgültigen Ausweisung der Reliefeinheiten auf die Berücksichtigung der Exposition verzichtet, so dass insgesamt lediglich drei Reliefklassen resultieren (vgl. Tabelle 7-2). Der größte Flächenanteil entfällt dabei auf Reliefeinheiten mit einer Hangneigung von 0° bis 5°.

Tabelle 7-2 Reliefeinheiten und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

Reliefeinheiten – Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach				
Code	Bezeichnung der Reliefeinheit	Anzahl der Teilflächen	Fläche [km ²]	Flächenanteil [%]
01000	0° bis 5° Neigung	6	9,57	75,1 %
02000	5° bis 10° Neigung	11	2,79	21,9 %
03000	> 10° Neigung	10	0,37	2,9 %

Die Ausgliederung pedologischer Einheiten beruhte auf einer Reklassifizierung der vier ursprünglich für das Gebiet ausgewiesenen Grundformen. Wie bereits in Kapitel 3.3.3 aufgezeigt, können diese im Gebiet des Soonwaldes bestimmten Bodentypen zugeordnet werden: Die Grundformen IX und IX/X entsprechen i. d. R. Pseudogleyen, Grundform VIII Braunerde-Pseudogleyen und die Grundformen ohne Staunäseeinfluss entsprechen Braunerden (vgl. Tabelle 3-2). Im Hinblick auf eine möglichst geringe Anzahl resultierender HRUs wurde im Rahmen der Reklassifizierung der pedologischen Einheiten ein hoher Generalisierungsgrad in Kauf genommen, so dass die staunäseeinflussten Grundformen VIII, IX

³⁴ Durch die Berücksichtigung der Exposition konnte der Zusammenhang zwischen beobachteter und simulierter Ganglinie (Maßzahl: Produktmoment-Korrelationskoeffizient r) für den Modellhang lediglich um +0,07 und für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches um +0,09 erhöht werden.

und IX/X in einer Klasse zusammengefasst wurden („Böden mit Staunäseeinfluss“) und die Grundformen ohne Staunäseeinfluss als separate Klasse bestehen blieben („Böden ohne Staunäseeinfluss“). Diese Klasseneinteilung erschien im Bezug auf die hydrologische Prozessdynamik insofern nahe liegend und sinnvoll, dass zum einen, wie in Geländebeobachtungen festgestellt werden konnte, die Existenz eines stauenden Horizonts direkt mit den gebildeten Abflusskomponenten korreliert ist,³⁵ und zum anderen eine sinnvolle Parametrisierbarkeit der pedologischen Eigenschaften innerhalb des Modells PRMS noch gegeben erschien. Aufgrund eines hohen Maßes an räumlicher Übereinstimmung zwischen Wechsel im Ausgangsgestein und Wechsel der aufbauenden Böden (bei geringer talwärtiger Verschleppung der aufbauenden Böden durch die pleistozänen Deckschichten sowie einigen lokalen Besonderheiten), wurde eine eigenständige Ausweisung geologischer Raumeinheiten als nicht notwendig erachtet. Den pedologischen Einheiten „Böden mit Staunäse“ sind im Allgemeinen Tonschiefer im Untergrund zugeordnet, während den pedologischen Einheiten „Böden ohne Staunäse“ Quarzite zugeordnet sind. Die Übergangsschichten zwischen Taunusquarzit und Hunsrückschiefer (Zunahme von Tonschieferlinsen) nehmen eine Zwischenstellung ein. Diese räumliche Übereinstimmung erschien im Hinblick auf die folgende Parametrisierung der Grundwasserspeicher als ausreichend. Wie in Tabelle 7-3 dargestellt, resultieren insgesamt zwei pedo(geo)logische Gebietsklassen, von denen die Klasse „Böden mit Staunäse“ einen Anteil von ca. 75 % der Einzugsgebietsfläche einnimmt.

Tabelle 7-3 Pedo(geo)logische Einheiten und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

Pedo(geo)logische Einheiten – Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach				
Code	Bezeichnung der pedologischen Reliefeinheit	Anzahl der Teilflächen	Fläche [km ²]	Flächenanteil [%]
10000	Böden ohne Staunäse (vorwiegend auf Taunusquarzit)	7	3,11	24,4 %
20000	Böden mit Staunäse (vorwiegend auf Hunsrückschiefer)	4	9,63	75,6 %

Der Einfluss der Landnutzung auf Wasserhaushalt und Abflussbildung wurde in Kapitel 2 ausführlich dargelegt. Im Zuge der Ausgliederung von Landnutzungseinheiten wurden die 21 ursprünglich erhobenen Landnutzungsarten (vgl. Kapitel 1.2) in vier Klassen zusammengefasst, die im Hinblick auf die hydrologischen Prozesse als weitgehend homogen anzusehen sind:

- Nadelwaldbestände in den Entwicklungsstadien Stangenholz und Baumholz („*Nadelwald*“)
- Laub- und Mischwaldbestände in den Entwicklungsstadien Stangenholz und Baumholz („*Laub- und Mischwald*“)
- Bestände in den Entwicklungsstadien Jungwuchs und Dickung sowie Wiese und Buschbrache („*Jungwuchs und Wiese*“)
- Verkehrs- und Siedlungsflächen ohne Berücksichtigung linienhafter Elemente wie öffentliche Straßen und Forstwege („*Verkehrs- und Siedlungsflächen*“)

³⁵ Entscheidende Bedeutung kommt v. a. der Merkmalskombination Relief–Boden zu (= pedogeologische Reliefeinheiten).

Die letztgenannte Klasse schließt, wie angegeben, keine linienhaften Elemente wie Straßen und Forstwege (vgl. Kapitel 3.5) ein. Deren Berücksichtigung hätte zu einer umfassenden Zerschneidung bestehender Teilflächen und daraus folgend zu einer Vervielfachung der Anzahl der HRU-Teilflächen geführt. Aufgrund der Struktur des Modells PRMS bot es sich stattdessen an, die Verkehrswege für jede HRU flächenanteilig im Rahmen der Parametrisierung des Modells zu berücksichtigen (Anteil der versiegelten Fläche einer HRU; vgl. Kapitel 7.4).

Resultierend ergeben sich für die vier ausgewiesenen Landnutzungsklassen die in Tabelle 7-4 dargestellten Flächenanteile am Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. Es wird deutlich, dass die Klasse „Verkehrs- und Siedlungsflächen“ (ohne lineare Strukturen) mit lediglich 0,1 % einen äußerst geringen Flächenanteil einnimmt, wohingegen den übrigen Klassen ein Flächenanteil zwischen 28,1 % und 37,4 % zufällt. Dennoch wurde aus zweierlei Gründen nicht auf die Ausweisung einer eigenständigen Klasse „Verkehrs- und Siedlungsflächen“ verzichtet: Einerseits erwies sich eine Eingliederung der Flächen in andere Landnutzungsklassen aufgrund ihres speziellen hydrologischen Charakters als nicht sinnvoll, andererseits erschien eine Ausweisung der Klasse im Hinblick auf eventuelle Folgeuntersuchungen notwendig, da eine mögliche Ausdehnung des untersuchten Gebietes ggf. mit höheren Flächenanteilen der Verkehrs- und Siedlungsflächen einhergeht.

Tabelle 7-4 Landnutzungseinheiten und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

^a Stangenholz und Baumholz ^b mit Dickung und Buschbrache
^c ohne linienhafte Strukturen (Straßen und Forstwege), diese wurden in PRMS direkt berücksichtigt

Landnutzungseinheiten – Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach				
Code	Bezeichnung der Reliefeinheit	Teilflächen	Fläche [km ²]	Flächenanteil [%]
00110	Nadelwald ^a	74	3,57	28,1 %
00130	Laub- und Mischwald ^a	59	4,76	37,4 %
00200	Jungwuchs und Wiese ^b	79	4,39	34,5 %
00700	Verkehrs- und Siedlungsflächen ^c	17	0,01	0,1 %

Die drei dargestellten Merkmalsebenen Relief, Boden/Geologie und Landnutzung bzw. die resultierenden Relief-, pedo(geo)logischen- und Landnutzungseinheiten bildeten die Grundlage der HRU-Flächenausweisung durch Verschneidung. Hierzu konnten, wie auch von Flügel (1996b) dargelegt, Reliefeinheit und pedo(geo)logische Einheiten zunächst zu insgesamt sechs pedo(geo)logischen Reliefeinheiten zusammengefasst werden, die im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches aus insgesamt 102 Teilflächen bestehen (vgl. Tabelle 7-5).

Tabelle 7-5 Landnutzungseinheiten und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

Pedo(geo)logische Reliefeinheiten – Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach				
Code	Bezeichnung der pedologischen Reliefeinheit	Teilflächen	Fläche [km ²]	Flächenanteil [%]
11000	Böden ohne Staunässe/0° bis 5° Neigung	32	0,98	7,7 %
12000	Böden ohne Staunässe/5° bis 10° Neigung	20	1,76	13,8 %
13000	Böden ohne Staunässe/> 10° Neigung	10	0,37	2,9 %
21000	Böden mit Staunässe/0° bis 5° Neigung	6	8,58	67,4 %
22000	Böden mit Staunässe/5° bis 10° Neigung	29	1,04	8,1 %
23000	Böden mit Staunässe/> 10° Neigung	5	0,001	0,01 %

Tabelle 7-6 Vorläufige Hydrological Response Units (HRUs) und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach.

HRUs – Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach (vorläufig)		Teil- flächen	Fläche [km ²]	Flächen- anteil [%]
Code	Bezeichnung – Eigenschaften			
11110	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Nadelwald	35	0,3233	2,54 %
11130	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Laub- und Mischwald	44	0,5077	3,99 %
11200	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Jungwuchs und Wiese	30	0,1493	1,17 %
11700	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	3	0,0015	0,01 %
12110	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Nadelwald	39	0,3440	2,70 %
12130	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald	35	1,1242	8,83 %
12200	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	35	0,2832	2,22 %
12700	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	4	0,0044	0,03 %
13110	ohne Staunässe / > 10° Neigung / Nadelwald	7	0,0563	0,44 %
13130	ohne Staunässe / > 10° Neigung / Laub- und Mischwald	10	0,2617	2,06 %
13200	ohne Staunässe / > 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	16	0,0541	0,42 %
13700	ohne Staunässe / > 10° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	-	-	-
21110	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Nadelwald	60	2,5269	19,85 %
21130	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Laub- und Mischwald	53	2,4950	19,60 %
21200	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Jungwuchs und Wiese	56	3,5560	27,93 %
21700	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	12	0,0055	0,04 %
22110	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Nadelwald	37	0,3215	2,53 %
22130	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald	35	0,3683	2,89 %
22200	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	22	0,3448	2,71 %
22700	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	5	0,0018	0,01 %
23110	mit Staunässe / > 10° Neigung / Nadelwald	3	0,0004	0,00 %
23130	mit Staunässe / > 10° Neigung / Laub- und Mischwald	2	0,0003	0,00 %
23200	mit Staunässe / > 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	2	0,0005	0,00 %
23700	mit Staunässe / > 10° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	-	-	-
Gesamt		546	12,7307	100,00 %

Durch eine aufbauende Verschneidung der pedo(geo)logischen Reliefeinheiten mit den vier Landnutzungseinheiten resultieren insgesamt 24 *vorläufige* HRUs (vgl. Tabelle 7-6). Deren zunächst vorläufiger Charakter ergibt sich aus der Tatsache, dass, wie Tabelle 7-6 zeigt, eine Reihe von HRUs lediglich sehr geringe Flächenanteile am Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches aufweisen. Dies betrifft in erster Linie alle HRUs mit der Landnutzung „Verkehrs- und Siedlungsflächen“ sowie alle HRUs mit der spezifischen Kombination aus pedo(geo)logischer Eigenschaft „Böden ohne Staunässe“ und Reliefeigenschaft „> 10° Neigung“. Es bot sich an, wie auch Flügel (1996b) erläutert, eine Zusammenlegung dieser schwach besetzten Klassen durchzuführen. Hierzu wurden, wie in Tabelle 7-7 und 7-8 dargestellt, einerseits die sechs HRUs mit der Landnutzung „Verkehrs- und Siedlungsflächen“ in einer Einheit zusammengefasst, und andererseits die HRUs mit der Merkmalskombination „Böden ohne Staunässe“ und „> 10° Neigung“ in die entsprechenden HRUs mit der Merkmalskombination „Böden ohne Staunässe“ und „5° bis 10° Neigung“ integriert. Die Merkmalskombination „Böden mit Staunässe / > 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese“ besitzt innerhalb des Einzugsgebietes keinerlei Flächenanteil, so dass diese ersatzlos gestrichen werden konnten. Darüber hinaus erfolgte eine Flächenbereinigung, in der HRU-Teilflächen mit einer Größe unter 1000 m² in benachbarte Teilflächen eingegliedert wurden, wobei bei einer Nachbarschaftslage zu verschiedenen HRUs der jeweils übertragene Flächenanteil aus dem Anteil der Grenzlinie zur jeweiligen HRU abgeleitet wurde.

Tabelle 7-7 Zusammenlegung von 6 HRUs mit der Landnutzung „Verkehrs- und Siedlungsflächen“ in eine HRU.

Zusammenlegung der Verkehrs- und Siedlungsflächen					
HRUs mit Verkehrs- und Siedlungsflächen vor der Zusammenlegung			HRUs mit Verkehrs- und Siedlungsflächen nach der Zusammenlegung		
Code	Bezeichnung – Eigenschaften	Flächen- anteil [%]	Code (neu)	Bezeichnung – Eigenschaften (neu)	Flächen- anteil [%]
11700	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	0,012 %	00700	Verkehrs- und Siedlungsflächen	0,103 %
12700	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	0,035 %			
13700	ohne Staunässe / > 10° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	–			
21700	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	0,043 %			
22700	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	0,014 %			
23700	mit Staunässe / > 10° Neigung / Verkehrs- und Siedlungsflächen	–			

Tabelle 7-8 Eingliederung der HRUs mit der Merkmalskombination „Böden ohne Staunässe“ und „> 10° Neigung“ in die entsprechenden HRUs mit der Merkmalskombination „Böden ohne Staunässe“ und „5° bis 10° Neigung“.

Zusammenlegung staunässebeeinflusster Gebiete > 5° Neigung					
HRUs mit Staunässeinfluss und > 5° Neigung vor der Zusammenlegung			HRUs mit Staunässeinfluss und > 5° Neigung nach der Zusammenlegung		
Code	Bezeichnung – Eigenschaften	Flächen- anteil [%]	Code (neu)	Bezeichnung – Eigenschaften (neu)	Flächen- anteil [%]
22110	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Nadelwald	2,525 %	22110	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Nadelwald	2,53 %
23110	mit Staunässe / > 10° Neigung / Nadelwald	0,003 %			
22130	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald	2,893 %	22130	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald	2,89 %
23130	mit Staunässe / > 10° Neigung / Laub- und Mischwald	0,002 %			
22200	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	2,708 %	22200	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	2,71 %
23200	mit Staunässe / > 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	0,004 %			

Auf Basis der HRU-Zusammenlegungen und der Flächenbereinigung ergibt sich letztlich eine Aufteilung des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches in 15 HRUs, die sich aus insgesamt 438 Teilflächen zusammensetzen (vgl. Tabelle 7-9 und Karte 7-1). Innerhalb der Grenzen des Modellhanges Hölzerkopf (vgl. Tabelle 7-10 und Karte 7-2) bleiben zwei der ausgewiesenen HRUs unbesetzt, d. h. ohne Flächenanteil. Die übrigen 13 HRUs setzen sich im Modellhangbereich aus insgesamt 37 Teilflächen zusammen.

Tabelle 7-9 Endgültige Hydrological Response Units (HRUs) und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach.

HRUs – Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach (endgültig)		Teil- flächen	Fläche [km²]	Flächen- anteil [%]
Code	Bezeichnung – Eigenschaften			
11110	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Nadelwald	23	0,324	2,54 %
11130	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Laub- und Mischwald	35	0,506	3,98 %
11200	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Jungwuchs und Wiese	15	0,144	1,13 %
12110	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Nadelwald	32	0,344	2,70 %
12130	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald	34	1,134	8,91 %
12200	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	34	0,336	2,64 %
13110	ohne Staunässe / > 10° Neigung / Nadelwald	6	0,055	0,43 %
13130	ohne Staunässe / > 10° Neigung / Laub- und Mischwald	16	0,263	2,07 %
21110	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Nadelwald	56	2,541	19,96 %
21130	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Laub- und Mischwald	55	2,490	19,56 %
21200	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Jungwuchs und Wiese	46	3,559	27,95 %
22110	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Nadelwald	26	0,318	2,50 %
22130	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald	33	0,365	2,89 %
22200	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	23	0,345	2,71 %
00700	Verkehrs- und Siedlungsflächen	4	0,007	0,05 %
Gesamt		438	12,731	100,00 %

Tabelle 7-10 Endgültige Hydrological Response Units (HRUs) und deren Flächenanteile am Modellhang Hölzerkopf.

HRUs – Modellhang Hölzerkopf (endgültig)		Teil- flächen	Fläche [m²]	Flächenanteil [%]
Code	Bezeichnung – Eigenschaften			
11110	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Nadelwald	-	-	-
11130	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Laub- und Mischwald	1	22915	4,13 %
11200	ohne Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Jungwuchs und Wiese	2	5400	0,97 %
12110	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Nadelwald	4	16868	3,04 %
12130	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald	6	91555	16,50 %
12200	ohne Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	5	13205	2,38 %
13110	ohne Staunässe / > 10° Neigung / Nadelwald	1	19748	3,56 %
13130	ohne Staunässe / > 10° Neigung / Laub- und Mischwald	2	46155	8,32 %
21110	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Nadelwald	6	20463	3,69 %
21130	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Laub- und Mischwald	2	5000	0,90 %
21200	mit Staunässe / 0° bis 5° Neigung / Jungwuchs und Wiese	1	251801	45,39 %
22110	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Nadelwald	3	21578	3,89 %
22130	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald	2	30767	5,55 %
22200	mit Staunässe / 5° bis 10° Neigung / Jungwuchs und Wiese	2	9325	1,68 %
00700	Verkehrs- und Siedlungsflächen	-	-	-
Gesamt		37	554782	100,00 %

Wie die Gegenüberstellung der HRU-Flächenanteile an Einzugsgebiet und Modellhang verdeutlicht (vgl. Abbildung 7-6), nimmt zwar in beiden Gebieten die HRU 21200 (Böden mit Staunässeinfluss / 0° bis 5° Neigung / Jungwuchs und Wiese) den größten Flächenanteil ein, insgesamt bestehen jedoch Unterschiede bezüglich der HRU-Verteilung in beiden Gebieten. Dies betrifft neben der zuvor genannten Einheit, die am Modellhang 45 % der Fläche, im Einzugsgebiet jedoch lediglich 28 % der Fläche umfasst, vor allem die am Modellhang überrepräsentierte HRU 12130 (Böden ohne Staunässeinfluss / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald) und die beiden im Gesamteinzugsgebiet deutlich stärker vertretenen HRUs 21110 (Böden mit Staunässeinfluss / 0° bis 5° Neigung / Nadelwald) und 21130 (Böden mit Staunässeinfluss / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald). Der im Vergleich zum Modellhang hohe Anteil der beiden letztgenannten HRUs im Gesamteinzugsgebiet ist in erster Linie auf die ausgedehnten Windwurfflächen am Unterhang des Modellhanges zurückzuführen, die heute mit Jungwuchs und Dickung bestanden sind, und somit der am stärksten vertretenen Klasse 21200 (s. o.) angehören. Die räumliche Zuordnung dieser HRU zu den Unterhangbereichen verdeutlicht auch Abbildung 7-7, die den direkten Vergleich der HRU-Flächenanteile in den unterschiedlichen Hangzonen des Modellhanges Hölzerkopf³⁶ darstellt. Während am Unterhang HRU 21200 (Böden mit Staunässeinfluss / 0° bis 5° Neigung / Jungwuchs und Wiese) mit einem Anteil von 88 % dominiert, besitzt in den oberhalb gelegenen Hangbereichen – bei jedoch insgesamt ausgeglichenerer Verteilung – HRU 12130 (Böden ohne Staunässeinfluss / 5° bis 10° Neigung / Laub- und Mischwald) den höchsten Flächenanteil (28 %). Die beiden Karten 7-1 und 7-2 illustrieren die räumliche Verteilung der HRUs und ihrer Teilflächen im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf. Auch hier zeigt sich der für beide Gebiete herausragende Anteil jungwuchsbestandener Areale auf den staunassen Böden des Unterhanges (HRU 21200).

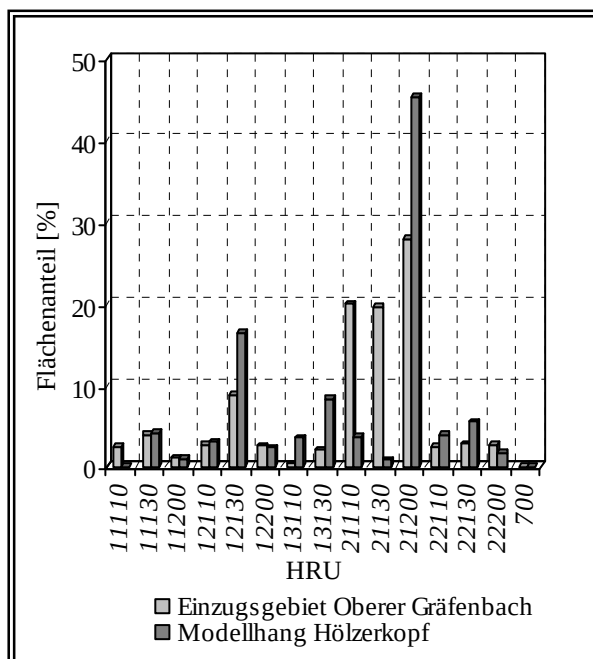


Abb. 7-6 Flächenanteile der Hydrological Response Units (HRUs) im Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach und im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.

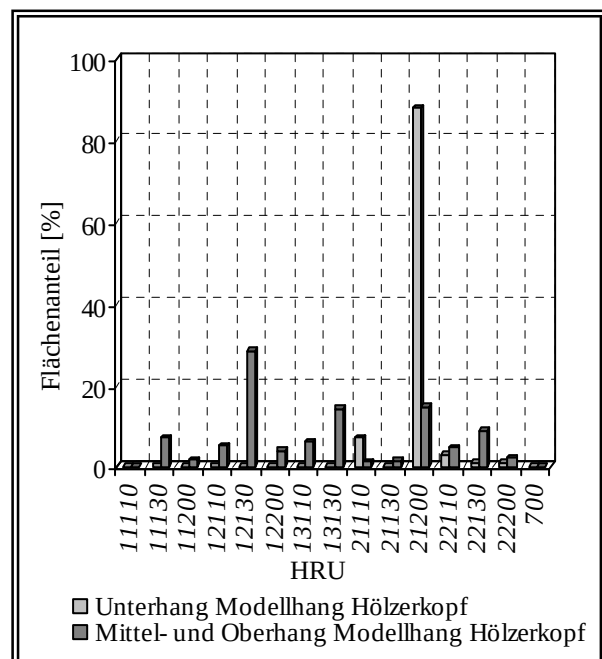
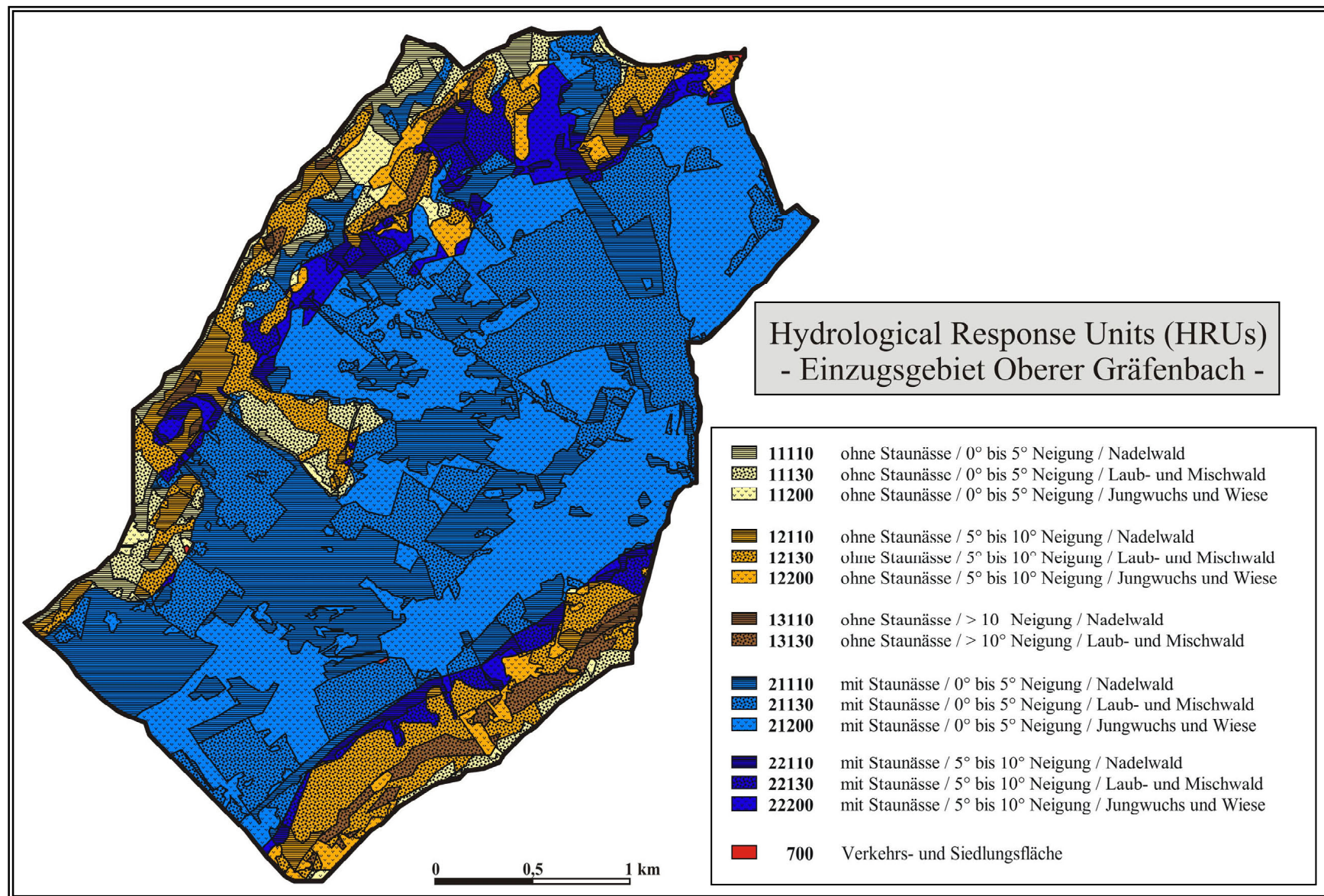
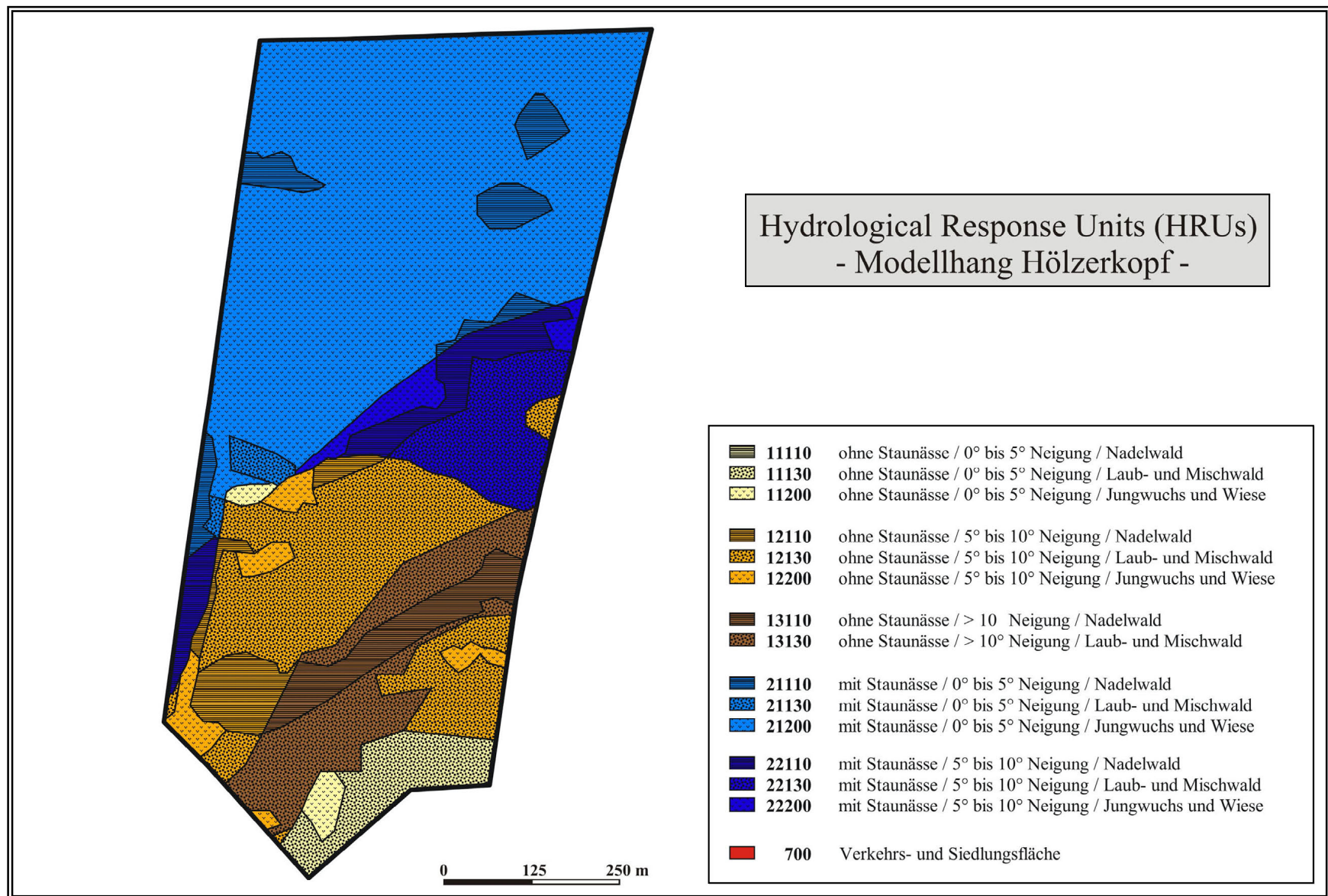


Abb. 7-7 Flächenanteile der Hydrological Response Units (HRUs) in unteren bzw. mittleren und oberen Hangbereichen des Modellhanges Hölzerkopf.

³⁶ Bezüglich der Aufteilung des Modellhanges in Teilbereiche vgl. Kapitel 6.2.2; diese Aufteilung kam auch im Rahmen der Kalibrierung des Modells PRMS zur Anwendung (vgl. Kapitel 7.3).



Karte 7-1 Verteilung der Hydrological Response Units (HRUs) im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.



Karte 7-2 Verteilung der Hydrological Response Units (HRUs) im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.

7.3 Hydrologische Modellierung mit dem Modell MMS/PRMS

7.3.1 Aufbau des Modells MMS/PRMS

Die Nachbildung der Wasserhaushaltsprozesse und die Berechnung verschiedener Landnutzungsszenarien im Rahmen der Untersuchung im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches erfolgte anhand des modular aufgebauten Einzugsgebietsmodells PRMS (Precipitation Runoff Modeling System). Das physikalisch basierte, konzeptionelle Einzugsgebietsmodell wurde in seiner ursprünglichen Form von Leavesley et al. (1983) am United States Geological Survey (USGS) entwickelt. Das für Unix-Systeme konzipierte Modell basiert auf numerischer Lösung partieller Differentialgleichungen, auf deren Basis die verschiedenen hydrologischen Prozesse nachgebildet werden. Die räumliche Diskretisierung des Untersuchungsgebietes erfolgt entweder anhand einer Aufteilung des untersuchten Gebietes in Teileinzugsgebiete oder durch Aufteilung in HRUs (Hydrological Response Units; vgl. Kapitel 7.1.2 und 7.2), für die jeweils ein eigener Parametersatz zugewiesen werden muss. Das Modell ist modular aufgebaut, wobei die einzelnen Module einen spezifischen Ausschnitt des hydrologischen Systems abbilden und, in Abhängigkeit von den Eigenschaften des nachzubildenden Real-systems, ggf. durch andere Module ersetzt werden können. Zu diesem Zweck stehen einerseits eine Reihe vorgefertigter Module zur Verfügung, andererseits besteht die Möglichkeit neu entwickelte Module zu integrieren (Leavesley et al. 1983). Den Rahmen der Modell-anwendung bildet das von Leavesley et al. (1996) entwickelte Programm MMS (Modular Modeling System), das die benutzerfreundliche Verwaltung von Eingabedaten, die Ausgabe der Simulationsergebnisse sowie die Kombination, Verwaltung und Parametrisierung der zur Verfügung stehenden hydrologischen Module ermöglicht. Darüber hinaus stehen Routinen zur Modellkalibrierung und eine Sensitivitätsanalyse zur Verfügung. Bei der Installation von MMS wird zugleich das Modell PRMS implementiert („MMS-Version von PRMS“), dessen Aufbau durch die zuvor angesprochene Integration weiterer hydrologischer Module bzw. durch einen gezielten Modulaustausch den Erfordernissen der Modell-anwendung angepasst werden kann.

Das Programm PRMS ermöglicht die Simulation hydrologischer Prozesse in den beiden zeitlichen Diskretisierungsstufen Tagesmodus und Ereignismodus. Während der Tagesmodus Tagesmittelwerte bzw. Tagessummen nachbildet, finden im Rahmen des Ereignismodus kürzere Zeitintervalle Berücksichtigung (minimales Zeitintervall: 1 Minute). Zur Nachbildung der hydrologischen Prozesse stellt PRMS jede Modellierungseinheit als Serie konzeptioneller, kaskadierender Speicher dar. Darauf aufbauend wird die Simulation vertikaler und lateraler Wasserflüsse ermöglicht, wobei die Prozessnachbildung teilweise direkt auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und teilweise auf physikalisch interpretierbaren, empirischen Zusammenhängen basiert. Damit einhergehend finden sich im Modell sowohl physikalische Parameter (Realparameter), die direkt im Gebiet gemessen oder anhand der naturräumlichen Ausstattung einer Modellierungseinheit abgeleitet werden können, als auch konzeptionelle Parameter (Speicher- und Abflusskoeffizienten), die anhand vorliegender hydrologischer Zeitreihen abgeschätzt und kalibriert werden müssen (Leavesley et al. 1983, Kennel 1998).

Wie Leavesley & Stannard (1995) konstatieren, ist das Modell PRMS in einer Vielzahl unterschiedlicher klimatischer Regionen erfolgreich zur Anwendung gekommen. Zur Lösung spezifischer Probleme wurden z. T. neue Module entwickelt und in das Modell integriert. Auf einen umfassenden Überblick über die Einsatzgebiete, die auch deutsche Mittelgebirge umfassen (z. B. Bongartz 2001, Lüllwitz 1993 und Michl 1999), wird an dieser Stelle verzichtet.

Zusammenfassende Darstellungen finden sich u. a. in Leavesley & Stannard (1990, 1995) und USGS (2006b).

Abbildung 7-8 zeigt den Aufbau des Modells PRMS. Im Folgenden wird die Nachbildung der hydrologischen Prozesse innerhalb des Modells kurz dargelegt.³⁷ Ausführliche Darstellungen finden sich bei Leavesley et al. (1983), Leavesley & Stannard (1995) und USGS (2006a). Eine Kurzdarstellung der eingesetzten Modellmodule sowie eine umfassende Auflistung der zugehörigen Modellparameter findet sich in Anhang XIII und XIV.

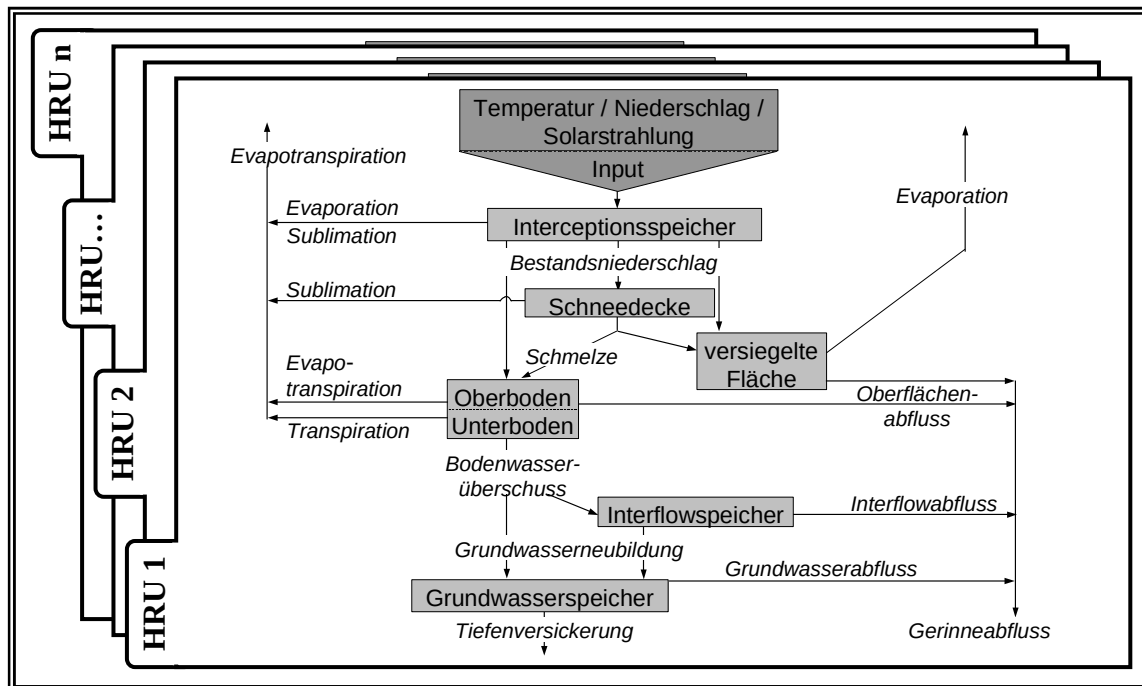


Abb. 7-8 Aufbau des Modells PRMS (verändert nach Leavesley et al. 1983).

7.3.1.1 Eingabedaten und deren HRU-spezifische Anpassung

Im Tagesmodus werden als Eingabedaten die tägliche Minimum- und Maximumtemperatur [°C oder °F] sowie die tägliche Niederschlagshöhe [inch] benötigt. Darüber hinaus können tägliche Globalstrahlung [ly] und potenzielle Verdunstung [inch] eingegeben werden, für deren Berechnung alternativ spezielle Module zur Verfügung stehen. Innerhalb des Modells erfolgt, in Abhängigkeit von Höhenlage und Reliefposition, eine Anpassung aller Eingabedaten an die einzelnen HRUs.

Die einfließenden täglichen Temperaturwerte (t_{min} ; t_{max}) werden zu diesem Zweck in zweifacher Weise angepasst (t_{min_corr} ; t_{max_corr}). Einerseits wird die Höhenlage der HRUs, bezugnehmend auf die Höhenlage der datenliefernden Klimastation (t_{sta_elev}), über einen monatspezifischen hypsometrischen Temperaturgradienten (t_{min_lapse} ; t_{max_lapse}) angepasst, andererseits können anhand zusätzlicher Korrekturglieder (t_{min_adj} ; t_{max_adj}) die Auswirkungen von Exposition und Neigung der HRUs berücksichtigt werden (Gleichung 7-1 und 7-2):

³⁷ Es werden vorwiegend die in dieser Arbeit zur Anwendung gekommenen Module erläutert.

$$tmax_corr = tmax \cdot tmax_lapse \cdot \left(hru_elev - \frac{tsta_elev}{1000} \right) - tmax_adj \quad (\text{Gleichung 7-1})$$

$$tmin_corr = tmin \cdot tmin_lapse \cdot \left(hru_elev - \frac{tsta_elev}{1000} \right) - tmin_adj \quad (\text{Gleichung 7-2})$$

mit: $tmax$ bzw. $tmin$ = eingegebene Max.- bzw. Min.-Temperatur [°C]
 $tmax_corr$ bzw. $tmin_corr$ = korrigierte Max.- bzw. Min.-Temp. [°C]
 $tmax_lapse$ bzw. $tmin_lapse$ = hypsometrischer Temperaturgradient [°C/1000ft]
 $tmax_adj$ bzw. $tmin_adj$ = Anpassungsfaktor für Exposition u. Neigung
 hru_elev = mittlere Höhe der HRU [ft]
 $tsta_elev$ = Höhe der temperaturgebenden Station [ft]

Auch die eingehenden Niederschläge (*precip*) können, in Abhängigkeit von ihrem Aggregatzustand, über einen monatlichen Korrekturfaktor (*rain_adj*; *snow_adj*) den Reliefbedingungen der einzelnen HRUs angepasst werden (Gleichung 7-3 und 7-4). Der Faktor ermöglicht zudem eine Korrektur systematischer Niederschlagsmessfehler (vgl. Richter 1995).

$$hru_rain = precip \cdot rain_adj \quad (\text{Gleichung 7-3})$$

$$hru_snow = precip \cdot snow_adj \quad (\text{Gleichung 7-4})$$

mit: hru_rain bzw. hru_snow = angepasster Freilandniederschlag [inch]
 $rain_adj$ = Anpassungsfaktor Regenniederschläge
 $snow_adj$ = Anpassungsfaktor Schneeniederschläge

Die Bestimmung der Zustandsform der Niederschläge (Schnee oder Regen bzw. Schneeanteil und Regenanteil in Mischereignissen) erfolgt, soweit dies nicht bereits in den Eingabedaten angegeben ist, in Abhängigkeit von den täglichen Minimum- und Maximumtemperaturen ($tmax$; $tmin$). Zu diesem Zweck wird ein Schwellenwert ($tmax_allsnow$) definiert. Bleibt die Maximumtemperatur kleiner oder gleich dem Schwellenwert, so wird der gesamte Niederschlag als Schnee angesehen; bleibt die tägliche Minimumtemperatur größer oder gleich dem Schwellenwert, so wird der gesamte Niederschlag als Regen angesehen. In den anderen Fällen handelt es sich um Mischereignisse, deren Aggregatzustände anteilig nach Gleichung 7-5 berechnet werden.

$$prmx = \left(\frac{tmax - tmax_allsnow}{tmin} \right) \cdot adjmix_rain \quad (\text{Gleichung 7-5})$$

mit: $prmx$ = Anteil des flüssigen Niederschlags
 $tmax$ = tägliche Maximumtemperatur [°C]
 $tmin$ = tägliche Minimumtemperatur [°C]
 $adjmix_rain$ = monatlicher Anpassungsfaktor

Die eingegebene Solarstrahlung kann ebenfalls der spezifischen Reliefposition der HRUs angepasst werden (*swrad*). Hierzu wird die gemessene Solarstrahlung (*solrad*; falls diese nicht vorliegt, kann sie anhand weiterer Algorithmen abgeschätzt werden), bei gegebener geographischer Breite des Untersuchungsgebietes, jeweils anhand der Kombination von Neigung und Exposition der HRU modifiziert (Gleichung 7-6).

$$swrad = \left(solrad \cdot \frac{radpl_postw}{horad} \right) / (radpl_cossl) \quad (\text{Gleichung 7-6})$$

mit: $swrad$ = HRU-spezifische Globalstrahlung [ly]
 $solrad$ = gemessene Globalstrahlung (Messstation) [Ly]
 $radpl_postw$ = potenzielle tägliche Globalstrahlung bei
gegebener Neigung und Exposition der HRU
 $horad$ = potenzielle tägliche Globalstrahlung (0° Neigung)
 $radpl_cossl$ = Cosinus der Neigung im Bereich der Messstation

7.3.1.2 Interzeption und Bestandesniederschlag

Bestandesniederschlag (*net_rain*; *net_snow*; *net_ppt*) und Interzeption werden in Abhängigkeit von der maximalen Interzeptionsspeicherkapazität des Bestandes (*srain_intcpt*; *wrain_intcpt*; *snow_intcpt*) und dem saisonabhängigen Deckungsgrad der Vegetation (*covden_sum*; *covden_win*) ausgehend vom Freilandniederschlag einer HRU (*hru_rain*; *hru_snow*; *hru_ppt*) berechnet. Für beide Komponenten finden jahreszeitliche Unterschiede Beachtung. Weiterhin wird der Aggregatzustand der Niederschläge berücksichtigt. Gleichung 7-7 zeigt die Berechnungsvorschrift für Regenniederschläge während der sommerlichen Vegetationszeit. Winterliche Bestandesniederschläge werden mit den entsprechenden winterlichen Werten der Vegetationsbedeckung (*covden_win*) und der Interzeptionsspeicherkapazität (*wrain_intcpt*) bei Regenereignissen ermittelt, für Schneeniederschläge findet die vegetationspezifische Interzeptionsspeicherkapazität für Schnee (*snow_intcpt*) Berücksichtigung.

$$\boxed{net_rain = (hru_rain \cdot (1 - covden_sum)) + (thrufall \cdot covden_sum)} \quad \text{(Gleichung 7-7)}$$

mit: *net_rain* = Bestandesniederschlag (Regen) [inch]
hru_rain = Freilandniederschlag (Regen) [inch]
covden_sum = Deckungsgrad der Vegetation im Sommer
thrufall = Überschuss aus dem Interzeptionsspeicher [inch] (s.u.)

mit:

$$\boxed{thrufall = hru_rain - (srain_intcp - intcp_stor)} \quad \text{(falls)} \quad \boxed{hru_rain > (srain_intcp - intcp_stor)} \quad \text{(Gleichung 7-8)}$$

$$\boxed{thrufall = 0} \quad \text{(falls)} \quad \boxed{hru_rain \leq (srain_intcp - intcp_stor)} \quad \text{(Gleichung 7-9)}$$

mit: *srain_intcp* = maximale Interzeptionskapazität Sommer (Regen)
intcp_stor = aktueller Inhalt des Interzeptionsspeichers

7.3.1.3 Auf- und Abbau von Schneedecken

PRMS beinhaltet ein umfangreiches Schneemodul, das den Schneedeckenauf- und -abbau nach einem Ansatz von Obled & Rosse (1977) auf Basis eines Energiebilanzmodells für jede HRU nachbildet. Die Schneedecke wird dabei als zweischichtiges System behandelt. Die obere Schneeschicht, die eine Mächtigkeit von 3 bis 5 cm umfasst, steht im Energieaustausch mit der bodennahen Luftschicht einerseits und der liegenden Schneeschicht andererseits. Die Berechnung der Energiebilanz im Bereich der Grenzschicht erfolgt zu diesem Zweck in 12-stündlichen Intervallen (Tag, Nacht) nach der folgenden, grundlegenden Gleichung 7-10:

$$\boxed{cal = swn + lwn + cecsub} \quad \text{(Gleichung 7-10)}$$

mit: *cal* = Energiebilanz an der Grenzschicht
 Schnee – bodennahe Luftschicht [cal]
swn = kurzwellige Strahlung [cal]
lwn = langwellige Strahlung [cal]
ceesub = sensible und latente Wärme [cal]

Die Glieder swn , lwn und $cecsb$ berechnen sich dabei wie folgt (Gleichung 7-11 bis 7-13):

$$swn = swrad \cdot (1 - albedo) \cdot rad_trncf \quad (\text{Gleichung 7-11})$$

mit: $swrad$ = HRU-spezifische Globalstrahlung [ly]
 $albedo$ = Albedo der Schneeoberfläche
 rad_trncf = Transmissionskoeffizient der Vegetationsschicht im Winter

$$lwn = (1 - covden_win) \cdot ((emis \cdot air) - sno) + (covden_win \cdot (air - sno)) \quad (\text{Gleichung 7-12})$$

mit: $covden_win$ = Deckungsgrad der Vegetation im Winter
 $emis$ = Emissivität der bodennahen Luftschicht
 air = Schwarzkörperstrahlung [cal]
 sno = langwellige Ausstrahlung der Schneeoberfläche [cal]

$$cecsb = cecncoeff \cdot temp \quad (\text{Gleichung 7-13})$$

mit: $cecncoeff$ = Konvektions-Kondensationsenergie-Koeffizient
 $temp$ = mittlere Temperatur des 12-Stunden-Zeitraumes [°C]

Schneesmelze findet statt, wenn die Temperatur der oberen Schneeschicht auf 0 °C ansteigt und zusätzlich die Energiebilanz an der Grenze Schneedecke – bodennahe Luftschicht (cal) positiv ist, d. h. ein Wärmefluss von oben nach unten erfolgt. Das geschmolzene Wasseräquivalent berechnet sich nach Gleichung 7-14, wobei ein Teil des Schmelzwassers zunächst in der Schneedecke zurückgehalten werden kann ($freeh2O$):

$$pmelt = \frac{cal}{203,2} \quad (\text{Gleichung 7-14})$$

mit: $pmelt$ = Schneesmelze [inch]
 203,2 = benötigte Kalorien zur Schmelze von 1 inch Wasseräquivalent

Der Energieaustausch zwischen oberer und unterer Schneeschicht ($qcond$) berechnet sich nach:

$$qcond = 2 \cdot pk_den \cdot cs \cdot \sqrt{\frac{keff}{pk_den \cdot cs} \cdot \frac{\Delta t}{\pi}} \cdot (ts - pk_temp) \quad (\text{Gleichung 7-15})$$

mit: pk_den = Schneedichte in Abhängigkeit vom Alter der Decke [g/cm³]
 cs = spezifische Wärme von Eis [cal · g⁻¹ · °C⁻¹]
 $keff$ = effektive Wärmeleitfähigkeit von Schnee [cal · cm⁻¹ · s⁻¹ · °C⁻¹]
 cs = spezifische Wärme von Eis [cal · g⁻¹ · °C⁻¹]
 Δt = Zeitintervall [s]
 ts = Temperatur der oberen Schneeschicht [°C]
 pk_temp = Temperatur der unteren Schneeschicht [°C]

Auf eine ausführlichere Darstellung der Nachbildung der Schneedynamik mit dem Modell PRMS soll an dieser Stelle verzichtet werden. Weitergehende Ausführungen finden sich u. a. in Leavesley et al. (1983), Leavesley & Stannard (1995), Melloh (1999) und Obled & Rosse (1977).

7.3.1.4 Potenzielle und aktuelle Evapotranspiration

Die Tageswerte der potenziellen Evapotranspiration können dem Modell entweder als extern erfasste Eingabedaten zur Verfügung gestellt oder programmintern anhand mehrerer Ansätze berechnet werden. Hierzu stehen u. a. der Ansatz nach Hamon (1961) und der hier zum Einsatz gekommene Ansatz auf Basis eines modifizierten Jensen & Haise-Verfahrens (Jensen & Haise 1963, Jensen et al. 1970) zur Verfügung. Letztgenanntes Verfahren beruht auf einer Abschätzung der täglichen potenziellen Evapotranspiration durch Temperatur und Solarstrahlung sowie zwei gebietsspezifischen Koeffizienten, die sich in erster Annäherung aus der Höhenlage des Untersuchungsgebietes, langjährigen Temperaturkennwerten und dem Vegetationsbestand abschätzen lassen (Gleichung 7-16). Weitergehende Darstellungen, in denen auch die Verfahren der Koeffizienten-Abschätzung umfassend erörtert sind, finden sich in Leavesley et al. (1983), Leavesley & Stannard (1995) und USGS (2006a).

$$potet = jh_coef \cdot (tavgf - jh_coef_hru) \cdot rin \quad (\text{Gleichung 7-16})$$

mit: *potet* = potenzielle Evapotranspiration einer HRU [inch]
jh_coef = monatlicher Temperaturkoeffizient
tavgf = mittlere tägliche Lufttemperatur der HRU [°F]
jh_coef_hru = HRU-spezifischer Temperaturkoeffizient
rin = Verdunstungsäquivalent der täglichen Globalstrahlung [inch]

Die aktuelle Evapotranspiration (*hru_actet*) wird in Abhängigkeit von der potenziellen Evapotranspiration (*potet*) berechnet. Hierzu werden Evaporation bzw. Transpiration aus den einzelnen Speichergliedern in der folgenden Reihenfolge berücksichtigt, bis maximal die gesamte potenzielle Evapotranspiration gedeckt ist:

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. Interzeptionsspeicher | ⇒ Evaporation und Sublimation (<i>intcp_evap</i>) |
| 2. Rückhalt versiegelter Flächen | ⇒ Evaporation (<i>imperv_evap</i>) |
| 3. Schneedecke | ⇒ Sublimation (<i>snow_evap</i>) |
| 4. oberes Bodenkompartment | ⇒ Evaporation und ggf. Transpiration (<i>perv_actet</i>) |
| 5. unteres Bodenkompartment | ⇒ ggf. Transpiration (<i>perv_actet</i>) |

Die Quantifizierung der aktuellen Evapotranspiration aus dem jeweiligen Bodenkompartment (s. Kapitel 7.3.1.5) erfolgt dabei, wie in Abbildung 7-9 dargestellt, als Funktion aus Bodenart und aktueller Wassersättigung des Kompartimentes in Anlehnung an Zahner (1967).

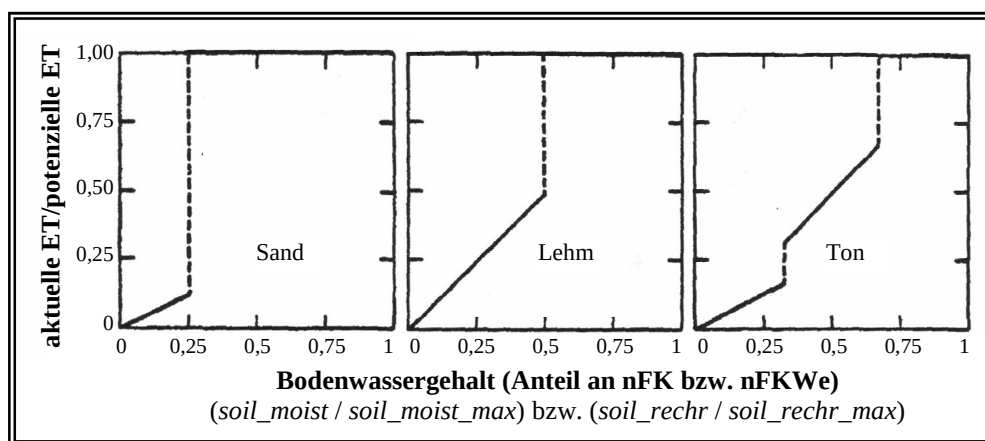


Abb. 7-9 Verhältnis der aktuellen ET zur potenziellen ET für ein Bodenkompartment in Abhängigkeit von der Wassersättigung des Bodens und der Bodenart (nach Leavesley et al. 1983).

7.3.1.5 Infiltration, Bodenspeicher und Abfluss

Der Boden stellt das entscheidende Transformationsglied bei der Bildung der Abflusskomponenten dar. Im Modell MMS/PRMS wird der Boden als zweigliedriges System aus oberer und unterer Bodenschicht nachgebildet. In Abhängigkeit von Bodenart, aktueller Bodenfeuchte (*soil_moist*; *soil_rechr*) und nutzbarer Feldkapazität (*soil_moist_max*; *soil_rechr_max*) wird der infiltrierte Niederschlag in die konzeptionellen Speicherglieder „Interflowspeicher“ und „Grundwasserspeicher“ geleitet (*soil_to_ssr*; *soil_to_gw*), aus denen die Abflusskomponenten Interflow (*ssres_flow*) und Grundwasserabfluss (*gwres_flow*) zum Vorfluter abgeführt werden. Zudem werden Evapotranspiration (*perv_actet*; s.o.) und ein evtl. unterirdischer Grundwasserabstrom aus dem Einzugsgebiet (*gwres_sink*) als Systemoutput berücksichtigt. Der Abfluss aus den einzelnen Speichergliedern berechnet sich jeweils auf Basis eines oder mehrerer Speicher- bzw. Abflusskoeffizienten (vgl. Gleichung 7-17 bis 7-24) unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung).

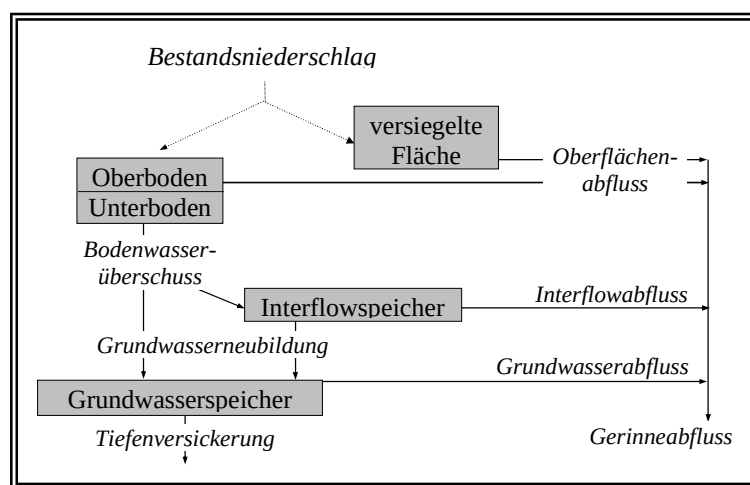


Abb. 7-10 Der Boden als Transformationsglied im Rahmen der Abflussbildung (verändert nach Leavesley et al. 1983).

7.3.1.5.1 Oberflächenabfluss und Infiltration

Oberflächenabfluss und Infiltration für wasserdurchlässige Flächen können in PRMS – in Abhängigkeit von der gewählten zeitlichen Auflösung – auf zweierlei Art simuliert werden. Im Tagesmodus liegt das Konzept der variablen Sättigungsflächen zugrunde (*variable-source-area* bzw. *contributing area*; Dickinson & Whiteley 1970, Hewlett & Nutter 1970); bei der ereignisbezogenen Betrachtung wird der Oberflächenabfluss aus dem Infiltrationsüberschuss abgeleitet. Letztere Möglichkeit der Nachbildung eignet sich daher in erster Linie für höchstintensive Niederschlagsereignisse.

Das im Tagesmodus zur Anwendung kommende Konzept der variablen Sättigungsflächen kann anhand eines linearen oder eines nicht-linearen Ansatzes (Gleichung 7-19) umgesetzt werden. In beiden Fällen ergibt sich der Oberflächenabfluss der wasserdurchlässigen Flächen einer HRU (*srp*) aus dem Produkt von beitragendem Flächenanteil (*ca_percent*) und Bestandesniederschlag (*net_rain*) (Gleichung 7-17). Die Infiltrationshöhe wird in der Folge, wie in Gleichung 7-18 dargestellt, aus der Differenz von Bestandesniederschlag (*net_rain*) und Oberflächenabfluss (*srp*) berechnet.

$$srp = ca_percent \cdot net_rain \quad (\text{Gleichung 7-17})$$

mit: *srp* = Oberflächenabfluss wasserdurchlässiger Bereiche [inch]
ca_percent = Anteil der Sättigungsflächen einer HRU
net_rain = Bestandesniederschlag (Regen) [inch]

$$infil = net_rain - srp \quad (\text{Gleichung 7-18})$$

mit: *infil* = Infiltrationshöhe [inch]
net_rain = Bestandesniederschlag (Regen) [inch]
srp = Oberflächenabfluss wasserdurchlässiger Bereiche [inch]

Der bei der Modellierung zur Anwendung gekommene nicht-lineare Ansatz zur Berechnung der Sättigungsflächen (Gleichung 7-19) beinhaltet einen linearen (*smidex_coef*) und einen exponentiellen Koeffizienten (*smidex_exp*), die auf Basis beobachteter Abflussdaten und Bodenfeuchtedaten abgeschätzt und im Anschluss in die Modellkalibrierung miteinbezogen werden müssen. Der weitere Faktor *smidex* berechnet sich anhand der Bodenfeuchte der HRU (*soil_moist*) und dem Bestandesniederschlag (*net_rain*) (Gleichung 7-20).

$$ca_percent = smidex_coef \cdot 10^{(smidex_exp \cdot smidex)} \quad (\text{Gleichung 7-19})$$

mit: *ca_percent* = Anteil der Sättigungsflächen einer HRU
smidex_coef = linearer Koeffizient
smidex_exp = exponentieller Koeffizient

$$smidex = soil_moist \cdot \left(\frac{net_rain}{2} \right) \quad (\text{Gleichung 7-20})$$

mit: *smidex* = Koeffizient zur Berechnung des Sättigungsflächenanteils
soil_moist = aktueller Bodenwassergehalt [inch]
net_rain = Bestandesniederschlag (Regen) [inch]

Bezüglich des optionalen, linearen Ansatzes zur Berechnung der Sättigungsflächen im Tagesmodus von PRMS sowie bezüglich des auf Infiltrationsüberschuss basierenden Ansatzes, der ausschließlich im Ereignismodus von PRMS zur Anwendung kommt (die Berechnung der Infiltrationskapazität beruht auf einem modifizierten Ansatz nach Green & Ampt (1911)), wird auf Leavesley et al. (1983), Leavesley & Stannard (1995) und USGS (2006a) verwiesen.

7.3.1.5.2 Interflow und Grundwasserabfluss

Der Wassergehalt der Bodenzone, der die nutzbare Feldkapazität (nFK) übersteigt, wird bis zu einem definierten Anteil (*soil2gw_max*) zunächst dem Grundwasserspeicher zugeführt (*soil_to_gw*). Der darüber hinausgehende Bodenwasserüberschuss fließt dem konzeptionellen Speicherglied Interflowspeicher zu (*soil_to_ssr; ssres_in*), aus dem in der Folge der Interflowabfluss zum Vorfluter (*ssres_flow*) und ein Abfluss zum Grundwasserspeicher (*ssr_to_gw*) nachgebildet werden. Ein Interflowspeicher kann dabei mehreren HRUs zugeordnet sein, d. h. von den Bodenspeichern mehrerer HRUs Zufluss erhalten. Daraus folgt, dass die Anzahl der Interflowspeicher grundsätzlich kleiner oder gleich der Anzahl der HRUs

ist. Der Interflowabfluss zum Vorfluter ($ssres_flow$) berechnet sich unter Berücksichtigung der Massenerhaltung nach folgendem konzeptionellen Ansatz (Gleichung 7-21):

$$ssres_flow = (ssrcoef_lin \cdot ssres_stor) + (ssrcoef_sq \cdot ssres_stor^2) \quad (\text{Gleichung 7-21})$$

mit: $ssres_flow$ = Interflowabfluss zum Vorfluter [inch]
 $ssrcoef_lin$ = linearer Faktor zur Berechnung des Interflowabflusses
 $ssrcoef_sq$ = exponentieller Faktor zur Berechnung des Interflowabflusses
 $ssres_stor$ = Speicherinhalt des Interflowspeichers [inch]

Eine erste Abschätzung der beiden Koeffizienten erfolgt, wie bei Leavesley et al. (1983) und USGS (2006) beschrieben, auf Basis beobachteter Abflüsse. Beide Parameter werden in der Folge in die Modellkalibrierung miteinbezogen. Die Grundwasserneubildung aus dem Interflowspeicher berechnet sich nach Gleichung 7-22, auch hier werden die Speicherkoeffizienten in die Modellkalibrierung mit einbezogen.

$$ssr_to_gw = ssr2gw_rate \cdot \left(\frac{ssres_stor}{ssrmax_coef} \right)^{ssr2gw_exp} \quad (\text{Gleichung 7-22})$$

mit: $ssr2gw_rate$ = } Speicherkoeffizienten für die Über-
 $ssr2gw_exp$ = } führung von Wasser aus dem Interflow-
 $ssrmax_coef$ = } speicher in den Grundwasserspeicher
 $ssres_stor$ = Speicherinhalt des Interflowspeichers [inch]

Ähnlich dem Interflowspeicher kann ein Grundwasserspeicher Zufluss aus dem Bodenspeicher verschiedener HRUs erhalten ($soil_to_gw$), ebenso kann ein Zufluss aus mehreren Interflowspeichern stattfinden (ssr_to_gw). Der Abfluss aus einem Grundwasserspeicher umfasst einerseits den Grundwasserzufluss zum Vorfluter ($gwres_flow$) und andererseits einen Abstrom in Gebiete außerhalb des Interesses des Modellanwenders ($gwres_sink$). Letzterer ist als unterirdischer Abstrom aus dem Einzugsgebiet anzusehen. Der Grundwasserabfluss zum Vorfluter ($gwres_flow$) berechnet sich nach Gleichung 7-23, der eventuelle unterirdische Abstrom aus dem Gebiet ($gwres_sink$) nach Gleichung 7-24. Auch in diesem Fall sind die Koeffizienten auf Grundlage beobachteter Daten abzuschätzen (vgl. Leavesley et al. 1983; USGS 2006) und in die Modellkalibrierung mit einzubeziehen.

$$gwres_flow = gwflow_coef \cdot gwres_stor \quad (\text{Gleichung 7-23})$$

mit: $gwres_flow$ = Grundwasserabstrom zum Vorfluter [inch]
 $gwflow_coef$ = Koeffizient für den Grundwasserabfluss zum Vorfluter [inch]
 $gwres_stor$ = Speicherinhalt des Grundwasserspeichers [inch]

$$gwres_sink = gwsink_coef \cdot gwres_stor \quad (\text{Gleichung 7-24})$$

mit: $gwres_sink$ = unterirdischer Grundwasserabstrom aus dem Gebiet [inch]
 $gwsink_coef$ = Koeffizient für den unterirdischen Gebietsabfluss
 $gwres_stor$ = Speicherinhalt des Grundwasserspeichers [inch]

7.3.1.5.3 Gesamtabfluss aus den HRUs und dem Gesamteinzugsgebiet

Bei der Modellierung des Wasserhaushaltes des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches kam die Standardversion von PRMS (MMS-Version) zum Einsatz, die zwei Methoden zur Ermittlung des Gesamtabflusses aus dem Gebiet vorsieht. Im Tagesmodus wird der Gesamtabfluss aus dem Einzugsgebiet als flächengewichtetes Mittel der Abflüsse der einzelnen HRUs angesehen, d. h. es wird davon ausgegangen, dass alle HRUs einen mehr oder weniger direkten Anschluss an den Gebietsauslass besitzen. Der Gesamtabfluss (*basin_stflow*; *basin_cfs*) berechnet sich demzufolge wie in Abbildung 7-11 dargestellt.

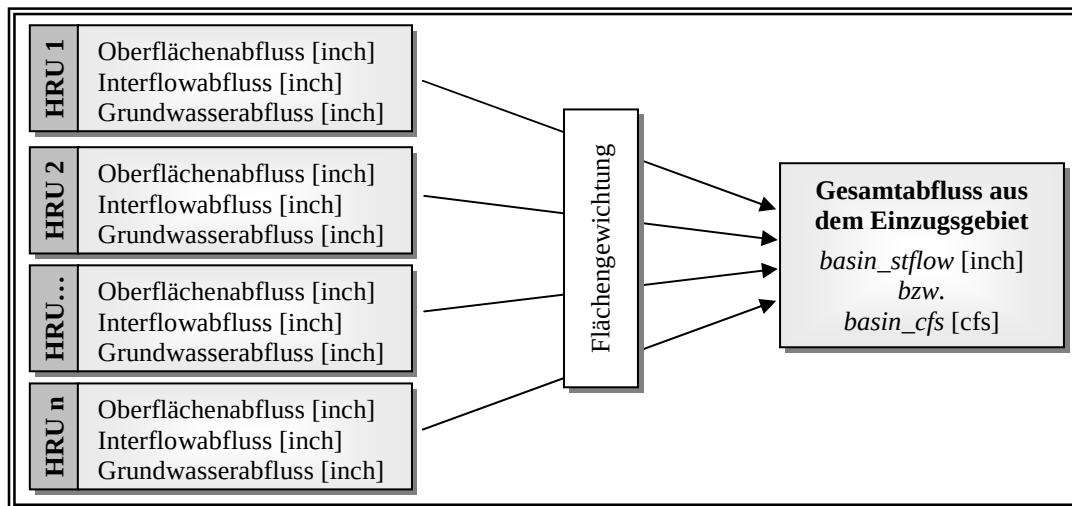


Abb. 7-11 Ermittlung des Gesamtabflusses aus dem untersuchten Gebiet als flächengewichtetes Mittel der Abflüsse der einzelnen HRUs.

Wie auf den ersten Blick ersichtlich ist, kann dieser Ansatz nur dann gute Ergebnisse erbringen, wenn das Einzugsgebiet einerseits relativ klein ist, d. h. keine langen Fließzeiten im Vorfluter und seinen Zuflüssen existieren, und andererseits der überwiegende Anteil der HRUs bzw. der HRU-Teilflächen gut durch ein Gewässernetz erschlossen ist. Darüber hinaus darf die Zeitschrittweite im Modell nicht zu klein gewählt werden, eine Berechnung auf Tagesbasis erscheint bei Erfüllung der beiden zuvor genannten Kriterien geeignet. Der Vorteil des genannten Ansatzes ist die gute Handhabbarkeit des Modells, die darauf beruht, dass nicht die HRU-Teilflächen, sondern lediglich die gesamten HRU-Klassen im Modell berücksichtigt werden müssen. Der Rechen- und Parametrisierungsaufwand wird minimiert.

Ein weiterer Ansatz, der im Ereignismodus des Originalmodells von PRMS zur Verfügung steht, umfasst darüber hinaus ein Wasserlaufmodell (channel flow routing), das der Nachbildung der Vorfluterprozesse dient. Für dessen Anwendung ist das Einzugsgebiet jedoch statt in prozesshydrologisch abgeleitete HRUs (bzw. HRU-Teilflächen) in Teileinzugsgebiete (in PRMS als flow-planes bezeichnet) zu untergliedern, die alle direkten Anschluss an den Vorfluter besitzen müssen (vgl. Abbildung 7-12).

Darüber hinausgehend wurden weitergehende Konzepte zur Optimierung des Originalmodells PRMS entworfen. Unter anderem hat Staudenrausch (2000) ein erweitertes, topologisches HRU-Konzept (topologisch verknüpfte HRUs)

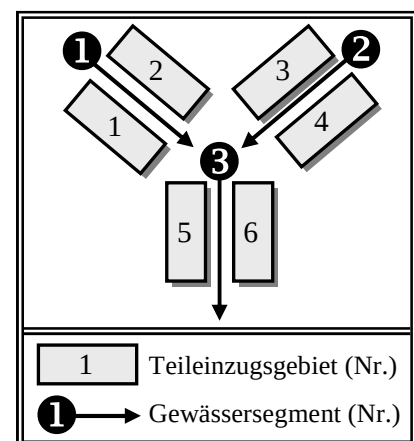
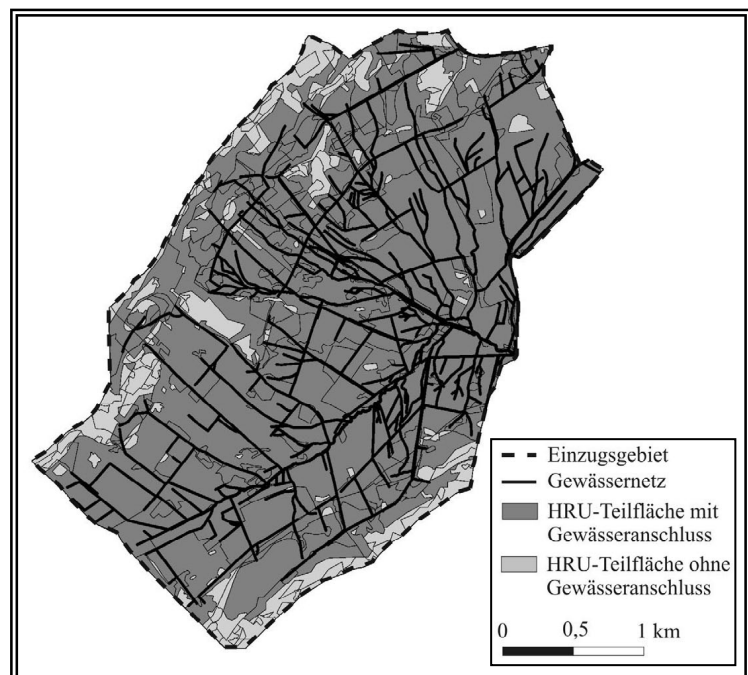


Abb. 7-12 Gliederung des Gebietes in Teileinzugsgebiete in PRMS (nach Leavesley et al. 1983).

entwickelt, mit dem einerseits eine Übergabe von Abflusskomponenten von einer HRU-Teilfläche zur nächsten möglich ist (laterale Verknüpfung der Teilflächen) und andererseits ein Gewässernetzanschluss der einzelnen Teilflächen nachgebildet werden kann. Wie Staudenrausch (2000) feststellt, ist erst durch die Trennung von lateraler Abflussmodifikation am Hang und Abflussmodifikation im Gerinne eine Übertragbarkeit der HRU-Klassen auf andere Gebiete gegeben. Wie er weiter ausführt, kann durch das Konzept der topologisch verknüpften HRUs zudem (jedoch in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße) die Güte der Simulationsergebnisse verbessert werden.

7.3.2 Wahl der Modellstruktur für die Anwendung im Untersuchungsgebiet

Die Nachbildung des Abflussgeschehens im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches erfolgte im Tagesmodus von PRMS, d. h. auf Basis von Tageswerten. Damit einhergehend wurde der klassischen HRU-Ansatz zur Durchführung der Modellrechnungen gewählt, der, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, nicht die HRU-Teilflächen als Berechnungsgrundlage heranzieht, sondern die HRU-Klassen in ihrer Gesamtheit. Hierdurch entfiel zwar die Möglichkeit einer Nachbildung der Übergabe lateraler Abflüsse von einer Fläche zur nächsten, jedoch war der Rechen- und Parametrisierungsaufwand erheblich herabgesetzt. Statt 438 HRU-Teilflächen mussten lediglich die 15 in Kapitel 7.2 ausgewiesenen HRUs Berücksichtigung finden. Bei der mit 12,73 km² vergleichsweise geringen Fläche des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches und der mit 79 lfdm/ha hohen Dichte des Gewässernetzes schien der gewählte Ansatz, d. h. die Kombination von Tagesmodus und klassischem HRU-Konzept, im Hinblick auf das Verhältnis von Parametrisierungsaufwand zu Qualität der Simulationsergebnisse geeignet. Insgesamt sind im Gebiet 235 der 438 HRU-Teilflächen direkt an das Gewässernetz angeschlossen. Da sich, wie Karte 7-3 verdeutlicht, das Fehlen eines unmittelbaren Anschlusses in erster Linie auf kleine, in den oberen Hangbereichen gelegene Teilflächen beschränkt, beträgt der Flächenanteil direkt angeschlossener Flächen 87,2 %.



Karte 7-3 Anschluss der HRU-Teilflächen an das Gewässernetz im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

Zur Nachbildung des Interflows wurden insgesamt fünf Interflowspeicher ausgewiesen, die in Abhängigkeit von Relief und Böden den HRUs zugeordnet wurden. Für jeweils mehrere HRUs wurde somit von einem identischen Verhalten bezüglich des Interflows ausgegangen:

Interflowspeicher 1:	HRU 11110 HRU 11130 HRU 11200	}	HRUs mit staunässefreien Böden und Hangneigung 0° bis 5°
Interflowspeicher 2:	HRU 12110 HRU 12130 HRU 12200 HRU 13110 HRU 13130	}	HRUs mit staunässefreien Böden und Hangneigung > 5°
Interflowspeicher 3:	HRU 21110 HRU 21130 HRU 21200	}	HRUs mit staunassen Böden und Hangneigung 0° bis 5°
Interflowspeicher 4:	HRU 22110 HRU 22130 HRU 22200	}	HRUs mit staunassen Böden und Hangneigung > 5°
Interflowspeicher 5:	HRU 700	}	Verkehrs- und Siedlungsflächen (ohne Infiltrationskapazität)

Interflowspeicher 5, der HRU 700 (Verkehrs- und Siedlungsflächen) anhängig ist, erhält mangels Infiltrationsvermögen der Flächen keinen Zufluss und bleibt stets ohne Füllung. Die Ausweisung erfolgte lediglich aus berechnungstechnischen Gründen.

Darüber hinaus wurde zur Simulation der Grundwasserströme ein Grundwasserspeicher ausgewiesen, an den alle HRUs mit staunässefreien Böden bzw. deren zugehörige Interflowspeicher angeschlossen sind. Für die staunässebeeinflussten HRUs wurde davon ausgegangen, dass aufgrund der Tonschiefer im Untergrund kein nennenswertes Grundwasservorkommen existiert (vgl. Kapitel 3.2 und 3.6), so dass diese HRUs keinem Grundwasserreservoir tributär sind.

7.3.3 Parametrisierung des Modells MMS/PRMS

Wie bereits in Kapitel 7.3.1 dargestellt, fließen in PRMS einerseits Parameter ein, die einen direkten physikalischen Bezug aufweisen (physikalische Parameter oder Realparameter), und andererseits Parameter, die, entsprechend dem konzeptionellen Modellansatz, durch einen abstrakteren Charakter gekennzeichnet sind (konzeptionelle Parameter). Während die Ausprägung physikalischer Parameter direkt gemessen oder aus der naturräumlichen Gebietsausstattung abgeleitet werden kann, müssen die konzeptionellen Parameter, bei denen es sich in erster Linie um Speicherkoeffizienten handelt, zunächst abgeschätzt und anschließend im Rahmen der Modellkalibrierung optimiert werden (vgl. Leavesley et al. 1983, USGS 2006). Auf eine Einbeziehung der physikalisch basierten Parameter in die Kalibrierung wird im Regelfall verzichtet, da, wie Beven (1989) feststellt, deren physikalische Bedeutung hierdurch verloren ginge.

Eine vollständige Auflistung der Modellparameter, ihrer ermittelten Ausprägungen und der jeweils zugrunde liegenden Methodik der Ermittlung findet sich in Anhang XIV. Im Folgenden wird exemplarisch die Ableitung einiger Parameterwerte kurz dargestellt.

7.3.3.1 Parameter zur Anpassung der Eingabedaten

Eine HRU-spezifische Anpassung der Temperatur-Eingabedaten erfolgt in PRMS auf Basis eines hypsometrischen Temperaturgradienten (*tmin_lapse*; *tmax_lapse*) sowie eines Anpassungsfaktors für Exposition und Neigung der HRU (*tmin_adj*; *tmax_adj*) (Gleichung 7-1 und 7-2). Während letztgenannter Anpassungsfaktor im Rahmen der Modellanwendung keine Beachtung fand, wurde die Höhenlage der HRUs anhand der in Tabelle 7-11 aufgeführten Korrekturfaktoren nach Hendl (1995) berücksichtigt.

Tabelle 7-11 Vertikaler Temperaturgradient für das Rheinische Schiefergebirge (nach Hendl 1995).

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
vertikaler Temperaturgradient [K/100 m]	0,56	0,59	0,65	0,65	0,64	0,64	0,63	0,57	0,50	0,46	0,59	0,57	0,59

Niederschlagswerte können ebenfalls anhand zweier Parameter (*rain_adj*, *snow_adj*) an die speziellen Verhältnisse innerhalb der HRUs angepasst werden (Gleichung 7-3 und 7-4). Beide Parameter wurden innerhalb der Modellanwendung im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers herangezogen. Für Regenniederschläge (*rain_adj*) kamen dabei die in Tabelle 7-12 aufgeführten monatlichen Korrekturfaktoren für mäßig geschützte Lagen nach Richter (1995) zur Anwendung; für Schneeniederschläge (*snow_adj*) wurde in Anlehnung an Maniak (1997), Richter (1995) und Sokollek et al. (1989) einheitlich für alle Monate von einem mittleren Korrekturbedarf von 20 % ausgegangen.

Tabelle 7-12 Monatlicher Korrekturfaktor für Regenniederschläge im Bereich des Soonwaldes – mäßig geschützte Lagen (nach Richter 1995).

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Korrekturfaktor für Regenniederschläge	1,152	1,158	1,140	1,124	1,098	1,083	1,086	1,086	1,096	1,102	1,120	1,132	1,111

7.3.3.2 Landnutzungsparameter

Von entscheidender Bedeutung für den Wasserhaushalt eines Gebietes ist u. a. der Anteil versiegelter bzw. wasserundurchlässiger Flächen. Diese können in PRMS einerseits als eigenständige HRU einfließen oder darüber hinausgehend flächenanteilig in den übrigen HRUs Berücksichtigung finden (*hru_percent_imperv*). Wie schon im Rahmen der HRU-Ausweisung in Kapitel 7.2 dargelegt, wurden linienhafte, nur eingeschränkt wasserdurchlässige Elemente, zu denen öffentliche Straßen, Forstwege, Drainagegräben und – jedoch mit Abstrichen – Rückegassen zählen, nicht der eigenständigen HRU „Verkehrs- und Siedlungsflächen“ zuge schlagen, sondern flossen über den Anteil wasserundurchlässiger Flächen in die übrigen HRUs ein. Tabelle 7-13 und Tabelle 7-14 verdeutlichen die HRU-spezifischen Flächenanteile der unterschiedlichen Elemente im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und am Modellhang Hölzerkopf.

Da das Infiltrationsvermögen der Rückegassen, auch im Bereich der Fahrspuren (vgl. Kapitel 3.3.4), nur z. T. eingeschränkt ist, wurden diese letztlich nicht als vollständig wasserunwegsam berücksichtigt; wenngleich, wie im Untersuchungsgebiet häufig beobachtet, in diesen Bereichen bereits bei weniger starken Niederschlagsereignissen Oberflächenabfluss auftritt. Unter ausschließlicher Berücksichtigung des Wegenetzes (öffentliche Straßen, Forstwege) und des Gewässernetzes ergibt sich ein mittlerer Anteil von Flächen mit sehr stark eingeschränkter Infiltrationskapazität von 2,9 % im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf und 3,16 % im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. Diese Werte variieren jedoch, wie Tabelle 7-13 und 7-14 zeigen, ganz erheblich zwischen den unterschiedlichen HRUs. So weist HRU 11110 (Böden ohne Staunässe / 0° bis 5° Hangneigung / Nadelwald) bezogen auf das Gesamtgebiet mit 5,15 % den größten und HRU 12130 (Böden ohne Staunässe / 5° bis 10° Hangneigung / Laub- und Mischwald) mit 1,69 % den geringsten Anteil kaum wasserdurchlässiger Flächen auf. Diese Flächenanteile flossen entsprechend ihrer Ausprägung innerhalb der einzelnen HRUs in die Parametrisierung des Modells PRMS ein.

Tabelle 7-13 Anteil der Flächen mit eingeschränkter bzw. stark eingeschränkter Infiltrationskapazität im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.

- a) linienhafte Elemente, die nicht in HRU 700 (Verkehrs- und Siedlungsflächen) berücksichtigt wurden
- b) mittlere Breite öffentlicher Straßen: 6,5 m (eigene Vermessung im Gelände);
mittlere Breite Forstwege: 4 m (nach DVWK 1999b und eigener Vermessung im Gelände)
- c) mittlere Breite Drainagegräben: 1 m; mittlere Breite Gräfenbach: 5 m (eigene Vermessung)
- d) für Rückegassen wurde im Mittel von einem stark verdichteten Anteil von 1 m der Gesamtbreite ausgegangen (Fahrspuren); bezüglich der Flächenerschließung durch Rückegassen vgl. Kapitel 3.5.2

HRU		Flächen mit eingeschränkter Infiltrationskapazität am Modellhang Hölzerkopf ^a							
		Infiltrationskapazität stark eingeschränkt						Infiltrationskapazität eingeschränkt	
		Fläche [m²]			Flächenanteil [%]			Fläche [m²]	Flächenanteil [%]
Code	Fläche [m²]	Wege-netz ^b	Gewässer-netz ^c	Gesamt	Wege-netz ^b	Gewässer-netz ^c	Gesamt	Rücke-gassen ^d	Rücke-gassen ^d
11110	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11130	22915	0	0	0	0,00	0,00	0,00	344	1,50
11200	5400	0	0	0	0,00	0,00	0,00	81	1,50
12110	16868	41	9	50	0,24	0,05	0,29	759	4,50
12130	91555	1273	110	1383	1,39	0,12	1,51	1373	1,50
12200	13205	677	93	770	5,13	0,70	5,83	198	1,50
13110	19748	737	0	737	3,73	0,00	3,73	889	4,50
13130	46155	1586	4	1590	3,44	0,01	3,45	692	1,50
21110	20463	438	490	928	2,14	2,39	4,53	921	4,50
21130	5000	0	0	0	0,00	0,00	0,00	75	1,50
21200	251801	4321	4074	8395	1,72	1,62	3,34	3777	1,50
22110	21578	491	382	873	2,28	1,77	4,05	971	4,50
22130	30767	851	177	1028	2,77	0,58	3,35	462	1,50
22200	9325	181	174	355	1,94	1,87	3,81	140	1,50
Gesamt	554782	10596	5513	16109	1,91	0,99	2,90	10681	1,93

Tabelle 7-14 Anteil der Flächen mit eingeschränkter bzw. stark eingeschränkter Infiltrationskapazität im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. a) b) c) d) vgl. Tabelle 7-13.

HRU		Flächen mit eingeschränkter Infiltrationskapazität im EZG Oberer Gräfenbach							
		Infiltrationskapazität stark eingeschränkt						Infiltrationskapazität eingeschränkt	
		Fläche [m²]			Flächenanteil [%]			Fläche [m²]	Flächenanteil [%]
Code	Fläche [m²]	Wege-netz ^b	Gewässer-netz ^c	Gesamt	Wege-netz ^b	Gewässer-netz ^c	Gesamt	Rückegassen ^d	Rückegassen ^d
11110	323641	15995	669	16664	4,94	0,21	5,15	14564	4,50
11130	506408	9796	741	10537	1,93	0,15	2,08	7596	1,50
11200	143773	3330	197	3527	2,32	0,14	2,46	2157	1,50
12110	343944	8731	601	9332	2,54	0,17	2,71	15477	4,50
12130	1134325	16699	2537	19236	1,47	0,22	1,69	17015	1,50
12200	335500	10446	1517	11963	3,11	0,45	3,56	5033	1,50
13110	55316	1426	76	1502	2,58	0,14	2,72	2489	4,50
13130	263447	6682	727	7409	2,54	0,28	2,82	3952	1,50
21110	2540504	50332	28579	78911	1,98	1,12	3,10	114323	4,50
21130	2490336	49330	22819	72149	1,98	0,92	2,90	37355	1,50
21200	3558670	87565	49211	136776	2,46	1,38	3,84	53380	1,50
22110	318458	6522	1988	8510	2,05	0,62	2,67	14331	4,50
22130	364799	7806	2593	10399	2,14	0,71	2,85	5472	1,50
22200	344635	12113	3363	15476	3,51	0,98	4,49	5170	1,50
Gesamt	12730735	286773	115618	402391	2,25	0,91	3,16	298312	2,34

Über den Einfluss wasserundurchlässiger bzw. versiegelter Flächen hinausgehend, wirkt sich die Landnutzung in PRMS u. a. durch die spezifische Modifikation der Niederschläge aus. Für unterschiedliche Landnutzungsklassen kann hierzu die Interzeptionsspeicherkapazität für Regenniederschläge während der Vegetationszeit (*srain_intcp*) und während der Vegetationsruhe (*wrain_incpt*) sowie die Interzeptionsspeicherkapazität für Schneeniederschläge (*snow_intcp*) definiert werden. Da keine eigenen, hinreichend exakten Messungen im Gelände durchgeführt werden konnten, erfolgte die Parametrisierung auf Basis von Literaturwerten. Tabelle 7-15 fasst die Ergebnisse ausgewählter Studien im Mittelgebirgsraum zusammen, Tabelle 7-16 stellt die daraus abgeleiteten Parameterwerte der verschiedenen Landnutzungsklassen dar. Die Streuinterzeption ist in den angegebenen Werten berücksichtigt.

Tabelle 7-15 Interzeptionsspeicherkapazität von Fichten- und Buchenbeständen sowie verbuschten Flächen nach verschiedenen Autoren. ^a nach Wohlrab et al. (1992)

Bestand	Max. Interzeptions-speicherkapazität	Quelle
Fichte	1,8–4,5 mm	Maniak (1997)
	~4,0 mm	Viville et al. (1993)
	3,3 mm–4,7 mm	Benecke & van der Ploeg (1978) ^a
	1,5 mm–4,0 mm	Mitscherlich (1971b)
Buche	2,5 mm	Maniak (1997)
	1,7 mm (Sommer) 0,7 mm (Winter)	Benecke & van der Ploeg (1978) ^a
	0,6 mm	Mitscherlich (1971b)
verbuschte Flächen	2,0 mm	Benecke & van der Ploeg (1978) ^a
Streu (Fichte)	0,8 mm	Fleck (1986)
	2,1 mm	Hoffmann (1982)
Streu (Buche)	1,1 mm	Fleck (1986)
	2,1 mm	Hoffmann (1982)

Für Schneeniederschläge ist die Interzeptionskapazität teilweise erheblich höher angesiedelt. Ernstberger (1987) gibt an, dass in Fichtenbeständen zeitweise das Wasseräquivalent von 20 mm im Kronenraum zurückgehalten wird. Die in Tabelle 7-16 aufgeführten Parameterwerte für die Schneeinterzeption (*snow_intcp*) wurden auf Basis der Angaben von Ernstberger (1987), Gerke (1985) und Brechtel & Balázs (1976) abgeschätzt.

Tabelle 7-16 Parameterwerte zur Interzeptionsspeicherkapazität der unterschiedlichen Landnutzungsklassen.

Landnutzungs-kategorie	Interzeptionsspeicher Regen – Nichtvegetationszeit – (<i>wrain_intcp</i>)	Interzeptionsspeicher Regen – Vegetationszeit – (<i>srain_intcp</i>)	Interzeptionsspeicher Schnee (<i>snow_intcp</i>)
Nadelwald	5,0 mm	5,0 mm	15,0 mm
Laub- und Mischwald	2,5 mm	3,5 mm	5,0 mm
Jungwuchs und Wiese	2,0 mm	3,0 mm	3,5 mm

7.3.3.3 Bodenparameter

Der Boden wird in PRMS, wie in Kapitel 7.3.1 dargelegt, als zweigliedriges System aus oberer und unterer Bodenschicht dargestellt. Von großer Bedeutung für die Nachbildung der Prozessdynamik in beiden Bodenhorizonten ist u. a. die nutzbare Feldkapazität (nFK), die sich in den beiden Parametern *soil_moist_max* (nFK [inch] des oberen und unteren Bodenhorizonts) und *soil_rechr_max* (nFK [inch] des unteren Bodenhorizonts) widerspiegelt. Die Parameter besitzen in erster Linie Einfluss auf die Simulation von Oberflächenabfluss und Infiltration sowie die Weiterleitung von Bodenwasser an Grundwasser- und Interflowspeicher. Die Parametrisierung erfolgte getrennt für die beiden ausgewiesenen pedologischen Einheiten „Böden mit Staunäseeinfluss“ und „Böden ohne Staunäseeinfluss“.

Die Untergrenze des liegenden Bodengliedes wurde aus der effektiven Durchwurzelungstiefe (*We*) der Vegetationsbestände abgeleitet, die in Anlehnung an Raissi et al. (2001) bestimmt wurde. Für die staunassen Böden des Untersuchungsgebietes wurde dabei der in durchschnittlich 35 cm Tiefe anstehende Stauhorizont als Grenze festgelegt, während für die Böden ohne Staunäseeinfluss, ausgehend von einem mittleren Bestandesalter von 45 Jahren, die Grenze bei ca. 100 cm u. GOF angesetzt wurde. Das obere Bodenglied stellt die Zone dar, aus der neben einer Ausschöpfung durch Pflanzenwurzeln auch Evaporation stattfindet. Für die staunassen Böden wurde die Untergrenze des oberen Bodengliedes bei 20 cm u. GOF, für die Böden ohne Staunässe bei 30 cm u. GOF festgelegt.

Die Parametrisierung der oben beschriebenen Größen *soil_moist_max* und *soil_rechr_max* erfolgte jeweils spezifisch für die pedologischen Einheiten, denen zu diesem Zweck Referenzaufschlüsse aus dem Bereich des Modellhanges Hölzerkopf zugeordnet wurden (Hauptaufschlüsse der „Catena West“ C2 bis C7). Auf jedes Bodenglied wurde in der Folge die mittlere nFK der zugehörigen Bodenhorizonte der Referenzausschlüsse übertragen. Wie Tabelle 7-17 verdeutlicht, basieren die Werte der nFK soweit möglich auf Laborauswertungen (vgl. Bott 2002 und Anhang XIV), für die skelettreichen unteren Bodenschichten von Oberhang und Kamm war jedoch eine Ableitung aus Bodendaten nach AG Boden (2005) erforderlich. Die zugrunde liegenden bodenphysikalischen Kennwerte und die resultierenden Parameterwerte sind in Tabelle 7-17 zusammengefasst.

Tabelle 7-17 Ableitung der Parameterwerte zur Wasserkapazität der unterschiedlichen Bodenglieder.^a nach Raissi et al. (2001) ^b nach AG Boden 2005^c Ableitung aus Bodendaten unter Berücksichtigung eines mittleren Skelettgehaltes von ca. 40 %

Pedolog. Einheit	Bodenglied (PRMS)	Tiefe ^a [cm GOF]	Referenz- aufschluss	Mittlere nFK [%] der Einheiten		Parametrisierung			
				Laborwert	Ableitung aus Bodenart, Dichte und Humusgehalt (Feinboden) ^b	nFK _{Bodenglied}		soil_ moist_ max [inch]	soil_ rechr_ max [inch]
						[%]	[mm]		
Böden mit Staunässe	Oberboden	0–20	C2–C4	18,0	-	18,0	36,0	2,0906	
	Unterboden	20–35		11,4	-	11,4	17,1		0,6732
Böden ohne Staunässe	Oberboden	0–30	C6–C7	22,0	-	22,0	66,0	7,0079	
	Unterboden	30–110		-	23,5	14,0 ^c	112,0		4,4094

7.3.4 Kalibrierung und Validierung des Modells MMS/PRMS

Im Anschluss an die Grundparametrisierung folgen i. d. R. die Kalibrierung und die abschließende Validierung des Modellsystems MMS/PRMS. Ziel der Kalibrierung ist, die im Rahmen der Grundparametrisierung festgelegten Ausprägungen der konzeptionellen Parameter durch Gegenüberstellung simulierter und im Gebiet gemessener hydrometeorologischer Zeitreihen so anzupassen, dass eine möglichst exakte Nachbildung des Realsystems durch das Modell gewährleistet ist (Verbesserung der empirischen Gültigkeit des Modells), während im Rahmen der Modellvalidierung die so erzielten Ergebnisse an zuvor nicht berücksichtigten hydrometeorologischen Zeitreihen überprüft werden. Klemes (1986) schlägt zu diesem Zweck vier grundsätzliche Vorgehensweisen vor:

- *split-sample test*
- *differential split-sample test*
- *proxy-basin test*
- *proxy-basin differential split-sample test*

Der *split-sample test* stellt den klassischen und am weitesten verbreiteten Ansatz dar. Die im Gebiet ermittelten hydrometeorologischen Zeitreihen werden dabei in zwei Teilzeiträume aufgeteilt, von denen einer zur Kalibrierung des Modells und der andere zur Validierung des Modells herangezogen wird. Im Rahmen des *differential split-sample test* werden die vorliegenden Zeitreihen ebenfalls aufgeteilt, wobei jedoch für Kalibrierung und Validierung Zeiträume mit verschiedenen klimatischen Bedingungen (feuchte Periode – trockene Periode) herangezogen werden. Im Gegensatz zu den zwei zuvor genannten Verfahren erfolgt im Rahmen des *proxy-basin test* eine Kalibrierung des Modells auf Basis der vollständigen hydrometeorologischen Zeitreihen eines Einzugsgebietes, die Validierung wird anhand der Daten eines anderen Gebietes durchgeführt. Der *proxy-basin differential split-sample test* stellt das komplexeste der vier Verfahren dar. Hier wird die Modellkalibrierung wie zuvor für ein anderes Gebiet als die Validierung durchgeführt, jedoch wird darüber hinaus ein anderer Zeitraum mit abweichenden klimatischen Bedingungen gewählt (Klemes 1986).

Die Auswahl eines Verfahrens hängt neben der hydrologischen Fragestellung auch von der Verfügbarkeit der hydrometeorologischen Zeitreihen ab. Diese umfasst sowohl die Dauer der Messwerterhebung im Gebiet, die naturgemäß möglichst groß sein sollte, als auch die Anzahl der erhobenen Messgrößen. Mangels weiterer erhobener Komponenten beschränkt sich die Gegenüberstellung simulierter und realer Prozesse im Untersuchungsgebiet in den meisten Fällen auf eine Gegenüberstellung der prozessintegrierenden Kenngröße „Gebietsabfluss“. Wie Abbildung 7-13 zusammenfassend darstellt, standen auch für die Untersuchungen im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches ausschließlich Abflussreihen zur Modellkalibrierung und -validierung zur Verfügung (vgl. Kapitel 4). Da diese jedoch nicht ausschließlich für den Auslasspunkt des Einzugsgebietes vorlagen, wurde zur Modellvalidierung der in Abbildung 7-14 dargestellte Ansatz gewählt, der einerseits einen *split-sample test* und andererseits einem *proxy-basin test* einschloss.

Die Kalibrierung erfolgte primär auf Basis der quasi-kontinuierlichen Abflussganglinie aus dem Modellhang Hölzerkopf (Zeitraum 01.11.1999 bis 31.10.2001), wobei zusätzlich die Ergebnisse der diskontinuierlichen Gefäßmessungen am Modellhang Berücksichtigung fanden. Letztere dienten der Aufteilung des Gesamtmodellhangabflusses in den Abfluss aus dem Unterhang und den Abfluss aus Mittel- u. Oberhang (mit Kamm). Diese Kalibrierung auf drei Ebenen sollte die sowohl von Beven (1996) als auch von Müller & Peschke (2000) beschriebene Problematik umgehen, dass mehrere Parametersätze zu identischen Simulationsergebnissen führen können. Durch die unterschiedliche HRU-Zusammensetzung der Teilgebiete sollten falsche Parametersätze aufgedeckt werden, da davon auszugehen ist, dass in diesem Fall zumindest für ein Areal die simulierte Abflussganglinie nicht in akzeptabler Güte mit der beobachteten Ganglinie übereinstimmt.

Zur Aufteilung des Modellhangabflusses in Abfluss aus dem Unterhang und Abfluss aus Mittel- und Oberhang konnten jedoch nur die Ergebnisse der direkten volumetrischen Messungen einfließen, die annähernd das Tagesmittel der Abflüsse wiedergeben. Zur Selektion geeigneter Daten diente der Vergleich von direkt erfasstem (diskontinuierlichem) Gesamtmodellhangabfluss mit dem – anhand der zu diesem Zeitpunkt bereits installierten Pegel P1, P2 und P3 erhobenen – quasi-kontinuierlichen Tagesmittel des Gesamtmodellhangabflusses. Bei einer Abweichung $\leq 10\%$ wurden die volumetrischen Direktmessungen des zugehörigen Erhebungstages als annähernde Tagesmittelwerte angesehen,³⁸ und folglich zur Regionalisierung des Modellhangabflusses auf Tagesbasis herangezogen. Die volumetrischen Messungen folgender Tage flossen in die Kalibrierung ein:

05.11.1999	27.12.1999	29.12.1999	31.12.1999
04.01.2000	10.03.2000	07.04.2000	26.04.2000
11.05.2000	26.05.2000	19.07.2000	20.07.2000
21.07.2000	22.07.2000	19.04.2001	12.06.2001

Zur Validierung des Modells diente der Zeitraum von 01.11.2001 bis 31.10.2003. Einerseits wurde auch in diesem Fall der Abfluss aus dem Modellhang Hölzerkopf sowie der Abfluss seiner beiden Teilsegmente³⁹ als Vergleichsreihe herangezogen (*split-sample test*), andererseits erfolgte eine Übertragung des Modells auf das Gesamteinzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (*proxy-basin test*). Auf eine Gegenprobe im Rahmen der *split-sample tests* durch Umkehr von Kalibrierungs- und Validierungszeitraum mit anschließendem Vergleich beider Ergebnisse wurde verzichtet.

³⁸ Die Messungen an den 30 Messwehren wurden i. d. R. in einem Zeitraum von maximal 3 Stunden durchgeführt.

³⁹ Im Gegensatz zum Kalibrierungszeitraum lagen für den Validierungszeitraum quasi-kontinuierliche Abflussganglinien vor (vgl. Abbildung 7-13 und Kapitel 4).

Erhobene Abflussdaten	Erfassungszeitraum									
	SH 1999	WH 99/00	SH 2000	WH 00/01	SH 2001	WH 01/02	SH 2002	WH 02/03	SH 2003	WH 03/04
quasi-kontinuierliche Werte Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach										
quasi-kontinuierliche Werte Modellhang Hölzerkopf (Gesamthang)										
quasi-kontinuierliche Werte Modellhang Hölzerkopf (Mittel- u. Oberhang)										
quasi-kontinuierliche Werte Modellhang Hölzerkopf (Unterhang)										
diskontinuierliche Werte Modellhang Hölzerkopf (30 Messstellen)										

Abb. 7-13 Vorliegende Abflussdaten zur Kalibrierung und Validierung von MMS/PRMS
(SH = hydrologisches Sommerhalbjahr / WH = hydrologisches Winterhalbjahr).

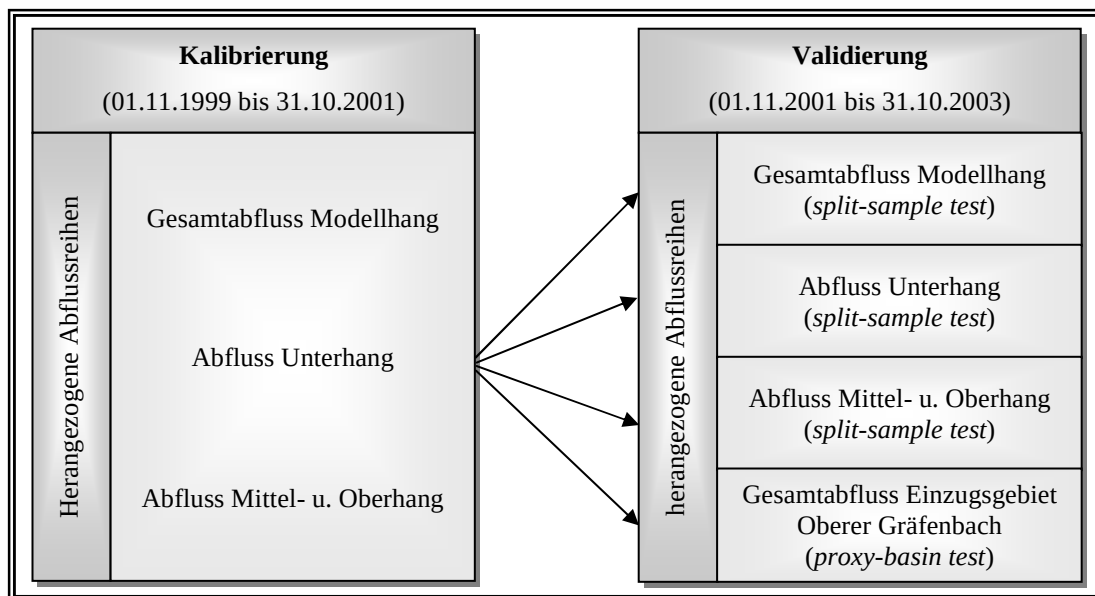


Abb. 7-14 Schema der Modellkalibrierung und Modellvalidierung.

7.3.4.1 Modellkalibrierung

Die Kalibrierung des Modells PRMS beschränkte sich weitgehend auf die konzeptionellen Parameter, da, wie Bronstert et al. (2001) feststellen, durch die Einbeziehung physikalischer Prozessparameter deren physikalische Bedeutung zerstört wird. Die optimierten Modellparameter umfassen daher vorwiegend Auslauf- bzw. Speicherkoeffizienten der konzeptionellen Speicherglieder. Tabelle 7-18 stellt diese mit ihren abschließenden Parameterwerten dar. Nach Refsgaard & Storm (1996) stehen für die Kalibrierung prinzipiell drei Methoden zur Verfügung: manuelle Kalibrierung nach dem *Trial-and-Error-Verfahren*, automatische Kalibrierung und Kombinationen von manueller und automatischer Kalibrierung. Das Modell MMS/PRMS beinhaltet zur automatisierten Parameteroptimierung das Verfahren nach Rosenbrock (1960) und ein Hyper-Tunnel-Verfahren (Restrepo & Bras 1982). Wie Refsgaard & Storm (1996) feststellen, können sich jedoch gerade für distributive, d. h. räumlich komplexe Modelle, die automatisierten Verfahren als problematisch erweisen. So zeigte sich auch bei Kalibrierung von MMS/PRMS, dass beide Algorithmen für die Optimierung der HRU-spezifischen Parameter, die im Extremfall für jede der 15 HRUs einen eigenen Wert aufweisen, eher ungeeignet sind. Diese Erfahrung schildert u. a. auch Lüllwitz (1993). Aus diesem Grund wurde lediglich für Parameter, die über keine HRU-spezifische Ausprägung verfügen, wie z. B. der Koeffizient für den Grundwasserabfluss (*gwflow_coef*), auf eine automatisierte Optimierung zurückgegriffen (Rosenbrock-Verfahren). In allen anderen Fällen kam die zeitaufwändigere manuelle Kalibrierung nach dem *Trial-and-Error-Verfahren* zum Einsatz.

Bei beiden Kalibrierungsverfahren wurde zunächst die resultierende Güte für den Gesamtang und im Anschluss für die beiden Teilsegmente des Modellhangs, die eine abweichende HRU-Zusammensetzung aufweisen (vgl. Kapitel 7.2), betrachtet. Nur wenn durch die Parameteranpassung sowohl für den Gesamtang als auch für beide Teilbereiche eine Verbesserung in der Übereinstimmung zwischen beobachteten und simulierten Abflusswerten erreicht werden konnte, wurde die Optimierung angenommen. In allen übrigen Fällen wurde die Anpassung verworfen. Auf Basis dieser Vorgehensweise konnte das Risiko einer Ausweisung falscher Parametersätze erheblich gemindert werden. Abbildung 7-15 zeigt den zugehörigen Entscheidungsbaum. Als Maßzahl für den Zusammenhang zwischen beobachteten Abflüssen und simulierten Abflüssen (was als Modellgüte zu interpretieren ist) diente der Korrelationskoeffizient nach Pearson (r).

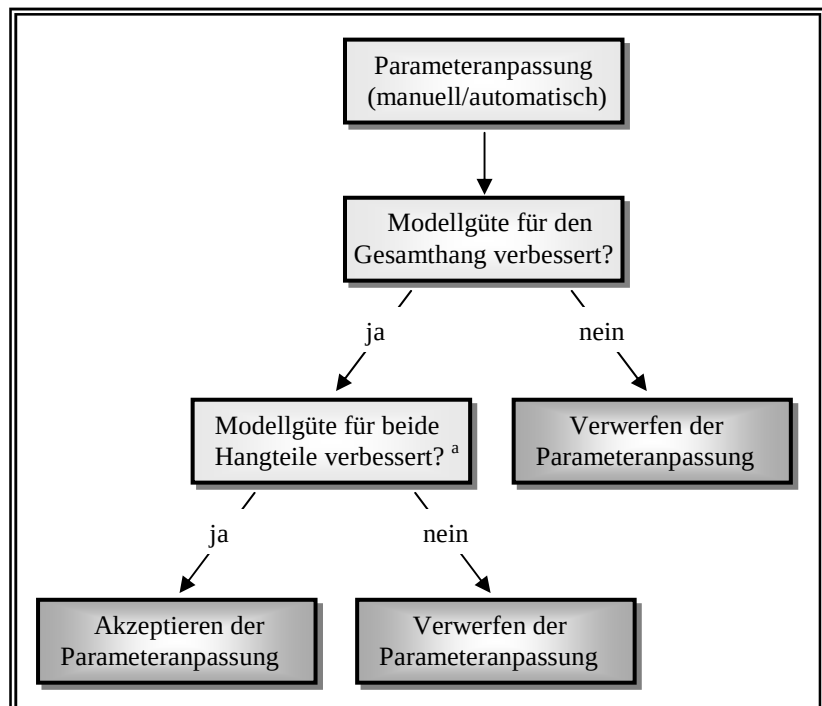


Abb. 7-15 Entscheidungsbaum im Rahmen der Parameterkalibrierung.

a) die Parameteranpassung wurde auch bei einer Verbesserung des Ergebnisses in einem Hangsegment bei gleichzeitig unverändertem Ergebnis im anderen Hangsegment beibehalten

Die so ermittelten Ausprägungen der konzeptionellen Speicher- bzw. Abflusskoeffizienten sind in Tabelle 7-18 dargestellt. Wie sie verdeutlicht, wurden Abflussbildung im Boden (Module *ssflow* und *gwflow*) und Entstehung von Oberflächenabfluss (Modul *srunoff*) in Abhängigkeit von Relief und Bodeneigenschaften behandelt, so dass den verschiedenen pedo(geo)logischen Reliefeinheiten jeweils spezifische Parameterwerte zugeordnet wurden. Exemplarisch illustriert Abbildung 7-16 – in Anlehnung an Gleichung 7-19 und 7-20 – die Abhängigkeit des Anteils oberflächenabflusswirksamer Flächen (*ca_percent*; ausgedrückt als Dezimalanteil) von Bodenwassergehalt (*soil_moist*) und Höhe des täglichen Bestandesniederschlages (*net_rain*). Die dargestellte Beziehung gilt in dieser Form für alle HRUs mit staunassen Böden und einer Hangneigung kleiner 5° (ohne Berücksichtigung undurchlässiger Flächen). Es wird deutlich, dass sich lediglich dann ein großer Flächenanteil einstellt, wenn eine hohe Bodenvorfeuchte in Kombination mit hohen Niederschlagsmengen auftritt. Der maximale Anteil direkt abflusswirksamer Flächen (*carea_max*) bleibt für alle HRUs mit staunassen Böden unbegrenzt (*carea_max* = 1; d. h. maximal 100 % der Fläche sind direkt abflusswirksam), wohingegen auf unversiegelten Flächen für alle HRUs ohne staunässebeeinflusste Böden die Entstehung von Oberflächenabfluss ausgeschlossen ist (*carea_max* = 0, d. h. maximal 0 % der Fläche sind direkt abflusswirksam).

Tabelle 7-18 Konzeptionelle Speicher- und Abflusskoeffizienten. ^a *carea_max* = 0 ^b *carea_max* = 1

Modul	Parameter	Parameter-Beschreibung	Bezugseinheit (HRU)		Wert
			Bodenklasse	Hangneigung	
srunoff	smidex_coef	linearer Faktor zur Berechnung des Oberflächenabflusses	ohne Stauhorizont	0° bis 5°	0,0025 ^a
			ohne Stauhorizont	5° bis 10°	0,0050 ^a
			ohne Stauhorizont	> 10°	0,0750 ^a
			mit Stauhorizont	0° bis 5°	0,0100 ^b
			mit Stauhorizont	5° bis 10°	0,0130 ^b
	smidex_exp	exponentieller Faktor zur Berechnung des Oberflächenabflusses	ohne Stauhorizont	0° bis 5°	0,2 ^a
			ohne Stauhorizont	5° bis 10°	0,2 ^a
			ohne Stauhorizont	> 10°	0,2 ^a
			mit Stauhorizont	0° bis 5°	0,6 ^b
			mit Stauhorizont	5° bis 10°	0,6 ^b
ssflow	ssrcoef_lin	linearer Faktor zur Berechnung des Interflows	ohne Stauhorizont	0° bis 5°	0,8
			ohne Stauhorizont	> 5°	0,8
			mit Stauhorizont	0° bis 5°	0,8
			mit Stauhorizont	> 5°	0,8
	ssrcoef_sq	exponentieller Faktor zur Berechnung des Interflows	ohne Stauhorizont	0° bis 5°	0,05
			ohne Stauhorizont	> 5°	0,10
			mit Stauhorizont	0° bis 5°	0,05
			mit Stauhorizont	> 5°	0,10
	ssrmax_coef	linearer Faktor zur Berechnung der Wassermenge, die vom Interflow- zum Grundwasserspeicher geroutet wird	ohne Stauhorizont	0° bis 5°	1
			ohne Stauhorizont	> 5°	1
			mit Stauhorizont	0° bis 5°	1
			mit Stauhorizont	> 5°	1
	ssr2gw_rate	linearer Faktor zur Berechnung der Wassermenge, die vom Interflow- zum Grundwasserspeicher geroutet wird	ohne Stauhorizont	0° bis 5°	0,30
			ohne Stauhorizont	> 5°	0,15
			mit Stauhorizont	0° bis 5°	0,00
			mit Stauhorizont	> 5°	0,00
	ssr2gw_exp	exponentieller Faktor zur Berechnung der Wassermenge, die vom Interflow- zum Grundwasserspeicher geroutet wird	ohne Stauhorizont	0° bis 5°	0,1
			ohne Stauhorizont	> 5°	0,1
			mit Stauhorizont	0° bis 5°	0,1
			mit Stauhorizont	> 5°	0,1
gwflow	gwflow_coef	Faktor zur Berechnung des Grundwasserabflusses	alle	alle	0,07

Insgesamt resultiert, wie in Tabelle 7-19 aufgeführt, im Kalibrierungszeitraum ein Zusammenhang von $r = +0,84$ zwischen beobachteten (quasi-kontinuierliche Werte auf Basis der Pegelmessungen) und simulierten Abflüssen für den (gesamten) Modellhang Hölzerkopf. Für die beiden Teilsegmente des Hanges – als Vergleichswerte dienen die Ergebnisse der 16 volumetrischen Direktmessungen – ergibt sich $r = +0,93$ für den Unterhang und $r = +0,96$ für Mittel- und Oberhang. Die Güte des Modells kann somit als gut bezeichnet werden. Die graphische Gegenüberstellung des simulierten und des beobachteten Abflussgangs aus dem Modellhang Hölzerkopf im Kalibrierungszeitraum (vgl. Abbildung 7-17 in Kapitel 7.3.4.2) verdeutlicht die insgesamt hohe Übereinstimmung der Werte. Eine weitergehende Diskussion von Stärken und Schwächen der Nachbildung folgt im Rahmen des folgenden Kapitels zur Modellvalidierung (Kapitel 7.3.4.2).

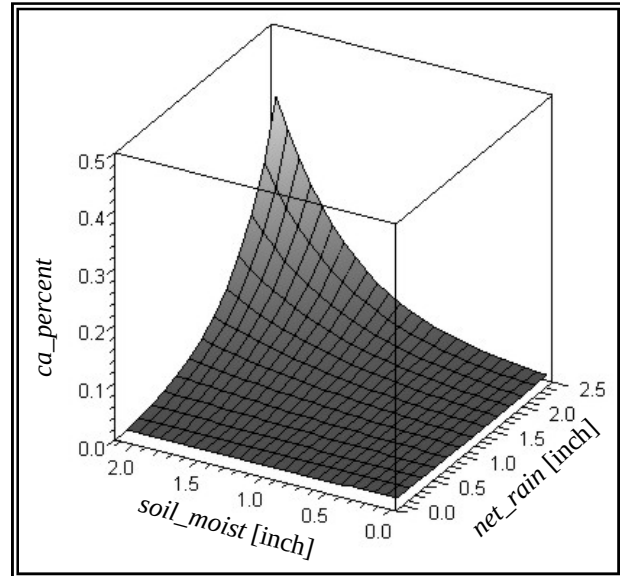


Abb. 7-16 Anteil der oberflächenabflusswirksamen Flächen (*ca_percent*; Dezimalanteil) in Abhängigkeit von Bodenwassergehalt (*soil_moist*) und Niederschlag (*net_rain*) für alle HRUs mit staunässebeeinflussten Böden und $< 5^\circ$ Hangneigung.

Tabelle 7-19 Maßzahlen zur Modellgüte im Kalibrierungszeitraum.

Gebiet	Beobachtete Abflussreihe	Güte der Simulationsergebnisse für den Kalibrierungszeitraum 01.11.1999 bis 31.10.2001 (Pearson r)
Modellhang Hölzerkopf Gesamtabfluss	quasi-kontinuierliche Abflussganglinie aus Pegelmessungen	$r = +0,84$
Modellhang Hölzerkopf Abfluss Mittel- u. Oberhang	16 Messwerte aus volumetrischen Direktmessungen	$r = +0,96$
Modellhang Hölzerkopf Abfluss Unterhang	16 Messwerte aus volumetrischen Direktmessungen	$r = +0,93$

7.3.4.2 Modellvalidierung

Im Rahmen der Modellvalidierung, d. h. der empirischen Gültigkeitsprüfung des Modells, diene wiederum der Korrelationskoeffizient nach Pearson (r) als Maßzahl zur Beschreibung der Modellgüte. Wie aus Tabelle 7-20 ersichtlich wird, besteht innerhalb des Validierungszeitraumes (01.11.2001 bis 31.10.2003) ein Zusammenhang der Stärke $r = +0,88$ zwischen beobachteter und simulierter Abflussganglinie aus dem Modellhang Hölzerkopf. Der Zusammenhang ist somit im Vergleich zum Kalibrierungszeitraum etwas stärker ausgeprägt. Für die beiden Teilsegmente des Modellhanges, den Unterhang auf der einen Seite und die oberhalb gelegenen Hangbereiche andererseits, kann mit $r = +0,84$ bzw. $r = +0,9$ ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Abflusswerten festgestellt werden. Eine dem Modellhang vergleichbare Modellgüte ergibt sich auch bei der Übertragung

des Modells auf das gesamte Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. Der Korrelationskoeffizient nimmt hier eine Ausprägung von $r = +0,88$ an (vgl. Tabelle 7-20). Über den Korrelationskoeffizient nach Pearson (r) bzw. das direkt ableitbare Bestimmtheitsmaß (r^2) hinausgehend bieten sich indes noch weitere Maßzahlen zur Modellvalidierung an (vgl. Legates & McCabe 1999 und Krause et al. 2005). So wurde zusätzlich der verbreitete Nash-Sutcliffe-Effizienzkoeffizient (NSE)⁴⁰ nach Nash & Sutcliffe (1970) berechnet, der Ausprägungen zwischen $-\infty$ (schlechtes Modell) und $+1$ (perfektes Modell) annehmen kann. Für den Gesamtabfluss aus dem Modellhang resultiert der Wert $E = +0,75$, für den Abfluss aus dem Oberhang $E = +0,74$ und für den Abfluss aus dem Unterhang $E = +0,72$. Die Modellgüte kann somit in Anlehnung an Anderson et al. (2001) für alle zuvor genannten Gebiete als weitgehend gut bezeichnet werden. Für das Gesamteinzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches ergibt sich dagegen lediglich ein Wert von $E = +0,54$, was auf eine immer noch befriedigende Modellgüte hinweist. Da letztlich für alle Teilräume eine zumindest zufriedenstellende Modellgüte besteht, ist die empirische Gültigkeit des Modells als nicht widerlegt anzusehen.

Tabelle 7-20 Maßzahlen zur Modellgüte im Kalibrierungs-, Validierungs- und Gesamtzeitraum.

Gebiet	Beobachtete Abflussreihe	Güte der Simulationsergebnisse (Maßzahl: Pearson r)		
		Kalibrierung	Validierung	Gesamt
		01.11. 1999 bis 31.10.2001	01.11. 2001 bis 31.10.2003	01.11.1999 bis 31.10.2003
Modellhang Hölzerkopf Gesamtabfluss	quasi-kontinuierliche Abfluss- ganglinie aus Pegelmessungen	+0,84	+0,88	+0,86
Modellhang Hölzerkopf Abfluss Mittel- u. Oberhang	quasi-kontinuierliche Abfluss- ganglinie aus Pegelmessungen		+0,90	
Modellhang Hölzerkopf Abfluss Unterhang	quasi-kontinuierliche Abfluss- ganglinie aus Pegelmessungen		+0,84	
Modellhang Hölzerkopf Abfluss Mittel- u. Oberhang	volumetrische Direktmessungen	+0,96		
Modellhang Hölzerkopf Abfluss Unterhang	volumetrische Direktmessungen	+0,93		
EZG Oberer Gräfenbach Gesamtabfluss	quasi-kontinuierliche Abfluss- ganglinie aus Pegelmessungen		+0,88	

Die insgesamt gute Übereinstimmung von beobachteter und simulierter Abflussganglinie wird auch anhand der graphischen Gegenüberstellung deutlich, die in Abbildung 7-17 für den Modellhang Hölzerkopf dargestellt ist. Dennoch treten bei der Betrachtung auch Schwächen des Modells zutage:

- Abflussspitzen, die im Rahmen sommerlicher Niederschlagsereignisse bei zuvor geringer Bodenvorfeuchte und geringem Inhalt des Interflowspeichers auftreten, werden über-simuliert. Dies betrifft vor allem die niederschlagsarmen Sommer 2001, 2002 und 2003.
- Einzelne Abflussspitzen im Winter können nur in unzureichender Genauigkeit nach-gebildet werden, so z. B. am 01.01.2002, im Zeitraum 25.–28.10.2002 und im Zeitraum Ende Januar bis Anfang Februar 2003. Im letztgenannten Abschnitt bleibt unklar, ob die Erhebung der Abflussdaten im Untersuchungsgebiet evtl. durch Bildung einer Eisdecke am Gebietsauslass infolge ausgeprägter Minustemperaturen beeinflusst wurde.

⁴⁰ Der Effizienzkoeffizient (E) beschreibt das Verhältnis von mittlerem quadratischem Fehler (MSE) zwischen beobachteten und simulierten Abflüssen zur Varianz der beobachteten Abflusswerte. Der resultierende Wert wird von 1 subtrahiert. Für $E < 0$ stellt das beobachtete Abflussmittel einen besseren Prädiktor dar als das Modell (vgl. Legates & McCabe 1999).

- Der Basisabfluss im Spätjahr 2000, d. h. im Anschluss an den sehr niederschlagsreichen Sommer 2000, wird in zu geringer Höhe nachgebildet.
- Die simulierten monatlichen Abflusshöhen stimmen zwar in den meisten Fällen gut mit den beobachteten Abflusshöhen überein, jedoch können auch signifikante Abweichungen auftreten. Dies betrifft sowohl den Modellhangabfluss als auch den Abfluss aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches, wobei in erster Linie Monate mit insgesamt hohen Abflusswerten betroffen sind. Für den Modellhang beträgt diese Abweichung in einem Extremfall fast 30 mm bzw. 36 % der monatlichen Abflusshöhe (November 2002), wobei sie im Mittel lediglich bei 2,3 mm angesiedelt ist.

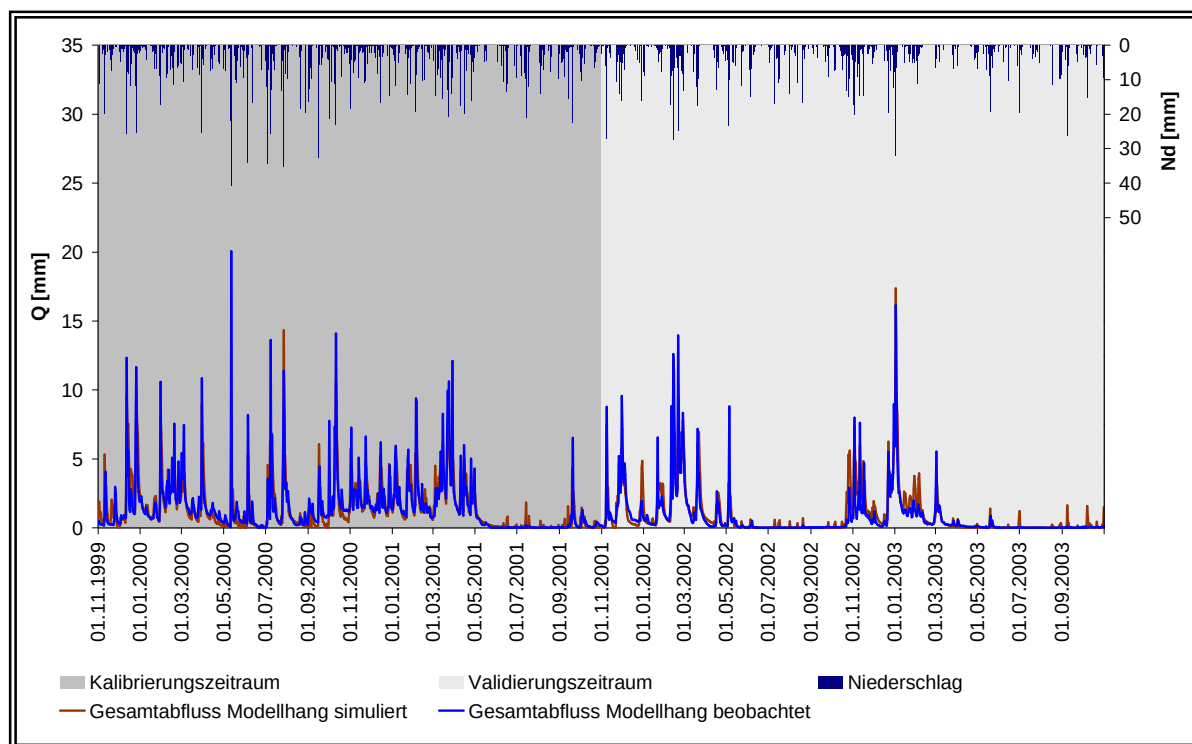


Abb. 7-17 Beobachteter und simulierter Gang der täglichen Abflusshöhe aus dem Modellhang Hölzerkopf.
(Kalibrierungszeitraum: 01.11.1999 bis 31.10.2001/Validierungszeitraum: 01.11.2001 bis 31.10.2003)

Wie angesprochen ergibt die Simulation der Abflüsse aus dem Modellhang Hölzerkopf einen mittleren monatlichen Überschuss von 2,3 mm gegenüber den beobachteten Abflusswerten. Dies betrifft, wie Tabelle 7-21 zeigt, in ähnlicher Weise auch die übrigen Teilräume. Mit einem mittleren monatlichen Residualwert von 3,8 mm ist das Phänomen für Mittel- und Oberhangbereich des Modellhanges am stärksten ausgeprägt. In diesem Zusammenhang ist davon auszugehen, dass der Berechnungsansatz nach Jensen & Haise (1963) zur Ermittlung der potenziellen Verdunstung, infolge der Ausweisung zu geringer Werte, eine Hauptfehlerquelle darstellt.

Tabelle 7-21 Mittlere monatliche Differenz zwischen simulierter und beobachteter Abflusshöhe.
^a Gesamtzeitraum ^b Validierungszeitraum

Gebiet	$Q_{\text{simuliert}} - Q_{\text{beobachtet}}$ [mm/Monat]
Modellhang Hölzerkopf Gesamtabfluss	2,3 ^a
Modellhang Hölzerkopf Abfluss Mittel- und Oberhang	3,8 ^b
Modellhang Hölzerkopf Abfluss Unterhang	2,7 ^b
EZG Oberer Gräfenbach Gesamtabfluss	3,7 ^b

Abbildung 7-18 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Residualwerte zwischen simulierter und beobachteter täglicher Abflusshöhe aus Modellhang und Einzugsgebiet für den Validierungszeitraum. Es ist ersichtlich, dass in beiden Arealen annähernd 80 % der Residualwerte zwischen $-0,5$ und $+0,5$ mm angesiedelt sind, wohingegen stärkere Abweichung nur vereinzelt auftreten. Die Abweichungen zeigen dabei keine vollständig symmetrische Verteilung, da stärkere Abweichungen bevorzugt im positiven Bereich zu finden sind. Inhaltlich bestätigt dies die bereits zuvor dargestellte durchschnittliche Übersimulation der Abflusswerte.

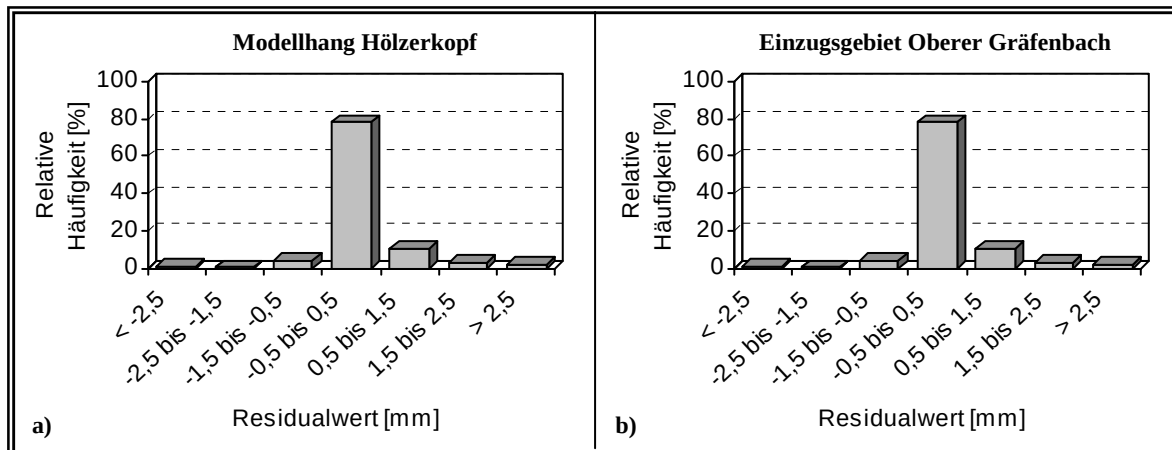


Abb. 7-18 Verteilung der Residualwerte (simulierte tägliche Abflusshöhe [mm] – beobachtete tägliche Abflusshöhe [mm]) im Validierungszeitraum.

a) Abfluss aus dem Modellhang Hölzerkopf b) Abfluss aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches

7.3.5 Darstellung der Simulationsergebnisse

In der Folge werden zunächst die auf Basis der Simulation des Ist-Zustandes ermittelten Ergebnisse zum Abflussverhalten des Untersuchungsgebietes und im Anschluss (Kapitel 7.3.6) die Resultate unterschiedlicher Landnutzungsszenarien vorgestellt.

Abbildung 7-19 zeigt die für den Ist-Zustand ermittelten jährlichen Werte der unterschiedlichen Abflusskomponenten und der aktuellen Evapotranspiration in Bezug zum Niederschlagsinput⁴¹ für den Modellhang Hölzerkopf (a) und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (b). Die Differenz zwischen In- und Output stellt die jeweilige Speicheränderung im Gebiet dar. Es wird deutlich, dass die Werte der Evapotranspiration für den Modellhang zwischen 597 mm und 390 mm im Jahr angesiedelt sind, für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches, für das aufgrund der Datengrundlage lediglich die Ergebnisse aus den Jahren 2001/2002 bis 2002/2003 vorliegen,⁴² zwischen 410 mm und 373 mm. Für die gemeinsam betrachteten Jahre 2001/2002 bis 2002/2003 ergibt sich, wie in Abbildung 7-20 deutlich wird, ein mittlerer Anteil der Evapotranspiration am Systemoutput von 54,1 % für den Modellhang bzw. 51,4 % für das Einzugsgebiet. Die verbleibenden 45,9 % bzw. 48,6 % entfallen auf den Gebietsabfluss. Dem Interflow kommt dabei eine dominierende Rolle zu. Er umfasst im Mittel 20,6 % des Systemoutputs aus dem Modellhang bzw. 26,8 % des Systemoutputs aus dem Einzugsgebiet. Dies entspricht einem Anteil von 44,9 % bzw. 55,1 % an der jeweiligen Abflusshöhe. Als zweitstärkste Abflusskomponente folgt am Modellhang der Grundwasserabfluss, wohingegen im Einzugsgebiet der Oberflächenabfluss bedeutender ist.

⁴¹ Dargestellt ist der anhand der Anpassungsfaktoren (vgl. Kapitel 7.3.3.1) korrigierte Gebietsniederschlag ($N_{d, \text{kor}}$).

⁴² Es werden lediglich die Ergebnisse aus dem Zeitraum der Modellkalibrierung und Modellvalidierung vorgestellt.

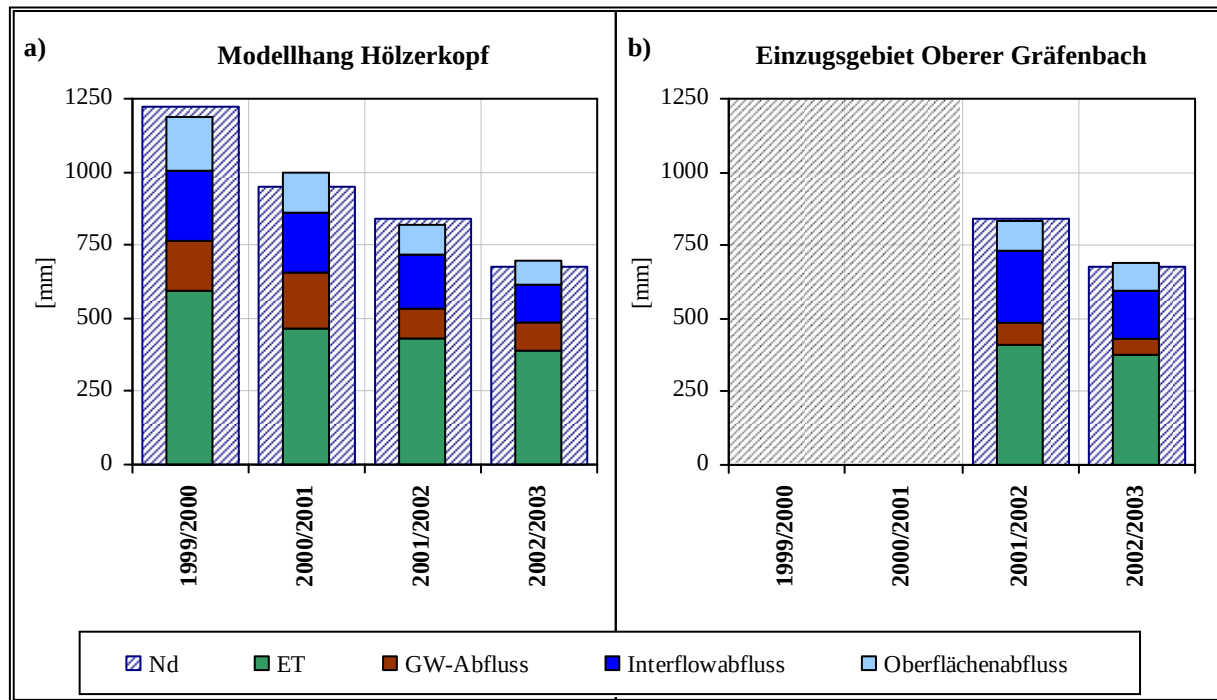


Abb. 7-19 Simulierte Höhe von Evapotranspiration und Abfluss sowie zugrunde liegender Niederschlagsinput für den Modellhang Hölzerkopf (a) und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (b).

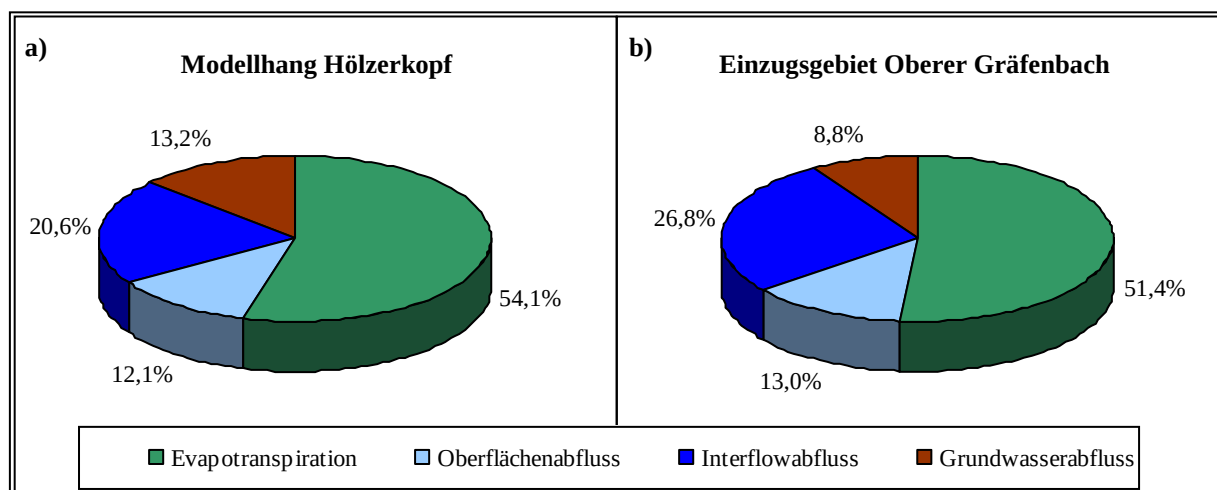


Abb. 7-20 Anteil der unterschiedlichen Abflusskomponenten und der Evapotranspiration am gesamten Systemoutput im Mittel der hydrologischen Jahre 2001/2002 bis 2002/2003.

a) Modellhang Hölzerkopf b) Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches

Die folgenden Karten illustrieren die zugehörige räumliche Verteilung des Abflussquotienten (Abbildung 7-21) und des Oberflächenabflussanteils am Gesamtabfluss (Abbildung 7-22). Es wird einerseits deutlich, dass an Mittel- und Unterhang sowie in den Tallagen der Abflussquotient, d. h. das Verhältnis Abfluss zu Niederschlag, im Allgemeinen höher angesiedelt ist als in den oberen Hangbereichen. Zum anderen zeigt sich, dass gerade in den Bereichen mit hohen Abflussquotienten dem Oberflächenabfluss eine bedeutende Rolle zufällt. Dieser ist in erster Linie als Sättigungsflächenabfluss zu verstehen, der auf dem Kamm und in den oberen Hangbereichen nicht auftritt. Eventueller Oberflächenabfluss entsteht in den oberen Hangbereichen ausschließlich auf verdichteten Flächen (Walderschließung). Im Bereich von HRU 700 (Verkehrs- und Siedlungsflächen) umfasst der Oberflächenabfluss stets 100 % der Gesamtabflussmenge. Weiterhin zeigt sich ein vergleichsweise höherer Oberflächenabflussanteil auf Arealen mit Jungwuchsbeständen und Wiese. Dies wird v. a. anhand der Gegen-

überstellung von Abbildung 7-22 mit Karte 3-9 deutlich. Einen ähnlichen Zusammenhang belegt auch Abbildung 7-23, die exemplarisch die räumliche Verteilung der Abflusshöhe am 20.02.2002 (Niederschlag 24,7 mm) wiedergibt. Auch hier ist die Abhängigkeit vom Vegetationsbestand sichtbar, wobei die Jungwuchsareale vergleichsweise hohe Abflusswerte aufweisen. Primär wird jedoch in allen drei Kartendarstellungen die grundsätzlich vorherrschende räumliche Strukturierung des Abflussgeschehens in Abhängigkeit von der Lage am Hang, letztlich also (auch) in Abhängigkeit von Substrat und Hangneigung, sichtbar.

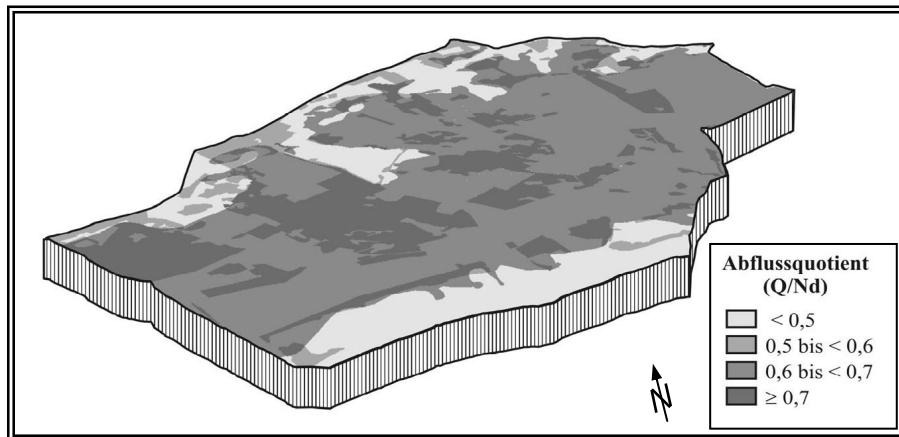


Abb. 7-21 Mittlerer jährlicher Abflussquotient (Q/Nd) im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. Bezugszeitraum: hydrologische Jahre 2001/2002 bis 2002/2003.

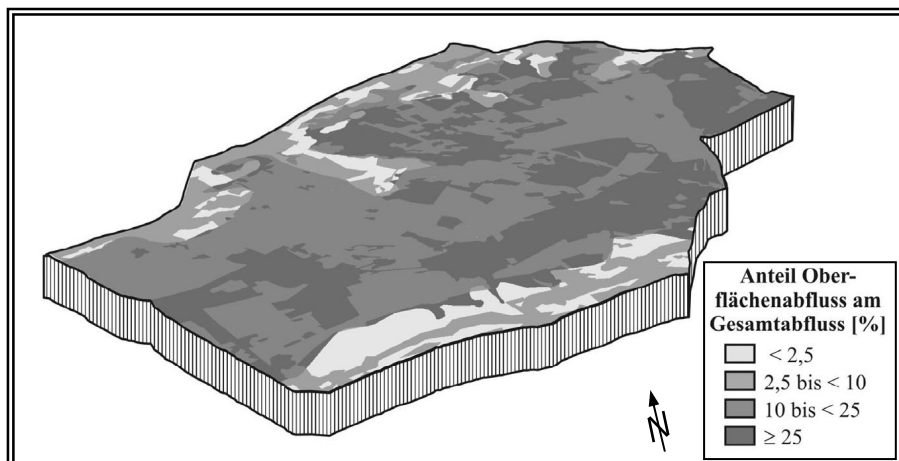


Abb. 7-22 Mittlerer Oberflächenabflussanteil am Gesamtabfluss im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. Bezugszeitraum: hydrologische Jahre 2001/2002 bis 2002/2003.

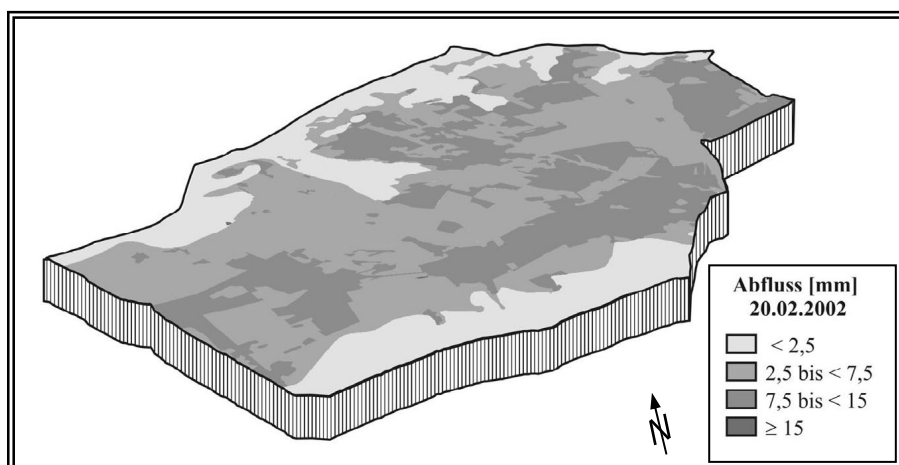


Abb. 7-23 Tagesabflusshöhe am 20.2.2002 im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.

Neben den räumlichen Disparitäten bezüglich Abflussverhalten und Abflussbildung existiert im Untersuchungsgebiet, wie bereits in Kapitel 6 ausführlich dargelegt, eine ausgeprägte intraannuelle Variabilität des Gebietswasserhaushaltes. Tabelle 7-22 und 7-23 geben einen Überblick über die simulierten monatlichen Werte der unterschiedlichen Abflusskomponenten und der aktuellen Evapotranspiration sowie der resultierenden Speicherinhaltsänderung für das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach und den Modellhang Hölzerkopf. Abbildung 7-24 und 7-25 stellen die Ergebnisse graphisch dar. Für beide Gebiete zeigt sich neben dem erwarteten deutlichen Jahresgang von aktueller Evapotranspiration und Gesamtabfluss auch ein ausgeprägtes saisonales Verhalten in den Anteilen der unterschiedlichen Abflusskomponenten am Gesamtabfluss. So kommt dem Grundwasserabfluss, auch in Abhängigkeit vom Niederschlagsreichtum des vorangegangenen Sommerhalbjahres, ab Dezember eine durchaus bedeutende Rolle zu (dies betrifft jedoch ausschließlich die oberen Hangbereiche), wohingegen der Abfluss in den Sommermonaten weitestgehend aus Oberflächenabfluss besteht, der infolge von Gewitterniederschlägen generiert wird. Bis auf den Sommer stellt insgesamt jedoch der Interflow die stärkste Abflusskomponente dar. Weiterhin zeigt sich deutlich die große Schwankungsbreite der monatlichen Speicherinhaltsänderung. Diese bewegt sich für den Modellhang Hölzerkopf zwischen -86,4 mm (Mai 2001) und +70,6 mm (Juli 2000) (vgl. Tabelle 7-23 und Abbildung 7-25). Auf Basis dieser Extremwerte der Speicherinhaltsänderungen, die ausschließlich im Rahmen spezifischer Konstellationen der zeitlichen Niederschlagsverteilung auftreten (z. B. niederschlagsreicher Vormonat in Verbindung mit einem sehr niederschlagsarmen Folgemonat; dies entspricht der Konstellation im Mai 2001), werden auch die bereits in Kapitel 6 erörterten hohen Abflussquotienten einiger Monate, die sich dem Wert 1 annähern bzw. ihn sogar leicht überschreiten, erklärbar.

Tabelle 7-22 Simulationsergebnisse für das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach auf Monatsbasis.

Monat	Nd [mm]	Nd _{kor} [mm]	ET [mm]	Oberflächen- abfluss [mm]	Interflow- abfluss [mm]	Grundwasser- abfluss [mm]	Gesamt- abfluss [mm]	Speicher- änderung [mm]
11/01	95,8	107,5	10,7	28,1	31,6	1,6	61,3	+35,5
12/01	47,0	54,0	3,3	4,7	35,2	12,8	52,7	-2,0
01/02	27,2	31,7	4,3	1,3	27,8	7,7	36,7	-9,3
02/02	134,9	156,5	17,6	14,6	92,2	23,7	130,5	+8,4
03/02	58,7	67,0	32,4	14,0	23,2	20,1	57,3	-22,7
04/02	45,0	50,6	45,0	6,9	8,4	5,7	21,0	-15,4
05/02	68,2	74,9	77,7	8,1	8,4	1,7	18,2	-21,0
06/02	34,7	37,6	62,1	1,3	0,0	0,2	1,6	-26,1
07/02	55,0	59,7	55,3	2,4	0,0	0,0	2,4	+2,0
08/02	59,3	64,4	57,0	1,4	0,0	0,0	1,4	+6,0
09/02	23,3	25,5	21,4	0,7	0,0	0,0	0,7	+3,4
10/02	98,0	108,0	22,3	17,6	21,4	0,0	39,0	+46,7
11/02	105,8	118,5	10,9	30,6	54,9	8,8	94,3	+13,3
12/02	71,9	81,5	3,4	24,5	34,2	11,0	69,6	+8,5
01/03	79,9	92,2	3,7	22,7	40,1	23,9	86,8	+1,7
02/03	24,1	28,4	8,7	0,8	16,6	10,3	27,7	-8,0
03/03	24,7	28,2	31,9	1,1	12,6	5,0	18,8	-22,5
04/03	24,8	27,9	39,8	1,5	0,0	0,6	2,2	-14,1
05/03	56,7	62,3	79,7	3,2	0,0	0,1	3,3	-20,7
06/03	39,7	43,0	44,0	2,6	0,0	0,0	2,6	-3,6
07/03	38,2	41,5	51,8	0,2	0,0	0,0	0,2	-10,5
08/03	43,5	47,2	30,6	1,3	0,0	0,0	1,3	+15,3
09/03	43,6	47,8	48,3	2,7	0,0	0,0	2,7	-3,2
10/03	49,6	54,7	20,4	5,9	0,5	0,0	6,4	+27,9

Tabelle 7-23 Simulationsergebnisse für den Modellhang Hölzerkopf auf Monatsbasis.

Monat	Nd [mm]	Nd _{korrt} [mm]	ET [mm]	Oberflächen- abfluss [mm]	Interflow- abfluss [mm]	Grundwasser- abfluss [mm]	Gesamt- abfluss [mm]	Speicher- änderung [mm]
11/99	51,5	58,0	10,6	10,8	18,4	2,3	31,4	+16,0
12/99	116,5	132,4	4,2	29,6	46,8	23,8	100,3	+27,9
01/00	50,0	58,0	4,3	9,3	18,5	24,5	52,3	+1,4
02/00	74,8	86,7	16,4	14,9	33,6	30,5	79,0	-8,7
03/00	81,5	93,3	25,5	17,9	19,4	22,6	59,9	+7,9
04/00	37,1	41,7	61,6	4,2	10,6	16,5	31,4	-51,3
05/00	126,6	139,0	95,6	13,4	7,2	1,9	22,5	+20,9
06/00	70,8	76,7	112,8	7,5	5,2	4,7	17,4	-53,5
07/00	230,9	250,8	88,6	41,0	40,9	9,8	91,6	+70,6
08/00	53,3	57,9	97,3	2,6	1,8	13,5	18,0	-57,4
09/00	95,4	104,6	49,7	13,3	10,4	1,4	25,1	+29,8
10/00	109,0	120,1	30,4	22,6	28,5	14,2	65,3	+24,4
11/00	88,0	98,6	11,8	18,9	36,5	27,3	82,7	+4,1
12/00	65,0	74,0	7,3	12,6	27,8	25,3	65,7	+1,0
01/01	73,0	84,5	7,8	16,4	32,3	27,6	76,3	+0,4
02/01	61,0	71,1	14,8	12,7	21,5	26,5	60,7	-4,4
03/01	142,4	162,4	26,1	31,4	54,6	38,5	124,5	+11,8
04/01	97,1	109,4	43,3	17,0	22,1	31,0	70,1	-4,0
05/01	12,3	13,5	84,5	0,2	2,9	12,3	15,4	-86,4
06/01	67,7	73,3	69,1	2,3	0,0	1,3	3,6	+0,6
07/01	63,8	69,3	76,1	3,7	0,0	0,1	3,8	-10,6
08/01	57,0	61,9	52,0	1,4	0,0	0,0	1,4	+8,5
09/01	79,8	87,5	38,8	9,1	7,0	0,0	16,2	+32,5
10/01	41,6	45,8	34,9	5,0	2,4	0,0	7,3	+3,6
11/01	95,8	107,5	10,6	22,9	25,3	0,1	48,3	+48,6
12/01	47,0	54,0	3,5	4,4	28,9	10,9	44,2	+6,3
01/02	27,2	31,7	6,4	1,1	23,1	13,0	37,2	-11,9
02/02	134,9	156,5	15,2	28,6	53,5	34,2	116,3	+25,0
03/02	58,7	67,0	34,4	11,7	21,2	34,2	67,0	-34,4
04/02	45,0	50,6	46,5	5,9	6,9	9,1	21,9	-17,8
05/02	68,2	74,9	84,5	6,9	6,5	2,7	16,1	-25,7
06/02	34,7	37,6	71,3	1,2	0,0	0,4	1,6	-35,3
07/02	55,0	59,7	53,9	1,7	0,0	0,0	1,8	+4,0
08/02	59,3	64,4	59,6	1,8	0,0	0,0	1,8	+3,0
09/02	23,3	25,5	19,8	0,7	0,0	0,0	0,7	+5,0
10/02	98,0	108,0	24,2	14,9	17,8	0,0	32,7	+51,1
11/02	105,8	118,5	10,8	24,6	43,3	13,8	81,7	+26,0
12/02	71,9	81,5	3,9	16,8	24,8	16,7	58,4	+19,2
01/03	79,9	92,2	4,0	21,5	39,0	41,7	102,2	-14,0
02/03	24,1	28,4	8,5	0,5	11,1	14,7	26,3	-6,4
03/03	24,7	28,2	34,8	1,8	9,9	8,2	19,8	-26,4
04/03	24,8	27,9	45,0	1,4	0,0	1,0	2,4	-19,5
05/03	56,7	62,3	86,0	2,9	0,0	0,1	3,0	-26,7
06/03	39,7	43,0	39,4	1,1	0,0	0,0	1,1	+2,5
07/03	38,2	41,5	55,2	1,5	0,0	0,0	1,5	-15,2
08/03	43,5	47,2	31,0	1,2	0,0	0,0	1,2	+15,0
09/03	43,6	47,8	50,0	2,4	0,0	0,0	2,4	-4,6
10/03	49,6	54,7	21,0	5,5	0,6	0,0	6,2	+27,5

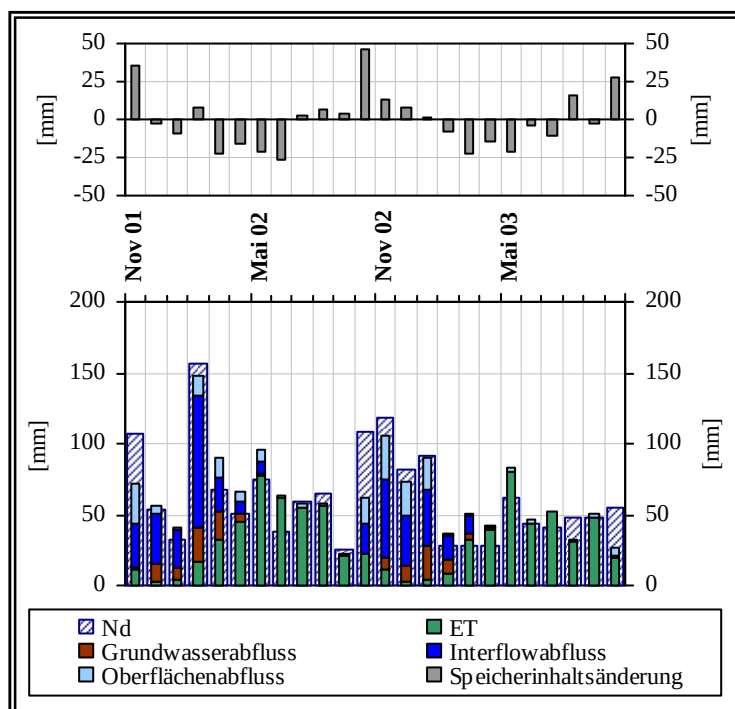


Abb. 7-24 Simulationsergebnisse für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches auf Monatsbasis.

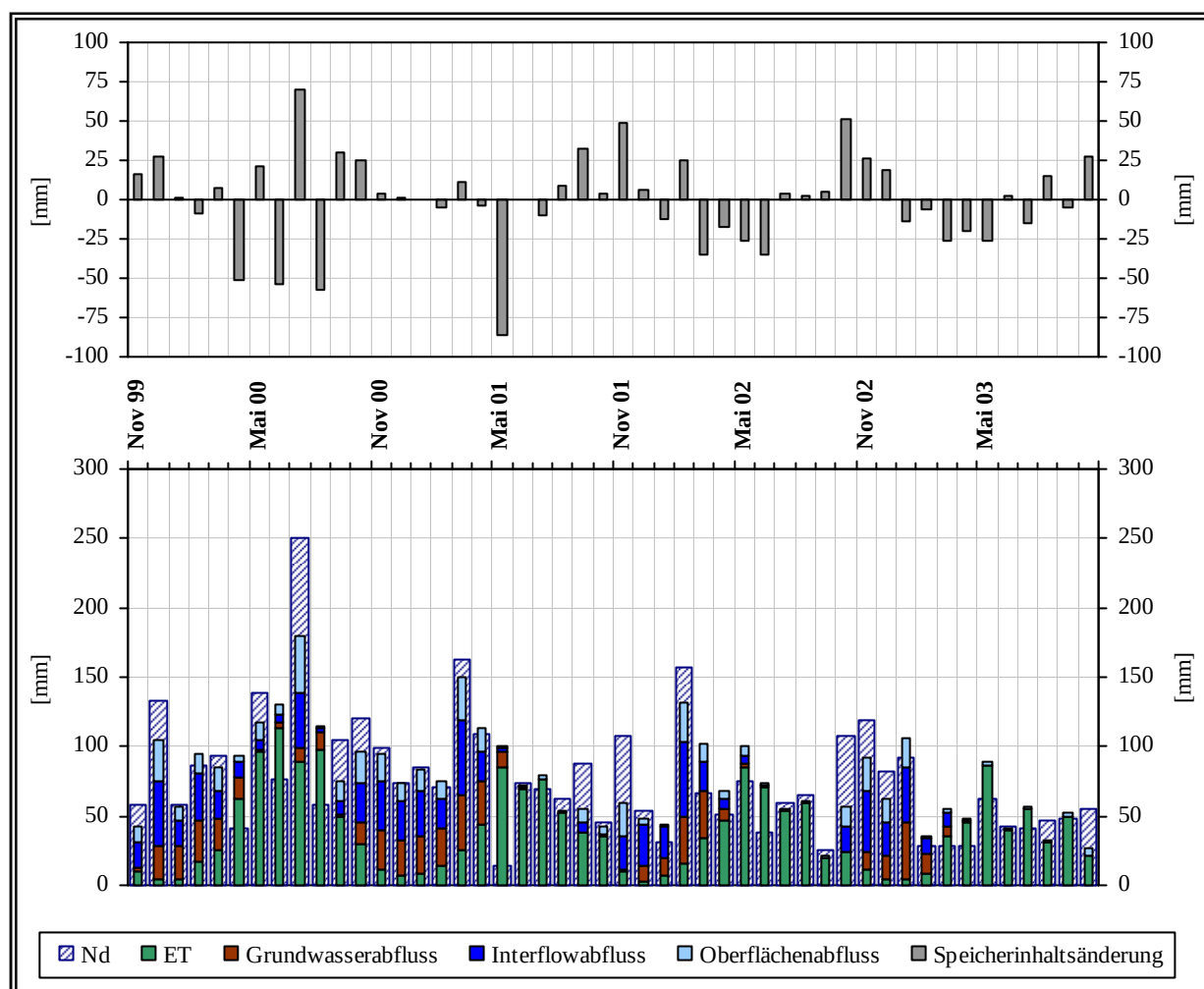


Abb. 7-25 Simulationsergebnisse für den Modellhang Hölzerkopf auf Monatsbasis.

7.3.6 Prognoserechnungen für veränderte Landnutzungen

Aufbauend auf der Nachbildung des Realsystems erfolgte eine Analyse des Einflusses der forstlichen Bestandeszusammensetzung und des Anteils wasserundurchlässiger Flächen auf den Gebietswasserhaushalt anhand folgender Landnutzungsszenarien:

- **Szenario I:** Erhöhung des Anteils versiegelter Flächen⁴³ von 2,9 % auf 15 %
- **Szenario II:** Absenkung des Anteils versiegelter Flächen⁴³ von 2,9 % auf 0 %⁴⁴
- **Szenario III:** vollständige Substitution der Jungwuchsbestände durch Altersmischwald

Die Berechnung eines darüber hinausgehenden Szenarios mit einer Veränderung der Bodeneigenschaften, welches letztlich eine vergleichende Quantifizierung des Einflusses der forstlichen Nutzung und der Untergrundeigenschaften auf die Abflussdynamik ermöglicht hätte, war aufgrund des konzeptionellen Modellcharakters bei der Nachbildung der Abflussgenese im Boden nicht möglich. Die in PRMS zur Anwendung kommenden Abflusskoeffizienten sind, wie zuvor dargestellt, anhand beobachteter Abflüsse zu kalibrieren. Da Kamm und Oberhang im Ist-Zustand jedoch ausschließlich staunässefreie Braunerden und der Unterhang staunässebeeinflusste Pseudogleye aufweisen, und beide Hangbereiche eine spezifische – auch von bodenphysikalischen Eigenschaften abhängige – Neigung zur Ausbildung von Sättigungsflächen zeigen, war keine entsprechende Szenariensimulation möglich, im Rahmen derer z. B. die Pseudogleye des Unterhangs durch Braunerden substituiert sind. Eine entsprechende Modifikation der konzeptionellen Parameter erschien zu unsicher. Zur Berechnung der Szenarien I bis III konnten demgegenüber, im Rahmen einer zulässigen Modellanpassung, direkt die Anteile versiegelter Flächen der HRUs (Szenario I und II) oder die Flächenanteile existierender HRUs am Gesamtgebiet angepasst werden (Szenario III). Für letztgenanntes Szenario wurden die Flächenanteile wie in Tabelle 7-24 dargestellt modifiziert.

Tabelle 7-24 Veränderung der HRU-Flächenanteile in Szenario III.

HRU		Ist-Zustand			Szenario III	
Code	Eigenschaften	[m ²]	[%]		[m ²]	[%]
11200	Böden ohne Staunässe 0° bis 5° Hangneigung Jungwuchs und Wiese	5399,8	0,97	⇒	0,0	0,00
11130	Böden ohne Staunässe 0° bis 5° Hangneigung Laub- und Mischwald	22915,1	4,13		28314,9	5,10
12200	Böden ohne Staunässe 5° bis 10° Hangneigung Jungwuchs und Wiese	13205,5	2,38	⇒	0,0	0,00
12130	Böden ohne Staunässe 5° bis 10° Hangneigung Laub- und Mischwald	91555,0	16,50		104760,5	18,88
21200	Böden mit Staunässe 0° bis 5° Hangneigung Jungwuchs und Wiese	251801,1	45,39	⇒	0,0	0,00
21130	Böden mit Staunässe 0° bis 5° Hangneigung Laub- und Mischwald	5000,3	0,90		256801,4	46,29
22200	Böden mit Staunässe 5° bis 10° Hangneigung Jungwuchs und Wiese	9325,4	1,68	⇒	0,0	0,00
22130	Böden mit Staunässe 5° bis 10° Hangneigung Laub- und Mischwald	30766,9	5,55		40092,3	7,23

⁴³ Der Begriff „versiegelt“ bezeichnet hier alle Flächen (auch verdichtete), die durch anthropogene Eingriffe keine bzw. eine sehr geringe Infiltrationskapazität besitzen: Straßen, Forstwege, Gräben (vgl. Kapitel 7.3.3.2).

⁴⁴ Ohne Berücksichtigung der indirekt durch den Gewässerrückbau eintretenden Effekte (Veränderung der Sättigungsneigung, kein direkter Anschluss der HRU-Teilflächen an das Gewässernetz).

In Abbildung 7-26 bis 7-28 ist für alle drei Landnutzungsszenarien die jeweils resultierende Ganglinie des Modellhangabflusses der Ganglinie bei bestehender Gebietsausstattung (Ist-Zustand) für den Zeitraum November 1999 bis Oktober 2003 gegenübergestellt. Vor allem im Rahmen von Szenario I (Erhöhung des Anteils versiegelter und verdichteter Flächen auf 15 %; vgl. Abbildung 7-26) werden signifikante Unterschiede zum Ist-Zustand deutlich, die jedoch weitgehend auf die Spitzenabflüsse beschränkt bleiben. Die ausgeprägtere Flächenversiegelung und -verdichtung führt hier insbesondere bei hohen Tagesniederschlägen in Kombination mit geringer Bodenvorfeuchte (21-Tage-Vorregenindex) zu einer deutlichen Erhöhung der Abflussscheitel. Bei Betrachtung aller Abflussspitzen $> 100 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ (vgl. Tabelle 7-25) ergibt sich ein mittlerer Zuwachs der Scheitelwerte um +14,3 %, wobei 10 der 11 Scheitel eine erhöhte Ausprägung zeigen. Lediglich am 03.01.2003 resultiert eine um -4,4 % herabgesetzte Scheitelhöhe, die dadurch begründet ist, dass hohe Niederschlagswerte des Vortages bei geringerem Versiegelungsgrad entsprechend verzögerte Abflussspitzen bewirken.

Szenario II (vgl. Abbildung 7-27), das von vollständig fehlender Flächenversiegelung und -verdichtung im Gebiet ausgeht, führt demgegenüber zu deutlich geringeren Abweichungen gegenüber dem Ist-Zustand, wobei auch hier die markantesten Unterschiede bei den Spitzenabflüssen auftreten. Erwartungsgemäß bleiben diese für Szenario II unter den realen Werten zurück, wobei die durchschnittliche Veränderung -3 % beträgt (vgl. Tabelle 7-25). Szenario II umfasst in diesem Zusammenhang jedoch nicht die indirekten Effekte, die durch einen Rückbau der Drainagegräben entstehen würden. Diese lassen einen deutlich darüber hinausgehenden Einfluss auf die Abflussdynamik erwarten: Es ist davon auszugehen, dass infolge eines entsprechenden Rückbaus, mangels direkter Überführung von Interflow und Oberflächenabfluss in das Grabensystem (kein direkter Anschluss der HRU-Teilflächen an das Gewässernetz), eine deutliche Absenkung der Abflussspitzen eintritt, obwohl gleichzeitig die Neigung zur Ausbildung von Sättigungsflächen am Unterhang ansteigt (vgl. Karte 3-12). Eine entsprechende Quantifizierung hätte jedoch erst durch eine Szenariensimulation realisiert werden können, bei der, im Gegensatz zur angewandten Modellstruktur, eine Nachbildung der Übergabe lateraler Abflusskomponenten zwischen den HRU-Teilflächen erfolgt. Wegen der grundlegenden Unterschiede zur bestehenden Modellstruktur wurde von der Berechnung des Szenarios abgesehen.

Im Rahmen von Szenario III, in dem, wie in Tabelle 7-24 dargelegt, alle HRUs mit der Landnutzung „Jungwuchs und Wiese“ durch die entsprechenden HRUs mit der Landnutzung „Laub- und Mischwald“ substituiert sind, zeigt sich die im Vergleich geringste Veränderung zur Abflussganglinie im Ist-Zustand. Die Abweichungen betreffen auch in diesem Fall in erster Linie die Scheitelabflüsse, die jedoch im Mittel lediglich um 1,2 % vermindert sind.

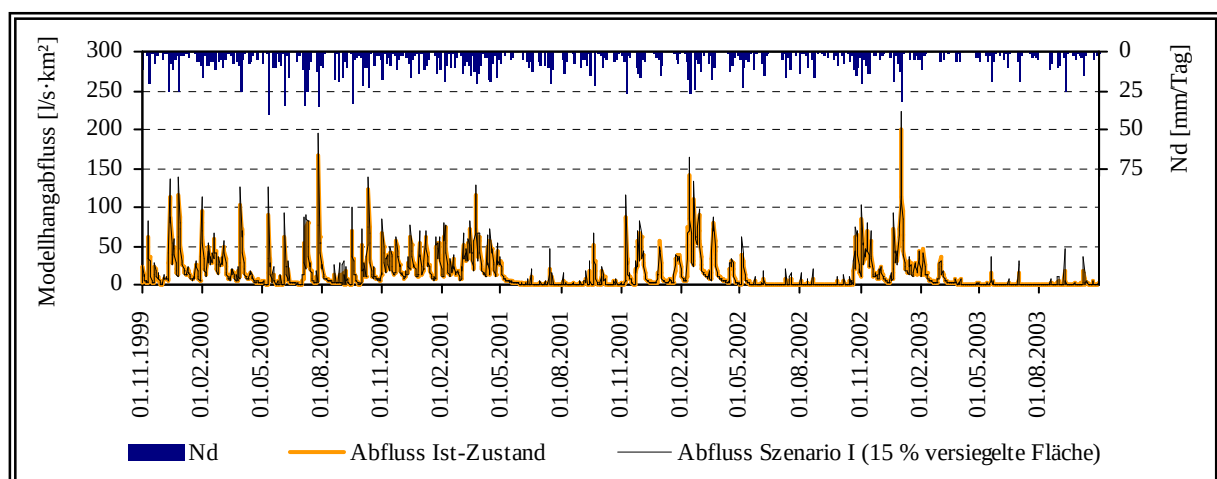


Abb. 7-26 Ganglinie des Modellhangabflusses für Szenario I (15 % versiegelte Fläche) und im Ist-Zustand.

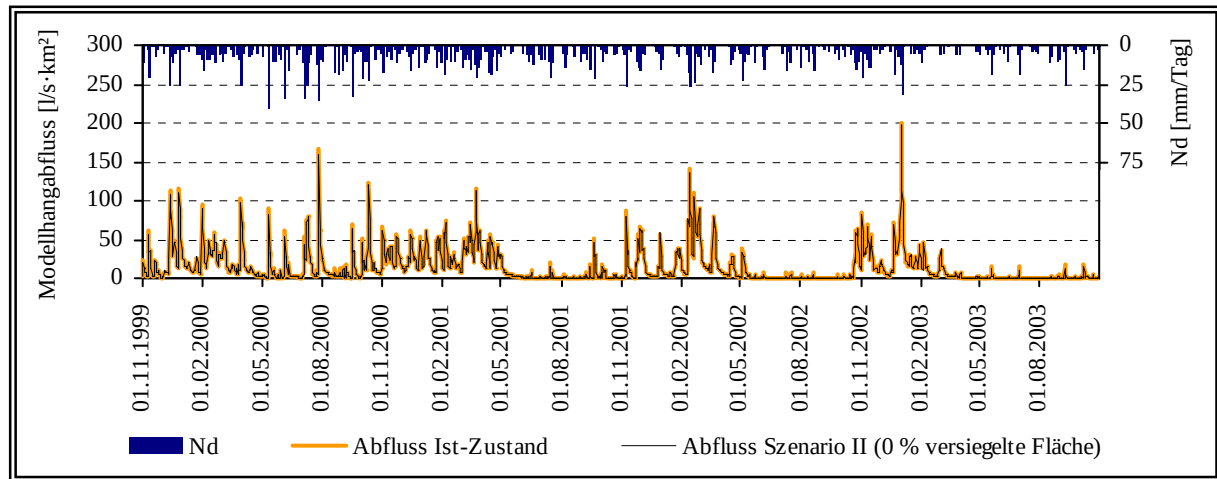


Abb. 7-27 Ganglinie des Modellhangabflusses für Szenario II (0 % versiegelte Fläche) und im Ist-Zustand.

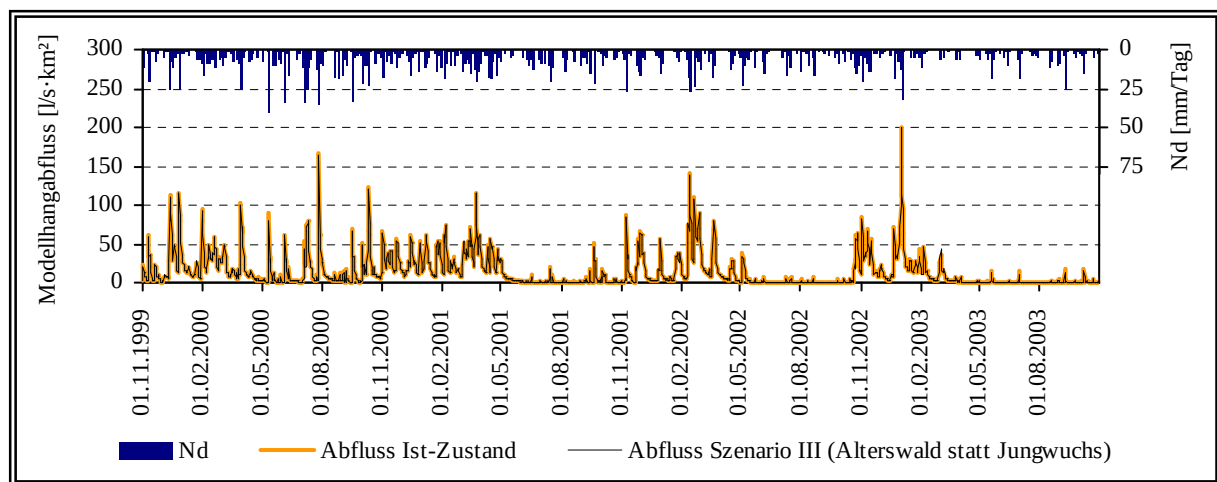


Abb. 7-28 Ganglinie des Modellhangabflusses für Szenario III (ohne Jungwuchs) und im Ist-Zustand.

Tabelle 7-25 Veränderung der Spitzenabflüsse $> 100 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ (Tagesmittelbasis) im Rahmen der Landnutzungsszenarien.

Datum	Scheitelhöhe im Ist-Zustand [$\text{l/s} \cdot \text{km}^2$]	Veränderung der Abflussspitze gegenüber Ist-Zustand [%]		
		Szenario I (15 % versiegelt)	Szenario II (0 % versiegelt)	Szenario III (ohne Jungwuchs)
12.12.1999	111,7	+21,1	-4,5	-2,0
26.12.1999	116,3	+20,1	-4,4	-1,7
30.03.2000	103,5	+21,7	-4,7	-2,4
27.07.2000	165,8	+17,5	-3,6	-0,4
11.10.2000	122,8	+13,4	-2,7	-1,1
23.03.2001	115,4	+12,2	-2,6	-1,1
13.02.2002	141,6	+15,4	-3,2	-1,4
20.02.2002	111,1	+19,6	-4,3	-2,0
01.01.2003	101,7	+10,4	-2,1	-0,9
02.01.2003	201,1	+10,7	-2,1	-0,7
03.01.2003	112,4	-4,4	+1,3	+0,9
Mittelwert	127,6	+14,3	-3,0	-1,2

Letztlich wird deutlich, dass eine Substitution der Jungwuchsbestände, die in erster Linie die Windwurfflächen von 1990 umfassen, durch Alterswald (Laub- und Mischwald) zwar zu einer Absenkung der Spitzenabflusswerte um durchschnittlich 1,2 % führt, der Abflussgang aus dem Modellhang jedoch im Rahmen einer Veränderung des Flächenversiegelungsgrades

beträchtlich stärker modifiziert wird. Diese Tatsache zeigt sich auch bei näherer Betrachtung ausgewählter Starkniederschlagsereignisse. In Abbildung 7-29 ist für die unterschiedlichen Landnutzungsszenarien zu diesem Zweck der Abflussgang aus dem Modellhang im Zeitraum von 01.06.2000 bis 31.07.2000 dargestellt. Die Ergebnisse sind jeweils dem Ist-Zustand gegenübergestellt. Folgendes wird deutlich:

- Eine Erhöhung des Anteils versiegelter Flächen auf 15 % (Szenario I, Abbildung 7-29a) führt im betrachteten Zeitraum zu einem enormen Anstieg der Spitzenabflusswerte. Dieser bewegt sich zwischen 17,5 % (27. Juli) und 67 % (4. Juli).
- Die Höhe des Zuwachses der Abflussspitzen bei Erhöhung des Anteils versiegelter Flächen (Szenario I, vgl. Abbildung 7-29a) hängt von der Niederschlagshöhe und der Bodenvorfeuchte ab. Wie exemplarisch der Vergleich von 4. und 7. Juli verdeutlicht, führen ähnliche Tagesniederschläge bei geringerer Bodenvorfeuchte (4. Juli) zu einem vergleichsweise höheren Zuwachs der Abflusswerte gegenüber dem Ist-Zustand.
- Auch bei Szenario I und II (vgl. Abbildung 7-29b und 7-29c) zeigt sich eine Modifikation im Abflussgeschehen, wobei gerade in Bezug auf die Abflussspitzen die Veränderungen mit -3,6 % (27. Juli) bis -15,7 % (4. Juli) für Szenario II und -0,4 % (27. Juli) bis -18,3 % (4. Juli) für Szenario III gegenüber dem Ist-Zustand geringer ausgeprägt sind als die Veränderungen bei Szenario I.

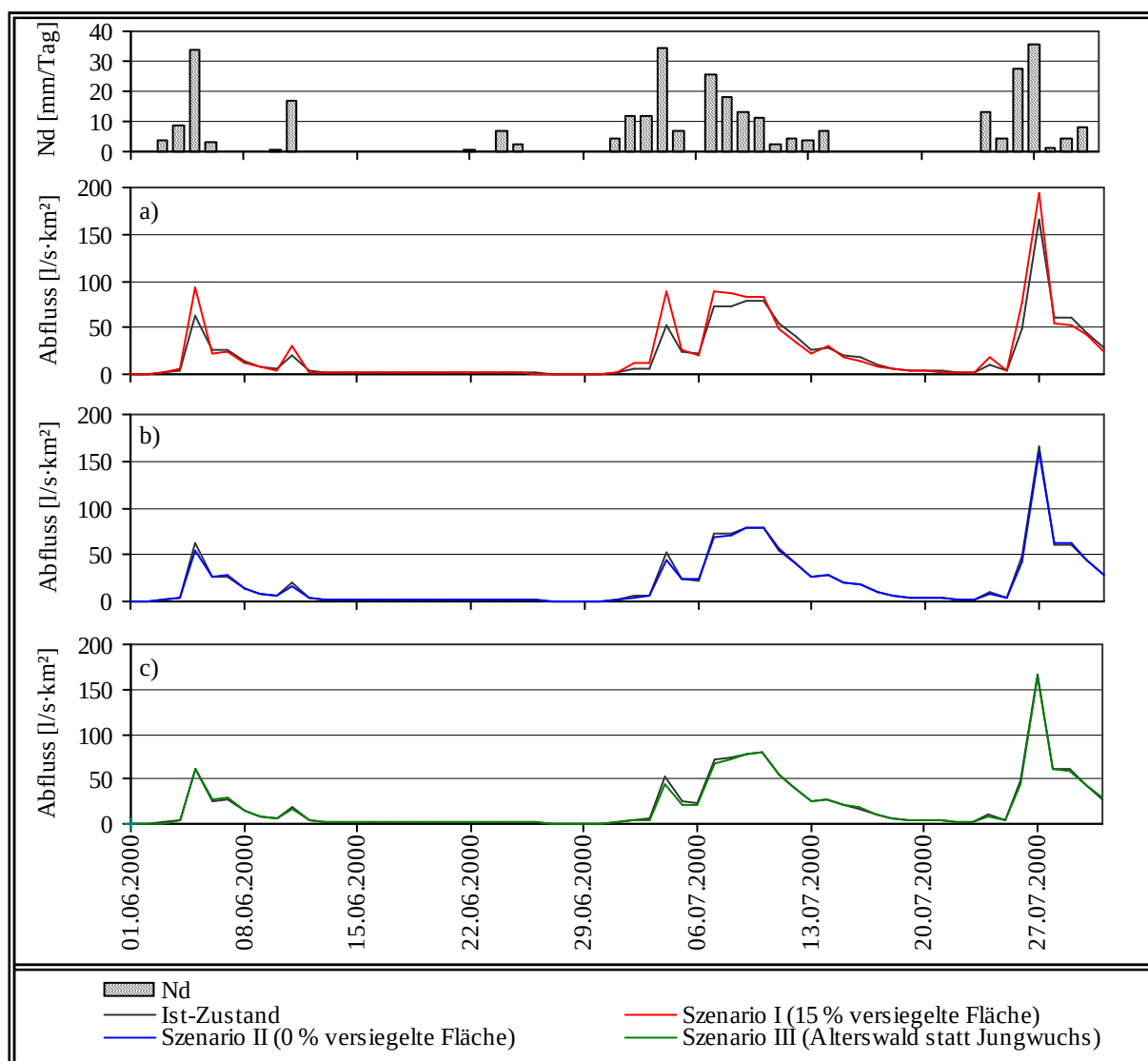


Abb. 7-29 Vergleich der simulierten Modellhangabflüsse für den Zeitraum 01.06.2000 bis 31.07.2000.

a) Szenario I gegenüber Ist-Zustand b) Szenario II gegenüber Ist-Zustand c) Szenario III gegenüber Ist-Zustand

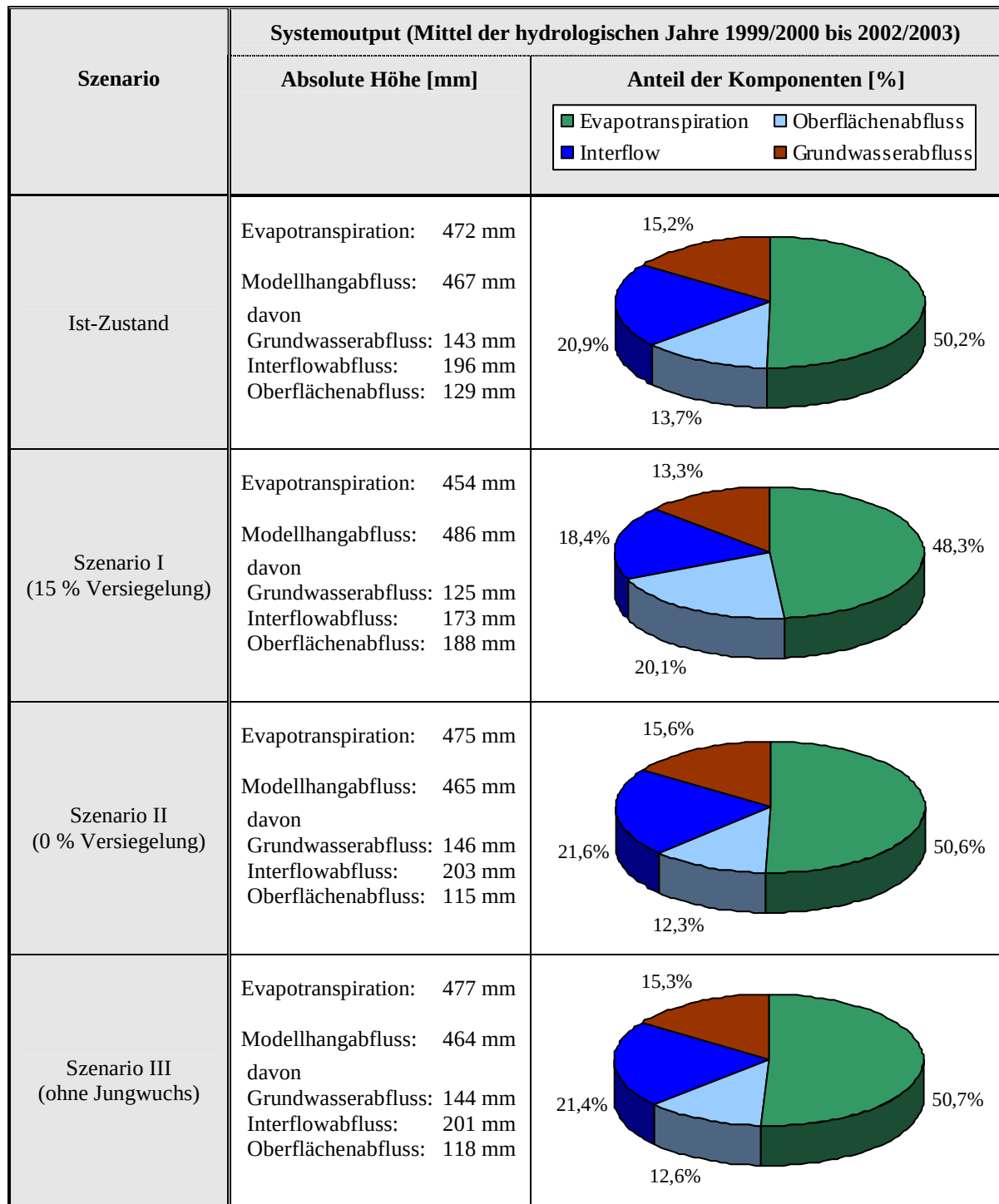


Abb. 7-30 Systemoutput (4-jähriges Mittel) im Rahmen der Landnutzungsszenarien.

Neben der dargelegten, auf Spitzenabflüsse fokussierten Betrachtungsweise, ist auch die zugrunde liegende Zusammensetzung des Systemoutputs auf Jahresbasis von Interesse. Wie Abbildung 7-30 verdeutlicht, bestehen im Mittel des 4-jährigen Simulationszeitraumes ausgeprägte szenarienspezifische Unterschiede: Szenario I (15 % versiegelte Fläche) führt auf Jahresbasis zu einer durchschnittlichen Erhöhung des Gebietsabflusses gegenüber dem Ist-Zustand um 4 % auf insgesamt 486 mm bzw. 51,7 % des Gesamtoutputs, wohingegen im Rahmen von Szenario II (0 % versiegelte Fläche) und Szenario III (ohne Jungwuchsflächen) eine Herabsetzung der Abflusshöhe um 0,5 % bzw. 0,7 % gegenüber dem Ist-Zustand eintritt. In diesem Zusammenhang verändert sich auch die Zusammensetzung der Abflusskompo-

nenten. So führt die Erhöhung des Versiegelungsgrades in Szenario I zu einer mittleren Zunahme des jährlichen Oberflächenabflusses auf 188 mm (Ist-Zustand: 129 mm), wohingegen Interflow, Grundwasserabfluss und Evapotranspiration deutlich vermindert sind. Für Szenario II und III fallen die Unterschiede zum Ist-Zustand weniger drastisch aus. Wie Abbildung 7-30 zeigt, nimmt in beiden Szenarien der Anteil des Oberflächenabflusses sichtbar ab, wohingegen Interflow, Grundwasserabfluss und Evapotranspiration ansteigen. Im direkten Vergleich beider Szenarien zeigt sich, dass sowohl die vollkommene „Entsiegelung“ des Gebietes (Szenario I; wie oben angemerkt jedoch ohne Berücksichtigung der indirekten Effekte, die durch den Rückbau der Drainagegräben entstehen würden) als auch das vollständige Fehlen von Jungwuchsbeständen (Szenario III) die Genese von Oberflächenabfluss auf jährlich 115 bzw. 118 mm herabsetzen. Im Gegenzug steigt in beiden Szenarien die Evapotranspiration an. Zudem nehmen hier jeweils Grundwasserabfluss und in erster Linie der Interflowabfluss signifikant zu.

8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in der jüngeren Vergangenheit zunehmende Häufigkeit schwerer Hochwasser der Nahe bildete den **Ausgangspunkt der durchgeführten Untersuchungen**. Trotz eines mit ca. 38 % hohen Anteils waldbestandener Flächen im Nahe-Einzugsgebiet, denen im Allgemeinen eine dämpfende Wirkung auf Hochwasserereignisse zugesprochen wird, traten u. a. in den Jahren 1993 und 1995 verheerende Hochwasser im Nahetal auf, die zu hohen Sachschäden führten. Auf dieser Problematik aufbauend wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit, die z. T. integriert in das vom Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz geförderte Projekt „Wasserrückhalt in Wäldern“ entstand, das Abflussverhalten eines kleinen, forstlich genutzten Areals im Nahe-Einzugsgebiet untersucht. Als **Untersuchungsgebiet** diente das 12,73 km² umfassende Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches, ein im Soonwald lokalisieretes Teileinzugsgebiet der Nahe, das fast ausschließlich forstlicher Nutzung unterliegt. Innerhalb dieses Einzugsgebietes wurde zusätzlich der 0,56 km² große Modellhang Hölzerkopf ausgegliedert, in dem vorwiegend die Instrumentierung zur Erhebung hydrometeorologischer Messreihen erfolgte. **Ziel der Untersuchung** war eine grundlegende Analyse des Abflussverhaltens im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches einschließlich Aufdeckung der zugrunde liegenden Abflussprozesse und Quantifizierung der Abflusskomponenten. Weiterhin sollte der Einfluss der Landnutzung und der Untergrundeigenschaften auf die Abflussbildung analysiert werden. Zu diesem Zweck wurden von Frühjahr 1999 bis Frühjahr 2004 eine Vielzahl hydrometeorologischer Messreihen im Gebiet erfasst, eingehende Geländebeobachtungen des Abflussgeschehens durchgeführt und die physiogeographischen Gebietseigenschaften erhoben. Mit Hilfe der so vorliegenden Daten konnte einerseits eine Bilanzierung des Wasserhaushaltes und eine grundlegende Analyse des Abflussverhaltens auf Basis statistisch-mathematischer Verfahren erfolgen, andererseits wurde die Anwendung des physikalisch basierten, konzeptionellen Einzugsgebietsmodells MMS/PRMS möglich, mit dem die im Gebiet ablaufenden hydrologischen Prozesse zunächst im Ist-Zustand und darauf aufbauend in verschiedenen Landnutzungsszenarien nachgebildet wurden. Die hierzu notwendige räumliche Diskretisierung des Einzugsgebietes erfolgte durch Ausweisung von Hydrological Response Units (HRUs), hydrologisch weitgehend homogen reagierender Teilflächen.

Aus Sicht der **physiogeographischen Gebietsausstattung** kann der Aufbau des **Modellhanges Hölzerkopf** als weitgehend charakteristisch für das gesamte **Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches** angesehen werden. Die Kamm- und Oberhangbereiche werden von morphologisch hartem Quarzit (Taunusquarzit) gebildet, wohingegen am Unterhang und in den Tallagen Tonschiefer (Hunsrückschiefer) anstehen. Über dem Ausgangsgestein sind mittelgebirgstypisch pleistozäne Deckschichten entwickelt (Basis- und Hauplage), auf denen wiederum in den oberen Hangbereichen Lockerbraunerden, in den unteren Hangbereichen Pseudogleye (lokal Stagnogleye) und in den dazwischen liegenden, mittleren Hanglagen die Übergangsformen Pseudogley-Braunerde und Braunerde-Pseudogley ausgebildet sind. Ab dem Mittelhang ist dabei mit zunehmender Deutlichkeit ein Stauhorizont ausgebildet, der sich talwärts immer weiter der Geländeoberfläche annähert (bis 30 cm u. GOF). Während in den oberen Hangbereichen ältere Fichten und Buchenbestände dominieren, findet sich auf den staunassen Böden des Unterhanges ein hoher Anteil von Flächen mit Jungwuchs und Dickung. Letztere setzen sich vorwiegend aus Birken, Erlen und Fichten zusammen, und sind auf ehemaligen Windwurfflächen lokalisiert, die aus Sturmereignissen der Vergangenheit resultieren. Die zuvor angesiedelten Fichtenbestände, die bei den entsprechenden Untergrundeigenschaften lediglich flache Tellerwurzeln ausbilden, fielen v. a. Orkan „Wiebke“ (1990) großflächig zum Opfer. Das gesamte Gebiet, in erster Linie jedoch der Unterhang, ist von einem dichten Netz anthropogen angelegter Drainagegräben durchzogen, das bereits ab Ende

des 18. Jahrhunderts zur Standortmelioration angelegt wurde. Dieses Grabennetz besitzt naturgemäß einen erheblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt des Gebietes: Die Kombination aus großer Einschnitttiefe der Gräben, oberflächennah anstehendem Stauhorizont und weitgehend wasserunwegsamem Tonschiefern im Untergrund von Mittel- und Unterhang bedingt, dass alle zuvor auf der Fläche gebildeten Abflusskomponenten rasch in das Grabensystem überführt, und so als Gerinneabfluss dem Gräfenbach zugeführt werden. Direkt damit einhergehend nimmt die Neigung der Unterhangbereiche zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss ab, ist jedoch immer noch stark ausgeprägt. Weiterhin wird so der gesamte Abfluss einzelner Hangbereiche vergleichsweise leicht mit Messgeräten in den Drainagegräben erfassbar.

Aufbauend auf der Erfassung der physiogeographischen Gebietsausstattung ergab sich, gestützt durch entsprechende Geländebeobachtungen, ein **erstes gedankliches Modell zur Hydrologie des Untersuchungsgebietes**: Auf dem Kamm und am Oberhang findet aufgrund der Wasserwegsamkeit des klüftigen Quarzitgesteins und mangels eines deutlich ausgeprägten Stauhorizontes in erster Linie die Perkolation des infiltrierten Wassers in tiefere Schichten statt. Interflow tritt dagegen nur untergeordnet, v. a. im Bereich großer Hangneigungen, auf. Der hier existierende Grundwasserkörper erstreckt sich lediglich bis an die Grenze zum Mittelhang, an dem weitgehend wasserunwegsame Tonschiefer im Untergrund anstehen. Im Grenzbereich findet sich eine Quellzone, in der das auf dem Kamm und am Oberhang dem Grundwasserspeicher zugeführte Wasser mit entsprechender zeitlicher Verzögerung in oberflächennahen, lateralen Abfluss transformiert wird. Oberflächennaher Interflow, der sowohl im Mikro- als auch im Makroporensystem auftritt, stellt insgesamt die vorherrschende Abflusskomponente der mittleren Hangbereiche dar. Der Interflow konnte in erster Linie an den Grabenschnitten, aber auch in den entlang des Hanges angelegten Schürfgruben beobachtet werden. Hauptentstehungsort des Interflows ist die Grenze zwischen Basis- und Hauptlage, an der ein deutlicher Wechsel in der Wasserleitfähigkeit des Substrates auftritt. Die Genese von Oberflächenabfluss erfolgt am Mittelhang, wie auch im Bereich von Kamm und Oberhang, ausschließlich auf verdichteten oder versiegelten Flächen (z. B. Forstwege). Am Unterhang herrscht demgegenüber großflächig Oberflächenabfluss vor, der im Allgemeinen als Sättigungsflächenabfluss ausgebildet ist. Dieser konnte, bei entsprechender Vorsättigung der Böden, bereits bei weniger starken Niederschlagsereignissen beobachtet werden. Eine besondere Bedeutung kommt darauf aufbauend dem Netz an Drainagegräben zu, die den Oberflächenabfluss aufnehmen und direkt zum Vorfluter ableiten. Am Mittelhang erfolgt dies in entsprechender Weise mit dem Interflow.

Sowohl das **Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches** als auch der **Modellhang Hölzerkopf** zeigen die dargelegten, prinzipiellen Mechanismen der Abflussentstehung und sind entsprechend den physiogeographischen Gebietseigenschaften in sich heterogen aufgebaut, wobei der Modellhang, bei graduellen Unterschieden, prinzipiell als exemplarisch für das Gesamtgebiet angesehen werden kann. Das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und der Modellhang besitzen dementsprechend ein grundsätzlich ähnliches Abflussverhalten. Die Abflussganglinien beider Gebiete zeigen in allen untersuchten zeitlichen Skalen einen sehr starken linearen Zusammenhang (jeweils signifikant auf dem Niveau $\alpha = 0,01$).⁴⁵ Auf Monatsbasis beträgt der Zusammenhang $r = +0,96$, auf Tagesbasis $r = +0,95$ und auf Basis der 15-minütlichen Werte $r = +0,92$. Folgende Ergebnisse zum **Abflussverhalten und Wasserhaushalt beider Gebiete** konnten ermittelt werden:

⁴⁵ Aufgrund des sukzessiven Aufbaus der Instrumentierung war ein direkter Vergleich beider Gebiete lediglich anhand der beiden hydrologischen Jahre 2001/2002 und 2002/2003 möglich.

- In den beiden vergleichsweise niederschlagsarmen Jahren 2001/2002 (837 mm Nd) und 2002/2003 (674 mm Nd) gehen aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches im Mittel 42 % und aus dem Modellhang Hölzerkopf 39 % des Niederschlagsinputs wieder als Abfluss ab. In den beiden niederschlagsreicheren Jahren 1999/2000 (1219 mm Nd) und 2000/2001 (951 mm Nd), für die aufgrund der Instrumentierung lediglich Abflussreihen aus dem Modellhang vorliegen, ist der Anteil mit durchschnittlich 51 % deutlich höher angesiedelt. Für den Modellhang ergibt sich im Vierjahreszeitraum eine mittlere jährliche Abflusshöhe von 428 mm bei einem mittleren Abflussquotienten von 0,45. Der Abflussquotient nimmt somit für ein Einzugsgebiet in den Mittelgebirgslagen Deutschlands vergleichsweise hohe Werte an. Die absolute Abflusshöhe ist demgegenüber deutlich durch die Kulissenwirkung der westlich und nördlich gelegen Gebirge beeinflusst und bewegt sich aufgrund der herabgesetzten Niederschlagshöhen im Vergleich zu Eifel, Hoch- und Idarwald auf geringerem Niveau (vgl. BMU 2003, DFG 1983, Keller 1978, Leibnitz-Institut für Länderkunde 2003a).
- Sowohl der Abflussgang des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches als auch der des Modellhanges Hölzerkopf besitzen eine gebietstypisch ausgeprägte Saisonalität mit einem Abflussmaximum im Januar/Februar und einem Minimum in den Monaten Juli bis September, wobei der Abfluss in den letztgenannten Monaten z. T. fast vollständig versiegt. Dieses saisonale Verhalten der Abflüsse spiegelt sich, bei den gegebenen jahreszeitlich ausgeglichenen Niederschlagsverhältnissen, direkt im Abflussquotienten wider, der sich für beide Gebiete in den Wintermonaten dem Wert 1 annähert und in den Sommermonaten auf Werte knapp über 0 zurückgeht.
- Die relative intraannuelle Variabilität der Abflüsse ist am Modellhang Hölzerkopf in allen zeitlichen Betrachtungsebenen gegenüber dem Gesamteinzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches etwas stärker ausgeprägt. Auf Basis der Stundenmittelwerte beträgt diese für den Modellhang durchschnittlich 123 % gegenüber 106 % im Einzugsgebiet, auf Monatsbasis 103 % gegenüber 93 %.
- In der ereignisbezogenen Betrachtung zeigen sich deutlichere Unterschiede zwischen beiden Gebieten: Die Scheitelabflüsse des Modellhanges übertreffen die des Einzugsgebietes um durchschnittlich 30 %, wobei die Scheitel des Einzugsgebietes im Allgemeinen ca. 15 bis 45 Minuten verzögert auftreten. In beiden Gebieten finden sich erhebliche jahreszeitliche Unterschiede in der Systemantwort auf identische Niederschläge.
- In der Summe deuten die Beobachtungen auf ein geringfügig erhöhtes Retentionsvermögen des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches gegenüber dem Modellhang Hölzerkopf hin. Wie die aufbauende Modellierung zeigte, beruht dieses höhere Retentionsvermögen größtenteils auf den Abweichungen in der naturräumlichen Ausstattung.

Während Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und Modellhang Hölzerkopf somit geringe Unterschiede im Abflussverhalten aufweisen, stellen sich diese zwischen einzelnen **Segmenten des Modellhanges** – entsprechend den zuvor dargelegten, im Gebiet beobachteten Unterschieden bezüglich der vorherrschenden Abflusskomponenten – wesentlich ausgeprägter dar. Teilt man den Modellhang in zwei Segmente auf, **Unterhang** einerseits und oberhalb gelegene Hangbereiche („**Mittel- und Oberhang**“) andererseits, zeigt sich, dass der Abflussgang aus diesen Teilräumen weniger starke, wenngleich immer noch signifikante Korrelationen zeigt. Der Zusammenhang ist dabei einer jahreszeitlichen Komponente unterworfen. Folgende Merkmale des **Abflussverhaltens beider Hangbereiche** wurden deutlich:

- Die jährliche Abflusshöhe aus dem Unterhang ist in beiden beobachteten Jahren deutlich gegenüber den oberhalb gelegenen Hangbereichen erhöht. Im Mittel der beiden beobachteten Jahre 2001/2002 und 2002/2003 beträgt die Abflusshöhe aus dem Unterhang 355 mm, aus Mittel- und Oberhang 255 mm. Das resultierende durchschnittliche Abflussverhältnis beträgt für den Unterhang 0,47 und für Mittel- und Oberhang 0,33.
- Die beiden Teilräume weisen offensichtliche Unterschiede in der Saisonalität ihrer Abflüsse auf. Der Unterhang zeigt in der ersten Hälfte des Winterhalbjahres eine vergleichsweise höhere Abflusspende, wohingegen in den oberhalb gelegenen Bereichen in der zweiten Hälfte des Winterhalbjahres höhere Werte vorliegen. Ein Abflussminimum stellt sich in beiden Gebieten in den Sommermonaten ein, wobei der Rückgang der Abflusswerte aus dem Unterhang im Allgemeinen früher eintritt, so dass der monatliche Abflussgang aus Mittel- und Oberhang um ein bis zwei Monate verzögert ist. Daraus resultiert weiterhin, dass der Unterhangbereich von Oktober bis Januar/Februar, bei insgesamt hohen Abflusswerten, den größten Anteil am Gesamtabfluss aus dem Modellhang beisteuert, während Mittel- und Oberhang zum Ende des Winterhalbjahres den größeren Anteil beisteuern. Diese Verhältnisse spiegeln sich entsprechend im Gang des monatlichen Abflussquotienten wider.
- Die intraannuelle Abflussvariabilität des Unterhanges ist auf allen zeitlichen Betrachtungsebenen deutlich erhöht. Auf Basis der Stundenmittelwerte beträgt sie hier durchschnittlich 152 % gegenüber 103 % an Mittel- und Oberhang, auf Monatsbasis beträgt sie 111 % gegenüber 90 % an Mittel- und Oberhang.
- In beiden Gebieten besteht (wie zu erwarten) ein signifikanter linearer Zusammenhang zwischen täglicher Niederschlags- und Abflusshöhe. Dieser Zusammenhang bleibt jedoch weitgehend auf die drei Jahreszeiten Herbst, Winter und Frühjahr beschränkt. Vor allem im Winter ist der Zusammenhang stark ausgeprägt, er beträgt am Unterhang $r = +0,74$ und an Mittel- und Oberhang $r = +0,65$. Es wird deutlich, dass die tägliche Niederschlagshöhe einerseits in allen Jahreszeiten eine stärkere Korrelation zu den Abflusswerten des Unterhanges aufweist, und dass andererseits identische Niederschläge stets höhere Abflussmengen aus dem Unterhang hervorrufen. Der durchschnittliche Proportionalitätsfaktor schwankt in Abhängigkeit von der Jahreszeit zwischen 2,5 und 3,5. Einzig an niederschlagsarmen Tagen wird der erhöhte Basisabfluss aus Mittel- und Oberhang deutlich.
- Auch der 21-Tage-Vorregenindex weist, ähnlich der täglichen Niederschlagshöhe, bei Betrachtung der Tageswerte einen jahreszeiten- und gebietsspezifischen Einfluss auf die tägliche Abflusshöhe auf. Besonders bedeutend stellt sich der Zusammenhang im Winter dar, in dem er für Mittel- und Oberhang $r = +0,79$ und für den Unterhang $r = +0,58$ beträgt. In den Übergangsjahreszeiten und im Sommer nimmt der Einfluss des 21-Tage-Vorregenindex auf die tägliche Abflusshöhe jedoch deutlich ab. Der Zusammenhang ist dabei stets für Mittel- und Oberhang stärker ausgeprägt, so dass insgesamt deutlich wird, dass der Abfluss aus dem Unterhang stärker durch die aktuelle tägliche Niederschlagshöhe beeinflusst wird, während der Abfluss aus Mittel- und Oberhang stärker von vorangegangenen Niederschlagsereignissen bzw. der Bodenvorfeuchte abhängt. Dies belegt das geringere Retentionsvermögen des Unterhanges.
- Bei ausschließlicher Betrachtung von Hochwasserereignissen zeigt sich eine Abhängigkeit der Scheitelhöhe von Höhe und Intensität der Niederschläge, die am Unterhang stärker ausgeprägt ist ($r^2_{\text{Unterhang}} = +0,69$; $r^2_{\text{Mittel- u. Oberhang}} = +0,43$). Im Gegensatz zur vorangegangenen Betrachtung auf Tagesbasis ist dem 21-Tage-Vorregenindex jedoch

kein Einfluss auf die Höhe der Abflussscheitel bei starken Hochwasserereignissen zuzumessen ($r^2_{\text{Unterhang}} = +0,04$; $r^2_{\text{Mittel- u. Oberhang}} = +0,02$). Dies betrifft beide Hangbereiche, und belegt, dass gerade bei starken Hochwasserereignissen der Niederschlagscharakteristik der stärkste Einfluss auf den Abflussgang zukommt.

- Bei der ereignisbezogenen Betrachtung wird weiterhin deutlich, dass entsprechende Niederschlagshöhen am Unterhang zu vergleichsweise höheren Abflussspitzen führen. Die Scheitelwerte des Unterhangs übersteigen die von Mittel- und Oberhang maximal um den Faktor 4, wobei der Proportionalitätsfaktor mit steigender Niederschlagshöhe zunimmt, d. h. dass der Unterhang gerade bei ausgeprägten Niederschlagsereignissen sehr stark zum Gesamtabfluss des Modellhangs beiträgt.
- **Insgesamt** konnte durch den **Vergleich beider Hangsegmente** das deutlich herabgesetzte Retentionsvermögen des Unterhangs nachgewiesen werden. Niederschlagsereignisse führen hier vor allem in der vegetationslosen Zeit zu vergleichsweise höheren Scheitelabflüssen und Abflussvolumina. Dieser Sachverhalt lässt sich ursächlich auf die Naturraumausstattung beider Teilgebiete und die resultierenden Abflusskomponenten zurückführen. Während am Unterhang, bedingt durch die flachgründigen Böden und die lang andauernde Stauwasserführung, bereits bei Niederschlägen geringerer Höhe und Intensität ausgeprägter Oberflächenabfluss zu beobachten ist (vgl. Bild 3-16), der in Verbindung mit dem dichten Netz anthropogen angelegter Drainagegräben einen deutlichen Anstieg der Abflussvolumina hervorruft, herrscht im Bereich von Mittel- und Oberhang in erster Linie Interflow als Abflusskomponente vor (vgl. Bild 6-6). Aufgrund des größeren Flurabstandes des Stauhorizontes in Verbindung mit einer erhöhten Feldkapazität besteht dabei eine im Allgemeinen stärkere Abhängigkeit zu Vorregenereignissen bzw. zur Vorfeuchte im Vergleich zum Unterhang (bei sehr ergiebigen Niederschlägen tritt die Abhängigkeit in beiden Hangsegmenten in den Hintergrund). Interflow stellt naturgemäß eine verzögerte Abflusskomponente dar, die erst im Einschnittsbereich der Drainagegräben in oberflächlichen Gerinneabfluss überführt wird, wodurch auch in diesem Hangbereich der Grabennetzdichte eine bedeutende Rolle zukommt. Da sich beide ausgewiesenen Hangsegmente sowohl bezüglich ihrer morphologischen und pedologischen Eigenschaften als auch bezüglich des Vegetationsbestandes erheblich unterscheiden, konnte die Frage nach dem Einfluss der Vegetation auf die Abflussbildung erst anhand der aufbauenden Modellierung mit MMS/PRMS erörtert werden

In einem weiteren Betrachtungsansatz wurde der **Modellhang Hölzerkopf in insgesamt zehn Teileinzugsgebiete untergliedert**. Aufgrund der Gebietsinstrumentierung war eine vergleichende Abflussanalyse jedoch lediglich auf Basis der Ergebnisse der zeitlich schwach aufgelösten Gefäßmessungen möglich. Folgende Ergebnisse sind festzuhalten:

- Die 10 Teileinzugsgebiete des Modellhangs können in Gruppen ähnlichen Abflussverhaltens zusammengefasst werden, wobei sich auch hier die deutliche Zweiteilung des Modellhangs Hölzerkopf in Teilgebiete des Unterhangs und Teilgebiete der oberhalb gelegenen Hangbereiche zeigt. Im Rahmen einer weitergehenden Untergliederung bietet sich eine Aufteilung der Teileinzugsgebiete der oberen Hangbereiche in zwei Untergruppen an. Diese weisen jedoch untereinander deutlich geringere Unterschiede auf als gegenüber den Teilgebieten des Unterhangs. Auf einem annehmbaren Generalisierungsniveau ergeben sich so drei Teileinzugsgebietsklassen mit ähnlichem Abflussverhalten. Die Teilgebiete von Klasse I und II erstrecken sich jeweils über Kamm, Ober- und Mittelhang, während jene von Klasse III fast ausschließlich am Unterhang lokalisiert sind.

- Bezüglich des Abflussverhaltens weisen die Teilgebiete des Unterhangs (Klasse III) in allen zeitlichen Betrachtungsebenen die größte Abflussvariabilität, im Jahresmittel die höchsten Abflusssummen und die höchsten Scheitelabflüsse auf. Die beiden in den oberen Hangbereichen gelegenen Klassen (Klasse I und II) zeigen demgegenüber eine deutlich eingeschränkte Abflussvariabilität. Die Teilgebiete des Unterhangs (Klasse III) steuern dabei vor allem im abflussintensiven Winterhalbjahr einen Großteil zum Gesamtabfluss aus dem Modellhang bei.
- Die beiden Gebietsklassen der oberen Hangbereiche (Klasse I und II) unterscheiden sich bezüglich der Naturraumausstattung v. a. durch die höhere Heterogenität in Klasse II. Diese betrifft v. a. die Untergrundeigenschaften, während Vegetationsbestand und Lage am Hang vergleichbar sind. Die Gebiete der Klasse II, die bezüglich des Abflussverhaltens eine moderate Erhöhung der Variabilität sowie höhere Scheitelwerte des Abflusses zeigen, umfassen verstärkt Bereiche, deren Untergrundbeschaffenheit eine Übergangsstellung zum Unterhang einnimmt, die also bereits eine herabgesetzte nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes bei deutlicher Annäherung des Stauhorizontes an die Geländeoberfläche aufweisen. Auch hier finden sich somit Hinweise, dass Unterschiede im Abflussverhalten primär durch die Untergrundbeschaffenheit determiniert sind, wohingegen dem Vegetationsbestand lediglich eine untergeordnete Rolle zufällt.

Zur weiteren Untersuchung des Einflusses von Untergrund und Landnutzung auf das Abflussverhalten wurde eine weitergehende, **prozessorientierte räumliche Diskretisierung des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches in Hydrological Response Units (HRUs)**, hydrologisch weitgehend homogen reagierende Teilflächen, durchgeführt. Insgesamt wurden auf Basis von Reliefeigenschaften, pedologisch-geologischen Eigenschaften und Landnutzung 15 HRUs im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches ausgewiesen, die sich aus insgesamt 438 Elementarflächen zusammensetzen. Bezüglich des Reliefs wurden dabei 3 Neigungsklassen unterschieden ($< 5^\circ$, 5° bis 10° , $> 10^\circ$), bezüglich des Untergrundes erfolgte eine Aufteilung in 2 Klassen („Böden mit Staunäseeinfluss“, „Böden ohne Staunäseeinfluss“) und bezüglich der Landnutzung wurden 4 Klassen unterschieden („Nadelwald“, „Laub- und Mischwald“, „Jungwuchs, Wiese und Buschbrache“, „Verkehrs- und Siedlungsflächen“). Die so ausgewiesenen HRUs dienten als Modellierungseinheiten der aufbauenden, flächendifferenzierten Nachbildung des Wasserhaushaltes des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches bzw. des Modellhangs Hölzerkopf mit Hilfe des **physikalisch basierten, konzeptionellen Einzugsgebietsmodells MMS/PRMS**. Mit Hilfe des Modells erfolgte zunächst eine Nachbildung der hydrologischen Abläufe im Ist-Zustand. Dabei wurde eine vergleichsweise einfache Modellstruktur gewählt, bei der, entsprechend dem klassischen HRU-Ansatz, die 15 HRU-Klassen als Berechnungsgrundlage dienten, ohne die Nachbarschafts- und Vorfluterbeziehungen der 438 HRU-Elementarflächen im Detail zu berücksichtigen. Trotz des vergleichsweise einfachen Modellansatzes konnte auf Basis von Tageswerten eine hohe **Modellgüte** erreicht werden. Der Vergleich von beobachtetem und simuliertem Abflussgang ergab für den Modellhang Hölzerkopf einen Zusammenhang von $r = +0,86$ (01.11.1999 bis 31.10.2003) und für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches einen Zusammenhang von $r = +0,88$ (01.11.2001 bis 31.10.2003). Dabei wurde das Abflussvolumen aus beiden Gebieten insgesamt jeweils übersimuliert, auf Monatsbasis für den Modellhang durchschnittlich um 2,3 mm und für das Einzugsgebiet um 3,7 mm. Die durch den z. T. konzeptionellen Modellcharakter gegebene Gefahr einer Ausweisung falscher Parametersätze wurde durch den darüber hinausgehenden Vergleich von beobachteten und simulierten Abflüssen für unterschiedliche Hangbereiche minimiert. Die **Nachbildung des Ist-Zustandes** führte zu folgenden **Ergebnissen**:

- Auf Jahresbasis stellt Interflow sowohl im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (55 % des Gesamtabflusses) als auch am Modellhang Hölzerkopf (45 %) die dominierende Abflusskomponente dar. Als zweitstärkste Komponente folgt im Modellhang Grundwasserabfluss (28 %), im Einzugsgebiet Oberflächenabfluss (27 %).
- In beiden Gebieten zeigt sich ein ähnlicher Jahresgang der Abflusskomponenten: Interflow nimmt vor allem im Winterhalbjahr, bei insgesamt hohen Abflussvolumina, eine zentrale Stellung ein, wohingegen Oberflächenabfluss vor allem in den Sommermonaten, sowohl in niederschlagsärmeren als auch in niederschlagsreicheren, die Hauptabflusskomponente bildet. Lediglich bei sehr ergiebigen sommerlichen Niederschlägen (z. B. im Sommer 2000) entfällt auch in dieser Jahreszeit ein hoher Anteil auf die Komponente Interflow. Grundwasserbürtiger Abfluss, der an der Grenze von Ober- zu Mittelhang, d. h. an der Grenze von quarzitischem Gestein zu Tonschiefer, in oberflächennahen Abfluss bzw. in der Folge zu Gerinneabfluss überführt wird, tritt v. a. im Winterhalbjahr verstärkt auf (in erster Linie in der zweiten Hälfte).
- Entsprechend der im Gebiet erzielten Beobachtungsergebnisse zeigt sich, dass Oberflächenabfluss in erster Linie in den unteren Hangbereichen auftritt. Auch der Abflussquotient nimmt in den unteren Hangbereichen höhere Werte an. Die auftretenden räumlichen Muster sind dabei in erster Linie von den Untergrundeigenschaften abhängig und erst in zweiter Linie von der Landnutzung.

Aufbauend auf der Nachbildung des Ist-Zustandes wurden drei **Landnutzungsszenarien** für den **Modellhang** simuliert:

- **Szenario I:** Erhöhung des Anteils versiegelter Flächen⁴⁶ von 2,9 % auf 15 %
- **Szenario II:** Absenkung des Anteils versiegelter Flächen⁴⁶ von 2,9 % auf 0 %⁴⁷
- **Szenario III:** vollständige Substitution der Jungwuchsbestände durch Altersmischwald

Folgende **Ergebnisse** konnten aus dem Vergleich der **Landnutzungsszenarien** mit dem Ist-Zustand abgeleitet werden:

- Szenario I weist auf allen betrachteten zeitlichen Ebenen die größten Unterschiede zum Ist-Zustand auf, wohingegen Szenario II und III zu vergleichsweise geringeren Unterschieden führen.
- Spitzenabflüsse (Tagesmittelbasis) zeigen sich in Szenario I gegenüber dem Ist-Zustand i. d. R. erheblich erhöht. Eine vollständige Entsiegelung des Modellhanges (Szenario II) und eine vollständige Substitution der Jungwuchsbestände durch Altersmischwald (Szenario III) führen demgegenüber jeweils zu einer geringfügigen Absenkung der Spitzenabflüsse.
- Die Szenarien führen in unterschiedlicher Weise zu einer Verschiebung der Anteile der Abflusskomponenten am Gesamtabfluss. Während die Erhöhung des Versiegelungsgrades erwartungsgemäß zu einem sprunghaften Anstieg des Oberflächenabflussanteils führt, nimmt dieser im Rahmen von Szenario II und III jeweils geringfügig ab.

⁴⁶ Der Begriff „versiegelt“ bezeichnet hier alle Flächen (auch verdichtete), die durch anthropogene Eingriffe keine bzw. eine sehr geringe Infiltrationskapazität besitzen: Straßen, Forstwege, Gräben (vgl. Kapitel 7.3.3.2).

⁴⁷ Ohne Berücksichtigung der indirekt durch den Gewässerrückbau eintretenden Effekte (Veränderung der Sättigungsneigung, kein direkter Anschluss der HRU-Teilflächen an das Gewässernetz mehr gegeben).

- Insgesamt wird deutlich, dass die Substitution der Jungwuchsbestände durch Altersmischwald nur eine vergleichsweise schwache Auswirkung auf den Wasserhaushalt des Modellhanges zeigt. Ähnlich in der Wirkung erweist sich die Herabsetzung des Versiegelungsgrades im Gebiet von real existierenden 2,9 % auf 0 %, wobei die indirekten Effekte des Rückbaus der Drainagegräben im Rahmen dieses Szenarios nicht berücksichtigt wurden (Veränderung der Sättigungsneigung des Unterhanges, kein direkter Anschluss der HRU-Teilflächen an das Gewässernetz mehr gegeben).

Bezüglich der **Untersuchungsmethoden** ist **zusammenfassend festzuhalten**, dass in umfangreichen Geländearbeiten das Abflussverhalten des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenabaches studiert und z. T. quantitativ erfasst wurde. Die erhobenen Datenreihen umfassen dabei in erster Linie Abflusswerte, die an unterschiedlichen Messpunkten im Gebiet erhoben wurden. Darüber hinausgehend wurde die physiogeographische Gebietsausstattung direkt im Gelände ermittelt bzw. aus bereits bestehenden Datenquellen abgeleitet und in ein GIS integriert. Auf allen genannten Ebenen der Datenerhebung wäre eine noch umfangreichere und weitergehendere Erfassung hydrologisch relevanter Kenngrößen und Messwerte wünschenswert gewesen. Exemplarisch seien z. B. tracerhydrologische Untersuchungen, der Ausbau des Netzes elektronischer Pegelanlagen oder weitere Analysen zur Bodenhydraulik genannt. Eine entsprechende Ausweitung der Untersuchungen war im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht möglich. Auch sind mit fortschreitender Projektdauer Schwächen des Modells MMS/PRMS zutage getreten: Gerade im Bereich der Abflussbildung im Boden besitzt das Modell einen ausgesprochen konzeptionellen Charakter, wodurch die Simulation weiterer Szenarien (z. B. Veränderung der Untergrundeigenschaften) nicht umgesetzt werden konnte, da sie mit zu großen Unsicherheiten behaftet erschienen. Auch der Einfluss eines Rückbaus der Drainagegräben konnte bei der gewählten Modellstruktur nicht simuliert werden. Zu diesem Zweck muss entweder die Struktur des Modells MMS/PRMS modifiziert oder auf ein alternatives Modell zurückgegriffen werden. Dennoch ist letztlich zu konstatieren, dass trotz z. T. starker Vereinfachungen – auch bei der Diskretisierung des Untersuchungsgebietes in HRUs – für alle betrachteten Teilräume eine hohe Modellgüte erreicht werden konnte.

Als **wichtigste Ergebnisse der Untersuchungen** zum Abflussverhalten und Wasserhaushalt im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenabaches sind mehrere Punkte festzuhalten: Das Abflussgeschehen weist bei insgesamt hohen Abflussvolumina eine sehr hohe Variabilität auf. Dabei bestehen jedoch signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Hangbereichen, die in erster Linie durch abweichende Untergrundeigenschaften bedingt sind. Die oberen Hangbereiche weisen einerseits ein deutlich erhöhtes Wasserrückhaltevermögen gegenüber dem Unterhang auf, andererseits bestehen gravierende Unterschiede in den vorherrschenden Mechanismen der Abflussbildung. Während am Unterhang weitgehend Sättigungsflächenabfluss dominiert, findet sich am Mittelhang fast ausschließlich Interflow, der v. a. durch einen deutlichen Wechsel in der Wasserleitfähigkeit zwischen Haupt- und Basislage hervorgerufen wird. Eine Grundwasserneubildung erfolgt ausschließlich am Oberhang und auf dem Kamm. Insgesamt wurde anhand der Modellierung deutlich, dass eine Veränderung der forstlichen Bestandeszusammensetzung nur vergleichsweise geringe Auswirkungen auf das Abflussverhalten des Gebietes hervorruft.

Quellenverzeichnis

Literatur

- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Hannover.
- AK Standortkartierung (1996): Forstliche Standortsaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 5. Auflage. Eching bei München.
- Altermann, M. & Kühn, D. (1999): Systematik der bodenbildenden Substrate. Kapitel 3.2.8. In: Blume, H.-P. et al. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Landsberg.
- Ammer, U., Breitsameter, J. & Zander, J. (1988): Experimentelle Untersuchungen über den Einfluß des Befahrens auf die Oberbodenverdichtung. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 107. S. 112–122.
- Anacker, H. (1956): Übersicht über die Geologie des oberen Nahe-Gebietes. In: Fischer, W.: Vom Hunsrück zum Westrich. Zur Geologie des oberen Nahegebietes um Idar-Oberstein. Der Aufschluss. 3. Sonderheft. Rossdorf. S. 3–13.
- Andersen, J., Refsgaard, J.C. & Jensen, K.H. (2001): Distributed Hydrological Modelling of the Senegal River Basin – Model Construction and Validation. In: Journal of Hydrology 247 (3–4). S. 200–214.
- Anderson, M.G. & Burt, T.P. (1990): Process Studies in Hillslope Hydrology. Chichester.
- Arnell, N.W. & Reynard, N.S. (1996): The Effects of Climate Change Due to Global Warming on River Flows in Great Britain. In: Journal of Hydrology 183 (3–4). S. 397–424.
- Bahrenberg, G., Giese, E. & Nipper, J. (1999): Statistische Methoden in der Geographie. Band 1. 4. Auflage. Univariate und bivariate Statistik. Stuttgart/Leipzig.
- Bahrenberg, G., Giese, E. & Nipper, J. (1992): Statistische Methoden in der Geographie. Band 2. Multivariate Statistik. 2. Auflage. Stuttgart.
- Balázs, Á. (1983): Ein kausalanalytischer Beitrag zur Quantifizierung des Bestands- und Nettoniederschlags von Waldbeständen. Dissertation. Technische Universität Berlin.
- Bárdossy, A. & Caspary, H.J. (1990): Detection of Climate Change in Europe by Analyzing European Atmospheric Circulation Patterns from 1881–1989. In: Theoretical and Applied Climatology 42 (3). S. 155–167.
- Barsch, D. et al. (Hrsg.) (1994): Messungen in fluvialen Systemen. Feld- und Labormethoden zur Erfassung des Wasser- und Stoffhaushaltes. Berlin et al.
- Bauer, Erich (1962): Der Soonwald im Hunsrück. Forstgeschichte eines deutschen Waldgebietes. Schriftenreihe zur Trierischen Landesgeschichte und Volkskunde. Band 11. Freiburg.
- Baumgartner, A. & Liebscher H.-J. (1996): Lehrbuch der Hydrologie. Band 1. Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie. 2. Auflage. Berlin/Stuttgart.

- Becht, M. & Wetzel, K.-F. (1994): Abfluß- und Niederschlagsmessung eines Wildbachsystems (Lainbach/Oberbayern). In: Barsch, D. et al. (Hrsg.): Messungen in fluvialen Systemen. Feld- und Labormethoden zur Erfassung des Wasser- und Stoffhaushaltes. Berlin et al. S. 139–157.
- Beck, J.V. & Arnold, K.J. (1977): Parameter Estimation in Engineering and Science. New York.
- Becker, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Weinheim. S. 16–32.
- Becker, A., Günter, A. & Katzenmaier, D. (1999): Required Integrated Approach to Understand Runoff Generation and Flow Path Dynamics in Catchments. In: Leibundgut, C., McDonnell, J. & Schulz, G. (Hrsg.): Integrated Methods in Catchment Hydrology – Tracer, Remote Sensing and New Hydrometric Techniques. IAHS Publication No. 258. Wallingford. S. 3–9.
- Becker, G., Hofmann, R. & Groß, R. (1986): Boden- und Wurzelschäden durch Befahren von Waldbeständen. In: Der Forst- und Holzwirt 41 (4). S. 367–370.
- Becker, G., Hofmann, R. & Seeling, U. (1989): Bodenschäden im Wald durch den Einsatz von Forstmaschinen. Abschlussbericht Projekt Wasser-Abfall-Boden. Göttingen et al.
- Bendix, J. (1997): Natürliche und anthropogene Einflüsse auf den Hochwasserabfluss des Rheins. In: Erdkunde 51. S. 292–308.
- Bennecke, P. & van der Ploeg, R.R. (1978): Wald und Wasser. II. Quantifizierung des Wasserumsatzes am Beispiel eines Buchen- und eines Fichtenaltholzbestandes im Solling. In: Forstarchiv 49 (2). S. 26–32.
- Berz, G. (2001): Naturkatastrophenzunahme und globaler Klimawandel – Trends, Befürchtungen und Handlungsoptionen. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 145 (6). S. 6–11.
- Beven, K.J. (1989): Changing Ideas in Hydrology – The Case of Physically-Based Models. In: Journal of Hydrology 105 (1–2). S. 157–172.
- Beven, K.J. (1996): A Discussion of Distributed Hydrological Modelling. In: Abbott, M.B. & Refsgaard, J.C. (Hrsg.): Distributed Hydrological Modelling. Dordrecht et al. S. 255–278.
- Beven, K.J. & Germann, P. (1980): The Role of Macropores in the Hydrology of Field Soils. Institute of Hydrology Report 69. Wallingford.
- Beven, K.J. & Germann, P. (1981): Water Flow in Soil Macropores I. An Experimental Approach. In: European Journal of Soil Science 32 (1). S. 1–13.
- Beven, K.J. & Germann, P. (1982): Macropores and Water Flow in Soils. In: Water Resources Research 18 (5). S. 1311–1325.
- Beven, K.J. & Kirkby, M.J. (1979): A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. Hydrological Sciences Bulletin 24 (1). S. 43–69.

- BfG (Hrsg.) (1971): Richtlinien für Abflußmessungen. Koblenz.
- Bismuth, Chr. et al. (1998): Ursachen der Hochwasserentstehung und ihre anthropogene Beeinflussung – Maßnahmenvorschläge. Umweltbundesamt – Texte 18/98. Berlin.
- BLfW (1981): Möglichkeiten der Bilanzierung und Minderung der Bodenerosion und der Oberflächenabflüsse von landwirtschaftlichen Nutzflächen. Informationsberichte des BLfW 6-81.
- Blöschl, G. & Sivapalan, M. (1995): Scale Issues in Hydrological Modelling: A Review. In: Hydrological Processes 9 (3–4). S. 251–290.
- Blöschl, G. & Merz, R. (2000): Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. In: Gutknecht, D. (Hrsg.): Wiener Mitteilungen 164. Niederschlag-Abfluss Modellierung – Simulation und Prognose. ÖWAV-Seminar an der Technischen Universität Wien. S. 149–178. – URL: www.hydro.tuwien.ac.at (29.05.2006).
- Blume, H.-P. et al. (Hrsg.) (1996ff.): Handbuch der Bodenkunde. Landsberg.
- Blume, H.-P. et al. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Scheffer/Schachtschabel. 15. Auflage. Heidelberg.
- BMELV (2006): Bundeswaldinventur 2. – URL: www.bundeswaldinventur.de (03.07.2006).
- BMU (Hrsg.) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Berlin.
- BMU (2006): Fallstudie KAHN. – URL: www.umweltbundesamt.de/rup/fallstudien-html/fallstudie-kahn.html (13.06.2006)
- Bohne, K. (1998): Wasserbewegung und Wasserleitfähigkeit des Bodens. Kapitel 2.6.2.4. In: Blume, H.-P. et al. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Landsberg.
- Bongartz, K. (2001): Untersuchung unterschiedlicher Flächendiskretisierungs- und Modellierungskonzepte für die hydrologische Modellierung am Beispiel Thüringer Vorfluter. Dissertation. Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Bonnell, M. (1998): Selected Challenges in Runoff Generation Research in Forests from the Hillslope to Headwater Drainage Basin Scale. In: Journal of the American Water Resources Association 34 (4). S. 765–785.
- Bortz, J. (2004): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 6. Auflage. Heidelberg.
- Bott, W. (2002): Prozessorientierte Modellierung des Wassertransports zur Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen in bewaldeten Entstehungsgebieten. Dissertation. Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Bouma, J., Belmans, C.F. & Dekker, L.W. (1982): Water Infiltration and Redistribution in a Silt Loam Subsoil with Vertical Worm Channels. In: Soil Sciences Society of America Journal 46. S. 917–921.
- Brechtel, H. M. (1985): Waldsterben und Gebietswasserhaushalt. Informationen zur Raumentwicklung 10. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumordnung. Bonn.

- Brechtel, H.N. & Balázs, Á. (1976): Auf- und Abbau der Schneedecke im westlichen Vogelsberg in Abhängigkeit von Höhenlage, Exposition und Vegetation. In: Beiträge zur Hydrologie 3. Freiburg. S. 35–108.
- Brechtel, H.M. & Pavlov M.-B. (1977): Niederschlagsbilanz von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen in der Rhein-Main-Ebene. Arbeitspapier KWK Bonn und Hessische Forstliche Versuchsanstalt. Bonn.
- Brinkmann, R. (1986): Historische Geologie. Erd- und Lebensgeschichte. Brinkmanns Abriss der Geologie. Band 2. 12./13. Auflage. Stuttgart.
- Bronstert, A. (1994): Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe 46. Karlsruhe.
- Bronstert, A., Fritsch, U. & Katzenmaier, D. (2001): Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten. Gutachten für das BMU. – URL: www.umweltbundesamt.de/wasser/veroeffentlich/kurzfassungen/29724508 (01.03.2006)
- Brose, K. et al. (1957): Klimaatlas von Rheinland-Pfalz. Bad Kissingen.
- Bultot, F. et al. (1988): Repercussions of a CO₂ Doubling on the Water Cycle and on the Water Balance – A Case Study for Belgium. In: Journal of Hydrology 99 (3–4). S. 319–347.
- Bultot, F. et al. (1992): Repercussions of a CO₂ Doubling on the Water Balance – A Case Study in Switzerland. In: Journal of Hydrology 137 (1–4). S. 199–208.
- Calder, I.R. (1992): Hydrologic Effects of Land-Use Change. In: Maidment, D.R. (Hrsg.): Handbook of Hydrology. New York.
- Caspary, H.J. (1990): Auswirkungen neuartiger Waldschäden und der Bodenversauerung auf das Abflussverhalten von Waldgebieten. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft an der Universität Karlsruhe. Heft 37. Karlsruhe.
- Caspary, H.J. & Bárdossy, A. (1995): Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaänderungen? In: Wasser & Boden 47 (1). S. 18–24.
- Casper, M. (2002): Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald). Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH) 210. Karlsruhe.
- Chen, X. (1994): Untersuchung zur zeitlich-räumlichen Ähnlichkeit von phänologischen und klimatologischen Parametern in Westdeutschland und zum Einfluß geoökologischer Faktoren auf die phänologische Entwicklung im Gebiet des Taunus. Berichte des DWD 189. Offenbach.
- Chen, C. & Wagenet, R.J. (1992): Simulation of Water and Chemicals in Macropore Soils. Part 1: Representation of the Equivalent Macropore Influence and Its Effect on Soil Water. In: Journal of Hydrology 130 (1–4). S. 105–126.

- DFG (1983): National Report on Hydrological Research 1975–1982 for the FRG. Hamburg.
- Dickinson, W.T. & Whiteley, H. (1970): Watershed Areas Contributing to Runoff. IAHS Publication 96. S. 12–26.
- Dietz, P., Knigge, W. & Löffler, H. (1984): Walderschließung. Ein Lehrbuch für Studium und Praxis unter besonderer Berücksichtigung des Waldwegebbaus. Hamburg/Berlin.
- Dikau, R. & Schmidt, J. (1999): Georeliefklassifizierung. In: Schneider-Sliwa, R., Schaub, D. & Gerold, G. (Hrsg.): Angewandte Landschaftsökologie. Grundlagen und Methoden. Berlin/Heidelberg. S. 217–244.
- DIN 19683-1 (Ausgabe 1973-04). Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau. Physikalische Laboruntersuchungen – Teil 1. Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung durch Siebung.
- DIN 19683-2 (Ausgabe 1973-04). Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau. Physikalische Laboruntersuchungen – Teil 2. Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat.
- DIN 19683-13 (Ausgabe 1997-03). Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau. Physikalische Laboruntersuchungen – Teil 13. Bestimmung des Substanzanteils, Porenanteils und der Porenziffer.
- DIN (Hrsg.) (1996): Wasserwesen, Begriffe. DIN-Taschenbuch 211. Berlin.
- Dirschke, H. (1994): Pflanzensoziologie. Grundlagen und Methoden. Stuttgart.
- Dooge, J.C.I. (1986): Looking for Hydrologic Laws. In: Water Resources Research 22 (9). S. 46–58.
- Dunne, T. (1978): Field Studies of Hillslope Flow Processes. In: Kirkby, M. J. (1978) (Hrsg.): Hillslope Hydrology. Chichester. S. 227–293.
- DVWK (Hrsg.) (1982): Anthropogene Einflüsse auf das Hochwassergeschehen. Schriftenreihe des DVWK. Heft 53. Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1995): Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung. Teil I: Ansprache der Böden. DVWK-Regeln 129/1995. Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter 238. Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1999a): Hochwasserabflüsse. Schriftenreihe des DVWK. Heft 124. Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1999b): Richtlinien für den ländlichen Wegebau. DVWK-Regeln 137/1999. Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1999c): Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. Schriftenreihe des DVWK. Heft 127. Bonn.

- DWD (2005): Klimadaten ausgewählter deutscher Stationen. – URL: <http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/daten/online> (16.11.2005).
- Dyck, S. & Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. Berlin.
- Engler, A. (1919): Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen XII. Zürich.
- ERDAS (2003): ERDAS Field Guide. 7. Auflage. Atlanta.
- Erlbeck, R., Haseder, I. & Stinglwagner, G. (1998): Das Kosmos Wald- und Forstlexikon. Stuttgart.
- Ernstberger, H. (1987): Einfluß der Landnutzung auf Verdunstung und Wasserbilanz: Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration von unterschiedlich genutzten Standorten zur Ermittlung der Wasserbilanz von Einzugsgebieten in unteren Mittelgebirgslagen Hessens. Beiträge zur Hydrologie. Kirchzarten.
- Falkenburg, B. & Hauser, S. (Hrsg.) (1997): Modelldenken in den Wissenschaften. Dialektik 1997 (1).
- Felix-Henningsen, P., Spies, E.D. & Zakosek, H. (1991): Genese und Stratigraphie periglazialer Deckschichten auf der Hochfläche des Ost-Hunsrücks (Rheinisches Schiefergebirge). In: Eiszeitalter und Gegenwart 41. S. 56–69.
- Fetzer, K.D. et al. (1995): Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland. In: Benda, L. (Hrsg.): Das Quartär Deutschlands. Berlin/Stuttgart. S. 220–254.
- Finke, L. (1994): Landschaftsökologie. 2. Auflage. Braunschweig.
- Fleck, W. (1986): Bodenwasserbilanz, Streuverdunstung und Wasserverbrauch von Buche und Fichte auf Standorten und in Einzugsgebieten des Schönbuchs. In: Eisele, G. (Hrsg.): Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch. Wasser- und Stoffhaushalt, bio-, geo- und forstwirtschaftliche Studien in Südwestdeutschland. DFG Forschungsbericht. Weinheim. S. 133–160.
- Fleck, W. (1987): Einfluß des Bodenaufbaus und des Waldbestandes auf Verdunstung und Abflussbildung im Naturpark Schönbuch bei Tübingen. Dissertation. Eberhard-Karls-Universität Tübingen.
- Fleming, G. (1975): Computer Simulation Techniques in Hydrology. New York.
- Flury, M. et al. (1994): Susceptibility of Soils to Preferential Flow of Water. A Field Study. In: Water Resources Research 30 (7). S. 1945–1954.
- Flügel, W.-A. (1979): Untersuchungen zum Problem des Interflow. Messungen der Bodenfeuchte, der Hangwasserbewegung, der Grundwassererneuerung und des Abflußverhaltens im Versuchsgebiet Hollmuth/Kleiner Odenwald. Heidelberger Geographische Arbeiten 56. Heidelberg.

- Flügel, W.-A. (1988): Interzeptionsverluste und Niederschlagsbilanzen für Fichten- und Buchenbestände auf dem „Hollmuth“, Kleiner Odenwald. In: Barsch, D. & Flügel, W.-A. (Hrsg.): Niederschlag, Grundwasser, Abfluss. Ergebnisse aus dem hydrologisch-geomorphologischen Versuchsgebiet „Hollmuth“. In: Heidelberger Geographische Arbeiten 66. Heidelberg. S. 83–100.
- Flügel, W.-A. (1993a): Hierarchically Structured Hydrological Process Studies to Regionalize Interflow in a Loess Covered Catchment Near Heidelberg. In: IAHS Publication 212. S. 215–223.
- Flügel, W.-A. (1993b): Hangentwässerung durch Interflow und seine Regionalisierung. Einzugsgebiet der Elsenz (Kraichgau). In: Berliner Geographische Arbeiten 78. S. 68–94.
- Flügel, W.-A. (1995a): Hydrological Response Units to Preserve Basin Heterogeneity in Hydrological Modelling Using PRMS/MMS. A Case Study in the Bröl Basin, Germany. In: IAHS-Publication 231. S. 79–87.
- Flügel, W.-A. (1995b): Delineating Hydrological Response Units (HRU's) by GIS Analysis for Regional Hydrological Modelling Using PRMS/MMS in the Drainage Basin of the River Bröl, Germany. In: Hydrological Processes 9. S. 423–436.
- Flügel, W.-A. (1996a): Hydrological Response Units (HRU's) and Their Delineation Using GIS Analyses as a Tool for Regional Hydrological Modelling with PRMS/MMS. Results from the River Bröl, Germany. In: Heidelberger Geographische Arbeiten 104. S. 441–449..
- Flügel, W.-A. (1996b): Hydrological Response Units (HRU's) as Modelling Entities for Hydrological River Basin Simulation and Their Methodical Potential for Modelling Complex Environmental Process Systems. – Results from the Sieg Catchment. In: Die Erde 1996 (1). S. 43–62.
- Flügel, W.-A. (2000): Systembezogene Entwicklung regionaler hydrologischer Modellsysteme. In: Wasser & Boden 52 (3). S. 14–17.
- Flügel W.-A., Luckhaus, S. & Schöler, H. (1991): Wasserbilanzen, Stoffeintrag, -transport und regionale Modellierung des hydrologischen Prozessgefüges im Einzugsgebiet der Sieg. In: Mitteilungen zur Rheinischen Landeskunde 60. S. 153–161.
- Flügel, W.-A. & Lüllwitz, T. (1993): Using a Distributed Hydrological Model with the Aid of GIS for Comparative Hydrological Modelling of Micro- and Mesoscale Catchments in the USA and in Germany. In: IAHS-Publication 214. S. 59–66.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (1962a): Erläuterungsbericht der Standortkartierung im Soonwald. Teilkartierung der staatlichen Forstämter Entenpfuhl und Neupfalz. Koblenz.
- Frister, H. (2003): Hochwasser aus Waldgebieten – Entstehung und Verminderung. Diplomarbeit. Universität Kolenz-Landau (unveröffentlicht).
- Fürst, J. (2004): GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft. Heidelberg.
- Gees, A. (1997): Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz. Bedeutung für das Bemessungshochwasser. Geographica Bernensia. Bern.

- Gellens, D. & Roulin, E. (1998): Streamflow Response of Belgian Catchments to IPCC Climate Change Scenarios. In: *Journal of Hydrology* 210 (1–4). S. 242–258.
- Gerke, H. (1985): Kronendurchlass, Stammabfluss und Interzeptionsverdunstung eines Buchenaltbestandes und deren Beziehungen zum Freiflächenniederschlag. In: *Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald (Hrsg.): Wald und Wasser – Prozesse im Wasser- und Stoffkreislauf von Waldgebieten. Symposium in Grafenau/Bayerischer Wald. 5. Tagungsbericht.* S. 59–76.
- Germann, P. (1986): Rapid Drainage Response to Precipitation. In: *Hydrological Processes* 1. S. 1–13.
- Germann, P. (1999): Makroporen und präferenzielle Sickerung. Kapitel 2.7.1. In: Blume, H.-P. et al. (Hrsg.): *Handbuch der Bodenkunde*. Landsberg.
- Giek, M. (2001): Infiltrationsmessungen auf Waldwegen und Rückegassen im Hinblick auf die Hochwasserproblematik. Untersucht an zwei Standorten im Soonwald und Pfälzer Wald. Diplomarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz (unveröffentlicht).
- Glaser, R. (2001): *Klimageschichte Mitteleuropas: 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen*. Darmstadt.
- Grabs, W. (Hrsg.) (1997): *Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine Basin*. Lelystad.
- Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911): Studies on Soil Physics. I – Flow of Air and Water through Soils. In: *Journal of Agricultural Research* 4. S. 1–24.
- Grimm, F.-D. (1968): Zur Typisierung des mittleren Abflussganges (Abflußregime) in Europa. In: *Freiburger Geographische Hefte* 6. S. 51–64.
- Grunert, J. & Bott, W. (2002): The Retention Capacity of Forested Catchment Areas for Heavy Rainfalls – Flood Reduction in the Middle Rhine Area. In: Delahaye, D., Levoy, F. & Maquaire, O. (Hrsg.): *Geomorphology: From Expert Opinion to Modelling. Symposium April 26–27, 2002. Strasbourg*. S. 329–335.
- Hahn, A. (1951): Wahrscheinlichkeitstheoretische Bestimmung und Erörterung der Abflusskurve. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch 3. Bielefeld.
- Hamon, W.R. (1961): Estimating Potential Evapotranspiration. In: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 87. S. 107–120.
- Hanle, A. (Hrsg.) (1990): *Meyers Naturführer Hunsrück*. Mannheim.
- Hartge, K.H. & Horn R. (1999): *Einführung in die Bodenphysik*. 3. Auflage. Stuttgart.
- Haude, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitteilungen des DWD 2 (11). Bad Kissingen.
- Heer, W. (1987): Strukturelle Untersuchungen entlang der Hunsrück-Südrand-Störung zwischen Birkenfeld und Bingen (SW-Deutschland). *Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen*. Band 21. Clausthal-Zellerfeld.

- Hendl, M. (1995): Klima. In: Liedtke, H. & Marcinek, J. (Hrsg.): Physische Geographie Deutschlands. 2. Auflage. Gotha.
- Herrmann, R. (1977): Einführung in die Hydrologie. Stuttgart.
- Hershby, R.W. (1998): Climate Change and the Greenhouse Effect. In: Hershby, R.W. & Fairbridge, R.W. (Hrsg.): Encyclopedia of Hydrology and Water Resources. Dordrecht.
- Hewlett, J.D. & Nutter, W.L. (1970): The Varying Source Area of Streamflow from Upland Basins. In: Proceedings of the Symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management, Montana State University, August 3–6, 1970. S. 65–83.
- Heyer, E. (1993): Witterung und Klima. 9. Auflage. Stuttgart/Leipzig.
- Hildebrand, E. (1983): Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 102. S. 111–125.
- Hildebrand, E. (1996): Forstliche Bodenbewirtschaftung. Kapitel 6.2.2. In: Blume, H.-P. et al. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Landsberg.
- Hölting, B. (1996): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 5. Auflage. Stuttgart.
- Hoffmann, H.D. (1982): Die Interzeption einer Fichtenstreudecke im Freiland und im Bestand. In: Beiträge zur Hydrologie. Sonderheft 4. S. 103–116.
- Hoffmann, H.-D. (1992): Modellierung der Interzeption von Waldbeständen und Überlegungen zur Regionalisierung der Modellparameter. In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Weinheim. S. 157–170.
- Hofmann, G. (1963): Zum Abbau der Schneedecke. In: Theoretical and Applied Climatology 13 (1). S. 1–20.
- Hofmann, R. (1989): Physikalische Bodenschäden durch Forstmaschineneinsatz. Teil 1 des Abschlussberichtes Projekt Wasser-Abfall-Boden. In: Becker, G., Hofmann, R. & Seeling, U.: Bodenschäden im Wald durch den Einsatz von Forstmaschinen. Abschlussbericht Projekt Wasser-Abfall-Boden. Göttingen/Freiburg.
- Hoogmoed, W.D. & Bouma, J. (1980): A Simulation Model for Predicting Infiltration into a Cracked Clay Soil. In: Soil Sciences Society of America Journal 44 (3). S. 458–461.
- Hormann, K. (1981): Länderkunde, Landeskunde und Geographie. In: Bähr, J. & Stewig, R. (Hrsg.): Beiträge zur Theorie und Methode der Länderkunde. Oskar Schmieder (27. Januar 1891–12. Februar 1980) zum Gedenken. Kieler Geographische Schriften 52. S. 51–56.
- Hornberger, G.M., Germann, P.F. & Beven, K.J. (1991): Throughflow and Solute Transport in an Isolated Sloping Block in a Forest Catchment. In: Journal of Hydrology 124 (1–2). S. 81–99.
- Horton, R.E. (1933): The Role of Infiltration in the Hydrological Cycle. Transactions of the American Geophysical Union 14. S. 446–460.

- IPCC (2006): Online-Angebot des Intergovernmental Panel on Climate Change. – URL: www.ipcc.ch/index.html (03.07.2006).
- Jacobeit, J. et al. (2004): Hochwasserentwicklung in Mitteleuropa und Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation. In: Geographische Rundschau 56 (1). S. 26–34.
- Janssen J. & Laatz W. (2005): Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. 5. Auflage. Berlin et al.
- Jensen, M.E. & Haise, H.R. (1963): Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. In: Journal of Irrigation and Drainage Division 89 (4). S. 15–41.
- Jensen, M.E., Robb, D.C.N. & Franzoy, C.E. (1970): Scheduling Irrigations Using Climate-Crop-Soil Data. In: Journal of the Irrigation and Drainage Division 96 (1). S. 25–38.
- Jürgens, C. (2001): Einsatz von Fernerkundungs- und GIS-Techniken zur vergleichenden Abflußmodellierung mesoskaliger Flußeinzugsgebiete. Regensburger Geographische Schriften 34. Regensburg.
- Jury, W.A. (1982): Simulation of Solute Transport Using a Transfer Function Model. In: Water Resources Research Volume 18 (2). S. 363–368.
- K.A.H.N. (Hrsg.) (2001): Aktionsplan Hochwasser im Einzugsgebiet der Nahe. Koblenz.
- Kämmerer, D. (1998): Hydrologische Untersuchungen zur Grundwasserversauerung im südlichen Taunus. Wiesbaden.
- Keller, R. (1961): Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes Berlin.
- Keller, R. (Hrsg.) (1978): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland – Kartenteil. Boppard.
- Keller, R. (Hrsg.) (1979): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland – Textband. Boppard.
- Kiefl, R. (2001): Der Aufbau eines Geographischen Informationssystems zur Erfassung von Hydrological Response Units (HRU) im Soonwald/Hunsrück. Diplomarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz (unveröffentlicht).
- Kirkby, M. J. (1978) (Hrsg.): Hillslope Hydrology. Chichester.
- Kirkby, M.J. (1993): Network Hydrology and Geomorphology. In: Beven, K.J. & Kirkby, M.J. (Hrsg.): Channel Network Hydrology. Chichester. S. 1–12.
- Kirnbauer, R. et al. (1996): Abflußmechanismen – Beobachtung und Modellierung. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 48 (1–2). S. 15–26.
- Kleeberg, H.-B. (1995): Extreme Hochwasser – Ursachen und Einflüsse. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 37. S. 103–107.
- Kleeberg, H.-B. (Hrsg.) (1992): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Weinheim.

- Kleeberg, H.-B. (1999): Zum Problem der Regionalisierung in der Hydrologie. In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Hydrologie und Regionalisierung: Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992–1998). Weinheim.
- Kleeberg, H.-B. & Cemus, J. (1992): Regionalisierung hydrologischer Daten – Definitionen. In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Weinheim. S. 1–15.
- Klemes, V. (1986): Operational Testing of Hydrological Simulation Models. In: Hydrological Sciences Journal 31 (1). S. 13–24.
- Kling, J.P. (1790): Die Behandlung der Domänenwaldung in der Kurpfalz. In: Forstarchiv 1790. S. 281–319.
- Knautz, D. (1992): Beckenentwicklung und strukturelle Ausgestaltung des südlichen Rheinischen Troges am Beispiel von „Züscher Sattel“ und „Leiseler Mulde“ (SW-Hunsrück, Rheinisches Schiefergebirge). Bonner Geowissenschaftliche Schriften 5. Bonn.
- Kneidl, V. (1984): Hunsrück und Nahe. Geologie, Mineralogie und Paläontologie. Stuttgart.
- Kneidl, V. & Benecke, P. (1990): Wasserhaushaltsuntersuchungen an Pseudogleyen unter Fichte im Vorderhunsrück (Soonwald). In: Beiträge zur Hydrologie 11 (2). S. 53–100.
- Kohlhaas, M. (2004): Die Nahe, mitunter ein unbändiger Fluss. In: Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord RLP - Regionalstelle Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft, Bodenschutz (Hrsg.): Hochwasserschutz Bad Kreuznach. Ein Projekt des Landes Rheinland-Pfalz. Koblenz. S. 2–5.
- Krause, P., Boyle, D.P. & Bäse, F. (2005): Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment. In: Advances in Geosciences 5. S. 89–97.
- Kuntze, H. (2004): Grundlagen der Bodenkultivierung und -melioration. Kapitel 5.1. In: Blume, H.-P. et al. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Landsberg.
- Kuntze, H., Roeschmann, G. & Schwerdtfeger, G. (1994): Bodenkunde. 5. Auflage. Stuttgart.
- Kutscher, F. (1970): Das Devon des Hunsrücks. In: Idar-Oberstein. Edelstein-Industrie – Geologie – Petrographie – Mineralogie und Lagerstätten im Bereich des Saar-Nahe-Gebietes. 19. Sonderheft der Zeitschrift Der Aufschluss. Heidelberg. S. 77–86.
- Kutschera, U. (1995): Kurzes Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. Wiesbaden.
- Kynast, R. (1995): Mit der Überführungsdurchforstung zur Einzelstammnutzung. In: Allgemeine Forstzeitschrift 50. S. 1038–1041.
- Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg (1993): Maßnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkung auf das Abflußverhalten ländlicher Gebiete. Schriftenreihe des Landesamtes für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg Heft 3.
- Landesamt Simmern/Hunsrück (Hrsg.) (1967): Landkreis Simmern. Bonn.

- LAWA (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Hochwasser – Ursachen und Konsequenzen. Stuttgart.
- LFV BW (Hrsg.) (2003): Richtlinie der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg zur Feinerschließung von Waldbeständen. – URL: www.fva-bw.de/publikationen/sonstiges/rlo_befahrung.pdf (07.04.2006).
- Langguth, H.-R. & Voigt, R. (1980): Hydrogeologische Methoden. 1. Auflage. Berlin et al.
- Larcher, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen. Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. 5. Auflage. Stuttgart.
- Leavesley G.H. et al. (1983): Precipitation-Runoff Modeling System. User's Manual. Water-Resources Investigations Report 83-4238. U.S. Geological Survey. Denver.
- Leavesley G.H. et al. (1996): The Modular Modeling System (MMS). User's manual. Open-File Report 96-151 U.S. Geological Survey. Denver.
- Leavesley, G.H. & Stannard, L.G. (1990): Application of Remotely Sensed Data in a Distributed-Parameter Watershed Model. In: Kite, G.W. & Wankiewicz (Hrsg.): Proceedings of Workshop on Applications of Remote Sensing in Hydrology. National Hydrologic Research Centre, Environment Canada. S. 47–64.
- Leavesley, G.H. & Stannard, L.G. (1995): The Precipitation-Runoff Modeling System – PRMS. In: Sing, V.P. (Hrsg.): Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. S. 281–310.
- Legates, D.R. & McCabe, G.J. (1999): Evaluating the Use of “Goodness of Fit” Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. In: Water Resources Research 35 (1). S. 233–241.
- Leibnitz-Institut für Länderkunde (Hrsg.) (2003a): Bundesrepublik Deutschland. Nationalatlas Band 2. Relief, Boden und Wasser. Heidelberg/Berlin.
- Leibnitz-Institut für Länderkunde (Hrsg.) (2003b): Bundesrepublik Deutschland. Nationalatlas Band 3. Klima, Pflanzen- und Tierwelt. Heidelberg/Berlin.
- Leibundgut, Ch. & Uhlenbrook, S. (1997a): Abflussbildung bei Hochwasser. Mainz.
- Leibundgut, Ch. & Uhlenbrook, S. (1997b): Abflussbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen. In: Wasser & Boden 49 (9). S. 13–22.
- Leser, H. (1991): Landschaftsökologie. 3. Auflage. Stuttgart.
- Leser, H. et al. (1993): Wörterbuch der allgemeinen Geographie. Band 1. 7. Auflage. Braunschweig.
- Libbert, E. (1993): Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. 5. Auflage. Jena/Stuttgart.
- Liebscher, H.-J. (1975): 20 Jahre Wasserhaushaltsuntersuchungen im Oberharz – Beitrag zur Internationalen Hydrologischen Dekade der UNESCO. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch 39. Koblenz.

- Liedtke, H. & Marcinek, J. (Hrsg.) (1995): Physische Geographie Deutschlands. 2. Auflage. Gotha.
- Liedtke, H., Scharf, G. & Sperling, W. (1985): Topographischer Atlas Rheinland-Pfalz. Sonderausgabe. Koblenz.
- Lorz, C. & Haase, D. (Hrsg.) (2004): Stoff- und Wasserhaushalt in Einzugsgebieten. Beiträge zur EU-Wasserrahmenrichtlinie und Fallbeispiele. Berlin/Heidelberg.
- Lösch, R. (2001): Wasserhaushalt der Pflanzen. Wiebelsheim.
- Luterbacher, J. et al. (2002): Reconstruction of Sea Level Pressure Fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500. In: Climate Dynamics 18. S. 545–561.
- Lüllwitz, T. (1993): Vergleichende hydrologische Modellierung mit dem Modell PRMS unter Anwendung von Geographischen Informationssystemen. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Maniak, U. (1997): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 4. Auflage. Berlin.
- Martin, E. (1980): Der Taunusquarzit im nordöstlichen Soonwald. Analyse eines Kluftwasserspeichers. Dissertation. Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Melloh, R.A. (1999): A Synopsis and Comparison of Selected Snowmelt Algorithms. CRREL Report 99-8. U.S. Army Corps of Engineers.
- Mendel, H.-G. & Fischer, P. (1998): Abflussentstehung bei Hochwasser – Forschung und dezentrale Schutzmaßnahmen. In: Pörtge, K.H. & Deutsch, M. (Hrsg.): Aktuelle und historische Hochwasserereignisse. Beiträge zur Jahrestagung des AK „Hydrologie“ im März 1997 in Erfurt. Erfurter Geographische Studien 7. Erfurt. S. 3–16.
- Mendel, H.-G., Fischer, P. & Herrmann, A. (1997): Hochwasser – Gedanken über Ursachen und Vorsorge aus hydrologischer Sicht. Koblenz.
- Meuser, A. (1989): Einfluss von Brachlandvegetation auf das Abflussverhalten in Mittelgebirgslagen. Quantifizierung der Wasserhaushaltskomponenten in kleinen Einzugsgebieten mittels des systemhydrologischen Abflußsimulationsmodells BRAWA. Beiträge zur Hydrologie. Kirchzarten.
- Meyer, W. & Stets, J. (1996): Das Rheintal zwischen Bingen und Bonn. Sammlung Geologischer Führer 89. Berlin/Stuttgart.
- Michl, C. (1998): Hydrologische Forschungsansätze im Bereich der Oberen Gera – die Einzugsgebiete Schmücker Graben und Steinbach. In: Pörtge, K.H. & Deutsch, M. (Hrsg.): Erfurter Geographische Studien. Aktuelle und historische Hochwasserereignisse. Beiträge zur Jahrestagung des AK Hydrologie im März 1997 in Erfurt. Erfurt. S. 43–52.
- Michl, C. (1999): Prozessorientierte Modellierung des Wasserhaushalts zweier Quelleinzugsgebiete im Thüringer Wald. Dissertation. Friedrich-Schiller-Universität Jena.

- Miller, J.A., Sheth, A.P. & Kochut, K.J. (1999): Perspectives in Modeling: Simulation, Database, and Workflow. In: Chen, P.P. et al. (Hrsg.): Conceptual Modeling. Current Issues and Future Directions. Lecture Notes in Computer Science 1565. Berlin. S. 154–167.
- Mikovari, A., Peter, C. & Leibundgut, Ch. (1995): Investigation of Preferential Flow Using Tracer Techniques. In: Leibundgut, Ch.: Tracer Technologies for Hydrological Systems. IAHS Publication 229.
- Mitscherlich, G. (1971a): Wald, Wachstum und Umwelt. Band 1. Form und Wachstum von Baum und Bestand. Frankfurt/Main. 1970.
- Mitscherlich, G. (1971b): Wald, Wachstum und Umwelt. Band 2. Waldklima und Wasserhaushalt. Frankfurt/Main. 1971.
- MLWF RLP (Hrsg.) (1963): Anweisung für die Standortserkennung und -kartierung im Staatswald der Forstdirektion Koblenz. A. Sta. 61. Mainz.
- Monteith J.L. (1965): Evaporation and Environment. In: Foggy, G.T. (Hrsg.): Symposium. The State and Movement of Water in Living Organisms. Cambridge. S. 205–234.
- Mosley, M.P. (1982): Subsurface Flow Velocities through Selected Forests Soils, South Island, New Zealand. In: Journal of Hydrology 55 (1–4). S. 65–92.
- MUF RLP (Hrsg.) (1994): Forstatlas. Mitteilungen der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz Nr. 12/1994. Mainz.
- MUF RLP (Hrsg.) (1995): Aktion Blau. Gewässerentwicklung in Rheinland-Pfalz. Mainz.
- MUF RLP (Hrsg.) (2005a): Hochwasservorsorge. Hinweise für die Wasserwehren. Mainz.
- MUF RLP (Hrsg.) (2005b): Umweltatlas Rheinland-Pfalz. – URL: <http://www.umweltatlas-rlp.de> (15.11.2005).
- Müller, M.-J. (1996): Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde. 5. Auflage. Trier.
- Müller, G. & Peschke, G. (2000): Hydrologische Prozessuntersuchungen auf der Basis adäquater Messnetze. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 52 (5/6). S. 94–104.
- Murawski, H. (1992): Geologisches Wörterbuch. 9. Auflage. Stuttgart.
- Musgrave, G.W. & Holtan, H.N. (1964): Infiltration. In: Chow, V.T. (Hrsg.): Handbook of Applied Hydrology. New York.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970): River Flow Forecasting through Conceptual Models. Part I – A Discussion of Principles. In: Journal of Hydrology 10 (3). S. 282–290.
- Newson, M. (1997): Land, Water and Development. Sustainable Management of River Basin Systems. 2. Auflage. London.
- Niehoff, D. & Bronstert, A. (2002): Landnutzung und Hochwasserentstehung: Modellierung anhand dreier mesoskaliger Einzugsgebiete. In: Wasser & Boden 54 (10). S. 20–28.
- O’Connell, P.E. & Todini, E. (1996): Modelling of Rainfall, Flow and Mass Transport in Hydrological Systems: An Overview. In: Journal of Hydrology 175 (1–4). S. 3–16.

- Obled, C. & Harder, H. (1978): A Review of Snow Melt in the Mountain Environment. In: Colbeck, S.C. & Ray, M. (Hrsg.): Modeling of Snow Cover Runoff. Hannover. S. 179–204.
- Obled, C. & Rosse, B.B. (1977): Mathematical Models of a Melting Snowpack at an Index Plot. In: Journal of Hydrology 32 (1–2). S. 139–163.
- Odenthal-Kahabka, J. (2005): Handreichung Sturmschadensbewältigung. Teil 2. Empfehlungen zur Feinerschließung der Bestände im Staatswald des Landes Rheinland-Pfalz. LFV BW und Landesforste Rheinland-Pfalz. – URL: www.waldwissen.net/themen/forsttechnik/walderschliessung/fva_sturmflaechen_befahrung_DE (03.07.2006).
- Oesau, A. & Merz, H. G. (1988): Naturdenkmale in Rheinland-Pfalz. Hannover.
- Ott (1999): Datensammler nach dem Einperlprinzip. Betriebsanleitung.
- Ott (2001): Winkelcodierer mit Datensammler Thalimedes. Betriebsanleitung.
- Peschke, G. (2001): Bodenwasserhaushalt und Abflussbildung. In: Geographische Rundschau 53 (5). S. 18–23.
- Pfützner, B. (1989): Verallgemeinerungsfähige Techniken zur rechnergestützten Entwicklung, Anpassung und Praxisanwendung von Einzugsgebietsmodellen. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft 49. Berlin.
- Pfützner, B. et al. (1992). Flächendifferenzierte hydrologische Einzugsgebietsmodellierung bei Anwendung eines Geographischen Informationssystems (GIS). In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 36 (2). S. 48–56.
- Plate, J.E., Pfaud, A. & Paschke, G. (1986): Auswirkungen der Waldschäden auf die Wasserwirtschaft aus quantitativer Sicht – Literaturstudie. Karlsruhe.
- Plate, J.E. (1992): Skalen in der Hydrologie: Zur Definition von Begriffen. In: Kleeberg, H.-B. (Hrsg.): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Weinheim. S. 33–44.
- Quinn, P.F. et al. (1991): The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models. In: Hydrological Processes 5. S. 59–79.
- Rachner, M., Schneider, G. & Matthäus, H. (2000): Die mittleren klimatologischen Bedingungen in Deutschland (Teil IV). Das Andauerverhalten der Schneedecke. In: DWD: Klimastatusbericht 2000. – URL: www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/KSB/ksb00/klimbed.pdf (03.07.2006).
- Raissi, F, Müller, U. & Meesenburg, H. (2001): Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. GeoFakten 9. Niedersächsisches Amt für Bodenforschung. Hannover.
- Rapp, J. (2000) Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. DWD Bericht 212. Offenbach.
- Refsgaard, J.C. (1996): Parameterisation, Calibration and Validation of Distributed Hydrological Models. In: Journal of Hydrology 198 (1–4). S. 69–97.

- Refsgaard, J.C. & Storm, B. (1996): Construction, Calibration and Validation of Hydrological Models. In: Abbott, M.B. & Refsgaard, J.C. (Hrsg.): Distributed Hydrological Modelling. Dordrecht. S. 41–54.
- Reinke, B. (2000): Wasserrückhaltung von Waldböden im Hinblick auf einen dezentralen Hochwasserschutz am Beispiel eines Modellhanges im Soonwald. Diplomarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz (unveröffentlicht).
- Restrepo, P.J. & Bras, R.L. (1982): Automatic Parameter Estimation of a Large Conceptual Rainfall-Runoff Model: A Maximum Likelihood Approach. Ralph M. Parsons Laboratory Report 267. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge.
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des DWD 194. Offenbach.
- Richards, L.A. (1931): Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums. In: Physics 1. S. 318–333.
- Riley, J.P., Israelsen, E.K. & Eggleston, K.O. (1973): Some Approaches to Snowmelt Prediction. In: The Role of Snow and Ice in Hydrology: IAHS Publication 107. Wallingford. S. 956–971.
- Rittershofer, F. (1999): Waldpflege und Waldbau – Für Studierende und Praktiker. Freising.
- Rosenbrock, H.H. (1960): An Automatic Method of Finding the Greatest or Least Value of a Function. In: Computer Journal 3. S. 175–184.
- Rutter, A.J. & Morton, A.J. (1977): A Predictive Model of Rainfall Interception in Forest. III. Sensitivity of the Model to Stand Parameters and Meteorological Variables. In: Journal of Applied Ecology 14 (2). S. 567–588.
- Sabel, K.-J. (1989): Zur Renaissance der Gliederung periglazialer Deckschichten in der deutschen Bodenkunde. In: Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten. Serie D. Band 10. S. 9–16.
- Schaar, J. (1989): Untersuchungen zum Wasserhaushalt kleiner Einzugsgebiete im Elsenzthal/Kraichgau. Heidelberger geographische Arbeiten Heft 86. Heidelberg.
- Schachtschabel, P. et al. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. Scheffer/Schachtschabel. 13. Auflage. Stuttgart.
- Schäuble, H. (2003): HydroTools 1.0 für ArcView 3.x. Ein Programm zur hydrologischen Analyse von Einzugsgebieten. – URL: http://www.terracs.de/Hydrotools_deu.pdf (29.05.2006).
- Schilling, W. & Wiefel, H. (1962): Jungpleistozäne Periglazialbildungen und ihre regionale Differenzierung in einigen Teilen Thüringens und des Harzes. In: Geologie 11. S. 428–460.
- Schlichting, E., Blume, H.-P. & Stahr, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. Pareys Studentexte 81. Berlin/Wien.

- Schönenberg, R. & Neugebauer, J. (1997): Einführung in die Geologie Europas. 7. Auflage. Freiburg.
- Schönwiese, C.-D. (2003): Klimatologie. 2. Auflage. Stuttgart.
- Schönwiese, C.-D. (2004): Globaler Klimawandel im Industriezeitalter. Beobachtungsindizes und Ursachen. In: Geographische Rundschau 56 (1). S. 4–9.
- Schönwiese, C.-D., Grieser, J. & Trömel, S. (2003): Secular Change of Extreme Precipitation Months in Europe. In: Theoretical and Applied Climatology (2003). S. 245–250.
- Schönwiese, C.-D. & Rapp, J. (1997): Climate Trend Atlas of Europe Based on Observations 1891–1990. Dordrecht.
- Schröder, W., Vetter, L. & Fränzle, O. (1992): Einfluß statistischer Verfahren auf die Bestimmung repräsentativer Standorte für Umweltuntersuchungen. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 136 (5–6). S. 309–318.
- Schröder, W., Vetter, L. & Fränzle, O. (Hrsg.) (1994): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie. Braunschweig et al.
- Schüler, G., Bott, W. & Schenk, D. (2002): Hochwasservorsorge durch Waldbewirtschaftung. In: Forst und Holz 57 (1–2). S. 3–9.
- Schulla, J. & Jasper, K. (1998): Modellbeschreibung WaSiM-ETH. Interner Bericht IAC ETH Zürich. – URL: http://homepage.hispeed.ch/wasim/download/doku/wasim_1998_de.pdf (21.04.2006)
- Schumann, A.H. & Schultz, G.A. (1995): Wasserhaushaltsmodellierung unter Verwendung von Fernerkundung, digitalem Höhenmodell und geographischem Informationssystem. Wasserwirtschaft 85 (12). S. 596–602.
- Schuwirth, N. (2001): Zur Hydrogeologie des Einzugsgebietes des Gräfenbaches im Soonwald (TK 25, Blatt 6011 Simmern, Hunsrück). Diplom-Kartierung. Johannes Gutenberg-Universität Mainz (unveröffentlicht).
- Schwentker, F. & Streit, U. (1983): Regionale Übertragung hydrologischer Parameter – ein Überblick. Manuskript zum Vortrag anlässlich der Jahresversammlung des Arbeitskreises Hydrologie in Göttingen. Göttingen.
- Semmel, A. (1968): Studien über den Verlauf jungpleistozäner Formung in Hessen. Frankfurter Geographische Hefte 45. Frankfurt.
- Singh, V.P. (1995): Watershed Modeling. In: Singh, V.P. (Hrsg.) (1995): Computer Models of Watershed Hydrology. Baton Rouge. S. 1–22.
- Singh, V.P. (Hrsg.) (2002): Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications. Chelsea.
- Sitte, P. et al. (1991): Strasburger. Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. 33. Auflage. Stuttgart.

- Slupik, J. (1983): Die Gestaltung des Abflußvorganges – Ein methodisches Beispiel aus den Flyschkaparten. In: Geomethodica. Basler Geomethodisches Colloquium 8. S. 179–208.
- Sokollek, V., Haamann, H. & Meuser, A. (1989): Precipitation Measurement Errors as a Function of the Degree of Gauge Site Exposition to Wind. In: Sevruk, B.: Precipitation Measurement. Proceedings WMO/IAHS/ETH Workshop on Precipitation Measurement. St. Moritz, 3.–7.12.1989. Zürich. S. 109–116.
- Stadt Bad Kreuznach (Hrsg.) (1994): Das Jahrhunderthochwasser 1993 in Bad Kreuznach. Bad Kreuznach.
- Staudenrausch, H. (2000): Untersuchungen zur hydrologischen Topologie von Landschaftsobjekten für die distributive Flussgebietsmodellierung. Dissertation. Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord RLP – Regionalstelle Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft, Bodenschutz (Hrsg.) (2004): Hochwasserschutz Bad Kreuznach. Ein Projekt des Landes Rheinland-Pfalz. Koblenz.
- Sturm, K. et al. (2001): Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 und ihre Beziehung zur atmosphärischen Zirkulation. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 145 (6). S. 14–23.
- Su, Z. et al. (1992): Application of Remote Sensing and Geographic Information System in Hydrological Modelling. In: EARSeL Advances in Remote Sensing 1 (3). S. 180–185.
- Symader, W. (2001): Boden und Landschaftswasserhaushalt. Kapitel 4.4.1. In: Blume, H.-P. et al. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Landsberg.
- Tanaka, A. et al. (1988): The Hachioji Experimental Basin Study – Storm Runoff Processes and the Mechanism of Its Generation. In: Journal of Hydrology 102 (1–4). S. 139–164.
- Turc, L. (1961): Evaluation des besoins en eau irrigation, l'évapotranspiration potentielle. In: Annales Agronomiques. 12. S. 13–49.
- U.S. Army Corps of Engineers (1956): Snow Hydrology. Summary Report of the Snow Investigation. U.S. Army Corps of Engineers. North Pacific Division. Portland.
- Uhlenbrook, S. (1995): Untersuchungen von schnellen Abflusskomponenten. Diplomarbeit. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (unveröffentlicht).
- Uhlig, H. (1954): Landkreis Bad Kreuznach. Die Landkreise in Rheinland-Pfalz. Speyer.
- UNESCO (Hrsg.) (1985): Teaching Aids in Hydrology. Technical Papers in Hydrology 27. 2. Auflage. Paris.
- USGS (2006a): Materialien zum Modell MMS/PRMS im Online-Angebot des USGS. – URL: www.brr.cr.usgs.gov/projects/SW_precip_runoff (01.04.2006).
- USGS (2006b): Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) Bibliography. – URL: www.brr.cr.usgs.gov/mms/html/prms_bib.html (01.04.2006).
- VDG (Hrsg.) (2003): Hochwasser – Naturereignis oder Menschenwerk? Schriftenreihe der Vereinigung Deutscher Gewässerschutz Band 66. 2. Auflage. Bonn.

- Verworn, H.-J. & Harms, R.W. (1984): Urbanisierung und Hochwasserabfluß. In: Wasser & Boden 36. S. 419–425.
- Viville, D. et al. (1993): Interception in a Mountainous Declining Spruce Stand in the Strengbach Catchment (Vosges, France). In: Journal of Hydrology 144 (1–4). S. 273–282.
- Völkel, J. (1995): Periglaziale Deckschichten und Böden im Bayerischen Wald und seinen Randgebieten als geogene Grundlagen landschaftsökologischer Forschung im Bereich naturnaher Waldstandorte. Zeitschrift für Geomorphologie. Supplementband 96. Berlin/Stuttgart.
- Walter, R. (1995): Geologie von Mitteleuropa. 6. Auflage. Stuttgart.
- Weingartner, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen. Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 37. Bern.
- Wels, C., Taylor C.H. & Cornett R.J. (1991): Streamflow Generation in a Headwater Basin on the Precambrian Shield. In: Hydrological Processes 5 (2). S. 185–199.
- Wilhelm, F. (1997): Hydrogeographie. Grundlagen der Allgemeinen Hydrogeographie. 3. Auflage. Braunschweig.
- Wohlrab, B. et al. (1992): Landschaftswasserhaushalt. Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. Hamburg/Berlin.
- Wohlrab, B., Sokollek, V. & Süßmann, W. (1983): Einfluß land- und forstwirtschaftlicher Bodennutzung sowie der Sozialbrache auf die Wasserqualität kleiner Wasserläufe im ländlichen Mittelgebirge. DVWK-Schriften 57.
- Wood, E.F. et al. (1988): Effects of Spatial Variability and Scale with Implications to Hydrologic Modeling. In: Journal of Hydrology 102 (1–4). S. 29–47.
- Wood, E.F., Sivapalan, M. & Beven, K.J. (1990): Similarity and Scale in Catchment Storm Response. In: Reviews of Geophysics 28 (1). S. 1–18.
- Worreschk, B. (2002): Leitlinien für eine zukunftsweisende Hochwasservorsorge. In: Patt, H. & Zersch, V.: Vorsorgender Hochwasserschutz. Vorträge. Seminarveranstaltung vom 21. Februar 2002. Universität Essen – Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen 96. Essen. S. 1–11.
- Zahner, R. (1967): Refinement in Empirical Functions for Realistic Soil Moisture Regimes under Forest Cover. In: Sopper, W.E. & Lull, H.W. (Hrsg.): Forest Hydrology. Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar. Oxford. S. 261–274.
- Zapp, B. (2004): Hochwasserkatastrophen in Bad Kreuznach. In: Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord RLP – Regionalstelle Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft, Bodenschutz (Hrsg.): Hochwasserschutz Bad Kreuznach. Ein Projekt des Landes Rheinland-Pfalz. Koblenz. S. 12–13.

- Zepp, H. & Herget, J. (2001): Bodenwasser – Grundlagen, Einflussfaktoren und geoökologische Bezüge. In: Geographische Rundschau 53 (5). S. 10–17.
- Zevenbergenn L.W. & Thorne, C.R. (1987): Quantitative Analysis of Land Surface Topography. In: Earth Surface Processes and Landforms 12 (1). S. 47–56.
- Zuidema, P. (1985): Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

Analoges Kartenmaterial

- Bezirksregierung Koblenz – Forstdirektion (Hrsg.) (1987a): Standortseinheitenkarte 1:10000. Forstamt Simmern. Forstrevier Riesweiler. Koblenz.
- Bezirksregierung Koblenz – Forstdirektion (Hrsg.) (1987b): Standortseinheitenkarte 1:10000. Forstamt Simmern. Forstrevier Simmern. Koblenz.
- Bezirksregierung Koblenz – Forstdirektion (Hrsg.) (1991a): Standortseinheitenkarte 1:10000. Forstamt Entenpfuhl. Forstrevier Gebroth. Koblenz.
- Bezirksregierung Koblenz – Forstdirektion (Hrsg.) (1991b): Standortseinheitenkarte 1:10000. Forstamt Entenpfuhl. Forstrevier Winterbach. Koblenz.
- Bezirksregierung Koblenz – Forstdirektion (Hrsg.) (1991c): Standortseinheitenkarte 1:10000. Forstamt Entenpfuhl. Forstrevier Wildburg. Koblenz.
- Bezirksregierung Koblenz – Forstdirektion (Hrsg.) (1977): Forstamtsübersichtskarte Neupfalz im Maßstab 1:25000. Koblenz.
- Forstdirektion Koblenz (Hrsg.) (1977): Forstamtsübersichtskarte Neupfalz im Maßstab 1:25000. Koblenz.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1962b): Standortskarte 1:5000. Block V (und Block IV). Blatt 1. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Thiergarten und Revierförsterei Reichenbach.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1962c): Standortskarte 1:5000. Block V. Blatt 2 und Blatt 3. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Thiergarten.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1962d): Standortskarte 1:5000. Block VI (und Block III). Blatt 1. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Schanzerkopf und Revierförsterei Opel.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1962e): Standortskarte 1:5000. Block VI. Blatt 2. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Schanzerkopf.

- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1966a): Standortseinheitenkarte 1:10000. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Opel.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1966b): Standortseinheitenkarte 1:10000. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Reichenbach.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1966c): Standortseinheitenkarte 1:10000. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Schanzerkopf.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1966d): Standortseinheitenkarte 1:10000. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Thiergarten.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1966e): Sonderkarte der stauwassergefährdeten Standorte 1:10000. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Opel.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1966f): Sonderkarte der stauwassergefährdeten Standorte 1:10000. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Reichenbach.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1966g): Sonderkarte der stauwassergefährdeten Standorte 1:10000. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Schanzerkopf.
- Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1966h): Sonderkarte der stauwassergefährdeten Standorte 1:10000. Forstamt Neupfalz – Staatswald. Revierförsterei Thiergarten.
- Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (1984): Topographische Karte 1:100.000. C 6310. Bad Kreuznach. Normalausgabe. Koblenz.
- Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (1994): Topographische Karte 1:25.000. 6011 Simmern (Hunsrück). Normalausgabe. Koblenz.

Analoges Luftbildmaterial

- Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (1996a): Orthophoto mit Höhenlinien 1:5000. Ödesborner Höhe. R 3400/H 5532. Bildflug 05.06.1996.
- Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (1996b): Orthophoto mit Höhenlinien 1:5000. Opelweg. R 3402/ H 5534. Bildflug 05.06.1996.
- Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (1996c): Orthophoto mit Höhenlinien 1:5000. Panzborner Stück. R 3400/H 5534. Bildflug 05.06.1996.
- Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (1996d): Orthophoto mit Höhenlinien 1:5000. Wolfsfels. R 3402/ H 5532. Bildflug 05.06.1996.
- Forstliche Versuchsanstalt Trippstadt (1995a): CIR-Luftbild. Streifen 400. Bilder 338, 340, 342, 452, 453, 455, 457 (unveröffentlicht).
- Forstliche Versuchsanstalt Trippstadt (1995b): CIR-Luftbild. Streifen 404. Bilder 459, 461, 462, 463, 465, 467 (unveröffentlicht).

Digitale Materialien

Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (1996e): Digitales panchromatisches Orthophoto von Rheinland-Pfalz. Kacheln: 3398/5528 bis 3406/5528, 3398/5530 bis 3406/5530, 3398/5532 bis 3406/5532, 3398/5534 bis 3406/5534, 3398/5536 bis 3406/5536. Bildflug 05.06.1996.

Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (1999a): ATKIS-DGM. Digitales Geländemodell (DGM) der Genauigkeitsklasse 1. Gitterweite 20 m. Aktualität: 1981–1991.

Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (1999b): ATKIS-DLM25. Digitales Basis-Landschaftsmodell mit der Objektgenauigkeit ± 3 m. Aktualität: 1990–1995.

LvermGeo RLP et al. (Hrsg.) (2003): Top 50 – Version 4. Rheinland-Pfalz/Saarland. Amtliche Topographische Karten. Aktualität: 2003.

Alle Kartenauszüge in der vorliegenden Arbeit wurden mit freundlicher Genehmigung des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz eingefügt:

Geobasisinformationen (TK50, TK100, DOP) © Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland - Pfalz vom 28.07.2006, Az.: 26 722-1.401

Software⁴⁸

ArcGis 9.1 (ESRI)

ArcView 3.2 (ESRI)

Erda Imagine 9.0 (Leica Geosystems)

MMS 1.1 (USGS)

PRMS (MMS-Version) (USGS)

Maple 9.5 (Maplesoft)

MS Office 2000 und MS Office 2003 (Microsoft)

SPSS 11.5 und SPSS 13 (SPSS)

Corel Suite 12 (Corel)

Top 50 Version 4 (LVerMGeo RLP, LKVK Saarland & Dornier GmbH)

Extensions zum Programm ArcView 3.2: u.a. HydroTools 1.0, DEMAT, AvATKIS, Basin1

⁴⁸ Alle aufgeführten Produktnamen stellen Warenzeichen der jeweiligen Firmen dar.

Abkürzungsverzeichnis

Institutionen

AG Boden	Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden
AK Standortskartierung	Arbeitskreis Standortskartierung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BLfW	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau
DWD	Deutscher Wetterdienst
IAHS	International Association of Hydrologic Science
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K.A.H.N	Kommunale Arbeitsgemeinschaft „Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Nahe“
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LFV BW	Landesforstverwaltung Baden-Württemberg
LKVK Saarland	Landesamt für Kataster-, Vermessungs- und Kartenwesen Saarland
LVA RLP	Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz
MLWF RLP	Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz
MUF RLP	Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USGS	United States Geological Survey

Ausgewählte hydrologische und bodenkundliche Abkürzungen

A_{Eo}	oberirdisches Einzugsgebiet [km ²]
A_{Eu}	unterirdisches Einzugsgebiet [km ²]
ET_a	aktuelle Evapotranspiration [mm]
ET_p	potenzielle Evapotranspiration [mm]
FK	Feldkapazität [Vol.-%] bzw. [mm/dm]
I	Interzeptionsverdunstung [mm]
kf	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
nFK	nutzbare Feldkapazität [Vol.-%] bzw. [mm/dm]
nFKWe	nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes [mm]
Nd bzw. P	Niederschlag (Freilandniederschlag) [mm]
Nd _b bzw. P _b	Bestandesniederschlag [mm]
pF-Wert	Maßzahl für die Saugspannung des Wassers im Boden [lg hPa]
Q	Abfluss, Durchfluss [l/s] bzw. [m ³ /s]
Q _g	Grundwasserabfluss [l/s] bzw. [m ³ /s]
Q _o	Oberflächenabfluss [l/s] bzw. [m ³ /s]
Q _z	Zwischenabfluss, Interflow [l/s] bzw. [m ³ /s]
We	effektiver Wurzelraum [cm]
Θ	Wassergehalt des Bodens, Bodenfeuchte [%]
ψ	Gesamtpotenzial [hPa]
ψ _H	hydraulisches Potenzial [hPa]
ψ _p	Druckpotenzial [hPa]
ψ _m	Matrixpotenzial [hPa]
ψ _o	osmotisches Potenzial [hPa]
ψ _z	Gravitationspotenzial [hPa]

Verzeichnis der Abbildungen, Karten, Bilder und Tabellen

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1-1	Grundlegendes Schema des Untersuchungsablaufes.	4
Abb. 1-2	Endgültige Ausdehnung des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches unter Berücksichtigung der modifizierenden Wirkung des Gewässernetzes und ursprüngliche Grenzziehung ohne Berücksichtigung des Gewässernetzes.	7
Abb. 1-3	Verlauf der beiden Bodencatenen („Catena-West“ und „Hangfall-Catena“) entlang des Modellhanges Hölzerkopf.	8
Abb. 1-4	Messgeräteausstattung im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	12
Abb. 1-5	Schema der Anwendung des Modells MMS/PRMS.	14
Abb. 2-1	Modell eines mesoskaligen Einzugsgebietes.	16
Abb. 2-2	Schema der hydrologischen Systemzusammenhänge in einem Einzugsgebiet.	16
Abb. 2-3	Komponenten der Niederschlagsbilanz von Vegetationsdecken.	17
Abb. 2-4	Mittlerer Kronendurchlass verschiedener Bestände.	17
Abb. 2-5	Schematische Darstellung des Abflussprozesses und Unterscheidung verschiedener räumlicher Dimensionen.	20
Abb. 2-6	Die wichtigsten Wasserbewegungen bei der Infiltration.	21
Abb. 2-7	Hydraulisches Potenzial (ψ_H), Matrixpotenzial (ψ_m), Gravitationspotenzial (ψ_z) und Wassergehalt in einer homogenen Bodensäule.	22
Abb. 2-8	Überblick über die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt verschiedener Böden, sowie Porenraumgliederung und die Unterteilung des Bodenwassers und der Speicherkapazität.	23
Abb. 2-9	Schematische Darstellung der Fließwege in einem Hangboden.	25
Abb. 2-10	Zusammensetzung einer Abflussganglinie aus ihren Komponenten Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss.	26
Abb. 2-11	Schematischer Überblick über die wichtigsten Steuergrößen einer Hochwasserganglinie für natürliche Einzugsgebiete in Abhängigkeit von der Gebietsgröße und der Jährlichkeit der Ereignisse.	28
Abb. 3-1	Geländemodell des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches.	35
Abb. 3-2	Flächenanteile der Höhenniveaus im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	37
Abb. 3-3	Flächenanteile der Höhenniveaus im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.	37
Abb. 3-4	Geländemodell des Modellhanges Hölzerkopf mit Hangneigungsklassen.	38
Abb. 3-5	Flächenanteile der Neigungsklassen im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	38
Abb. 3-6	Flächenanteile der Neigungsklassen im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.	38
Abb. 3-7	Flächenanteile der Expositionsklassen im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	39
Abb. 3-8	Flächenanteile der Expositionsklassen im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.	39
Abb. 3-9	Paläogeographische Übersichtskarte des Unterdevon in Mitteleuropa.	42
Abb. 3-10	Stratigraphische Gliederung des Hunsrücks.	42
Abb. 3-11	Flächenanteile der geologischen Einheiten im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	44
Abb. 3-12	Flächenanteile der geologischen Einheiten im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.	44
Abb. 3-13	Halbschematisches geologisches Profil durch den nordöstlichen Soonwald.	45

Abb. 3-14	Aufbau der Profile des Kamm- und Oberhangbereiches.	50
Abb. 3-15	Aufbau der Profile des oberen Mittelhanges.	51
Abb. 3-16	Aufbau der Profile des unteren Mittelhanges.	52
Abb. 3-17	Aufbau der Profile des oberen Unterhanges.	53
Abb. 3-18	Aufbau der Profile des unteren Unterhanges.	54
Abb. 3-19	Schematische Bodenkarte des Modellhanges Hölzerkopf.	55
Abb. 3-20	Flächenanteile der Grundformen im Bereich des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches.	57
Abb. 3-21	Flächenanteile der Grundformen im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.	57
Abb. 3-22	Gesättigte Wasserleitfähigkeit unverdichteter Waldböden in unterschiedlichen Hangpositionen – 15 cm bis 20 cm u. GOF.	58
Abb. 3-23	Infiltrationskapazität unterschiedlicher Standorte am Modellhang Hölzerkopf.	59
Abb. 3-24	Langjährige monatliche Niederschlagshöhen und Monatsmitteltemperaturen der Station Simmern-Wahlbach (1961 bis 1990).	61
Abb. 3-25	Langjährige monatliche Niederschlagshöhen der Station Ellern-Forsthaus Thiergarten (1961 bis 1990).	61
Abb. 3-26	Charakteristische Kennzahlen zur monatlichen Niederschlagsverteilung in den Jahren 1986 bis 1999 für die Station Ellern-Forsthaus Thiergarten.	62
Abb. 3-27	Flächenanteile der Wegekategorien im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	67
Abb. 3-28	Flächenanteile der Wegekategorien im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.	67
Abb. 3-29	Grabennetz des Modellhanges Hölzerkopf.	70
Abb. 3-30	Halbschematischer Schnitt durch den Modellhang Hölzerkopf (5-fach überhöht) unter Berücksichtigung des geologischen Untergrundes, der Bodentypen und der forstlichen Bestände.	71
Abb. 3-31	Modell der Abflussbildung am Modellhang Hölzerkopf.	73
Abb. 4-1	Konstruktionsprinzip der Messwehre.	77
Abb. 4-2	Einteilung des Messquerschnitts (Gräfenbach im Bereich von Pegel P5) in 8 Lamellen und Lage der Messpunkte zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit.	79
Abb. 4-3	Hydrometrischer Messflügel.	80
Abb. 4-4	Abflussquerschnitt des Gräfenbaches im Bereich von Pegel P5 am 13.01.2004.	81
Abb. 4-5	Aufbau der Pegelanlagen.	83
Abb. 4-6	Pegelstandsganglinien der Pegel P1, P2 und P3 auf Basis von Tagesmittelwerten im Zeitraum November 1999 bis Oktober 2003.	84
Abb. 4-7	Pegelstandsganglinien der Pegel P6, P7 und P8 auf Basis von Tagesmittelwerten im Zeitraum November 2001 bis Oktober 2003.	85
Abb. 4-8	Lage der Pegel und Problematik abflussloser Senken in der Gewässersohle.	86
Abb. 4-9	Lage der Pegelanlagen im Gräfenbach.	87
Abb. 4-10	Aufbau der Pegelanlage P5.	87
Abb. 4-11	Verlauf der maximalen und aktuellen Pegelstände der Maximalpegelanlagen im Gräfenbach.	88
Abb. 4-12	Pegelstandsganglinie Pegel P5 (Gebietsauslass Gräfenbach) auf Basis von Tagesmittelwerten im Zeitraum Oktober 2001 bis Oktober 2003.	88
Abb. 4-13	Lage der Standrohre zur Bestimmung des Stauwasserspiegels am Modellhang.	89
Abb. 4-14	Funktionsprinzip der Niederschlagskippswaage.	90
Abb. 4-15	Mittlere monatliche Niederschlagshöhe und mittlere Monatstemperaturen im Bereich von Profil C3 (515 m NN) in den Jahren 2000 bis 2003.	91

Abb. 4-16	Mittlere monatliche Niederschlagshöhe und mittlere Monatstemperaturen der Station Wahlbach (436 m NN) in den Jahren 2000 bis 2003.....	91
Abb. 4-17	Freiland- und Bestandesniederschläge im Bereich des Modellhanges von März 1999 bis Juni 2000.....	92
Abb. 5-1	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel <i>P1</i> /Abfluss <i>W3+W4</i> (Zeitraum 01.11.1999 bis 01.07.2000).	97
Abb. 5-2	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel <i>P1</i> /Abfluss <i>W3+W4</i> (Zeitraum 02.07.2000 bis 22.08.2001).	97
Abb. 5-3	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel <i>P1</i> /Abfluss <i>W3a</i> (Zeitraum ab 23.08.2001).	97
Abb. 5-4	Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel <i>P1</i>	98
Abb. 5-5	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel <i>P2</i> /Abfluss <i>W8</i> (Zeitraum ab 01.11.1999).	101
Abb. 5-6	Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel <i>P2</i>	102
Abb. 5-7	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel <i>P3</i> /Abfluss <i>W12</i> (Zeitraum 01.11.1999 bis 09.06.2001).	105
Abb. 5-8	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel <i>P3</i> /Abfluss <i>W12</i> (Zeitraum ab 10.06.2001).	105
Abb. 5-9	Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel <i>P3</i>	106
Abb. 5-10	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel <i>P6</i> /Abfluss <i>W17</i> (Zeitraum ab 01.11.2001).	108
Abb. 5-11	Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel <i>P6</i>	108
Abb. 5-12	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel <i>P7</i> /Abfluss <i>W22</i> (Zeitraum ab 01.11.2001).	110
Abb. 5-13	Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel <i>P7</i>	110
Abb. 5-14	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstände Pegel <i>P8</i> /Abfluss <i>W24a</i> für den Zeitraum ab 01.11.2001.	112
Abb. 5-15	Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel <i>P8</i>	112
Abb. 5-16	Streudiagramm und Regressionsmodell – Pegelstand Pegel <i>P5</i> /Abfluss Gräfenbach am Gebietsauslass (Zeitraum ab 01.11.2001).....	113
Abb. 5-17	Überblick über gemessenen und berechneten Abfluss sowie die resultierenden Residualwerte für Pegel <i>P5</i>	114
Abb. 5-18	Abflussganglinie Pegel <i>P1</i> auf Tagesmittelbasis.	115
Abb. 5-19	Abflussganglinie Pegel <i>P2</i> auf Tagesmittelbasis.	115
Abb. 5-20	Abflussganglinie Pegel <i>P3</i> auf Tagesmittelbasis.	116
Abb. 5-21	Ganglinie des Gesamtabflusses aus dem Modellhang auf Basis der Summenwerte von Pegel <i>P1</i> , <i>P2</i> und <i>P3</i> auf Tagesmittelbasis.	116
Abb. 5-22	Abflussganglinie Pegel <i>P6</i> auf Tagesmittelbasis.	117
Abb. 5-23	Abflussganglinie Pegel <i>P7</i> auf Tagesmittelbasis.	117
Abb. 5-24	Abflussganglinie Pegel <i>P8</i> auf Tagesmittelbasis.	118
Abb. 5-25	Ganglinie des Gesamtabflusses aus dem oberen Modellhangbereich auf Basis der Summenwerte von Pegel <i>P6</i> , <i>P7</i> und <i>P8</i> auf Tagesmittelbasis.	118

Abb. 5-26	Abflussganglinie des Gräfenbaches am Gebietsauslass des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach (Pegel P5) auf Tagesmittelbasis.....	119
Abb. 6-1	Monatliche Niederschlagshöhe der Station Ellern im hydrologischen Sommerhalbjahr 1999.....	121
Abb. 6-2	Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf im hydrologischen Sommerhalbjahr 1999.	122
Abb. 6-3	Vergleich der Hochwasserereignisse am 6./7. Juli 1999 und 7./8. Juli 2000.	122
Abb. 6-4	Monatliche Niederschlagshöhen im hydrologischen Jahr 1999/2000.....	124
Abb. 6-5	Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 1999/2000 (Tagesbasis).	124
Abb. 6-6	Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 1999/2000.	125
Abb. 6-7	Monatliche Niederschlags- und Abflusshöhe des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 1999/2000.	125
Abb. 6-8	Monatliche Niederschlagshöhen im hydrologischen Jahr 2000/2001.....	126
Abb. 6-9	Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2000/2001 (Tagesbasis).	126
Abb. 6-10	Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2000/2001.	127
Abb. 6-11	Monatliche Niederschlags- und Abflusshöhe des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2000/2001.	127
Abb. 6-12	Monatliche Niederschlagshöhen im hydrologischen Jahr 2001/2002.....	128
Abb. 6-13	Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches im hydrologischen Jahr 2001/2002 (Tagesbasis).	129
Abb. 6-14	Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2001/2002.	130
Abb. 6-15	Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach im hydrologischen Jahr 2001/2002.	130
Abb. 6-16	Monatliche Niederschlagshöhen im hydrologischen Jahr 2001/2002.....	131
Abb. 6-17	Niederschlag und Abflussgang für den Modellhang Hölzerkopf und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches im hydrologischen Jahr 2002/2003 (Tagesbasis).	132
Abb. 6-18	Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Modellhanges Hölzerkopf im hydrologischen Jahr 2002/2003.	133
Abb. 6-19	Niederschlags- und Abflusssummenlinie des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach im hydrologischen Jahr 2002/2003.	133
Abb. 6-20	Jährliche Niederschlags- und Abflusshöhe des Modellhanges Hölzerkopf mit resultierendem Abflussquotienten.	134
Abb. 6-21	Monatliche Niederschlags- und Abflusshöhe des Modellhanges Hölzerkopf mit resultierendem Abflussquotienten.	135
Abb. 6-22	Monatliche Abflusshöhen aus dem Modellhang Hölzerkopf in den hydrologischen Jahren 1999/2000 bis 2002/2003 und im 4-jährigen Mittel.	136
Abb. 6-23	Monatliche Abflussquotienten am Modellhang Hölzerkopf in den hydrologischen Jahren 1999/2000 bis 2002/2003 und im 4-jährigen Mittel.	136
Abb. 6-24	Interannuelle Variabilität der monatlichen Abflusshöhe und des monatlichen Abflussquotienten in den vier beobachteten hydrologischen Jahren (Maß: Relative Variabilität).	136
Abb. 6-25	Summenkurven des Modellhangabflusses in den Jahren 1999/2000 bis 2002/2003.	137
Abb. 6-26	Summenkurven des Niederschlags in den Jahren 1999/2000 bis 2002/2003.	137
Abb. 6-27	Dauerlinie des Modellhangabflusses in den Jahren 1999/2000 bis 2002/2003.	137

Abb. 6-28	Tägliche Niederschlagshöhe und Ganglinie des Tagesmittelabflusses aus dem Modellhang Hölzerkopf von 01.11.1999 bis 31.10.2003.....	139
Abb. 6-29	Tägliche Niederschlagshöhe und Ganglinie des Tagesmittelabflusses aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches von 01.10.2001 bis 31.10.2003.....	140
Abb. 6-30	Vergleich der physiogeographischen Ausstattung des Modellhanges Hölzerkopf und des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach anhand ausgewählter Faktoren.	142
Abb. 6-31	Jährliche Abflusshöhe aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und dem Modellhang Hölzerkopf in den hydrologischen Jahren 2001/2002 und 2002/2003.	143
Abb. 6-32	Monatliche Abflusshöhe aus dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches und dem Modellhang Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.....	144
Abb. 6-33	Monatliche Abflussquotienten des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.....	144
Abb. 6-34	Ganglinie der täglichen Abflusshöhe des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.....	145
Abb. 6-35	Bivariates Streudiagramm der mittleren täglichen Abflussspende des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.	146
Abb. 6-36	Abflussgang aus dem Modellhang Hölzerkopf und dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches am 04./05. Mai 2002 (Werte standardisiert auf Abflussspende $l/(s \cdot km^2)$).	147
Abb. 6-37	Niederschlags- und Abflusssummenlinien für den Modellhang Hölzerkopf und das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach. Hochwasserereignis am 04./05. Mai 2002.....	147
Abb. 6-38	Abflussgang aus dem Modellhang Hölzerkopf und dem Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches am 13./14. Feb. 2002. (Werte standardisiert auf Abflussspende $l/(s \cdot km^2)$).	148
Abb. 6-39	Niederschlags- und Abflusssummenlinien für den Modellhang Hölzerkopf und das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach. Hochwasserereignis am 13./14. Feb. 2002.	148
Abb. 6-40	Abfluss- und Niederschlagsgang für den Modellhang Hölzerkopf am 26.12.1999 und 21.08.2002.	149
Abb. 6-41	Abfluss- und Niederschlagsgang für den Modellhang Hölzerkopf von 01.07.2000 bis 10.07.2000.....	149
Abb. 6-42	Zusammenhang zwischen dem Abflussspendenscheitel $l/(s \cdot km^2)$ von Einzugsgebiet und Modellhang (18 Abflussereignisse).	150
Abb. 6-43	Schematische Aufteilung des Modellhanges Hölzerkopf in „Unterhang“ und „Mittel- u. Oberhang“ (5-fach überhöht).	151
Abb. 6-44	Vergleich der physiogeographischen Ausstattung der unteren und oberen Hangbereiche des Modellhanges Hölzerkopf anhand ausgewählter Faktoren.....	152
Abb. 6-45	Jährliche Abflusshöhe aus den unteren bzw. mittleren- und oberen Hangbereichen des Modellhanges Hölzerkopf.	154
Abb. 6-46	Monatliche Abflusshöhe aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.	154
Abb. 6-47	Monatliche Abflussquotienten von Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf (November 2001 bis Oktober 2003).....	155
Abb. 6-48	Monatlicher Abflussanteil von Unterhang und Mittel- u. Oberhang am Gesamtabfluss des Modellhanges Hölzerkopf (November 2001 bis Oktober 2003).....	155
Abb. 6-49	Summenlinien der täglichen Abflusshöhe aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges mit Niederschlagssummenlinie (a) und resultierende Doppelsummenlinie der Abflusshöhe beider Hangbereiche (b) für das hydrologische Jahr 2001/2002.	156
Abb. 6-50	Ganglinie der täglichen Abflusshöhe aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf von November 2001 bis Oktober 2003.	157
Abb. 6-51	Zusammenhang zwischen dem Anteil des Mittel- u. Oberhangabflusses am Gesamtabfluss des Modellhanges Hölzerkopf und der absoluten Abflusshöhe aus dem Modellhang Hölzerkopf (Tageswerte).	158

Abb. 6-52	Zusammenhang zwischen der mittleren täglichen Abflussspende von Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf.....	158
Abb. 6-53	Zusammenhang zwischen täglicher Abflusshöhe aus Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf und täglicher Niederschlagshöhe in Herbst, Winter und Frühjahr (hydrologisches Jahr 2001/2002 und 2002/2003).	159
Abb. 6-54	Zusammenhang zwischen täglicher Abflusshöhe aus dem Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf und täglicher Niederschlagshöhe in Herbst, Winter und Frühjahr (hydrologisches Jahr 2001/2002 und 2002/2003).	159
Abb. 6-55	Zusammenhang zwischen täglicher Abflusshöhe aus Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf und dem 21-Tage-Vorregenindex (hydrologisches Jahr 2001/2002 und 2002/2003).....	160
Abb. 6-56	Zusammenhang zwischen täglicher Abflusshöhe aus dem Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf und dem 21-Tage-Vorregenindex (hydrologisches Jahr 2001/2002 und 2002/2003).....	160
Abb. 6-57	Autokorrelogramme des mittleren stündlichen Abflusses für den Unterhang und den Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf.....	161
Abb. 6-58	Ganglinie des Stauwasserspiegels in unterschiedlichen Positionen des Modellhanges Hölzerkopf.	163
Abb. 6-59	Abflussgang aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf am 4./5. Mai 2002.....	164
Abb. 6-60	Niederschlags- und Abflusssummenlinien für Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf. Hochwasserereignis am 4./5. Mai 2002.	164
Abb. 6-61	Abflussgang aus Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf am 13./14. Februar 2002.....	165
Abb. 6-62	Niederschlags- und Abflusssummenlinien für Unterhang und Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf. Hochwasserereignis am 13./14. Februar 2002.	165
Abb. 6-63	Zusammenhang zwischen Abflussspendenscheitel [$l/(s \cdot km^2)$] von Unterhang und Mittel- u. Oberhang (a) und Zusammenhang zwischen dem ereignisbezogenen Zuwachs der Abflussspende von Unterhang und Mittel- u. Oberhang (b) für 18 ausgewählte Abflussereignisse.....	167
Abb. 6-64	Zusammenhang zwischen Abflussspendenscheitel [$l/(s \cdot km^2)$] und Höhe des zugrunde liegenden Niederschlagsereignisses [mm] (a) bzw. Abflussspendenscheitel [$l/(s \cdot km^2)$] und 21-Tage-Vorregenindex (b) für den Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf ($n = 18$).	168
Abb. 6-65	Zusammenhang zwischen Abflussspendenscheitel [$l/(s \cdot km^2)$] und Höhe des zugrunde liegenden Niederschlagsereignisses [mm] (a) bzw. Abflussspendenscheitel [$l/(s \cdot km^2)$] und 21-Tage-Vorregenindex (b) für Mittel- u. Oberhang des Modellhanges Hölzerkopf ($n = 18$).	168
Abb. 6-66	Zusammenhang zwischen Intensität des Abflusszuwachses [$l/(s \cdot km^2) \cdot h^{-1}$] und Intensität der Niederschlagsereignisse [mm/h] an Unterhang und Mittel- u. Oberhang während der Vegetationsruhezeit ($n = 13$).	169
Abb. 6-67	Schematischer Überblick über die Teileinzugsgebiete des Modellhanges mit resultierender Clusterzugehörigkeit.....	169
Abb. 6-68	Dendrogramm der hierarchischen Clusteranalyse.	171
Abb. 6-69	Klassenmittel der jährlichen Abflusshöhe in den hydrologischen Jahren 1999/2000 bis 2001/2002.	172
Abb. 6-70	Ganglinien der mittleren monatlichen Abflusshöhe der 3 Gebietsklassen.	173
Abb. 6-71	Ganglinien des mittleren monatlichen Anteils am Gesamtabfluss bezogen auf den Ideallhang mit identischen Flächenanteilen der Klassen.	173
Abb. 6-72	Abflussspenden der 10 Teilgebiete des Modellhanges Hölzerkopf von 10.12. bis 15.12.1999....	174
Abb. 6-73	Abflussspenden der 10 Teilgebiete des Modellhanges Hölzerkopf von 28.03. bis 03.04.2000....	174
Abb. 7-1	Klassifikation hydrologischer Modelle.....	179

Abb. 7-2	Übersicht über verschiedene Modellansätze.....	180
Abb. 7-3	Kriterien bei der Modellauswahl.	180
Abb. 7-4	Schema der HRU-Ausweisung.	183
Abb. 7-5	HRU-Ausweisung auf Basis von Relief, Geologie, Pedologie und Landnutzung.	185
Abb. 7-6	Flächenanteile der Hydrological Response Units (HRUs) im Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach und im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.	193
Abb. 7-7	Flächenanteile der Hydrological Response Units (HRUs) in unteren bzw. mittleren & oberen Hangbereichen des Modellhanges Hölzerkopf.	193
Abb. 7-8	Aufbau des Modells PRMS.	197
Abb. 7-9	Verhältnis der aktuellen ET zur potenziellen ET für ein Bodenkompartment in Abhängigkeit von der Wassersättigung des Bodens und der Bodenart.	201
Abb. 7-10	Der Boden als Transformationsglied im Rahmen der Abflussbildung	202
Abb. 7-11	Ermittlung des Gesamtabflusses aus dem untersuchten Gebiet als flächengewichtetes Mittel der Abflüsse der einzelnen HRUs.....	205
Abb. 7-12	Gliederung des Gebietes in Teileinzugsgebiete in PRMS.	205
Abb. 7-13	Vorliegende Abflussdaten zur Kalibrierung und Validierung von MMS/PRMS.	214
Abb. 7-14	Schema der Modellkalibrierung und Modellvalidierung.	214
Abb. 7-15	Entscheidungsbaum im Rahmen der Parameterkalibrierung.	215
Abb. 7-16	Anteil der oberflächenabflusswirksamen Flächen (<i>ca_percent</i> ; Dezimalanteil) in Abhängigkeit von Bodenwassergehalt (<i>soil_moist</i>) und Niederschlag (<i>net_rain</i>) für alle HRUs mit staunässebeeinflussten Böden und < 5° Hangneigung.....	217
Abb. 7-17	Beobachteter und simulierter Gang der täglichen Abflusshöhe aus dem Modellhang Hölzerkopf.....	219
Abb. 7-18	Verteilung der Residualwerte (simulierte tägliche Abflusshöhe [mm] – beobachtete tägliche Abflusshöhe [mm]) im Validierungszeitraum.....	220
Abb. 7-19	Simulierte Höhe von Evapotranspiration und Abfluss sowie zugrunde liegender Niederschlagsinput für den Modellhang Hölzerkopf (a) und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (b).....	221
Abb. 7-20	Anteil der unterschiedlichen Abflusskomponenten und der Evapotranspiration am gesamten Systemoutput im Mittel der hydrologischen Jahre 2001/2002 bis 2002/2003.....	221
Abb. 7-21	Mittlerer jährlicher Abflussquotient (Q/Nd) im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches. Bezugszeitraum: hydrologische Jahre 2001/2002 bis 2002/2003.....	222
Abb. 7-22	Mittlerer Oberflächenabflussanteil am Gesamtabfluss im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	222
Abb. 7-23	Tagesabflusshöhe am 20.2.2002 im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	222
Abb. 7-24	Simulationsergebnisse für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches auf Monatsbasis.	225
Abb. 7-25	Simulationsergebnisse für den Modellhang Hölzerkopf auf Monatsbasis.....	225
Abb. 7-26	Ganglinie des Modellhangabflusses für Szenario I (15 % versiegelte Fläche) und im Ist-Zustand.....	227
Abb. 7-27	Ganglinie des Modellhangabflusses für Szenario II (0 % versiegelte Fläche) und im Ist-Zustand.....	228
Abb. 7-28	Ganglinie des Modellhangabflusses für Szenario III (ohne Jungwuchs) und im Ist-Zustand.....	228
Abb. 7-29	Vergleich der simulierten Modellhangabflüsse für den Zeitraum 01.06.2000 bis 31.07.2000.	229
Abb. 7-30	Systemoutput (4-jähriges Mittel) im Rahmen der Landnutzungsszenarien.	230

Verzeichnis der Karten

Karte 1-1	Lage des Soonwaldes und des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches in Rheinland-Pfalz.	2
Karte 3-1	Überblick über den Großen Soon und Lage des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und Modellhang Hölzerkopf.	34
Karte 3-2	Geschummerte Höhenschichtenkarte des Untersuchungsgebietes.	36
Karte 3-3	Hangneigungskarte des Untersuchungsgebietes.	37
Karte 3-4	Expositionskarte des Untersuchungsgebietes.	39
Karte 3-5	Geologischer Überblick über das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	45
Karte 3-6	Verlauf der Bodencatenen am Modellhang Hölzerkopf.	49
Karte 3-7	Grundformenkarte des Einzugsgebiets.	57
Karte 3-8	Lage der Klimastationen Simmern-Wahlbach und Ellern-Thiergarten.	60
Karte 3-9	Landnutzung im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (ohne Berücksichtigung linearer Elemente wie öffentlicher Straßen, Forstwege, Rückegassen und Fließgewässer).	64
Karte 3-10	Wegenetz im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	67
Karte 3-11	Gewässernetz im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	69
Karte 3-12	Topographischer Index (c_s) im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	73
Karte 4-1	Abflussmessstellen am Modellhang.	77
Karte 4-2	Pegelanlagen am Modellhang.	82
Karte 6-1	Pegelanlagen am Modellhang Hölzerkopf mit schematischer Aufteilung in Hangbereiche.	151
Karte 7-1	Verteilung der Hydrological Response Units (HRUs) im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	194
Karte 7-2	Verteilung der Hydrological Response Units (HRUs) im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.	195
Karte 7-3	Anschluss der HRU-Teilflächen an das Gewässernetz im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	206

Verzeichnis der Bilder

Bild 1-1	Bad Kreuznacher Innenstadt während des Nahe-Hochwassers am 21.12.1993.	1
Bild 1-2	Anlage der Profilgruben mit einem Bagger (hier Profil C3).	9
Bild 1-3	Profil C3 (Tiefe 120 cm).	9
Bild 1-4	Permeametermessungen im Bereich des Mittelhanges nahe Profil C4).	9
Bild 3-1	Glashütter Wiesen mit Modellhang Hölzerkopf im Hintergrund.	40
Bild 3-2	Rennweg im Westen des Modellhanges mit Blick auf den nördl. Soonwaldhaupteckamm.	40
Bild 3-3	Rennweg im Norden des Modellhanges Hölzerkopf.	40
Bild 3-4	Forstweg im zentralen Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.	40

Bild 3-5	Mittlerer Soonwaldhauptkamm im Bereich des Hölzerkopfes.	40
Bild 3-6	Übergang zum Steilhang im Osten des Modellhanges mit Quarzitblöcken.....	50
Bild 3-7	Fahrspuren mit Abfluss am Modellhang Hölzerkopf.	59
Bild 3-8	Blick über die Glashütter Wiesen Richtung Modellhang Hölzerkopf während eines Hochwasserereignisses.	66
Bild 3-9	Jungwuchs am Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf (1999).	66
Bild 3-10	Fichtenaltbestand am Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf.....	66
Bild 3-11	Graben am Oberhang des Modellhanges während eines Niederschlagsereignisses.	70
Bild 3-12	Graben entlang des unteren Querweges des Modellhanges (nördliche Modellhanggrenze).	70
Bild 3-13	Quellhorizont im Westen des Modellhanges (Bereich der Störungslinie).	74
Bild 3-14	Interflowaustritt aus dem Makroporensystem in das Grabensystem am mittleren Querweg des Modellhanges Hölzerkopf (Februar 2004).	75
Bild 3-15	Interflowaustritt in das Grabensystem nahe der Abflussmessstelle W20.....	75
Bild 3-16	Oberflächlich anstehendes Stauwasser am Unterhang nach Niederschlagsperiode.....	75
Bild 3-17	Verdichtete Fahrspuren am mittleren Querweg des Modellhanges Hölzerkopf im Sommer 1999.	75
Bild 3-18	Oberflächenabfluss in den Fahrspuren eines unbefestigten Forstweges (mittlerer Querweg des Modellhanges Hölzerkopf) während eines Niederschlagsereignisses.	76
Bild 3-19	Oberflächenabfluss auf versiegeltem Forstweg an der Westgrenze des Modellhanges Hölzerkopf.	76
Bild 3-20	Direkte Ableitung von Oberflächenabfluss aus den Fahrspuren eines unbefestigten Forstweges in das Grabensystem bei Pegel P7.	76
Bild 3-21	Infolge von Starkregen vollständig wassergefüllte Profilgrube C2 (Feb. 2002).....	76
Bild 4-1	Messstelle W3 im Winter 1999/2000.....	77
Bild 4-2	Abflussmessstelle W9a mit starker Eisbildung im Februar 2000.	78
Bild 4-3	Abflussmessstelle W24 an einer Sprungstelle im Grabenbett.....	78
Bild 4-4	Messung mit dem hydrometrischen Flügel an Messpunkt P5 (Gräfenbach) im Februar 2004.....	80
Bild 4-5	Pegelanlage P1 mit dem vorgelagerten Messwehr W3a während des Hochwasserereignisses im Februar 2002.	83
Bild 4-6	Gräfenbach mit Maximalpegel 1	87
Bild 4-7	Profil C4 im Frühjahr 2000.....	89
Bild 4-8	Stauwasserpegel IF 9.....	89
Bild 4-9	Elektronische Wetterstation am Unterhang des Modellhanges Hölzerkopf nahe Aufschluss C3.	90
Bild 6-1	Sommerhochwasser des Gräfenbaches am 7. Juli 1999.	121
Bild 6-2	Gräfenbach während der sommerlichen Trockenphase im Jahr 1999.	123
Bild 6-3	Gräfenbach nordwestlich des Modellhanges – außerhalb seines eigentlichen Flussbettes (Niederschlagsphase im Februar 2002).	128
Bild 6-4	Glashütter Wiesen im Norden des Modellhanges Hölzerkopf während der Niederschlagsphase im Februar 2002.	128
Bild 6-5	Entwässerungsgraben entlang des mittleren Querweges des Modellhanges Hölzerkopf.	153
Bild 6-6	Interflowaustritt in das Grabensystem infolge von Starkniederschlägen.....	153

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1-1	Aufnahmezeitraum und -intervall der erhobenen Variablen bzw. Nutzungsdauer der Messanlagen.	11
Tabelle 2-1	Skalenbereiche in der Hydrologie und ihre Charakteristika.	16
Tabelle 2-2	Jährliche ET_a verschiedener Bestände in unteren Mittelgebirgslagen.	19
Tabelle 3-1	Vertikalabfolge periglazialer Lagen der Mittelgebirge.	47
Tabelle 3-2	Überblick über die Grundformen und die entsprechenden Bodentypen im Untersuchungsgebiet.	56
Tabelle 3-3	Langjährige Klimawerte für den Soonwald.	60
Tabelle 3-4	Tägliche Niederschlagsmaxima und Niederschlagsverteilung der Station Ellern (1986 bis 1999).	62
Tabelle 3-5	Heutige potenzielle natürliche Vegetation (hpnV) des Soonwaldes.	63
Tabelle 3-6	Flächenanteile der unterschiedlichen Landnutzungsformen im Gesamteinzugsgebiet und am Modellhang.	65
Tabelle 4-1	Indirekt über Abflussgeschwindigkeit ermittelte Abflusswerte des Gräfenbaches im Bereich von Pegel P5 (Januar und Februar 2004).	81
Tabelle 4-2	Abfluss und Abflussgeschwindigkeit des Gräfenbaches im Bereich von Pegel P5 während des Hochwasserereignisses am 13.01.2004 (Messung 10:45 bis 12:00).	81
Tabelle 4-3	Ergebnisse der Gefäßmessungen im Bereich von Pegel P5 bzw. Max2.	82
Tabelle 4-4	Ausfallzeiträume der Pegel und zugehörige Modelle zur Ersatzwertfindung.	86
Tabelle 4-5	Monatliche Temperatur- und Niederschlagswerte für den Modellhang Hölzerkopf. Ermittelt anhand der elektronischen Wetterstation im Bereich von Profil C3 von Januar 2000 bis Dezember 2003.	92
Tabelle 4-6	Interzeptionswerte unterschiedlicher Fichtenbestände.	93
Tabelle 5-1	Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P1 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.	95
Tabelle 5-2	Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P1.	98
Tabelle 5-3	Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P2 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.	99
Tabelle 5-4	Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P2.	101
Tabelle 5-5	Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P3 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.	103
Tabelle 5-6	Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P3.	106
Tabelle 5-7	Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P6 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.	107
Tabelle 5-8	Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurve für Pegel P6.	107
Tabelle 5-9	Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P7 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.	109
Tabelle 5-10	Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurve für Pegel P7.	110
Tabelle 5-11	Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P8 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.	111
Tabelle 5-12	Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurve für Pegel P8.	112
Tabelle 5-13	Pegel- und Abflussdaten zur Erstellung der Abflusskurven für Pegel P5 sowie Abflussdaten und Residualwerte aus dem entsprechenden Regressionsmodell.	113
Tabelle 5-14	Zusammenfassende Angaben zur Erstellung der Abflusskurve für Pegel P5.	114

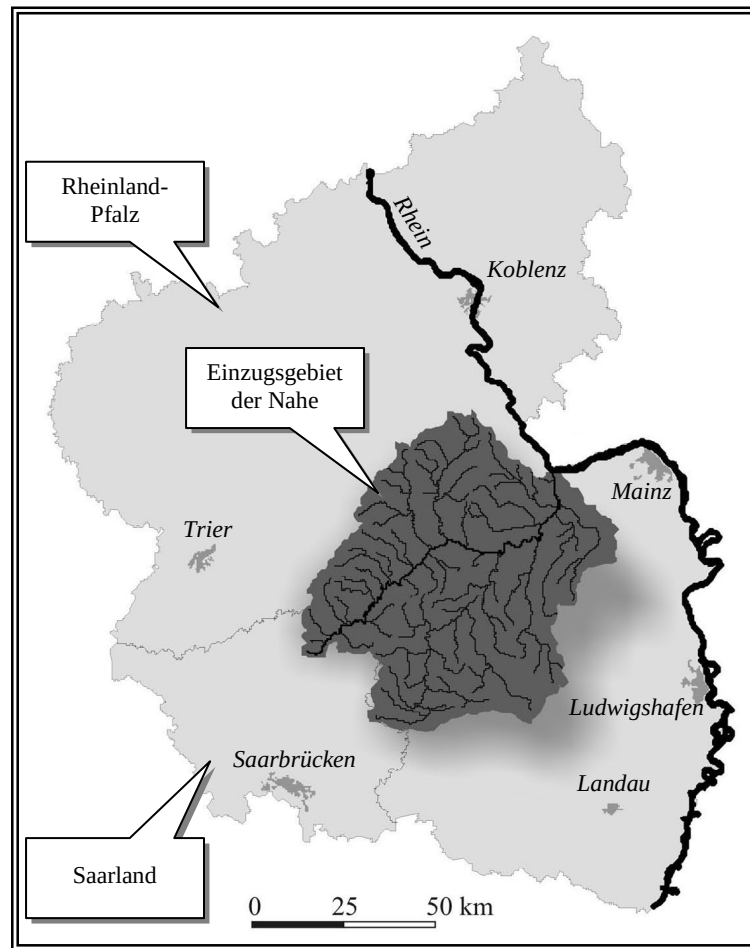
Tabelle 6-1	Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Sommerhalbjahr 1999 für den Modellhang Hölzerkopf.	123
Tabelle 6-2	Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 1999/2000 für den Modellhang Hölzerkopf.	125
Tabelle 6-3	Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2000/2001 für den Modellhang Hölzerkopf.	127
Tabelle 6-4	Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2001/2002 für den Modellhang Hölzerkopf.	130
Tabelle 6-5	Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2001/2002 für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	130
Tabelle 6-6	Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2002/2003 für den Modellhang Hölzerkopf.	133
Tabelle 6-7	Kennzahlen zu Niederschlag und Abfluss im hydrologischen Jahr 2002/2003 für das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	133
Tabelle 6-8	Ausgewählte gewässerkundliche Kennwerte für den Modellhang (Untersuchungszeitraum 11/1999 bis 10/2003) und das Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches (Untersuchungszeitraum 11/2001 bis 10/2003).	138
Tabelle 6-9	Intraannuelle Abflussvariabilität des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach und des Modellhanges Hölzerkopf 1999/2000 bis 2002/2003 (Datenbasis: Stundenmittel).	145
Tabelle 6-10	Kennwerte ausgewählter Abflussereignisse (n = 18) der Jahre 2001/2002 und 2002/2003 für das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach und Modellhang Hölzerkopf.	150
Tabelle 6-11	Einfluss der Faktoren Tagesniederschlagshöhe und 21-Tage-Vorregenindex auf die Tagesabflusshöhe von Unterhang und Mittel- u. Oberhang in den verschiedenen Jahreszeiten.	161
Tabelle 6-12	Intraannuelle Abflussvariabilität des Modellhanges und seiner Hangbereiche.	161
Tabelle 6-13	Kennwerte ausgewählter Abflussereignisse (n = 18) der hydrologischen Jahre 2001/2002 und 2002/2003 für unterschiedliche Bereiche des Modellhanges Hölzerkopf.	166
Tabelle 6-14	Hangbereichsspezifische Stärke des linearen Zusammenhangs (r) zwischen verschiedenen Variablen für 13 Hochwasserereignisse in der Vegetationsruhezeit.	168
Tabelle 6-15	Überblick über die 10 Teileinzugsgebiete des Modellhanges Hölzerkopf mit Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der zugehörigen Abflussspende auf Basis der Gefäßmessungen an den Abflussmessstellen.	170
Tabelle 6-16	Erhebungszeitpunkte der 107 in die Clusteranalyse eingeflossenen Abflussmessreihen.	170
Tabelle 6-17	Unähnlichkeitsmatrix der Gebiete E1 bis E10 bezüglich des Abflussverhaltens (107 Messreihen) auf Basis der Maßzahl „Quadierte Euklidische Distanz“.	171
Tabelle 6-18	Innergruppendifferenzsummen.	171
Tabelle 6-19	Clusterzugehörigkeiten der Teileinzugsgebiete für verschiedene Lösungen mit jeweiligem Anteil an der Gesamtinnergruppendifferenzsumme.	171
Tabelle 6-20	Naturräumliche Ausstattung und hydrologische Eigenschaften der drei ausgewiesenen Gebietsklassen.	175
Tabelle 7-1	Kriterienkatalog zur Klassifizierung der hydrologisch bedeutsamen Gebietseigenschaften.	186
Tabelle 7-2	Reliefeinheiten und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	187
Tabelle 7-3	Pedo(geo)logische Einheiten und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	188
Tabelle 7-4	Landnutzungseinheiten und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	189
Tabelle 7-5	Landnutzungseinheiten und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.	189
Tabelle 7-6	Vorläufige Hydrological Response Units (HRUs) und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach.	190

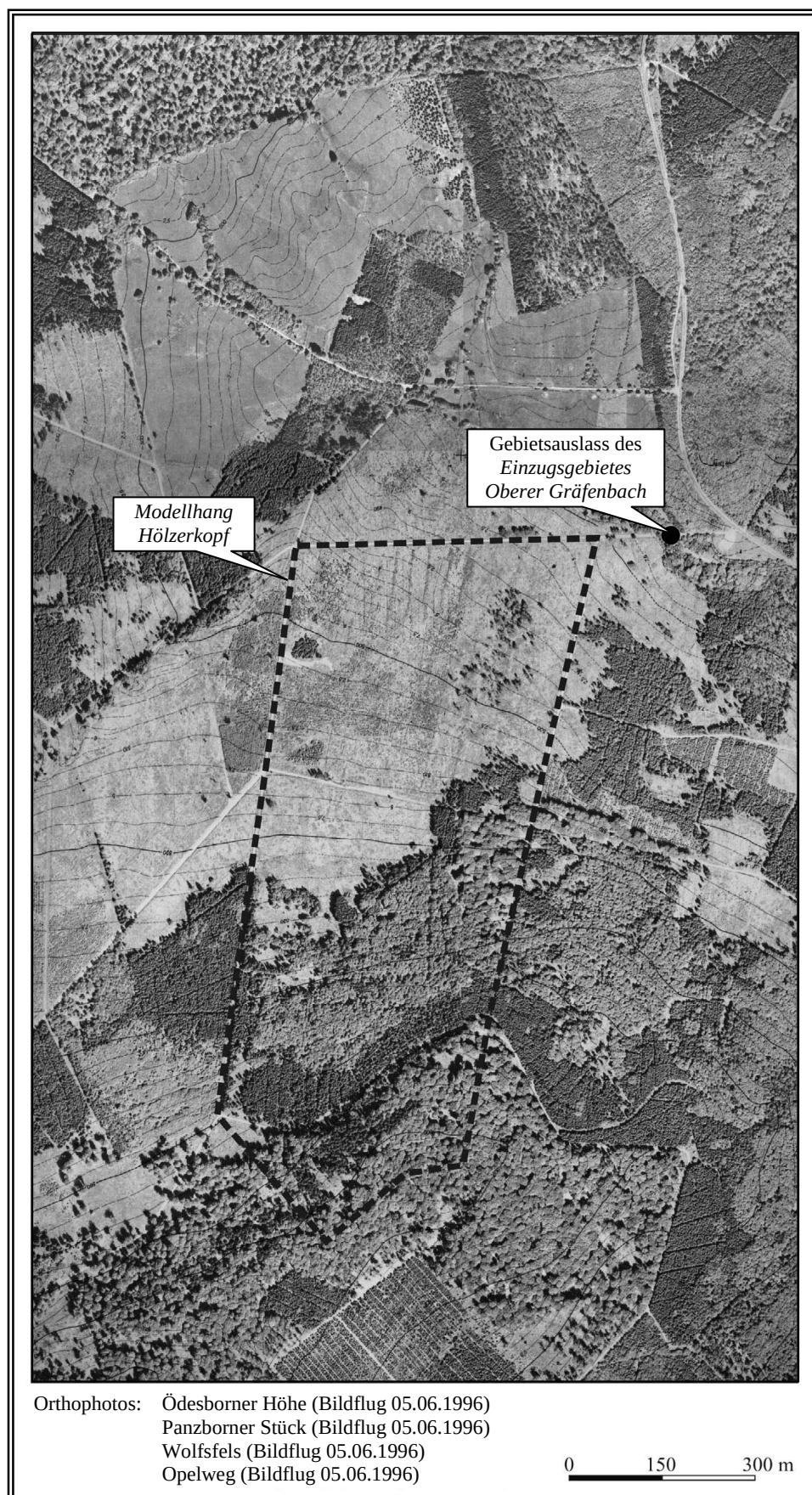
Tabelle 7-7	Zusammenlegung von 6 HRUs mit der Landnutzung „Verkehrs- und Siedlungsflächen“ in eine HRU.	191
Tabelle 7-8	Eingliederung der HRUs mit der Merkmalskombination „Böden ohne Staunässe“ und „>10° Neigung“ in die entsprechenden HRUs mit der Merkmalskombination „Böden ohne Staunässe“ und „5° bis 10° Neigung“.....	191
Tabelle 7-9	<i>Endgültige</i> Hydrological Response Units (HRUs) und deren Flächenanteile im Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach.	192
Tabelle 7-10	<i>Endgültige</i> Hydrological Response Units (HRUs) und deren Flächenanteile am Modellhang Hölzerkopf.....	192
Tabelle 7-11	Vertikaler Temperaturgradient für das Rheinische Schiefergebirge.....	208
Tabelle 7-12	Monatlicher Korrekturfaktor für Regenniederschläge im Bereich des Soonwaldes – mäßig geschützte Lagen.	208
Tabelle 7-13	Anteil der Flächen mit eingeschränkter bzw. stark eingeschränkter Infiltrationskapazität im Bereich des Modellhanges Hölzerkopf.....	209
Tabelle 7-14	Anteil der Flächen mit eingeschränkter bzw. stark eingeschränkter Infiltrationskapazität im Einzugsgebiet des Oberen Gräfenbaches.....	210
Tabelle 7-15	Interzeptionsspeicherkapazität von Fichten- und Buchenbeständen sowie verbuschten Flächen nach verschiedenen Autoren.	210
Tabelle 7-16	Parameterwerte zur Interzeptionsspeicherkapazität der unterschiedlichen Landnutzungsklassen.....	211
Tabelle 7-17	Ableitung der Parameterwerte zur Wasserkapazität der unterschiedlichen Bodenglieder.....	212
Tabelle 7-18	Konzeptionelle Speicher- und Abflusskoeffizienten.	216
Tabelle 7-19	Maßzahlen zur Modellgüte im Kalibrierungszeitraum.	217
Tabelle 7-20	Maßzahlen zur Modellgüte im Kalibrierungs-, Validierungs- und Gesamtzeitraum.....	218
Tabelle 7-21	Mittlere monatliche Differenz zwischen simulierter und beobachteter Abflusshöhe.	219
Tabelle 7-22	Simulationsergebnisse für das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach auf Monatsbasis.	223
Tabelle 7-23	Simulationsergebnisse für den Modellhang Hölzerkopf auf Monatsbasis.....	224
Tabelle 7-24	Veränderung der HRU-Flächenanteile in Szenario III.	226
Tabelle 7-25	Veränderung der Spitzenabflüsse > 100 l/s·km ² im Rahmen der Landnutzungsszenarien.	228

A N H A N G

Inhaltsverzeichnis zum Anhang

Anhang I:	Karte zur Lage und Ausdehnung des Nahe-Einzugsgebietes	A-1
Anhang II:	Panchromatisches Luftbild des Modellhanges Hölzerkopf	A-2
Anhang III:	Lage der Aufschlüsse der „Catena West“ und der „Hangfall-Catena“	A-3
Anhang IV:	Bodenkennwerte der Hauptaufschlüsse der „Catena West“	A-4
Anhang V:	Bodenkennwerte der Aufschlüsse der „Hangfall-Catena“	A-6
Anhang VI:	Karte der forstlichen Bestände des Modellhanges Hölzerkopf	A-9
Anhang VII:	Tabelle der forstlichen Bestände des Modellhanges Hölzerkopf	A-10
Anhang VIII:	Lage der Pegelanlagen im Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach	A-11
Anhang IX:	Ergebnisse der direkten volumetrischen Abflussmessungen am Modellhang Hölzerkopf vom 02.04.1999 bis 14.10.2003	A-12
Anhang X:	Ergebnisse der Maximalpegelmessungen im Gräfenbach	A-24
Anhang XI:	Ergebnisse der Stauwasserspiegelmessungen in den Profilen der „Catena West“	A-25
Anhang XII:	Ergebnisse der Stauwasserspiegelmessungen in den Standrohren <i>IF 1</i> bis <i>IF 11</i>	A-29
Anhang XIII:	Genutzte Module des Modells MMS/PRMS (Kurzbeschreibung)	A-30
Anhang XIV:	Parameter, Parameterausprägungen und Parametrisierungsgrundlagen des Modells MMS/PRMS	A-31
Anhang XV:	Messprotokoll der direkten volumetrischen Abflussmessungen und Stauwasserspiegelmessungen am Modellhang Hölzerkopf	A-38
Anhang XVI:	Messprotokoll der Drei-Punkt-Messungen am Gebietsauslass des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach	A-39

Anhang I Karte zur Lage und Ausdehnung des Nahe-Einzugsgebietes.

Anhang II Panchromatisches Luftbild des Modellhanges Hölzerkopf.

Anhang III Lage der Aufschlüsse der „Catena West“ und der „Hangfall-Catena“.

Profil	Lage der Profile „Catena West“ (Gauß-Krüger-Koordinaten)	
	Rechtswert	Hochwert
C 1.0	³⁴ 01 710	⁵⁵ 33 810
C 2	³⁴ 01 700	⁵⁵ 33 670
C 2.1	³⁴ 01 680	⁵⁵ 33 630
C 2.2	³⁴ 01 670	⁵⁵ 33 540
C 2.3	³⁴ 01 660	⁵⁵ 33 510
C 2.4	³⁴ 01 660	⁵⁵ 33 480
C 3	³⁴ 01 660	⁵⁵ 33 460
C 3.1	³⁴ 01 660	⁵⁵ 33 450
C 3.2	³⁴ 01 650	⁵⁵ 33 390
C 3.3	³⁴ 01 630	⁵⁵ 33 330
C 3.4	³⁴ 01 650	⁵⁵ 33 300
C 3.5	³⁴ 01 650	⁵⁵ 33 270
C 3.6	³⁴ 01 660	⁵⁵ 33 250
C 3.7	³⁴ 01 650	⁵⁵ 33 220
C 3.8	³⁴ 01 640	⁵⁵ 33 200
C 3.85	³⁴ 01 630	⁵⁵ 33 190
C 3.9	³⁴ 01 630	⁵⁵ 33 180
C 4	³⁴ 01 620	⁵⁵ 33 140
C 4.0	³⁴ 01 620	⁵⁵ 33 140
C 4.1	³⁴ 01 620	⁵⁵ 33 110
C 4.2	³⁴ 01 610	⁵⁵ 33 070
C 5	³⁴ 01 600	⁵⁵ 33 050
C 5.1	³⁴ 01 610	⁵⁵ 33 050
C 5.2	³⁴ 01 600	⁵⁵ 33 030
C 5.3	³⁴ 01 590	⁵⁵ 32 990
C 5.4	³⁴ 01 590	⁵⁵ 32 950
C 5.5	³⁴ 01 600	⁵⁵ 32 930
C 6	³⁴ 01 630	⁵⁵ 32 880
C 6.1	³⁴ 01 640	⁵⁵ 32 820
C 6.2	³⁴ 01 680	⁵⁵ 32 760
C 7	³⁴ 01 750	⁵⁵ 32 710

Profil	Lage der Profile „Hangfall Catena“ (Gauß-Krüger-Koordinaten)	
	Rechtswert	Hochwert
Hf 1	³⁴ 02 190	⁵⁵ 33 820
Hf 2	³⁴ 02 110	⁵⁵ 33 790
Hf 3	³⁴ 02 030	⁵⁵ 33 760
Hf 4	³⁴ 01 970	⁵⁵ 33 720
Hf 5	³⁴ 01 920	⁵⁵ 33 690
Hf 6	³⁴ 01 880	⁵⁵ 33 660
Hf 7	³⁴ 01 850	⁵⁵ 33 620
Hf 8	³⁴ 01 810	⁵⁵ 33 560
Hf 9	³⁴ 01 780	⁵⁵ 33 490
Hf 10	³⁴ 01 760	⁵⁵ 33 420
Hf 11	³⁴ 01 740	⁵⁵ 33 330
Hf 12	³⁴ 01 730	⁵⁵ 33 260
Hf 13	³⁴ 01 730	⁵⁵ 33 200
Hf 14	³⁴ 01 730	⁵⁵ 33 130
Hf 15	³⁴ 01 730	⁵⁵ 33 050
Hf 16	³⁴ 01 750	⁵⁵ 32 990
Hf 17	³⁴ 01 770	⁵⁵ 32 950
Hf 18	³⁴ 01 800	⁵⁵ 32 910
Hf 19	³⁴ 01 850	⁵⁵ 32 840
Hf 20	³⁴ 01 880	⁵⁵ 32 800
Hf 21	³⁴ 01 900	⁵⁵ 32 770

– Aufschluss C5 – Pseudogley - Braunerde Profiltiefe: 135 cm R ³⁴ 01 600 / H ⁵⁵ 33 050 Mittelhang – 540 m NN Exposition: N / Neigung: 5° Geologie: Hunsrückschiefer	Tiefe [cm]	Perigl. Lage	Horizont	Dichte		Bodenart	C _{org.} [%]	Skelett- anteil [%]	Porenverteilung ^a [Vol.-%]			Wassergehalt ^a [Vol.-%]			
				Rohdichte [g/cm³]	Ld				FP	MP	GP _{eng}	pF 1,8	pF 2,5	pF 4,2	nFK ^b
	0-7	LH	Ah	0,67	Ld 1	Uls	21,2	14,4	13,1	19,2	9,1	41,4	32,3	13,1	19,2
	7-65	LH	Bv	1,16	Ld 2	Uls	3,8	35,5	14,6	17,7	4,0	36,3	32,3	14,6	17,7
	65-120	LB	IICv-Sw			Uls	1,5	~ 70							
> 120	LB	IICv-Swd			Uls	0,5	~ 70								

– Aufschluss C6 – Lockerbraunerde Profiltiefe: 140 cm R ³⁴ 01 630 / H ⁵⁵ 32 880 Oberhang – 562 m NN Exposition: NW / Neigung: 8° Geologie: Taunusquarzit	Tiefe [cm]	Perigl. Lage	Horizont	Dichte		Bodenart	C _{org.} [%]	Skelett- anteil [%]	Porenverteilung ^a [Vol.-%]			Wassergehalt ^a [Vol.-%]			
				Rohdichte [g/cm ³]	Ld				FP	MP	GP _{eng}	pF 1,8	pF 2,5	pF 4,2	nFK ^b
	0-5	LH	Ah	0,64	Ld 1	Slu	10,2	35,7	9,6	24,4	7,8	41,8	34,0	9,6	24,4
	5-45	LH	Bfv	0,80	Ld 1	Ls2	3,8	53,2	9,5	22,7	6,1	38,3	32,2	9,5	22,7
	45-60	LH	Bv			Ls2	3,3	53,2							
60-100	LB	IICv			Sl3	1,7	51,5								
> 100	LB	IICv-Sw			Sl3	0,7	~ 70								

– Aufschluss C7 – Lockerbraunerde Profiltiefe: 80 cm R ³⁴ 01 750 / H ⁵⁵ 32 710 Kamm – 600 m NN Exposition: NW / Neigung: 3° Geologie: Taunusquarzit	Tiefe [cm]	Perigl. Lage	Horizont	Dichte		Bodenart	C _{org.} [%]	Skelett- anteil [%]	Porenverteilung ^a [Vol.-%]			Wassergehalt ^a [Vol.-%]			
				Rohdichte [g/cm³]	Ld				FP	MP	GP _{eng}	pF 1,8	pF 2,5	pF 4,2	nFK ^b
	0-5	LH	Ah	0,60	Ld 1	Sl4	12,4	34,4	10,8	29,8	6,2	46,8	40,6	10,8	29,8
	5-18	LH	Ah-Bfv	0,80	Ld 1	Ls3	6,3	39,9	15,5	14,2	7,5	37,2	29,6	15,5	14,2
18-55	LH	Bfv	0,89	Ld 1	Sl3	4,4	35,1	11,7	18,9	7,1	37,6	30,5	11,7	18,9	
> 55	LB	IICv				Ss	1,4	49,1							

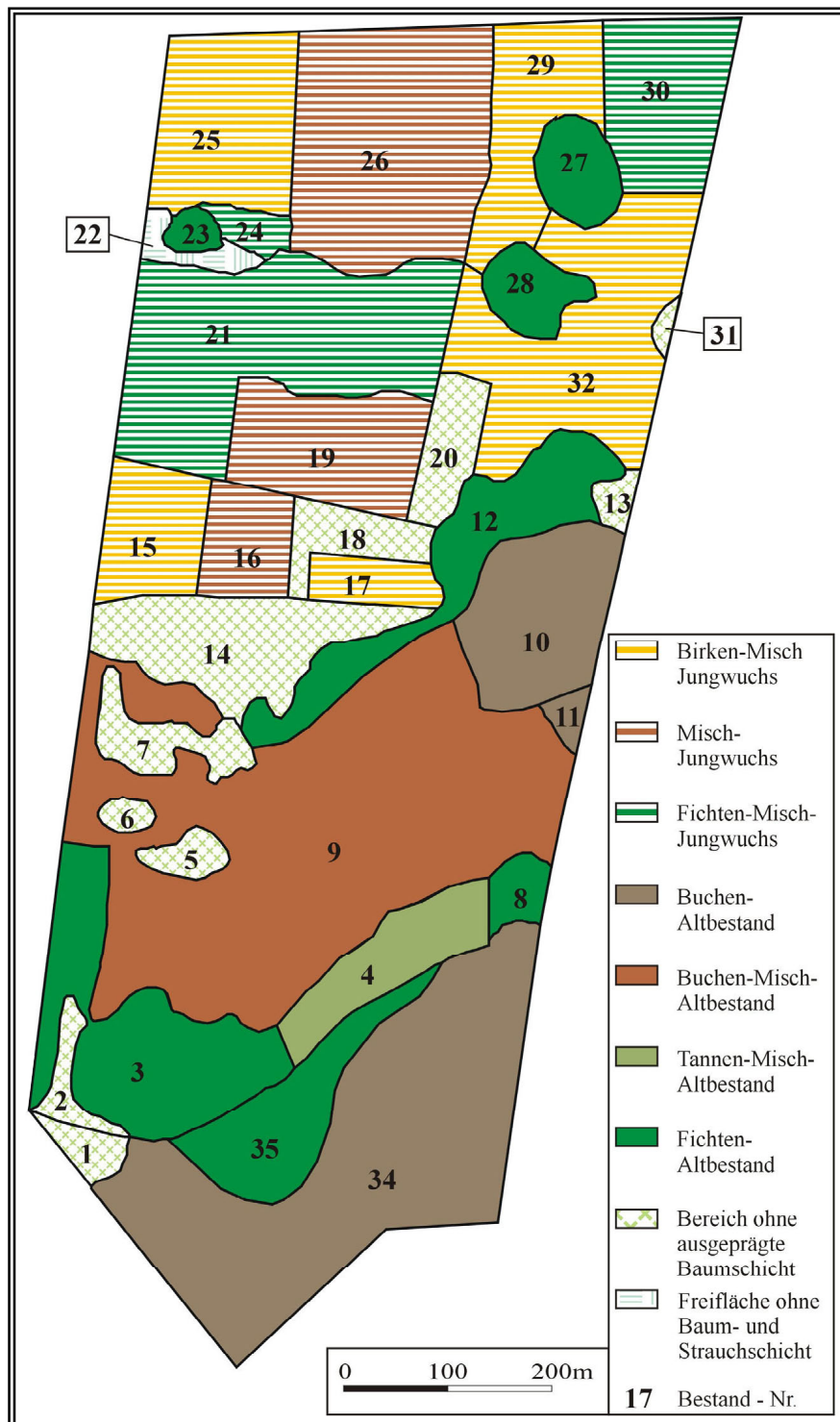
^a Mittelwert aus 5 bis 7 Proben^b nFK = pF 2,5–pF 4,2

Anhang V Bodenkennwerte der Aufschlüsse der „Hangfall-Catena“ (*Hf 1 bis Hf 21*).
(Benennungen nach AG Boden 2005; alle Merkmale im Gelände diagnostiziert)

	Hf 1	Hf 2	Hf 3	Hf 4	Hf 5	Hf 6	Hf 7
Exposition	NE	NE	NE	NNE	NNE	NNE	NNE
Hangneigungs- stufe	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N2
Bodentyp	Pseudogley	Stagnogley	Pseudogley	Stagnogley	Pseudogley	Pseudogley	Pseudogley
Deckungsgrad Baumschicht [%]	50 %	80 %	40 %	25 %	40 %	20 %	45 %
Deckungsgrad Unterwuchs [%]	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	90 %
Aufschlusstiefe [cm]	35	30	35	35	40	35	33
L [cm]	1 – 2	1	1 – 2	1	1	1	2
Of [cm]	3	3	4	2	4	2	3
Oh [cm]	2	< 1	< 1	< 1	< 1	2	2
Humusart	RO	MR	MR	MR	MR	MR	MR
Horizont 1	Ah	Sw-Ah	Ah	Sw-Ah	Ah	Ah	Ah
Tiefe [cm]	0 – 5	0 – 5	0 – 5	0 – 6	0 – 7	0 – 7	0 – 13
Farbe (Munsell)	10YR 3/3	10YR 3/3	10YR 3/3	2,5Y 5/3	10YR 3/3	10YR 3/3	10YR 3/3
Feinbodenart	tU	tU	tU	tU	tU	tU	tU
Durchwurzelung	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Skelettgehalt [Vol-%]	< 10	< 10	< 10	< 5	< 5	< 5	< 5
Horizont 2	Bv-Sw	S(e)rw	Bv-Sw	S(e)rw	Bv-Sw	Bv-Sw	Bv-Sw
Tiefe [cm]	5 – 30	5 – 15	5 – 25	5 – 28	7 – 30	7 – 25	13 – 26
Farbe (Munsell)	10YR 5/3	10YR 5/3	10YR 5/3	10YR 5/3	10YR 5/3	10YR 5/3	10YR 5/3
Feinbodenart	tU	tU	tU	tU	tU	tU	tU
Durchwurzelung	gering	gering	mäßig	gering	gering	gering	gering
Skelettgehalt [Vol-%]	< 10	< 10	< 10	< 5	< 5	< 5	< 5
Horizont 3	IICv-Sd	IICv-Srd	IICv-Sd	IICv-Srd	IICv-Sd	IICv-Sd	IICv-Sd
Tiefe [cm]	30 – > 35	15 – > 30	25 – 35	28 – > 35	30 – > 35	25 – > 35	26 – > 33
Farbe (Munsell)	2,5Y 7/1	2,5Y 7/1	2,5Y 7/1	2,5Y 7/1	2,5Y 7/1	2,5Y 7/1	2,5Y 7/1
Feinbodenart	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT
Durchwurzelung	keine	keine	keine	keine	gering	keine	gering
Skelettgehalt [Vol-%]	> 20	> 20	> 20	> 20	20	> 20	25

	Hf 8	Hf 9	Hf 10	Hf 11	Hf 12	Hf 13	Hf 14
Exposition	N	N	N	N	N	NNW	NNW
Hangneigungs- stufe	N2	N2	N2	N2	N2	N2	N3
Bodentyp	Pseudogley	Pseudogley	Pseudogley	Pseudogley	Stagnogley	Pseudogley- Braunerde	Pseudogley- Braunerde
Deckungsgrad Baumschicht [%]	60 %	40 %	10 %	ca. 20 %	25 %	ca. 80 %	ca. 70 %
Deckungsgrad Unterwuchs [%]	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	20 %	20 %
Aufschlusstiefe [cm]	30	30	15	21	21	35	30
L [cm]	1	2	3	4	3	2 – 3	3
Of [cm]	2	5	1	4	3	1	1
Oh [cm]	3	0 – 1	0 – 1	1	2	< 1	< 1
Humusart	RO	MR	RO	RO	RO	MO	MO
Horizont 1	Ah	Ah	Ah	Ah	Sw-Ah	Ah	Ah
Tiefe [cm]	0 – 5	0 – 4	0 – 4	0 – 5	0 – 6	0 – 2	0 – 5
Farbe (Munsell)	10YR 5/3	10YR 4/3	10YR 2/2	10YR 3/2	–	5YR 3/1	5YR3/1
Feinbodenart	U	tU	tL	tL	uL	uL	sU
Durchwurzelung	sehr hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Skelettgehalt [Vol-%]	< 5	< 5	< 5	< 10	10 – 15	20	40 – 45
Horizont 2	Bv-Sw	Bv-Sw	Bv-Sw	Bv-Sw	Bv-S(e)rw	Bfv	Bfv
Tiefe [cm]	5 – 25	4 – 25	4 – 15	5 – 21	6 – 21	2 – 35	5 – 30
Farbe (Munsell)	10YR 5/3	2,5Y 5/3	2,5Y 5/3	2,5Y 5/4	–	10YR 5/4	10YR 5/4
Feinbodenart	uL	uL	tL	sL	uL	sU	uL
Durchwurzelung	gering	stark	mäßig	gering	gering	mäßig	gering
Skelettgehalt [Vol-%]	< 5	< 5	< 5	< 10	10 – 15	20	40 – 45
Horizont 3	IICv-Sd	IICv-Srd					
Tiefe [cm]	25 – >30	25 – >30					
Farbe (Munsell)	2,5Y 7/1	2,5Y 5/3					
Feinbodenart	tL	tL					
Durchwurzelung	keine	keine					
Skelettgehalt [Vol-%]	30	30					

	Hf 15	Hf 16	Hf 17	Hf 18	Hf 19	Hf 20	Hf 21
Exposition	NNW	NNW	NW	NW	NW	NW	NW
Hangneigungs- stufe	N3	N6	N5	N4	N3	N1	N0
Bodentyp	Pseudogley- Braunerde	Skelett- humusbd.	Skelett- humusbd.	Braunerde	Locker- braunerde	Locker- braunerde	Locker- braunerde
Deckungsgrad Baumschicht [%]	70 %	70 %	70%	0 %	70 %	65 %	75 %
Deckungsgrad Unterwuchs [%]	20 %	20 %	20 %	95 %	30 %	25 %	50 %
Aufschlusstiefe [cm]	30	40	40	30	31	35	25
L [cm]	3	0 – 5	0 – 5	1	0 – 5	2	2
Of [cm]	1	0 – 5	0 – 5	2	0 – 3	1	1
Oh [cm]	1	0 – 15	0 – 15	1 – 2	1 – 3	0 – 1	0 – 1
Humusart	MR	RO	RO	MR	RO	MR	MO
Horizont 1	Ah	xC	xC	Ah	Ah	Ah	Ah
Tiefe [cm]	0 – 7			0 – 6	0 – 10	0 – 7	0 – 8
Farbe (Munsell)	5YR 3/1			10YR 3/1	10YR 3/1	10YR 3/1	10YR 3/1
Feinbodenart	IU			uL	IU	IU	sU
Durchwurzelung	gering			stark	stark	stark	stark
Skelettgehalt [Vol-%]	30 – 40	100	100	> 70	90 – 100	70	75
Horizont 2	Bv			Ah-Bv	Ah-Bfv	Ah-Bfv	Ah-Bfv
Tiefe [cm]	7 – 30			6 – 22	10 – 25	7 – 28	8 – 15
Farbe (Munsell)	10YR 6/8			10YR 3/3	10YR 4/6	10YR 5/3	10YR 5/3
Feinbodenart	U			tU	sU	IU	sU
Durchwurzelung	gering			gering	gering	gering	gering
Skelettgehalt [Vol-%]	30 – 40			> 70	90 – 100	70	75
Horizont 3				Bv	Bfv	Bfv	Bfv
Tiefe [cm]				22 – >30	25 – >30	28 – >35	15 – >25
Farbe (Munsell)				10YR 5/4	10YR 5/4	10YR 5/4	10YR 5/4
Feinbodenart				IU	fsU	fsU	fsU
Durchwurzelung				gering	gering	gering	
Skelettgehalt [Vol-%]							

Anhang VI Karte der forstlichen Bestände des Modellhanges Hölzerkopf (Kartierung 1999).

Anhang VII Tabelle der forstlichen Bestände des Modellhanges Hölzerkopf

[illegible]

Anhang VIII Lage der Pegelanlagen im Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach.

Pegelanlagen zur Erfassung des oberird. Abflusses (P1 bis P8)	Lage der Messstelle (Gauß-Krüger-Koordinaten)		Pegeltyp (vgl. Kapitel 4)
	Rechtswert	Hochwert	
P1	³⁴ 02 260	⁵⁵ 33 860	Einperlprinzip
P2	³⁴ 02 080	⁵⁵ 33 880	Einperlprinzip
P3	³⁴ 01 750	⁵⁵ 33 860	Einperlprinzip
P4	(Pegelanlage im Einzugsgebiet des Ellerbaches)		
P5	³⁴ 02 380	⁵⁵ 33 860	Schwimmer
P6	³⁴ 01 650	⁵⁵ 33 480	Einperlprinzip
P7	³⁴ 01 750	⁵⁵ 33 450	Einperlprinzip
P8	³⁴ 01 980	⁵⁵ 33 410	Einperlprinzip
Max1	³⁴ 01 560	⁵⁵ 33 750	Maximalpegel
Max2	siehe P5		Maximalpegel

Maximalpegel zur Erfassung des Stauwasserspiegels (IF 1 bis IF 11)	Lage der Messstelle (Gauß-Krüger-Koordinaten)		Lage des Stauhorizonts [cm u. GOF]
	Rechtswert	Hochwert	
IF 1	³⁴ 01 710	⁵⁵ 33 810	30
IF 2	³⁴ 01 700	⁵⁵ 33 670	30
IF 3	³⁴ 01 660	⁵⁵ 33 520	30
IF 4	³⁴ 01 660	⁵⁵ 33 440	35
IF 5	³⁴ 01 650	⁵⁵ 33 390	40
IF 6	³⁴ 01 650	⁵⁵ 33 330	40
IF 7	³⁴ 01 690	⁵⁵ 33 250	45
IF 8	³⁴ 01 700	⁵⁵ 33 170	62
IF 9	³⁴ 01 720	⁵⁵ 33 120	75
IF 10	³⁴ 01 730	⁵⁵ 33 080	n. bekannt
IF 11	³⁴ 01 630	⁵⁵ 32 880	n. bekannt

Anhang IX Ergebnisse der direkten volumetrischen Abflussmessungen am Modellhang Hölzerkopf vom 02.04.1999 bis 14.10.2003.

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	02.04.99	09.04.99	16.04.99	23.04.99	30.04.99	07.05.99	14.05.99	22.05.99	28.05.99	04.06.99	11.06.99	18.06.99	25.06.99	02.07.99	07.07.99
W 1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
W 2	0,3	0,4	1,1	0,4	0,1	0,1	0,1	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
W 3	0,3	0,6	2,2	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0
W 4	1,2	1,0	2,4	1,1	0,3	0,4	0,2	0,1	0,0	+	+	+	0,0	0,0	15,0
W 5	0,7	1,6	1,9	0,9	0,2	0,4	0,1	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0
W 6	2,3	2,3	6,5	1,6	0,4	1,0	0,4	0,2	0,0	+	+	0,0	+	+	20,0
W 7	1,7	1,6	6,5	1,6	0,4	0,5	0,2	0,1	0,0	+	+	0,0	0,0	+	15,0
W 8	4,7	4,3	14,3	5,9	2,0	1,4	0,8	0,4	0,0	+	+	+	+	0,1	35,0
W 9	0,1	0,1	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5
W 9a	1,5	1,6	4,1	1,4	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	9,5
W 10	0,1	+	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
W 11	1,3	1,7	5,0	2,1	0,8	0,8	0,7	0,5	+	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	15,0
W 12	2,3	2,0	6,0	3,5	1,6	1,3	1,2	1,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,3	30,0
W 13	1,5	1,3	3,5	1,7	0,5	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	+	+	+	15,0
W 15	+	0,6	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0	
W 17	1,8	1,8	3,6	2,0	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1	+	0,1	14,0
W 20	1,6	1,3	3,1	1,7	0,7	0,5	0,3	0,2	+	0,1	0,1	+	+	+	9,0
W 21	0,1	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	+	0,0	+	+	+	+	4,0
W 22	1,6	1,7	3,0	1,8	0,9	0,9	0,6	0,7	0,1	+	0,1	0,1	0,1	0,2	11,0
W 23	0,7	0,4	1,5	0,8	0,1	+	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0	
W 24	1,8	0,9	1,3	1,3	0,6	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	
W 24a				3,1	1,2	0,7	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	
W 34	1,3	1,1	1,2		0,5	0,3	0,1	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
W 35	0,1	+	0,4		+	+	0,0	+	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
W 37	0,1	0,1	0,1		0,1	0,1	+	+	+	0,3	+	+	+	+	0,3
W 37b	1,3	0,6	0,9		0,3	0,1	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0
W 38	0,0	0,0	0,1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
W 39	0,1	0,1	0,3	0,1	+	0,1	+	+	0,0	+	0,0	0,0	0,0	+	
W I	4,5	8,3	17,0	5,5	1,4	1,4	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	+	+	50,0
W II	3,3	6,2	9,7	4,5	1,4	1,3	0,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	40,0
W III	0,0	+	0,2	+	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	
W IV	4,6	5,3	14,0	4,7	0,7	0,8	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	35,0
W V	3,2	4,0	8,8	3,8	1,2	1,0	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
W VI	1,9	2,0	5,2	2,6	0,9	0,7	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

+ = Q < 0,1 l/s = Fehlwert = Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	07.07.99	08.07.99	10.07.99	16.07.99	26.07.99	30.07.99	09.08.99	13.08.99	20.08.99	30.08.99	06.09.99	13.09.99	17.09.99	27.09.99	01.10.99
W 1			+	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 2			+	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 3	2,0	0,1	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 4	2,0	0,1	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 5			0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 6	4,5	1,6	0,6	0,2		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 7	2,0	0,7	0,1	+		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
W 8	7,0	3,0	2,0	0,3	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
W 9	1,0	0,1	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 9a	2,0	0,7	0,3	+		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
W 10			0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 11	2,0	1,0	0,3	0,1		0,0	0,0	+	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
W 12	5,0	2,0	1,0	0,3	0,1	+	+	0,1	0,1	0,1	+	+	+	0,1	0,3
W 13	3,0	1,0	0,4	0,1		0,0	+	+	+	+	+	+	+	+	0,3
W 15									0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 17	2,5	1,5	0,5	0,3		+	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
W 20	2,0	1,0	0,4	0,2		+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,1
W 21	0,7	0,3	0,1	+		+	0,1	0,1	0,1	+	0,1	0,1	+	+	0,1
W 22	2,0	1,0	0,4	0,1		+	0,2	0,1	0,1	+	+	+	0,0	0,1	+
W 23			+	+		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 24			0,6	0,1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 24a			0,7	0,1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 34	0,7	0,4	0,2	0,1		+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 35	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 37	0,3	0,2	0,1	0,1		+	+	+	+	+	+	0,0	0,0	0,0	+
W 37b	0,4	0,2	0,1	+		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 38	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 39			+	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W I	12,0	5,0	2,8	0,4	0,0	0,0	0,0	+	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
W II	11,0	4,7	2,6	0,4		0,0	0,0	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
W III			0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W IV	10,0	4,5	2,4	0,4		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
W V			2,0	0,5		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W VI			1,3	0,3		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

+ = $Q < 0,1 \text{ l/s}$
 = Fehlwert
 = Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	08.10.99	15.10.99	22.10.99	29.10.99	05.11.99	12.11.99	17.11.99	19.11.99	24.11.99	26.11.99	01.12.99	03.12.99	08.12.99	10.12.99	12.12.99
W 1	0,0	0,0	0,0	0,0	+	+	0,0	+	+	0,1	+	+	+	+	3,0
W 2	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,1	0,0	+	0,2	0,4	0,1	+	0,1	0,1	5,0
W 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	+	0,1	0,6	1,0	0,1	0,1	0,2	0,2	9,0
W 4	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,3	+	0,1	0,5	1,1	0,2	0,1	0,3	0,2	10,0
W 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	+	+	0,1	0,6	0,1	0,1	0,3	0,2	10,0
W 6	0,0	0,0	0,0	+	0,1	0,4	0,2	0,1	0,7	2,7	0,2	0,2	0,8	0,2	15,0
W 7	+	0,0	0,0	+	0,1	0,8	0,2	0,1	0,5	3,0	0,3	0,3	0,6	0,5	15,0
W 8	0,1	+	0,0	+	0,3	2,6	0,4	0,2	1,2	5,7	0,5	0,6	1,5	1,2	30,0
W 9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1		+		0,5	0,1	+	0,1	0,1	6,0
W 9a	+	+	0,0	+	0,2	0,9	0,2	0,1	0,6	2,0	0,2	0,2	0,4	0,2	10,0
W 10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,1		+	+	+	
W 11	0,1	+	+	0,1	0,8	1,3	0,4	0,3	1,1	3,4	0,4	0,4	0,8	1,0	20,0
W 12	0,2	0,1	0,1	0,2	1,0	2,2	0,6	0,5	1,5	4,0	0,8	0,5	1,1	1,2	28,0
W 13	+	0,1	0,1	0,1	0,2	1,0	0,3	0,2	0,9	1,6	0,3	0,3	0,4	0,5	10,0
W 15	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,1	+	+	0,1	0,3	0,1	+	+	+	2,0
W 17	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	0,2	0,2	0,5	1,2	0,3	0,3	0,3	0,5	7,0
W 20	+	+	+	+	0,1	0,2	0,5	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	4,0
W 21	0,1	0,1	0,1	+	+	0,1	+	+	0,2	0,1	0,1	+	0,1	0,1	1,5
W 22	0,2	0,1	+	0,2	0,4	0,9	0,5	0,2	1,3	1,6	0,4	0,2	0,6	0,5	6,0
W 23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+		0,0		0,1		+		+	
W 24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	
W 24a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,1	0,0	0,0	+	0,0	
W 34	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	+	+	+	+	+	+	1,5
W 35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
W 37	+	0,0	0,0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,1
W 37b	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
W 38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
W 39	0,0	0,0	0,0	0,0	+	+	+	+	0,1	0,3	0,1	+	0,1	0,1	2,0
W I	+	+	0,0	0,1	0,5	2,4	0,5	0,6	4,0	4,5	1,2	1,0	1,7	1,8	50,0
W II	+	+	+	0,1	0,5	1,7	0,5	0,5		3,3	0,5	0,7	1,3	1,3	
W III	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+		+	+	+	
W IV	+	+	0,0	0,1	0,2	1,2	0,3	0,2	2,0	2,7	0,5	0,3	0,8	0,9	25,0
W V	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,6		0,2		1,7		0,3		0,7	
W VI	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,4		0,2		1,0		0,3		0,4	

+ = Q < 0,1 l/s = Fehlwert = Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	13.12.99	14.12.99	15.12.99	17.12.99	24.12.99	25.12.99	27.12.99	29.12.99	31.12.99	04.01.00	07.01.00	11.01.00	14.01.00	19.01.00	21.01.00
W 1	0,3			+	0,1	1,0	0,4	0,4	0,2		0,1		0,1		0,1
W 2	1,0	1,5	0,6	0,2	0,2	4,0	2,5	0,8	0,5		0,3	0,2	0,2		0,3
W 3	1,8	2,5	1,1	0,3	0,3	8,0	3,4	1,4	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4
W 4	2,0	3,0	1,1	0,3	0,4	8,5	3,3	1,8	1,3	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,6
W 5	1,0	1,6		0,2	0,3	4,9	2,6	2,0	1,0	0,7	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4
W 6	3,2	4,5	1,8	1,0	0,8	16,2	7,4	7,0	5,0	2,4	2,0	2,1	1,2	1,1	1,2
W 7	4,0	5,0	2,2	0,7	0,5	12,5	4,6	1,2	0,7	0,7	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4
W 8	7,7	10,0	4,0	2,2	2,0	34,5	14,7	8,0	7,2	4,0	2,9	2,7	1,8	1,6	1,7
W 9	1,3	1,1	0,5	0,1	0,1	2,8	1,2	0,4	0,1		0,1	0,1	+	+	0,1
W 9a	2,4	3,0	1,1	0,4	0,2	10,6	3,3	0,9	0,4		0,2	0,3	0,2	0,1	0,3
W 10				+		0,3	0,1		+		+		+		+
W 11	4,4	5,5	2,4	1,1	0,8	19,1	7,2	3,0	1,7	1,5	1,1	1,4	0,9	1,0	1,0
W 12	6,5	8,0	4,0	2,0	2,3	24,7	13,7	7,0	3,6	3,3	2,2	2,5	1,7	1,7	1,6
W 13	2,5	4,0	2,0	1,4	1,2	7,5	6,2	4,5	2,7	2,3	1,5	1,3	1,1	1,0	1,1
W 15	0,3	0,5	0,2	0,1	0,1	2,5	0,8	0,3	0,1		+	+	+		0,1
W 17	1,6	3,0	2,0	1,0	0,9	7,5	6,0	4,0	2,5	2,4	1,4	1,2	1,0	0,9	0,9
W 20	1,0	2,0	2,0	0,9	0,5	5,4	5,0	3,5	2,3	1,9	1,3	1,0	0,8	0,7	0,7
W 21	0,5	0,8	0,3	0,1	0,2	1,7	1,0	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
W 22	2,5	3,5	1,8	0,5	0,5	6,1	3,4	2,0	1,2	1,1	0,9	0,9	0,7	0,9	1,2
W 23				0,1		1,2	1,4		1,0		0,3		0,1		0,3
W 24				0,3		1,5	1,2		1,7		0,7		0,5		0,3
W 24a	0,5	1,0	0,7	0,5	0,3	4,4	3,7	6,0	4,5	2,1	1,6	1,4	0,8	0,7	0,8
W 34	0,2	0,4	0,3	0,6	0,5	2,0	2,4	2,5	2,0	1,7	1,0	0,5	0,6	0,4	0,4
W 35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,9	0,2	+	+	+	+	+	+	+
W 37	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
W 37b	+	0,3	0,2	0,4	0,3	1,5	1,8	2,2	1,7	1,0	0,7	0,3	0,3	0,2	0,1
W 38	0,0	0,1	0,1	+	0,0	0,8	0,7	0,5	+	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 39	0,4	0,5	0,2	0,1	0,1	0,8	0,6	0,3	+	+	+	+	+	+	+
W I	10,0	17,0	11,0	6,7	3,5	50,0	25,5	12,0	7,0	5,0	4,3	3,5	2,8	2,5	2,9
W II				5,0	0,9	38,6	13,3		5,8		3,5		2,5		2,7
W III		0,1	+	+		0,2	0,3		+		0,0	0,0	+	+	+
W IV	8,0	12,0	5,5	4,8	3,0	22,5	17,3	11,0	7,0	4,5	3,7	3,0	2,2	2,2	2,6
W V				3,6		20,0	11,8		6,5		2,8		1,8		1,8
W VI				2,2		9,3	6,8		3,5		1,7		1,4		1,2

+ = Q < 0,1 l/s = Fehlwert = Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	24.01.00	28.01.00	31.01.00	04.02.00	11.02.00	14.02.00	18.02.00	25.02.00	26.02.00	28.02.00	01.03.00	03.03.00	10.03.00	15.03.00	17.03.00
W 1		+		0,1	0,2		0,2	0,3		0,2		0,1	0,1		0,2
W 2	0,2	0,1		0,4	1,0	0,6	0,5	1,5		0,4		0,6	0,4		0,6
W 3	0,8	0,1	3,5	0,7	2,0	1,0	1,0	3,0	1,0	0,7	2,5	1,0	0,7	0,4	0,8
W 4	0,5	0,1	2,6	1,1	2,3	1,2	1,1	3,8	1,5	1,0	3,0	1,3	1,1	0,7	1,4
W 5	0,3	+	2,0	0,7	1,8	0,7	0,7	2,8	1,3	0,5	2,5	1,0	1,0	0,5	1,1
W 6	1,6	0,5	6,0	3,6	5,0	3,2	3,5	9,5	3,6	3,5	7,0	3,8	3,0	2,6	2,9
W 7	0,5	0,1	3,7	0,8	2,2	1,0	1,3	3,3	1,0	0,7	3,0	1,2	0,7	0,4	1,0
W 8	2,4	0,9	10,0	5,8	10,0	4,0	6,3	15,4	4,7	4,5	10,0	5,3	4,0	3,0	4,1
W 9	0,2	+	1,1	0,1	0,6	0,3	0,3	0,8	0,2	0,1	0,5	0,3	0,1		0,2
W 9a	0,3	0,1	2,4	0,4	1,2	0,7	0,7	2,2	0,7	0,4	2,8	0,7	0,4		0,6
W 10		+		+	0,1		0,1	0,3				0,1	+		0,1
W 11	1,2	0,4	6,5	1,7	5,0	3,0	2,7	7,5	2,3	1,8	7,0	2,5	1,8	1,3	2,2
W 12	2,2	0,5	13,0	3,6	7,1	5,5	4,4	13,3	4,5	4,1	10,5	5,0	3,3	2,6	3,6
W 13	1,0	0,5	6,0	2,2	3,0	2,8	2,4	5,3	2,2	2,1	5,5	2,8	1,7	1,4	1,7
W 15		+		0,1	0,4	0,3	0,2	0,6	0,2	0,1	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1
W 17	0,9	0,5	5,0	2,1	3,3	2,5	2,3	4,0	2,0	1,8	5,0	2,5	1,6	1,2	1,9
W 20	0,7	0,4	3,0	1,8	2,3	2,0	1,8	3,0	1,8	1,4	3,7	1,8	1,4	1,2	1,2
W 21	0,2	0,1	1,0	0,2	0,5	0,4	0,3	0,7	0,3	0,3	1,0	0,3	0,1	0,3	0,2
W 22	0,8	0,4	4,5	1,4	2,3	1,8	1,6	3,7	1,6		4,0	1,9	1,4	1,1	1,5
W 23		0,1		1,2	0,8		0,9	1,4				1,0	0,8		0,5
W 24		0,1		1,2	0,8		0,9	1,5				0,9	0,8		0,5
W 24a		0,2		3,5	2,5	1,5	2,8	4,5				2,6	2,5	2,0	1,7
W 34	0,3	0,2	1,2	1,4	0,8	0,9	1,0	1,4	1,3	1,1	1,8	1,2	1,0	0,5	0,6
W 35	0,1	+	0,9	+	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2		0,5	0,1	0,1	0,1	0,1
W 37	0,1	+	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
W 37b	0,1	0,1	0,7	1,2	0,6	0,5	0,7	1,2	1,0	0,9	1,3	0,8	0,6	0,4	0,3
W 38	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
W 39	+	+	0,5	0,1	0,3	0,2	0,1	0,4	0,1	0,1	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1
W I	3,0		25,0	6,5	13,3	6,5	7,5	20,0	10,0	6,0	18,0	7,3	4,8	2,6	
W II				5,0	10,0		6,0		9,2	5,5	16,5	5,7	4,0	2,4	
W III				+	0,1		+	0,2				0,1	+		
W IV	2,8		22,0	4,8	7,8	5,5	5,0	11,8	8,5	5,0	15,0	5,0	3,2	2,1	
W V				4,3								4,7	3,0		
W VI				3,0								3,0	2,2		

+ = Q < 0,1 l/s = Fehlwert = Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	21.03.00	24.03.00	28.03.00	30.03.00	31.03.00	01.04.00	03.04.00	07.04.00	18.04.00	22.04.00	26.04.00	01.05.00	11.05.00	26.05.00	09.06.00
W 1		0,1			0,4			0,1	0,1	+		+	+	+	0,1
W 2		0,2			1,5		0,7	0,3	0,3	0,1		0,1	+	0,2	0,1
W 3	0,4	0,2	0,7	12,0	3,5	3,0	1,0	0,3	0,5	0,2	0,2	0,1	+	0,3	0,1
W 4	0,7	0,4	0,9	15,0	3,6	4,0	1,4	0,8	0,6	0,2	0,4	0,1	+	0,4	0,1
W 5		0,4	0,5	10,0	3,0	3,0	1,0	0,7	0,5	0,2	0,3	0,1	0,0	0,3	0,1
W 6	1,8	1,3	1,7	20,0	10,0	10,0	6,0	3,0	1,8	0,9	1,6	0,7	0,1	1,2	0,6
W 7	0,5	0,2	0,7	18,0	4,0	5,0	1,0	0,2	0,5	0,1	0,2	+	+	0,2	0,1
W 8	2,4	1,8	2,5	40,0	16,7	16,0	7,0	3,6	2,4	1,3	1,8	0,9	0,2	1,5	0,8
W 9	0,1	+	0,1	4,0	1,1	1,2	0,2	+	0,1	+	0,1	+	0,0	+	+
W 9a	0,2	0,1	0,3	10,0	2,6	3,7	0,6	0,1	0,2	0,1	0,2	+	+	0,1	0,1
W 10		+			0,2			+	+	0,0		0,0	0,0	+	0,0
W 11	1,4	0,8	1,5	22,0	9,0	9,0	2,3	1,1	1,4	0,5	0,8	0,4	+	0,7	0,5
W 12	2,8	1,4	3,0	40,0	17,0	16,0	5,0	2,4	2,2	1,1	1,5	0,8	0,2	1,6	1,0
W 13	1,3	0,9	1,5	21,0	10,0	8,0	2,8	1,6	1,2	0,6	0,7	0,4	0,1	0,7	0,5
W 15	0,1	+	0,1	3,0	0,8	1,1	0,1	+	0,1	+	0,1	0,0	0,0	+	+
W 17	1,2	0,8	1,3	15,0	5,3	5,5	2,7	1,6	1,0	0,5	0,7	0,4	0,1	0,6	0,5
W 20	0,8	0,6	1,0	10,0	4,0	4,0	2,5	1,4	0,8	0,4	0,5	0,3	0,1	0,5	0,4
W 21	0,2	0,1	0,3	2,5	1,0	1,0	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	+	+	0,1	+
W 22	1,0	0,7	0,9	10,0	3,8	5,0	1,9	0,9		0,5	0,7	0,4	0,1	0,6	
W 23		0,3			1,7			1,0		0,3		0,2	0,1	0,2	0,1
W 24		0,4			1,0			0,9		0,2		0,1	0,0	0,2	0,2
W 24a	1,0	1,0	1,0	7,0	4,0	5,5	5,3	2,5		0,6	0,9	0,3	0,1	0,6	0,3
W 34	0,5	0,4	0,4	2,5	1,4	1,8	2,0	1,2	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1	0,3	0,3
W 35	0,1	+	0,1	2,5	0,9	0,9	0,1	+	+	0,0	+	0,0	0,0	+	+
W 37	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	+	+	0,1	0,1
W 37b	0,2	0,2	0,2	1,2	0,8	1,1	1,5	0,9	0,1	0,1		+	+	0,1	0,1
W 38	0,0	0,0	0,0	0,7	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 39	0,1	+	0,1	1,5	0,5	0,4	0,1	+	+	+	0,1	+	0,0	+	+
W I	2,8	1,6	4,0	55,0		22,0	10,0	3,0	3,2	1,0	1,9	0,6	+	1,8	
W II	2,5	1,6	3,5	50,0		20,0	9,5	2,6		0,9	1,4	0,5		1,6	
W III		+						+	+	+		0,0			
W IV	2,1	1,3	3,0	40,0		17,0	9,0	2,4				0,4			
W V		1,1						2,2		0,6		0,3		1,1	
W VI		0,8						1,8		0,3		0,2		0,8	

+ = Q < 0,1 l/s = Fehlwert = Modellhangabfluss

		Abfluss [l/s]													
Datum Wehr	30.06.00	16.07.00	17.07.00	18.07.00	19.07.00	20.07.00	21.07.00	22.07.00	23.07.00	14.08.00	28.08.00	18.09.00	06.10.00		
W 1	0,0							0,0		+	+				
W 2	0,0	0,3	0,2	0,1	0,1	+	+	+	+	+	+	0,5	0,7		
W 3	0,0	0,5	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	+	0,1	1,4	1,4		
W 4	0,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	+	+	+	0,2	1,2	1,5		
W 5	0,0	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	+	+	0,0	0,1	0,8	1,3		
W 6	0,0	2,7	2,1	2,2	1,5	1,5	1,0	0,7	0,6	0,3	0,4	2,3	3,2		
W 7	0,0	0,3	0,3	0,1	0,1	+	+	+	+	0,0	+	1,4	1,3		
W 8	0,0	4,0	3,4	2,4	1,7	1,6	1,0	0,9	0,7	0,4	0,5	4,0	4,5		
W 9	0,0	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2		
W 9a	0,0	0,1	0,1	+	+	+	+	+	+	+	+	0,7	0,8		
W 10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0				
W 11	0,0	1,2	1,0	0,8	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,7	2,2	2,7		
W 12	+	2,7	2,4	1,9	1,4	1,4	1,0	0,8	0,7	0,7	1,1	4,1	3,9		
W 13	+	1,6	1,5	1,4	1,0	0,8	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	1,5	1,8		
W 15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,1		
W 17	0,1	1,5	1,3	1,3	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,4	0,3	1,2	1,4		
W 20	+	0,1	0,1	0,1	0,1		+	+	+	+	+	0,3	0,3		
W 21		0,8	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,7	1,2	1,5		
W 22	+	0,6	0,5	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	+	+	0,2	0,2		
W 23	0,0	0,8	0,7	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	+	0,1	0,4		
W 24	0,0	2,2	2,0	1,8	1,2	1,0	0,7	0,6	0,4	0,2	0,1	0,5	1,2		
W 24a	0,1	1,3	1,2	1,2	1,0	0,7	0,7	0,6	0,6	0,4	0,1		0,3		
W 34	0,0	+	+	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	+		
W 35	+	0,1			0,1	0,1	0,1	+	+	0,1	+	+	+		
W 37	0,0	0,8	1,1	1,0	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4	0,2	+	+	0,2		
W 37b	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
W 38	0,0	+	+		0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,1	0,1		
W 39	0,0							0,0		+	+				
W I	0,0										0,6				
W II	0,0					0,6	0,5	0,5	0,4						
W III	0,0														
W IV	0,0														
W V	0,0														
W VI	0,0														

+

= Q < 0,1 l/s

= Fehlwert

= Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	13.01.01	02.02.01	23.02.01	13.03.01	04.04.01	19.04.01	03.05.01	22.05.01	12.06.01	27.06.01	19.07.01	03.08.01	13.08.01	22.08.01	24.08.01
W 1						0,3	0,1	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 2		0,3	0,5	2,0		0,6	0,3	+	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0
W 3	0,8	0,7	1,0	2,5		1,2	0,6	+	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0
W 4	2,2	2,0	2,0	4,1		3,6	1,2	+	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0
W 5	3,0	2,7	3,0	6,6		4,8	1,8	+	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0
W 6			1,3	3,0		3,2	1,1	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0
W 7	2,8	4,0	3,0	7,6		4,1	3,0	0,3	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
W 8	0,4	0,4	0,8	2,2		1,2	0,2	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0
W 9	4,0	5,5	3,6	10,4		5,7	3,4	0,3	0,1	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
W 9a				0,5		0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W 10			0,4	1,5		0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0
W 11	2,0	2,7	2,5	5,0		2,9	1,2	0,1	0,1	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
W 12	3,8	5,5	4,6	9,5		5,7	2,5	0,2	+	0,3	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
W 13	2,0	2,0	1,8	4,5		3,0	1,4	0,1	+	0,3	0,3	+	+	0,0	+
W 15				0,4		0,2	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
W 17			1,5	4,0		2,7	1,4	0,1	0,0		0,2	+	+		+
W 20	1,6		1,2	3,3		2,1	1,3	0,1	+	+	0,1	+	+		+
W 21			0,2	0,6		0,4	0,1	0,0	+		0,1	0,0	+		+
W 22	1,6		2,0	2,7	1,4	1,9	0,9	0,2			0,1	0,0	+		0,0
W 23			0,7	2,0	1,6	1,8	1,3	0,2	0,1		0,1	0,1	+		+
W 24			0,8	3,3	1,3	1,3	1,3	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0		0,0
W 24a			1,8	6,9	4,0	3,2	3,0	0,2	0,1		0,1	0,0	0,0		0,0
W 34						1,2	0,8	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
W 35	0,1		0,1	0,5		0,2	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
W 37			0,1	0,1		0,1	0,1	0,0	0,0	+	+	+	+		0,0
W 37b	1,0		0,5	1,7		1,1	0,8	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
W 38			0,0	0,1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
W 38a			0,0			0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
W 39			0,1	0,1		+	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0		0,0

+ = Q < 0,1 l/s = Fehlwert = Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	03.09.01	07.09.01	26.09.01	01.10.01	15.10.01	26.10.01	29.10.01	09.11.01	16.11.01	21.11.01	01.12.01	12.12.01	02.01.02	09.01.02	19.01.02
W 1		0,0	0,0		0,0	+		0,1	+	+			+	+	+
W 2		0,0	+		0,0	0,1		0,5	0,1	+		0,4	0,2		0,2
W 3	0,0	0,0	+		0,0	0,2		1,2	0,2	0,1	4,1	0,5			0,3
W 4	0,0	0,0	+		+	0,2		2,0	0,3	0,1	5,1	1,2			0,3
W 5	0,0	0,0	0,1	+	+	0,3	0,1	4,0	0,6	0,2	9,7	1,8	0,7		0,6
W 6		0,0	+		0,0	0,1		0,7	0,2	0,1	4,5	0,8			0,2
W 7		0,0	+		+	0,3	0,1	3,2	0,6	0,3	10,6	2,7			0,7
W 8		0,0	+		+	0,1	+	2,0	0,5	0,2	5,4	0,2			0,1
W 9	0,0	0,0	0,1	+	0,1	0,4	0,2	5,2	1,2	0,6	17,3	3,0	1,4	1,0	0,9
W 9a		0,0	0,0		0,0	+		0,6	0,1	+	1,3	0,1			+
W 10		0,0	+		+	0,1		1,2	0,3	0,1	3,7	0,1			+
W 11		0,0	0,1		0,1	0,5	0,2	3,3	0,6	0,3	10,7	0,9			0,4
W 12	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,8	0,4	5,1	0,8	0,5	15,0	1,9	0,6		0,8
W 13	0,0	0,1	0,2		0,1	0,3	0,2	1,8	0,4	0,3	8,0	1,4			0,4
W 15		0,0	0,0		0,0	+			0,1	+	0,5	+			
W 17		0,1	0,1		0,1	0,3		1,0	0,3	0,3	5,1	1,3	0,4		
W 20		+	0,0		0,0	0,1		0,7	0,2	0,2	5,1	1,2	0,4		
W 21		+	0,1		0,1	0,1		0,2	0,1	0,1	0,4	0,1	+		
W 22		0,0	0,1		0,1	0,4		1,2	0,3	0,3	3,1	0,6	0,5		
W 23		+	0,0		0,1	0,1		0,2	0,1	0,1	2,1	0,9	0,3		
W 24		0,0	0,0		0,0	0,0		+	0,0	+	2,4	0,6	+	+	
W 24a		0,0	0,0		0,1	0,1		0,4	0,1	0,1	5,0	2,2	0,4		
W 34		0,0	+		0,0	0,0		+	+	+	1,8	1,0	0,2		
W 35		0,0	0,0		0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,8	+			
W 37		0,0	+		+	0,0		0,0	+	+	0,1	+		+	
W 37b		0,0	0,0		0,0	0,0		0,0	0,0	+	1,8	0,8			
W 38		0,0	0,0		0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,6	0,0			
W 38a		0,0	0,0		0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,8	+			
W 39		0,0	0,0		+	+		0,1	+	+	0,2	+	+		

+ = $Q < 0,1 \text{ l/s}$
 = Fehlwert
 = Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	23.01.02	28.01.02	01.02.02	08.02.02	10.02.02	10.02.02	13.02.02	13.02.02	27.02.02	27.02.02	04.03.02	11.03.02	20.03.02	09.04.02	24.04.02
W 1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3						0,3	0,2			0,1
W 2	0,7	0,8	0,4	0,7	3,0						0,6	0,3	3,7		0,2
W 3	1,1	1,4	0,5	0,8	7,0		10,5		4,5		0,7	0,3	7,1		0,3
W 4	1,2	2,1	1,1	1,8	7,0		12,1		5,5		1,9	0,7	11,1		0,3
W 5	2,4	3,5	1,8	2,5	14,6	12,1	26,5	21,0	11,4	8,9	2,7	1,1	18,8	0,4	0,6
W 6	0,8	1,7	0,8	1,4	6,0		11,5		5,5		1,9	0,7	9,5		0,3
W 7	2,8	4,8	3,0	2,8	13,0		23,6		12,7		4,9	1,8	16,3		1,2
W 8	1,2	1,2	0,3	0,6	9,1		18,3		6,0		0,4	0,1	14,0		0,2
W 9	4,1	6,3	3,3	3,5	22,8	19,0	40,7	33,5	20,0	16,5	5,1	2,0	28,5	1,0	1,5
W 9a	0,3	0,4	0,1	0,1	1,9		4,0		1,3		0,1	+	2,8		0,1
W 10	0,6	0,8	0,2	0,4	7,7		17,5		4,5		0,2	0,1	11,7		0,1
W 11	2,5	2,9	1,0	1,8	12,3		28,5		10,0	8,6	2,2	0,8	18,4		0,7
W 12	4,2	5,2	2,2	2,6	19,7	17,3	34,6	28,5	15,4	14,3	4,2	1,9	23,8	0,9	1,2
W 13	2,1	2,8	1,5	1,3	10,0		21,1		9,4		2,6	1,1	11,6		0,6
W 15	0,3	0,3	0,1	0,1	3,0		6,5		1,7		0,1	+	3,6		+
W 17	1,4	1,8	1,3	1,3	7,8		13,8		6,9		2,4	1,0	9,5	0,4	0,5
W 20	1,1	1,8	1,3	0,9	5,2		11,0		5,4		2,1	0,8	6,6		0,3
W 21	0,1	0,2	0,1	0,1	0,7		2,6		0,8		0,1	0,1	1,4		0,1
W 22	1,2	1,6	0,7	1,3	4,2		8,2		3,7		1,3	0,8	6,1	0,4	0,6
W 23	0,7	1,6	1,0	0,7	2,3		5,8		4,5		1,9	0,8	3,6		0,4
W 24	0,2	1,0	0,6	0,4	1,2		3,7		3,0		1,9	0,4	1,6		0,2
W 24a	1,0	3,2	2,2	1,6	4,5		10,0		8,9		4,3	1,4	5,8	0,7	0,7
W 34	0,3	0,8	0,9	0,6	2,0		4,5		3,0		1,8	0,7	2,0		0,2
W 35	0,1	0,1	+	0,0	1,1		1,5		1,1		0,1	+	1,3		0,0
W 37	+	+	+	+	+		0,1		+		0,1	+	+		+
W 37b	0,1	0,8	0,8	0,3	1,0		3,0		2,5		1,7	0,4	1,2		+
W 38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2		1,0		0,4		0,0	0,0	0,4		0,0
W 38a	0,0	+	+	0,0	0,2		1,4		0,4		0,1	0,0	0,4		0,0
W 39	+	0,1	+	0,1	0,3		1,0		0,2		+	+	0,6		+

+ = Q < 0,1 l/s = Fehlwert = Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	03.05.02	15.05.02	22.05.02	29.05.02	19.06.02	21.07.02	07.08.02	28.08.02	16.09.02	25.09.02	14.10.02	02.11.02	24.11.02	21.12.02	03.01.03
W 1	+	0,2	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2			
W 2	0,1	0,4	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5			
W 3	0,1	0,6	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1			
W 4	0,3	1,1	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1			
W 5	0,4	1,6	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	2,1	1,4	17,8
W 6	0,3	1,0	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0		0,8	
W 7	0,9	2,0	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	1,9	1,4	25,3
W 8	0,1	0,3	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	1,8	0,7	16,8
W 9	1,1	2,2	0,4	0,3	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,8	3,2	2,2	42,2
W 9a	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6		+	
W 10	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,3	0,2	28,5
W 11	0,5	1,0	0,1	0,1	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,9	0,8	16,8
W 12	0,9	2,1	0,4	0,3	+	+	0,0	0,1	0,0	+	0,1	11,4	2,5	1,8	28,5
W 13	0,5	1,1	0,3	0,2	+	+	+	0,1	+	+	0,1	4,1	1,7	1,1	26,5
W 15	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	+	2,6
W 17	0,4	0,8	0,3	0,2	+	+	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	3,3	1,7	0,9	20,3
W 20	0,2	0,6	0,2	0,2	+	+	+	+	+	+	+	1,6	1,0	0,6	
W 21	0,1	0,1	+	+	+	+	+	+	+	+	0,1	0,6	1,0	0,3	
W 22	0,5	0,9	0,2	0,2	+	+	0,0	+	0,0	0,0	0,0	3,1	0,7	0,8	5,5
W 23	0,4	0,6	0,2	0,2	0,1	+	+	+	+	0,0	+	0,4	0,7	0,6	8,9
W 24	0,1	0,4	0,1	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,4	0,1	11,7
W 24a	0,5	1,1	0,3	0,3	0,1	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,6	0,7	20,1
W 34	0,2	0,6	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,9	0,4	
W 35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	
W 37	+	+	+	+	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	+	+	
W 37b	0,1	0,4	0,1	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,7	0,1	
W 38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
W 38a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,0	
W 39	+	+	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,0	0,0	0,0	0,2	+	0,0	

+ = Q < 0,1 l/s
 = Fehlwert
 = Modellhangabfluss

Datum Wehr	Abfluss [l/s]																		
	12.03.03	16.04.03	07.05.03	18.06.03	01.08.03	29.08.03	09.09.03	14.10.03											
W 1				0,0	0,0	0,0		0,0											
W 2				0,0	0,0	0,0		0,0											
W 3				0,0	0,0	0,0		0,0											
W 4				0,0	0,0	0,0		0,0											
W 5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0											
W 6				0,0	0,0	0,0		0,0											
W 7	2,2	0,3	+	0,0	0,0	0,0		0,0											
W 8		+	+	0,0	0,0	0,0		0,0											
W 9	2,9	0,3	+	0,0	0,0	0,0	+	0,0											
W 9a			0,0	0,0	0,0	0,0		0,0											
W 10	0,3	+		0,0	0,0	0,0		0,0											
W 11	0,8	+	0,0	0,0	0,0	0,0		+											
W 12	2,1	0,2	+	+	+	0,1	0,1	0,1											
W 13	1,3	0,2	+	+	+	0,1		0,1											
W 15	+	0,0		0,0	0,0	0,0		0,0											
W 17	1,2	0,2	+	+	+	+		0,1											
W 20	0,8	0,1		+	+	+		0,1											
W 21				0,0	0,0	0,0		+											
W 22	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0		0,0											
W 23	0,8	0,2	+	+	0,0	0,0		0,0											
W 24	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0											
W 24a	1,4	0,2	+	+	0,0	0,0		0,0											
W 34	0,7	+		0,0	0,0	0,0		0,0											
W 35	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0		0,0											
W 37	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0		+											
W 37b	+	+		+	0,0	0,0		0,0											
W 38	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0		0,0											
W 38a	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0		0,0											
W 39	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0		0,0											

+ = $Q < 0,1 \text{ l/s}$
= Fehlwert
= Modellhangabfluss

Datum	Maximalpegel 1 (Max1)				Maximalpegel 2 (Max2)			
	Max. [cm]	Akt. [cm]	V [m/s]	Q [l/s]	Max. [cm]	Akt. [cm]	V [m/s]	Q [l/s]
30.07.99	0	0	0,000	0	< 60	33	0,000	0
09.08.99	0	0	0,000	0	< 60	42	n.m.	–
13.08.99	0	0	0,000	0	< 60	40	n.m.	–
20.08.99	0	0	0,000	0	< 60	41	n.m.	1
30.08.99	0	0	0,000	0	< 60	41	n.m.	0,66
06.09.99	0	0	0,000	0	< 60	35	n.m.	0,13
13.09.99	0	0	0,000	0	< 60	31	n.m.	0,07
17.09.99	0	0	0,000	0	< 60	30	n.m.	0,03
27.09.99	0	0	0,000	0	< 60	42	n.m.	1,1
01.10.99	0	0	0,000	0	< 60	48	n.m.	4,5
08.10.99	0	0	n.m.	–	< 60	43	n.m.	2
15.10.99	0	0	0,000	0	< 60	42	n.m.	1,8
22.10.99	0	0	0,000	0	< 60	42	n.m.	1,6
29.10.99	8	4	n.m.	–	< 60	45	n.m.	5
05.11.99	12	8	0,253	–	< 60	48	0,047	–
12.11.99	20	13	1,267	–	95	66	0,156	–
19.11.99	13	7	0,127	–	66	48	0,037	–
03.12.99	16	9	0,447	–	81	48	n.m.	–
10.12.99	12	11	0,304	–	< 60	53	0,106	–
17.12.99	31	13	1,520	–	125	83	0,124	–
25.12.99	33	33	2,303	–	123	123	0,560	–
31.12.99	57	15	1,013	–	142	86	0,140	–
07.01.00	–	13	1,267	–	94	74	0,093	–
14.01.00	–	12	1,169	–	86	67	0,137	–
21.01.00	–	12	1,169	–	70	70	0,140	–
28.01.00	–	10	n.m.	–	81	75	n.m.	–
04.02.00	–	15	1,013	–	122	85	0,144	–
11.02.00	–	18	1,689	–	98	97	0,224	–
18.02.00	–	16	1,520	–	101	90	0,133	–
25.02.00	–	23	2,000	–	107	103	0,350	–
03.03.00	23	16	1,617	–	103	85	0,207	–
10.03.00	24	15	1,382	–	110	76	0,165	–
17.03.00	17	17	1,520	–	80	77	0,224	–
25.03.00	16	11	0,950	–	77	61	0,066	–
31.03.00	45	28	2,303	–	133	112	0,448	–
07.04.00	28	12	1,169	–	112	68	0,112	–
22.04.00	14	9	0,475	–	81	48	n.m.	–
01.05.00	13	7	0,304	–	72	48	0,041	–
11.05.00	13	6	n.m.	–	101	45	n.m.	–
26.05.00	64	11	1,169	–	152	53	0,075	–
09.06.00	33	9	0,927	–	81	50	n.m.	–
30.06.00	16	0	0,000	–	78	38	n.m.	–
16.07.00	–	13	1,462	–	130	77	0,100	–
17.07.00	–	12	1,288	25	–	–	–	–
18.07.00	–	–	1,288	31,5	–	–	–	–
19.07.00	–	–	1,169	11	–	–	–	–
20.07.00	–	–	–	–	–	–	–	–
21.07.00	–	–	0,551	10	–	–	–	–
22.07.00	–	–	0,415	6	–	–	–	–
23.07.00	–	–	0,173	3,3	–	–	–	–
14.08.00	n.m.	2	0,113	–	138	45	n.m.	–
28.08.00	n.m.	8	0,540	–	61	45	n.m.	–
18.09.00								

Anhang XI Ergebnisse der Stauwasserspiegelmessungen in den Profilen der „Catena West“
(Angaben in cm u. GOF).

Profil	25.06.99	02.07.99	10.07.99	16.07.99	30.07.99	09.08.99	13.08.99	20.08.99	30.08.99	06.09.99	13.09.99	17.09.99	27.09.99	01.10.99	08.10.99	15.10.99	22.10.99	29.10.99	05.11.99
C 2	62	59	15	41	58	61	61	62	63	63	66	66	67	65	65	66	67	63	59

Profil	12.11.99	17.11.99	19.11.99	24.11.99	26.11.99	01.12.99	03.12.99	08.12.99	10.12.99	12.12.99	13.12.99	14.12.99	15.12.99	17.12.99	24.12.99	25.12.99	27.12.99	29.12.99	31.12.99
C 1.0						24,5	25	21	22	0	15	13	16	19	19			14	15
C 2	52	55	55	53	48	46	46	45	45	4	10	7	16	17	22	15	8	13	18
C 2.1					15	14	15	10	12	0	4	3	8	10,5	12			8	8,5
C 2.2					14	25	23	16	18	0	5	4	8	19	14			12	14
C 2.3					8	14	16	10	10	0	4	3	6	10	11			7	10
C 2.4				6	7	12	14	7	8	0	4	0	6	11	11			7	10
C 3.1				12	7	15	17	10	11	0	3	2	7	10	11		4	7	10
C 3.2				28	10	29	30	18	18	0	7	0	8		28		3	18	23
C 3.3				17	9	19	20	11	13	0	5	0	4		13	3	5	9	13
C 3.4		16	18	16	8	15	15	13	14	0	6	0	8		14	2	5	8	11
C 3.5		40	40	32	24	36	35	31	32	0	15	0	14		35	0	5	19	29
C 3.6		35	34	30	27	33	33	31	31	7	19	16	22		31	8	17	26	30
C 3.7		47	47	46	40	45	46	43	46	26	33	32	36		43	25	33	39	42
C 3.8		37	41	50	33	38	35	34	34	14	22	19	25		34	16	19	29	40
C 3.85	>51						>51		>51	38	34	26	34	35	51	16	20	35	36
C 3.9	>64									54	30	25	29		42			29	
C 4	105	107	128	121	120	120	120	117	116	87	75	68	66	72	72	53	37	40	42
C 4.0	>65									49	62	40	48		65			32	
C 4.1															80			41	
C 4.2	78	83	80	97	87	80		83		48	57	53	57	58	62	31	38	48	47
C 5	>150						>150		>150	124	150	140	122	84	58	53,5	38	50	50,5
C 5.1	>70									51	59	61	70		70			55	
C 5.2															64	35	43	50	53
C 5.3										36	34	35	34	36	36	36	35	35	35
C 5.4										45				45		36	39	45	40
C 5.5										>74		68	67	>74	74	57	61	>74	>74
C 6										>150	131	135	136	>150	140	137	90	103	116
C 6.1												50	52		50	45	48	>56	>56
C 6.2																>71	>71	>71	>71

Profil	04.01.00	07.01.00	11.01.00	14.01.00	19.01.00	21.01.00	24.01.00	28.01.00	31.01.00	04.02.00	11.02.00	14.02.00	18.02.00	25.02.00	26.02.00	28.02.00	29.02.00	01.03.00	03.03.00
C 1.0	16	18	19	21	22	19	18	25	5	18	13	16	15	10	14	17		10	17
C 2	17	28	30	34		38	31	41	5	20	25		18	22		14			
C 2.1	9	11	11	13	13	11	8	9	5	10	7	8	7	5	7	9		5	7,5
C 2.2	16	20	17	24	24	22	14	32	7	14	11	13	14	9	14	18		7	15
C 2.3	10	12	11	15	14	12	8	20	4	10	6	7	8	5	8	10		4	8
C 2.4	10	11	11	12	10	8	6	15	2	9	3	5	6	2	6	7		2	5
C 3.1	9	10	11	13	11	7	7	23	3	8	5	5	6	4	8	8		4	8
C 3.2	20	27	23	30	33	30	19	37	4	22	6	12	17	2	14	22		2	16
C 3.3	11	13	12	18	17	12	8	28	4	11	6	7	9	4	9	10		3	8
C 3.4	9	12	13	15	15	15	11	15	5	11	10	12	12	7	12	13		6	10
C 3.5	24	32	32	35	36	35	27	38	0	27	13	17	20	8	16	25		8	19
C 3.6	27	30	31	33	36	34	31	36	18	30	22	24	26	18	26	32		18	25
C 3.7	39	43	42	44	46	47	42	45	30	40	34	36	37	32	36	39		32	37
C 3.8	29	32	33	33	35	34	33	34	20	31	22	25	26	20	25	29		19	26
C 3.85	39	43	50	51	>51	>51	>51	>51	24	38	25	30	30	23	31	39		24	31
C 3.9	31		40		44	46	32	48	25	33	28	27	29	25	28	31		25	29
C 4	38	41	39	40	39	39	39	39	35	39	35	37	38	34	37	39		36	37
C 4.0	29		30		31		27	32	18	27	19	20	22	17	21	23		17	22
C 4.1	43		45		55		47	53	28		27	33	40	26	31	42		26	40
C 4.2	43	45	45	46	47	48	52	50	36	44	33	38	39	28	37	40		30	35
C 5	53	52	60	55	60	60	63	62	40	53	51	50	50	51	51	52		50	46
C 5.1	53	58	57	58	64	>70	58	>70	47	>70	49	51	53	48	52	54		48	54
C 5.2	50	54	56	58	65	65	65	71	45	56	46	50	52	43	52	55		44	50
C 5.3	34	34	34	35	34	36	36	40	32	34	34	34	34	34	34	34	34	34	35
C 5.4	40	44	43	50	46	>60	60	>60		41	41	42	42	39	39	39	39	39	41
C 5.5	74	>74	>74	>74	>74	>74	>74	>74	>74	>74	66	65	>74	64	>74	>74	>74	74	>74
C 6	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	117	129	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150
C 6.1	>56	>56	>56	>56	>56	>56		>56		>56	>56		>56	>56	>56			>56	>56
C 6.2		>71		>71		>71		>71		>71	>71		>71	>71					>71

Profil	10.03.00	15.03.00	17.03.00	21.03.00	24.03.00	28.03.00	30.03.00	31.03.00	01.04.00	03.04.00	07.04.00	18.04.00	22.04.00	26.04.00	01.05.00	11.05.00	26.05.00	09.06.00	30.06.00
C 1.0	19	21		22	24						23		29		34				
C 2	29		41		46			9			34	50	55		59	60	44	31	83
C 2.2	11	11		10	13	8	0		2	7	12		13	12	17				
C 2.2	20	21		20	27	15	0		7	15	22		28	24	>40				
C 2.3	10	11		10	17	10	0		5	10	16		20	14	26				
C 2.4	8	8		7	15	7	0		2	8	14		16	11	22				
C 3.1	9	9	7	9	15	8	0	6	5	10	16	10	20	13	30		11	16	>38
C 3.2	25	29		24	34	21	0		2	20	29		36	32	44				
C 3.3	10	12		12	22	10	0		3	11	21		26	17	33				
C 3.4	13	13		13	14	13	0		4	10	14		14	12	17				
C 3.5	29	33		32	34	26	0		3	21	34		35	33	>45				
C 3.6	30	33		32	33	25	4		20	28	34		37	32	41				
C 3.7	40	43		41	43	40	25		32	36	42		46	41	48				
C 3.8	30	35		32	32	37	15		21	27	31		31	31	36				
C 3.85	44	53		56	>56	46	16		18	29	>56		>56		>56				
C 3.9	39	45		40	48	37	16		26	30	44		53	48	>64				
C 4	35	37	34	38	41	37	29	32	31	36	41	39	44	42	57		48	43	101
C 4.0	24	26	21	26	30	24	3	17	17	23	30	27	35	35	48	83	38	35	>65
C 4.1	46	51		48	55	44	17		21	41	55		>60	58	>60		>60	>60	
C 4.2	39	41		43	45	44	25		33	38	42		50	50	53		47	50	
C 5	51	56		58	63	62	52		42	46	54		72	74	83		72	72	>94
C 5.1	>70	60		65	>70	65	41		48	55	>70		>70	>70	>70		>70	>70	
C 5.2	57	61		63	67	62	35		45	51	62		>92	74	>92		75	73	
C 5.3	34	34		35	35	36	33		34	34	34		39		46		36	35	
C 5.4	44				>60						41		>60		>60		>60	>60	
C 5.5	>74	>74		>74	>74	>74	62			>74	>74		>74	>74	>74		>74	>74	
C 6	>150	>150			>150		120		126	126	135		>150		>150		>150	123	
C 6.1	>56	>56			>56						>56		>56		>56				
C 6.2	>71				>71						>71		>71		>71				

[illegible]

Anhang XII Ergebnisse der Stauwasserspiegelmessungen in den Standrohren *IF 1* bis *IF 11*
(Angaben in cm u. GOF; akt = aktueller Stand, max = Maximalstand).

Datum	Stauwasserspiegel cm u. GOF – Maximalstand im Zeitraum (max) bzw. aktueller Stand (akt)																					
	IF 1		IF 2		IF 3		IF 4		IF 5		IF 6		IF 7		IF 8		IF 9		IF 10		IF 11	
	max	akt	max	akt	max	akt	max	akt	max	akt	max	akt	max	akt	max	akt	max	akt	max	akt	max	akt
03.09.2001								32,5														
26.09.2001								16,5														
01.10.2001								16,0														
15.10.2001								16,0														
26.10.2001								9,5														
09.11.2001	0,0	0,0	31,5	31,5	0,0	0,0	1,5	1,5	21,0	21,0	0,0	0,0	0,0	31,5	0,0	61,0	0,0	64,0	0,0	68,5	0,0	112,0
16.11.2001	0,0	0,0	31,0	37,5	0,0	5,0	0,0	0,0	15,5	15,5	0,0	0,0	32,0	36,0	61,0	61,0	64,0	64,0	69,0	69,0	112,0	157,0
21.11.2001	0,0	0,0	38,0	39,0	6,0	7,5	1,5	9,5	16,0	20,5	0,0	4,0	37,0	42,0	61,5	61,5	64,0	64,0	69,0	69,0	157,0	163,0
01.12.2001	0,0	0,0	10,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7,5	0,0	0,0	31,5	31,5	12,0	13,5	39,5	39,5	51,5	51,5	112,0	112,0
12.12.2001	0,0	0,0	15,0	35,0	0,0	2,0	0,0	6,5	6,0	15,0	0,0	0,0	32,0	38,0	13,0	25,0	39,0	46,0	51,0	62,0	112,0	143,0
02.01.2002	0,0	0,0	35,0	35,0	1,0	7,0	0,0	6,5	15,0	16,0	0,0	1,0	31,0	35,5	25,0	26,0	46,0	55,0	62,0	69,0	143,0	144,0
09.01.2002	0,0	0,0	35,0	36,0	7,0	7,0	6,5	12,0	16,0	21,0	1,0	10,5	35,5	45,5	26,0	29,5	55,0	61,5	69,0	69,0	143,0	156,5
23.01.2002	0,0	0,0	27,0	27,0	1,5	1,5	0,0	1,5	0,0	2,5	0,0	0,0	31,5	31,5	20,0	20,0	53,5	53,5	59,5	59,5	121,0	121,0
28.01.2002	0,0	0,0	27,0	27,5	1,5	1,5	0,0	0,0	1,5	4,0	0,0	0,0	31,5	31,5	16,0	16,0	45,5	45,5	58,5	58,5	121,0	132,5
01.02.2002	0,0	0,0	27,5	28,0	1,5	5,5	0,0	5,5	4,0	11,0	0,0	0,0	31,5	33,0	16,0	23,0	45,5	47,5	58,5	61,0	132,5	147,0
08.02.2002	0,0	0,0	28,0	32,0	1,5	1,5	0,0	1,5	11,0	18,5	0,0	0,0	33,0	37,0	19,5	20,5	47,5	55,0	61,0	66,0	147,0	155,0
10.02.2002	0,0	0,0	16,0	18,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	30,0	31,0	10,5	11,5	32,0	32,0	64,0	64,0	114,5	117,5
13.02.2002	0,0	0,0	9,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,0	31,0	8,0	8,0	28,0	31,0	41,5	42,5	106,5	106,5
27.02.2002	0,0	0,0	9,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,0	31,0	6,0	11,0	24,5	31,5	37,5	51,5	88,0	104,0
04.03.2002	0,0	0,0	15,0	25,5	0,0	2,5	0,0	4,5	0,0	8,5	0,0	0,0	31,0	36,5	11,0	25,0	31,5	44,5	51,5	57,5	104,0	145,0
11.03.2002	0,0	0,0	25,5	33,0	2,5	7,0	4,5	6,5	8,5	20,0	0,0	7,0	36,5	45,0	25,0	29,0	44,5	55,0	57,5	64,5	145,0	159,0
20.03.2002	0,0	0,0	16,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,5	31,5	9,0	9,0	35,0	35,0	64,5	66,5	113,0	113,0
24.04.2002	0,0	0,0	15,0	38,0	0,0	5,5	0,0	5,0	0,0	13,5	0,0	0,0	31,5	33,5	9,0	28,0	35,0	52,0	57,5	69,5	111,0	154,5
03.05.2002	0,0	1,0	38,0	39,0	4,0	7,0	3,5	7,5	13,5	20,0	0,0	9,5	33,5	45,5	28,0	35,5	52,0	64,5	69,5	69,5	154,5	162,0
15.05.2002	0,0	0,0	29,0	34,0	2,5	6,5	0,0	2,5	0,0	19,5	0,0	0,0	32,0	44,5	10,0	33,0	38,0	55,5	66,5	69,5	108,0	136,5
22.05.2002	0,0	0,5	34,0	35,0	6,5	8,5	2,5	12,0	19,5	20,5	0,0	14,0	44,5	57,0	33,0	49,5	55,5	64,5	69,5	69,5	136,5	158,0
29.05.2002	0,5	1,0	35,0	37,0	6,5	6,5	6,5	9,5	20,5	20,5	5,0	13,5	57,0	58,0	43,5	49,0	64,5	64,5	69,5	69,5	129,0	156,5
19.06.2002	1,0	14,0	37,0	39,0	2,0	13,5	9,5	16,0	19,5	21,0	0,0	18,5	56,0	59,5	31,0	61,5	64,5	64,5	69,5	69,5	113,0	160,5
21.07.2002	14,0	14,0	39,0	39,0	13,5	13,5	16,0	16,5	21,0	21,0	18,5	18,5	59,5	59,5	61,5	61,5	64,5	64,5	69,5	69,5	160,5	160,5
07.08.2002	13,5	22,0	39,0	39,0	13,5	22,5	16,5	16,5	15,5	25,5	7,5	34,0	55,5	64,5	61,5	61,5	64,5	64,5	66,5	69,5	110,0	156,5
28.08.2002	20,0	20,0	38,5	38,5	11,0	17,5	16,0	16,0	19,5	25,0	5,5	33,5	55,5	64,5	61,5	61,5	64,5	64,5	66,5	69,5	107,0	156,0
16.09.2002	20,0	21,0	38,5	39,0	17,5	21,5	16,0	17,5	25,0	26,5	33,5	41,5	64,5	64,5	61,5	61,5	64,5	64,5	69,5	69,5	156,0	162,5
25.09.2002	21,0	22,0	39,0	39,0	21,5	22,0	17,5	17,5	26,5	28,5	41,5	46,0	62,0	64,5	61,5	61,5	64,5	64,5	69,5	69,5	163,0	163,0
14.10.2002	22,0	22,5	39,0	39,0	9,5	17,0	16,0	16,0	27,5	27,5	31,5	34,5	55,0	64,5	61,5	61,5	64,5	64,5	69,5	69,5	122,0	159,5
02.11.2002	3,5	3,5	39,0	39,0	1,0	1,0	0,0	0,0	2,5	2,5	0,0	0,0	55,0	55,0	61,5	61,5	64,5	64,5	69,5	69,5	108,0	115,0
24.11.2002	0,0	0,0	11,0	33,5	0,0	4,5	0,0	4,0	0,0	10,0	0,0	0,0	55,5	55,5	9,5	18,5	45,0	46,5	53,0	57,5	103,5	142,0
21.12.2002	0,0	3,5	33,5	37,5	2,5	2,5	0,0	1,0	1,0	22,5	0,0	0,0	31,5	31,5	18,5	18,5	46,5	55,0	57,5	66,5	130,5	159,0
03.01.2003	0,0	0,0	11,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,5	31,5	5,5	8,5	30,0	35,0	31,5	45,5	57,0	65,0
12.03.2003	0,0	5,0	15,0	34,0	0,0	2,0	0,0	9,0	0,0	21,5	0,0	0,0	31,5	37,0	8,5	24,5	35,0	49,5	45,5	63,0	65,0	154,5
16.04.2003	2,5	19,5	34,0	39,0	2,0	17,5	9,0	16,0	3,0	25,0	0,0	23,5	36,5	53,5	19,5	38,0	49,5	64,5	63,0	69,5	154,5	162,5

Anhang XIII Genutzte Module des Modells MMS/PRMS (Kurzbeschreibung).

PRMS-Modul	Kurzbeschreibung
<i>basin</i>	Grunddefinition des Einzugsgebietes und der HRUs bezüglich Flächenausdehnung und Reliefparameter
<i>obs</i>	Modul zum Einlesen der Input-Daten aus der Datei
<i>temp_1sta</i>	Zuordnung von Temperaturmessreihen zu den verschiedenen HRUs und HRU-spezifische Anpassung der Temperaturdaten auf Basis monatlicher Koeffizienten
<i>soltab</i>	Berechnung der potenziellen Globalstrahlung für vorgegebene Hangneigungen und Expositionen
<i>precip</i>	Zuordnung von Niederschlagsmessreihen zu den verschiedenen HRUs und/oder HRU-spezifische Anpassung der Niederschlagsdaten auf Basis monatlicher Koeffizienten
<i>ddsolrad</i>	Zuordnung von Messreihen der Globalstrahlung zu den verschiedenen HRUs in Abhängigkeit von deren Hangneigung und Exposition sowie Schätzwertfindung für fehlende Strahlungsdaten
<i>potet_jh</i>	HRU-spezifische Berechnung der potenziellen Evapotranspiration auf Basis des Ansatzes nach Jensen & Haise (1963)
<i>intcp</i>	HRU-spezifische Berechnung der Interzeption bzw. des Bestandesniederschlags für Regen- und Schneeniederschläge
<i>snow</i>	HRU-spezifische Nachbildung des Auf- und Abbaus von Schneedecken auf Basis eines Energiebilanzmodells nach Obled & Rosse (1977)
<i>srutoff_smidx</i>	HRU-spezifische Nachbildung von Oberflächenabfluss und Infiltration mit Hilfe eines nichtlinearen Konzeptes variabler Sättigungsflächen
<i>smbal</i>	HRU-spezifische Nachbildung des Bodenkompartmentes einschließlich der Berechnung von Bodenfeuchte, Evapotranspiration aus dem Boden und der Weiterleitung von Wassermassen an Grundwasser- und Interflowspeicher
<i>ssflow</i>	Darstellung konzeptioneller Interflowspeicher und aufbauende Berechnung der spezifischen Weiterleitung von Wassermassen zum Vorfluter und zum Grundwasserspeicher
<i>gwflow</i>	Darstellung konzeptioneller Grundwasserspeicher und aufbauende Berechnung der spezifischen Weiterleitung von Wassermassen zum Vorfluter

Anhang XIV Parameter, Parameterausprägungen und Parametrisierungsgrundlagen des Modells MMS/PRMS.

Modul	Parameter ^{a)}	Bedeutung	Parameterwert ^{b)}	Ableitung des Parameterwertes
basin	basin_area	Größe des Einzugsgebietes [acres]	I. 137,142 II. 3145,765	Ableitung aus DGM
	hru_area (1-15)	Größe der HRU [acres]	I. 0,000 ... 62,220 II. 1,725 ... 879,347	Ableitung aus GIS-Daten (vgl. Kapitel 7.2)
	hru_elev (1-15)	mittlere Höhenlage der HRU [ft]	I. 1650 ... 1975 II. 1743 ... 2022	Ableitung aus DGM
	hru_percent_imperv (1-15)	Anteil der wasserundurchlässigen bzw. versiegelten Fläche der HRU [%]	I. 0,0000 ... 1,0000 II. 0,0169 ... 1,0000	Ableitung aus DLM Kartierung Berechnung
	hru_slope (1-15)	mittlere Hangneigung der HRU (1-15) [vertical ft/horizontal ft]	0,044 ... 0,222	Ableitung aus DGM
	temp_units	Temperatureinheit der Eingabedaten (0 = °F / 1 = °C)	1	-
temp_1sta	basin_tsta	Code der Temperaturstation, die zur Berechnung der Einzugsgebietstemperaturen herangezogen wird	1	-
	hru_tsta (1-15)	Code der Temperaturstation, die zur Berechnung der HRU-Temperaturen herangezogen wird (1-15)	1	-
	tsta_elev	Höhenlage der Klimastation(en) [ft]	1690	Messung
	tmin_lapse (1-12)	monatl. vertikaler Temperaturgradient zur HRU-bezogenen Anpassung der Min.-Temperatur [°C/1000 ft]	1,402 ... 1,981	Literatur [1]
	tmax_lapse (1-12)	monatl. vertikaler Temperaturgradient zur HRU-bezogenen Anpassung der Max.-Temperatur [°C/1000 ft]	1,402 ... 1,981	Literatur [1]
	tmin_adj (1-15)	HRU-spezifischer Anpassungsfaktor für die Min.-Temperatur auf Basis von Hangneigung und Exposition	-	-
	tmax_adj (1-15)	HRU-spezifischer Anpassungsfaktor für die Max.-Temperatur auf Basis von Hangneigung und Exposition	-	-

Modul	Parameter ^{a)}	Bedeutung	Parameterwert	Ableitung des Parameterwertes
soltab	radpl_aspect	Exposition der bestrahlten Ebene	(0)	-
	radlp_slope	Neigung der bestrahlten Ebene [vertical ft/horizontal ft]	0	-
	radpl_lat	geographische Breite der bestrahlten Ebene [°]	50	Messung
precip	adjmix_rain (1-12)	monatlicher Faktor zur Anpassung des Verhältnisses von Schnee und Regen in Mischereignissen	1	-
	hru_psta	Code der Niederschlagsstation, die zur Berechnung der Niederschläge für die HRU herangezogen wird	1	-
	rain_adj (1-12) (1-15)	monatlicher Faktor zur Anpassung/Korrektur gemessener Niederschläge (Regen)	1,083 ... 1,158	Literatur [2]
	snow_adj (1-12) (1-15)	monatlicher Faktor zur Anpassung/Korrektur gemessener Niederschläge (Schnee)	1,2	Literatur [3]
	tmax_allrain (1-12)	Tagesmaximumtemperatur, über der Niederschlag komplett in flüssiger Form (Regen) fällt [°C]	6	Kalibrierung
	tmax_allsnow	Tagesmaximumtemperatur, unter der Niederschlag komplett in fester Form (Schnee) fällt [°C]	0	-
	tstorm_mo (1-12)	monatlicher Indikator für die vorherrschende Niederschlagsform (0 = zyklonal / 1 = konvektiv)	Sep – Apr ⇔ 0 Mai – Aug ⇔ 1	Literatur [1]
ddsolrad	hru_radpl (1-15)	Zuordnung einer Strahlungsebene (Code) zur HRU	1	-

Modul	Parameter ^{a)}	Bedeutung	Parameterwert	Ableitung des Parameterwertes
potet_jh	jh_coef (1-12)	monatlicher Temperaturkoeffizient zur Berechnung der potenziellen ET nach Jensen & Haise	0,0125 ... 0,0135	Berechnung Literatur [4; 5] Kalibrierung
	jh_coef_hru (1-15)	HRU-spezifischer Temperaturkoeffizient zur Berechnung der potenziellen ET nach Jensen & Haise	20	Berechnung Literatur [4; 5] Kalibrierung
	transp_beg (1-15)	Bezugsmonat der Temperatursumme für die Ableitung des Transpirationsbeginns – HRU-spezifisch	4	historische Daten [6] Literatur [7]
	transp_end (1-15)	letzter Monat der Transpiration (Stopp der Transpiration zum Monatsende) – HRU-spezifisch	9	historische Daten [6] Literatur [7]
	transp_max (1-15)	Temperatursumme (tägl. Max.-Temperaturen), ab deren Erreichen Transpiration einsetzt – HRU-spezifisch [°C]	265	historische Daten [6] Literatur [7]
intcp	covden_sum (1-15)	HRU-spezifischer Deckungsgrad der Hauptvegetationsform während der Vegetationszeit [%]	0,80 / 0,70 / 0,50 / 0	Messung Gelände Literatur [8]
	covden_win (1-15)	HRU-spezifischer Deckungsgrad der Hauptvegetationsform während der Vegetationsruhe [%]	0,80 / 0,30 / 0,25 / 0	Messung Gelände Messung
	cov_type (1-15)	HRU-spezifischer Hauptvegetationstyp (0 = ohne Bewuchs / 2 = Gras / 3 = Buschbrache / 4 = Bäume)	4	Kartierung Gelände Luftbildauswertung
	snow_intcp (1-15)	Interzeptionsspeicherkapazität (Benetzungskapazität) der Hauptvegetationsform für Schnee (Wasseräquivalent) [inch]	0,591 / 0,197 / 0,138 / 0	Literatur [9]
	srain_intcp (1-15)	Interzeptionsspeicherkapazität (Benetzungskapazität) der Hauptvegetationsform für Regenniederschlag in der Vegetationszeit [inch]	0,197 / 0,138 / 0,118 / 0	Literatur [10]
	wrain_intcp (1-15)	Interzeptionsspeicherkapazität (Benetzungskapazität) der Hauptvegetationsform für Regenniederschlag während der Vegetationsruhe [inch]	0,197 / 0,098 / 0,079 / 0	Literatur [10]

Modul	Parameter ^{a)}	Bedeutung	Parameterwert	Ableitung des Parameterwertes
snow	albset_rna	Anteil an Regenniederschlag in einem Mischereignis, oberhalb dessen der Albedowert der Schneedecke nicht auf „Neuschnee“ zurückgesetzt wird [%] (während der Schneedeckenaufbauphase)	0,80	Voreinstellung Literatur [11]
	albset_rmm	Anteil an Regenniederschlag in einem Mischereignis, oberhalb dessen der Albedowert der Schneedecke nicht auf „Neuschnee“ zurückgesetzt wird [%] (während der Schneedeckenabbauphase)	0,60	Voreinstellung Literatur [11]
	albset_sna	minimale Schneefallmenge (Wasseräquivalent), ab der der Albedowert der Schneedecke auf „Neuschnee“ zurückgesetzt wird [inch] (während der Schneedeckenaufbauphase)	0,05	Voreinstellung Literatur [11]
	albset_snm	minimale Schneefallmenge (Wasseräquivalent), ab der der Albedowert der Schneedecke auf „Neuschnee“ zurückgesetzt wird [inch] (während der Schneedeckenabbauphase)	0,20	Voreinstellung Literatur [11]
	cecn_coef (1-12)	monatlicher Anpassungsfaktor für den Austausch sensibler und latenter Wärme zwischen Schneeoberfläche und bodennaher Luftschicht (Monatlicher Konvektions-Kondensationsenergie-Koeffizient) [cal/°C; für T > 0°C]	5	Voreinstellung Literatur [12]
	den_init	Neuschneedichte [g/cm³]	0,1	Literatur [13]
	den_max	maximale Schneedichte [g/cm³]	0,5	Literatur [13]
	emis_noppt	mittlere Emissivität der Luftschicht an Tagen ohne Niederschlag	0,757	Voreinstellung Literatur [5]
	freeh2O_cap	freie Wasserhaltekapazität der Schneedecke (Anteil am Gesamtwasseräquivalent der Schneedecke)	0,05	Literatur [14]
	potet_sublim	Anteil der potenziellen ET, die durch die Sublimation der Schneedecke gedeckt wird (dezimal)	0,7	Kalibrierung
	rad_trncf (1-15)	Transmissionskoeffizient der kurzwelligen Nettostrahlung durch die Wintervegetation	0,15 / 0,45 / 0,50 / 1	Berechnung Literatur [15]
	settle_const	Konstante der Schneedeckenkonsolidierung	0,1	Voreinstellung Kalibrierung
	hru_deplcrv (1-15)	Code der HRU-spezifischen Schneeflächenabnahmekurve (<i>snarea_curve</i>)	1	-
	snarea_curve (1)	Schneeflächenabnahmekurve (Beziehung zwischen dem Anteil des aktuellen Wasseräquivalents der Schneedecke an <i>snarea_tresh</i> und dem Flächenanteil der Restschneedecke – bestehend aus 11 Werten je Kurve, max. 10 Kurven)	lineare Beziehung Y = X	Abschätzung Kalibrierung
	snarea_tresh (1-15)	HRU-spezifisches Wasseräquivalent der Schneedecke, bei dessen Unterschreiten die Schneedecke nicht mehr geschlossen ist [inch]. Eine Unterschreitung führt zur Anwendung der Schneeflächenabnahmekurve (<i>snarea_curve</i>).	3,937	Abschätzung Kalibrierung
	snowinfil_max (1-15)	HRU-spezifische, maximale tägliche Infiltrationskapazität [inch]	⇒soil_moist_max	Literatur [5]

Modul	Parameter ^{a)}	Bedeutung	Parameterwert	Ableitung des Parameterwertes
srunoff_smidx	care_max (1-15)	maximal zum Oberflächenabfluss beitragender Flächenanteil der HRU	0,0 ... 1,0	Topograph. Index Kalibrierung
	imperv_stor_max (1-15)	maximaler Muldenrückhalt der versiegelten Fläche der HRU [inch]	0,2	Abschätzung Kalibrierung
	smidx_coef (1-15)	linearer Koeffizient zur Berechnung des oberflächenabflusswirksamen Flächenanteils der HRU	0,0025 ... 0,0130	Literatur [5] Abschätzung Kalibrierung
	smidx_exp (1-15)	exponentieller Koeffizient zur Berechnung des oberflächenabflusswirksamen Flächenanteils der HRU	0,2 ... 0,6	Literatur [5] Abschätzung Kalibrierung
smbal	soil2gw_max (1-15)	HRU-spezifische maximale täglich Wassermenge, die direkt aus dem Bodenspeicher zum Grundwasserspeicher überführt werden kann [inch]	0 ... 1,5	kf-Werte Kalibrierung
	soil_moist_max (1-15)	HRU-spezifische nFK des effektiven Wurzelraumes (nFKWe) [inch]	2,0906 ... 7,0079	pF-Kurve Literatur [16]
	soil_rechr_max (1-15)	HRU-spezifische nFK bis zur Grenze Oberboden – Unterboden [inch]	0,6732 ... 4,4094	pF-Kurve Literatur [16]
	soil_moist_init (1-15)	HRU-spezifische nFK des effektiven Wurzelraumes (nFKWe) [inch] zu Beginn der Simulation	1,75 ... 4,50	Ableitung aus Initialisierungsphase
	soil_rechr_init (1-15)	HRU-spezifische nFK bis zur Grenze Oberboden – Unterboden [inch] zu Beginn der Simulation	0,75 ... 2,25	Ableitung aus Initialisierungsphase
	soil_type (1-15)	HRU-spezifische, grundlegende Bodenart (1 = Sand / 2 = Lehm / 3 = Ton)	1 ... 3	Messung

Modul	Parameter ^{a)}	Bedeutung	Parameterwert	Ableitung des Parameterwertes
ssflow	hru_ssres (1-5)	Code des Interflowspeichers, der mit der HRU verknüpft ist	1 ... 5	-
	ssr2gw_exp (1-5)	exponentieller Koeffizient zur Berechnung der Wassermenge, die vom Interflowspeicher zum Grundwasserspeicher geleitet wird	0,1	Literatur [5] Abschätzung Kalibrierung
	ssr2gw_rate (1-5)	linearer Koeffizient zur Berechnung der Wassermenge, die vom Interflowspeicher zum Grundwasserspeicher geleitet wird	0 ... 0,3	Literatur [5] Abschätzung Kalibrierung
	ssrmax_coef (1-5)	Koeffizient zur Berechnung der Wassermenge, die vom Interflowspeicher zum Grundwasserspeicher geleitet wird	1	Voreinstellung Kalibrierung
	ssrcoef_sq (1-5)	exponentieller Koeffizient zur Berechnung der Wassermenge, die vom Interflowspeicher zum Vorfluter geleitet wird	0,05 ... 0,1	Literatur [5] Abschätzung Kalibrierung
	ssrcoef_lin (1-5)	linearer Koeffizient zur Berechnung der Wassermenge, die vom Interflowspeicher zum Vorfluter geleitet wird	0,8	Literatur [5] Abschätzung Kalibrierung
	ssstor_init (1-5)	Inhalt des Interflowspeichers zu Beginn der Simulation [inch]	0,01	Ableitung aus Initialisierungsphase
gwflow	hru_gwres (1-15)	Code des Grundwasserspeichers, der mit der HRU verknüpft ist	1-15	-
	ssr_gwres (1-5)	Code des Grundwasserspeichers, der mit dem Interflowspeicher verknüpft ist	1-15	-
	gwflow_coef	linearer Koeffizient zur Berechnung der Wassermenge, die vom Grundwasserspeicher zum Vorfluter geleitet wird	0,07	Literatur [5] Abschätzung Kalibrierung
	gwsink_coef	linearer Koeffizient zur Berechnung der Wassermenge, die vom Grundwasserspeicher als unterirdischer Abfluss aus dem Gebiet abgeht	0	-
	gwstor_init	Inhalt des Grundwasserspeichers zu Beginn der Simulation [inch]	0,1	Ableitung aus Initialisierungsphase

Literaturangaben zur Parametrisierung von MMS/PRMS (zu Anlage XIV):

- [1] Hendl (1995)
- [2] Richter (1995)
- [3] Maniak (1997), Richter (1995), Sokollek et al. (1989)
- [4] Jensen & Haise (1963)
- [5] Leavesley et al. (1983), USGS (2006a)
- [6] Temperatur- und Niederschlagswerte der Station Simmern-Wahlbach von 1993 bis 2003
- [7] Chen (1994), Brose et al. (1957)
- [8] Dierschke (1994)
- [9] Gerke (1985), Ernstberger (1987), Brechtel & Balázs (1976)
- [10] Bennecke & van der Ploeg (1978), Fleck (1986), Maniak (1997), Viville et al. (1993), Wohlrab et al. (1992), Mitscherlich (1971b)
- [11] Leavesley et al. (1983), Obled & Rosse (1977), USGS (2006a)
- [12] Leavesley et al. (1983), Melloh (1999), USGS (2006a)
- [13] Maniak (1997), Wohlrab et al. (1992), Brechtel & Balázs (1976), Heyer 1993, Dyck & Peschke (1995)
- [14] Leavesley et al. (1983), Riley et al. (1973), U.S. Army Corps of Engineers (1956), USGS (2006a)
- [15] Leavesley et al. (1983), U.S. Army Corps of Engineers (1956), USGS (2006a)
- [16] AG Boden (2005), Raissi et al. (2001)

Anmerkungen zur Parameterstruktur und Parameterausprägung von MMS/PRMS (zu Anlage XIV):

- a) Parameterausprägung jeweils HRU-spezifisch (1-15), monatspezifisch (1-12) oder HRU- und monatspezifisch (1-15) (1-12)
- b) I = spezifische Parameterausprägung für den Modellhang Hölzerkopf
II = spezifische Parameterausprägung für das Einzugsgebiet Oberer Gräfenbach

Die Parameter besitzen teilweise spezifische Ausprägungen für jede einzelne HRU (d. h. 15 Parameterwerte) oder/und jeden einzelnen Monat (d. h. 12 bzw. 180 Parameterwerte). Für einige dieser Parameter sind in Anhang XIV z. T. nur die minimalen und maximalen Ausprägungen angegeben. Ein Auftreten von Ausprägungen zwischen den beiden Extremwerten ist in diesem Fall mit „...“ gekennzeichnet. Auf die exakten Ausprägungen dieser Parameter wird weitgehend in Kapitel 7 eingegangen.

Tag der Messung: _____ Wetter: _____													
Messstelle	Messung 1		Messung 2		Messung 3		(Messung 4)		(Messung 5)		mittlerer Abfluss [l/s]	Messzeitpunkt [hh:mm]	
	Messdauer	Abflussvolumen	Messdauer	Abflussvolumen	Messdauer	Abflussvolumen	Messdauer	Abflussvolumen	Messdauer	Abflussvolumen			
1	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
2	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
3	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
4	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
3a	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
5	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
6	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
7	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
8	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
9	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
9a	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
10	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
11	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
12	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
13	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
15	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
17	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
18	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
20	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
21	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
22	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
23	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
24	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
24a	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
34	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
35	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
37	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
37b	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
38	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
38a	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			
39	s	l	s	l	s	l	s	l	s	l			

Anhang XVI Messprotokoll der Drei-Punkt-Messungen am Gebietsauslass des Einzugsgebietes Oberer Gräfenbach.

Pegel: P5		Datum:		Uhrzeit:							
Schaufel-Nummer: 1-149430											
Wasserstand		a) Meßbeginn:		Wasserstand		a) Meßbeginn:					
Meßlatte [cm]		b) Meßende:		elektr. Pegel [cm]		b) Meßende:					
Zeitdauer einer Messung [sec.]											
Messpunkt (über Sohle)		Höhe Messpunkt [cm über Sohle]		Schaufelumdrehungen im Zeitintervall							
				Lamelle 1 (Bereich Pegellatte)	Lamelle 2	Lamelle 3	Lamelle 4	Lamelle 5	Lamelle 6	Lamelle 7	Lamelle 8 (gegenüber Pegellatte)
0,2 * Pegelstand											
0,4 * Pegelstand											
0,8 * Pegelstand											
Anmerkungen zum Meßgang:											

