

**Prozessorientierte Modellierung des Wassertransports  
zur Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen  
in bewaldeten Entstehungsgebieten**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
„Doktor der Naturwissenschaften“

am Fachbereich Geowissenschaften  
der Johannes Gutenberg-Universität  
in Mainz

vorgelegt von

Wolfgang Bott  
geb. in Bad Kreuznach

Mainz  
November 2002

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2002

Holzhacken ist deshalb so beliebt,  
weil man bei dieser Tätigkeit  
den Erfolg sofort sieht.

Albert Einstein

## Danksagung

Zunächst möchte ich meinem „Doktorvater“ Herrn Prof. Dr. Schenk für die Vergabe dieser Promotion sowie die zahlreichen konstruktiven und anregenden Diskussionen danken, die mich auch in schwierigen Phasen immer wieder neu motivieren konnten.

Herrn Prof. Dr. Grunert danke ich für die Übernahme des Korreferats, seine stete Diskussionsbereitschaft und sein reges Interesse am Fortgang der Arbeit.

Bei den Mitarbeitern der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, insbesondere Herrn Huckschlag und Herrn Dr. habil. Schüler, möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und das Bereitstellen von Forst- und Klimadaten bedanken. Die Informationen wurden durch zusätzliche Daten des Landesamtes für Wasserwirtschaft sowie der Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz Rheinland-Pfalz ergänzt. Wofür ich mich ebenfalls bedanken möchte.

Herrn Closen vom Forstamt Neupfalz sowie Herrn Albert vom Forstamt Merzalben danke ich für ihre großzügige Unterstützung der Geländearbeiten. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Raschdorf vom Forsthaus Reichenbach für die Hilfe beim Anlegen der Profilgruben sowie bei der forstlichen Bestandsaufnahme im Soonwald bedanken.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Maurer und Herrn Dr.-Ing. Zehe für die Einweisung in das Modellsystem CATFLOW und ihren weiteren Support bei offenen Fragen zum Modell. Durch ihr stets offenes Ohr und ihre anregenden Diskussionen war es erst möglich so manches Problem zu erkennen und eine Lösung zu finden.

Für die Durchführung der bodenkundlichen Geländeaufnahme und der Berechnungsversuche danke ich den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Physische Geographie, Herrn Prof. Dr. König, Herrn Dr. Emde sowie ihren Diplomanden und studentischen Helfern.

Ferner möchte ich mich bei den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Angewandte Geologie bedanken. Dabei gilt ein ganz besonderer und herzlicher Dank meinem Kollegen Herrn Dr. Enzmann für seine aufopfernde Unterstützung bei diversen Problemen rund um die Computer- und Modelltechnik sowie für seine Hilfe bei der Diskretisierung der Modellgebiete. Bedanken möchte ich mich auch bei den zahlreichen studentischen Helfern, ohne deren fleißige Mithilfe das Gelingen der Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Meinen Kollegen Frau Berg, Frau Dipl.-Geol. Christ, Herrn Dr. Hofmann, Herrn Dipl.-Hydr. Karnuth, Herrn Dr. Schmitt, Frau Dipl.-Geol. Schuwirth und Frau Dipl.-Geogr. Simon danke ich für die freundschaftlich kollegiale Zusammenarbeit, die kritischen und offenen Gespräche sowie für die Ablenkungen und Zerstreuungen fern der Arbeit. Frau Nitt danke ich für die reibungslose Verwaltung der Fördergelder und ihre Hilfestellung beim Bewältigen der oft undurchsichtig erscheinenden Universitätsbürokratie.

Dank schulde ich auch meinem jetzigen Chef, Herrn Prof. Dr. Wilken vom ESWE-Institut für Wasserforschung und Wassertechnologie in Wiesbaden, für seine Unterstützung in der Endphase meiner Arbeit.

Über allem steht aber die Dankbarkeit, die ich meiner Frau und meinen Söhnen für ihre aufbauende Liebe schulde. Dank ihrem Verständnis und ihrer oft überstrapazierten Geduld wurde es erst möglich diese Arbeit fertig zu stellen.

## Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Einflüsse verschiedener wasserwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf das Abflussverhalten von bewaldeten Gebieten beschrieben. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag dabei auf der Erfassung der Veränderungen im natürlichen System durch die jeweilige Maßnahme. Der Wassertransport wurde dabei auf der Prozessebene in der Mikroskala (BECKER, 1992) bzw. der Teilfläche (Raumskala 2, nach UHLENBROOK & LEIBUNDGUT (1997)) betrachtet. Es konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Hochwasserentstehung in bewaldeten Entstehungsgebieten gewonnen werden. Daraus abgeleitet wurde eine Bewertung sowohl der natürlich gegebenen Systemgrößen als auch der einzelnen Maßnahmen in Bezug auf eine Entschärfung der Abflussspitzen aus bewaldeten Gebieten.

Berücksichtigt wurden dabei Einflüsse einer Änderung in der Bestockung der Flächen und vor allem Veränderungen in der Feinerschließung der bewaldeten Flächen durch permanent nutzbare Wege unterschiedlichen Typs (befestigte und unbefestigte Forstwege) und Fahrwege, die nur temporär genutzt werden, wie Rückegassen oder Seillinienstrecken. Zur Erarbeitung der vorgegebenen Aufgabenstellung wurden die Wassertransportprozesse im Gelände untersucht und in Abhängigkeit von den globalen klimatischen Randbedingungen sowie den bodenhydraulischen und landnutzungsspezifischen Parametern mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell simuliert. Hierfür wurde das Modellsystem CATFLOW (BOTT et al., 2002; CASPER, 2002; MAURER, 1997a/b; ZEHE, 1999; ZEHE & MAURER, 2000) eingesetzt.

Zunächst wurden in Absprache mit der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz zwei hydrogeologisch unterschiedliche, aber für Rheinland-Pfalz repräsentative Waldstandorte (im Soonwald und im Pfälzerwald) ausgewählt (vgl. Kap. 3). Hauptauswahlkriterien waren dabei neben der Repräsentativität die messtechnische Ausstattung, die Verfügbarkeit pedogener und bestandsspezifischer Informationen sowie langjährige klimatische Messreihen der Gebiete. Die Geländeuntersuchungen dienten der Ermittlung der bodenspezifischen Eingabeparameter für die Modellrechnungen. Zudem wurden mit den im Gelände gewonnenen Ergebnissen die Simulationsergebnisse plausibilisiert. Dazu wurden gestörte und ungestörte Bodenproben gewonnen, Korngrößenanalysen durchgeführt und Lagerungsdichten sowie Eindringwiderstände bestimmt. Auf Wegen und in den Waldflächen wurden Beregnungsexperimente sowie Versickerungs- und Infiltrationsversuche durchgeführt. Abflussmessungen lieferten zusätzliche Informationen zur Abflussgenerierung.

Als wichtigste Ergebnisse aus der vergleichenden Untersuchung von zwei rheinland-pfälzischen Waldstandorten ergeben sich folgende Punkte:

- Die Hauptfaktoren, die die Abflussdynamik eines Gebietes in der betrachteten Raumskala bestimmen, sind erwartungsgemäß in den natürlichen Gebietsparametern zu sehen. Die geologisch-morphologische Ausgangssituation und die sich daraus entwickelnden Bodentypen mit ihren bodenhydraulischen Eigenschaften bestimmen den Wassertransport entscheidend. So dämpfen tiefgründig offenporige Böden mit ihrer hohen Infiltrations- und Tiefenperkulationsmöglichkeit des Niederschlagswassers eventuelle Hochwasserabflüsse. Böden, die eine Tiefensickerung durch niedrige Leitfähigkeiten verhindern, sind dagegen nicht in der Lage Abflussspitzen zu vermeiden.
- Maßgebend beeinflusst wird die Abflusshöhe von der Vorsättigung der jeweiligen Bodentypen. So führen hohe Bodenfeuchtwerte bei gleichzeitig verminderter Versickerungskapazität zwangsläufig zu hohen Abflussbeiwerten.

- Der grundlegende Vorteil von Wald bezüglich der Niederschlagsretention ist in seinem hohen Interzeptionsvermögen begründet und wurde bereits u.a. von BRECHTEL (1970), DELFS (1955), DE HAAR & HOFFMANN (1982) oder WEIHE (1976) beschrieben. So können kleinere Niederschlagsspitzen abgefangen werden. Ist der Interzeptionsspeicher jedoch einmal gefüllt, so ist die Abflussdynamik in Wäldern wie bei jeder anderen Landnutzung in erster Linie von den Bodeneigenschaften abhängig.
- Alle betrachteten waldbaulichen Maßnahmen nehmen zum einen Einfluss auf die Größe des Interzeptionsspeichers, etwa durch Wechsel bzw. Änderung in der Bestockung oder Bestockungsdichte, zum anderen beeinflussen sie die bodenhydraulischen Eigenschaften der Flächen. So werden durch Bodenverdichtung infolge des Einsatzes von schweren Forstmaschinen in der Fläche die Infiltrationskapazität und die Leitfähigkeit stark herabgesetzt und über Jahrzehnte gestört. In gleicher Weise macht sich eine stärkere Feinerschließung der Waldflächen durch Wege und Entwässerungsgräben bemerkbar. Diese Faktoren vermindern den Anteil der Flächen mit intakter Bodenstruktur und damit ungestörter Infiltrations- und Tiefsickerungsmöglichkeiten.

Es lässt sich festhalten, dass im Vergleich der beiden untersuchten Waldstandorte, im Bereich Pfälzerwald aufgrund der natürlichen Gebietseigenschaften keine Hochwassergefährdung gegeben ist. Alle Eingriffe durch die forstwirtschaftliche Bewirtschaftung spielen hier nur eine untergeordnete Rolle. Anders verhält es sich allerdings im Bereich Soonwald. Die naturgegebenen Gebietseigenschaften bedingen ein sehr hohes Hochwassergefährdungspotenzial. Hier wirken sich Eingriffe durch wasserwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Maßnahmen relativ stark aus.

Das bedeutet, dass man in Abhängigkeit von dem jeweils herrschenden dominanten Gebietseigenschaften und dem daraus resultierenden Abflussgeschehen beurteilen muss, welche Art der Bewirtschaftung von Waldstandorten gewählt werden sollte. Generell muss versucht werden die forstliche Erschließung, und damit den Anteil an versiegelten bzw. stark verdichteten Flächen, so gering wie möglich zu halten. Alle Eingriffe, die die bodenhydraulischen Gebietseigenschaften negativ beeinflussen, sollten vermieden werden.

## Summary

Within the scope of this work influences of different hydrological and forestal measures on runoff behaviour at forest sites are described. The registration of changes within the natural system by these measures was in the main focus of investigation. Water transport with its processes was examined on micro scale (BECKER, 1992) respectively on partial surface area (spatial scale 2 after UHLENBROOK & LEIBUNDGUT (1997)). Important findings regarding flood generation in forested catchments were made. Hence, the evaluation of the natural given system factors as well as every single measure was derived regarding to decrease runoff peaks from forest sites.

Mainly changes in the development of forested terrains by permanent usable roads and lanes of different kinds (made up and none made up) and temporary lanes like skidding tracks, log trails, skylines or cable systems were taken into consideration as well as changes in forest stand. To acquire the given task water transport processes were examined in the field and afterwards modelled with a precipitation-runoff-model in dependence of global climatic conditions, soil hydraulic and land use specific parameters. For that purpose the model system CATFLOW (BOTT et al., 2002; CASPER, 2002; MAURER, 1997a/b; ZEHE, 1999; ZEHE & MAURER, 2000) was used.

After consultation of Forest Research Institute of Rhineland-Palatinate to different hydro-geological forest sites (at Soonwald and at Pfälzerwald) were chosen, each representing a typical forested region of Rhineland-Palatinate. Main selection criterions were the equipping measurement technology, the availability of pedological and vegetation specific information as well as climatic data of many years for the sites. Field investigations were taken out to yield soil specific input data and validation data for the simulation model. For that disturbed and undisturbed soil probes were taken, grain size distribution analysis were carried out, soil bulk densities and penetration resistances were determined. Sprinkling experiments were carried out on roads, lanes and within the forest itself. Runoff measurements supplied further information on runoff generation.

The major results of the comparing investigation of two forest sites at Rhineland-Palatinate are given in the following points:

- Like expected, the main factors which characterize runoff dynamics of an area in the examined spatial scale are given in the natural parameters of the area. The geological-morphological conditions and the soil types with its hydraulic properties developed from that are the most decisive points for water transport. Deeply open pored soils with their high infiltration and percolation capacities for precipitation water are damping possible flood runoff. Soils preventing deep percolation by low conductivity, aren't able to avoid runoff peaks.
- Initial water content of different soils is a decisive factor of runoff height. Soil moisture conditions near saturation together with a decreased infiltration capacity lead inevitable to large runoff coefficients.
- Fundamental advantage of forests regarding retention of precipitation is given in the high interception possibility, which already was described by BRECHTEL (1970), DELFS (1955), DE HAAR & HOFFMANN (1982) or WEIHE (1976). So smaller precipitation peaks can be intercepted. But if the interception storage is filled, runoff dynamic of forests is reacting like every area with any other land use unit. In that case it is only depending on soil properties.

- All considered measures at forests at one hand are influencing the interception storage, e.g. by changes in forest stand or wood density, and on the other hand have impacts on soil hydraulic properties of the sites. Soil compaction by the use of heavy machines at forests leads to a strong decrease of infiltration capacity and conductivity for decades. In the same way a better development of forests by more roads, lanes and drainage trenches is effective. These factors reduce the parts of areas with an intact soil structure. Therefore an undisturbed infiltration and deep percolation possibility isn't longer given.

The comparison of the two examined forest sites shows for the region of Pfälzerwald no risk of flood because of the natural properties of this area. All interventions by forest management have only a minor impact. For the Soonwald the situation looks quit different. Here we have a high risk of floods caused by the natural properties. Interventions at this site have relative big impacts on runoff generation.

This means, in dependence on dominant properties of the area and resulting runoff behaviour, the kind of forest management had to be chosen. In general, it should be tried to held forest development of roads and lanes and compacted or totally sealed surfaces as low as possible. All negative interventions in soil hydraulic characteristics should be completely avoided.



# Inhaltsverzeichnis

<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>I</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>II</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>IV</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
1.1 Anlass.....	3
1.2 Zielsetzung .....	3
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Wassertransport in der ungesättigten Bodenzone.....	3
2.1.1 Das Potenzialkonzept.....	3
2.1.2 Bodenwasser und Bodengefüge .....	3
2.1.3 Abflussprozesse .....	3
2.2 Mathematische Beschreibung des Wassertransports .....	3
2.2.1 Bodenwasserbewegung .....	3
2.2.2 Verdunstung .....	3
2.3 Modellierungsstrategien.....	3
2.4 Modellsystem CATFLOW .....	3
2.4.1 Modellkonzept.....	3
2.4.2 Diskretisierung.....	3
2.4.3 Parametrisierung.....	3
<b>3 Beschreibung der Untersuchungsgebiete</b> .....	<b>3</b>
3.1 Klima.....	3
3.2 Geologisch-morphologische und bodenkundliche Beschreibung .....	3
3.2.1 Soonwald.....	3
3.2.2 Pfälzer Wald .....	3
<b>4 Feldbefunde</b> .....	<b>3</b>
4.1 Untersuchung des Bodens .....	3
4.2 Bestimmung der Eindringwiderstände.....	3
4.3 Infiltrationskapazität und Wasserleitfähigkeit der Böden.....	3
4.3.1 Bestimmung der Infiltrationskapazität mit dem Doppelring-Infiltrimeter .....	3
4.3.2 Bestimmung der Infiltrationskapazität mittels Beregnungsexperimenten .....	3
4.3.3 Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit mit dem Permeameter.....	3
4.4 Abflussmessungen .....	3
4.4.1 Abflussgeschehen im Gebiet Soonwald .....	3
4.4.2 Abflussgeschehen im Gebiet Pfälzerwald .....	3

<b>5</b>	<b>Datengrundlage der Modellierungen .....</b>	<b>3</b>
5.1	Klimadaten .....	3
5.2	Bodenparameter .....	3
5.3	Vegetationsparameter .....	3
5.4	Rand- und Startbedingungen .....	3
<b>6</b>	<b>Szenariensimulationen unterschiedlicher Einflussfaktoren auf das Abflussgeschehen ..</b>	<b>3</b>
6.1	Geogene Faktoren .....	3
6.1.1	Bodentypen .....	3
6.1.2	Hangneigung .....	3
6.1.3	Vergleich Soonwald – Pfälzerwald .....	3
6.1.4	Bewertung und Bedeutung der geogenen Faktoren .....	3
6.2	Niederschlagsverteilung .....	3
6.2.1	Starkregenereignis .....	3
6.2.2	Landregen .....	3
6.2.3	Bewertung und Bedeutung der Niederschlagsverteilung .....	3
6.3	Bestockung .....	3
6.3.1	Sensitivitätsanalyse der Landnutzungsparameter .....	3
6.3.2	Einfluss unterschiedlicher Bestockungen Wiese-Laubwald-Nadelwald .....	3
6.3.3	Bewertung und Bedeutung der Bestockung .....	3
6.4	Walderschließungsformen .....	3
6.4.1	Einfluss unterschiedlicher Walderschließungsformen .....	3
6.4.2	Bewertung und Bedeutung unterschiedlicher Walderschließungsformen .....	3
<b>7</b>	<b>Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>3</b>
7.1	Kritische Betrachtung der angewandten Methodik .....	3
7.2	Bewertung der erzielten Ergebnisse .....	3
7.3	Schlussfolgerungen .....	3
7.4	Zukünftige Arbeiten auf dem Gebiet .....	3
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>9</b>	<b>Register .....</b>	<b>3</b>
9.1	Abbildungsverzeichnis .....	3
9.2	Tabellenverzeichnis .....	3
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>3</b>
10.1	Ergebnisse der Bodenuntersuchung .....	3
10.2	Ergebnisse der Abflussmessung .....	3
10.3	Wasserspannungskurven aus Modellsimulationen .....	3
10.4	Einfluss der Bestockung -Ergänzungen .....	3
10.5	Landnutzungsparameter .....	3
10.6	Bildteil .....	3

# 1 Einleitung

Unter dem allgemeinen Wasserkreislauf versteht man vereinfacht den Weg des Wassers, den es vom Meer über Verdunstung, den atmosphärischen Wasserdampftransport und den Niederschlag zum Land sowie über die Bäche und Flüsse zurück zum Meer nimmt (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996). Dabei wird allerdings nur ein kleiner Teil des gesamten Wassers tatsächlich zwischen Meer und Land ausgetauscht. Die Hauptmasse des Wasserumsatzes erfolgt über dem Meer selbst. Ein etwas kleinerer Teil wird über der Landfläche bewegt. Doch gerade dieser Teil des Wasserkreislaufs mit seinen vielschichtigen Teilprozessen, die sowohl Anteile von Zufälligkeit als auch von Regel- und Gesetzmäßigkeit aufweisen (ETZENBERG, 1998; GUTKNECHT, 1993; MERZ, 1996; WOODS et al., 1995), ist für den Menschen von großem Interesse.

Numerische Modelle zur Berechnung von Strömungs- und Transportvorgängen im Grundwasser sowie im Bereich der ungesättigten Bodenzone sind heute zu einem unverzichtbaren und wertvollen Werkzeug der Hydrogeologie und ihrer angrenzenden Disziplinen geworden. Sie erleichtern das Erkennen und die Beurteilung wichtiger Prozesse des Wasserkreislaufes und die daraus resultierende Verteilung des Wassers und eventueller Schadstoffe. Vor allem durch die schnelle Entwicklung der Computertechnologie ist es heute möglich sehr komplexe Fragestellungen mit dem PC zu bearbeiten.

Die vorliegende Arbeit zeigt das Zusammenwirken natürlicher und anthropogener Einflussfaktoren auf die Wassertransportprozesse von bewaldeten Standorten auf. Sie liefert damit einen Beitrag zur Bewertung bestimmter Bewirtschaftungsformen und –maßnahmen von Wäldern hinsichtlich einer Hochwasserprävention. Sie entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „Wasserrückhalt in Wäldern“, das vom Ministerium für Umwelt und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz finanziell gefördert wurde. Die Projektabwicklung erfolgte unter der Federführung des Instituts für Geowissenschaften und des Geographischen Instituts der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Als Kooperationspartner waren die Forstliche Versuchsanstalt und das Landesamt für Wasserwirtschaft von Rheinland-Pfalz beteiligt.

## 1.1 Anlass

In Rheinland-Pfalz traten an den Hauptflüssen Rhein, Mosel, Lahn und Nahe sowie an ihren Nebenläufen in den letzten Jahren immer wieder Hochwässer mit teilweise verheerenden ökonomischen und ökologischen Schäden auf. Diese haben die zuständigen Stellen dazu gezwungen Maßnahmen und Aktionsprogramme zu erarbeiten, um dem entgegen zu wirken. Dabei konzentrierte sich das Interesse bislang zumeist auf bauliche Maßnahmen in den direkt vom Hochwasser betroffenen Bereichen. Es wurden Polderflächen ausgewiesen und spezielle Hochwasserschutzwände errichtet. Daneben soll aber auch eine verstärkte Renaturierung von Bach- und Flussläufen erfolgen, um deren natürliches Retentionsvermögen zu verbessern bzw. wieder herzustellen.

Die genannten Maßnahmen betreffen allerdings in erster Linie landwirtschaftlich genutzte Flächen. Bewaldete Regionen sind bisher so gut wie kaum beachtet worden. Bisher wurde lediglich auf die von vielen Autoren (u.a. BRECHTEL, 1969; BRECHTEL & PAVLOV, 1977; BRECHTEL & BALÁZS, 1988; DELFS, 1955; DE HAAR & HOFFMANN, 1982; LIEBSCHER, 1982) beschriebene Bedeutung des Waldes hinsichtlich seines Wasserrückhaltepotenzials verwiesen. Rheinland-Pfalz ist mit einem Anteil von 41 % das walddreichste Bundesland der Bundesrepublik Deutsch-

land (LEONHARD, 1999). Das hat zusammen mit den auftretenden Hochwässern den Landtag von Rheinland-Pfalz dazu bewegt (Landtagsdrucksache 13/314/1012), das oben erwähnte Forschungsvorhaben zu initiieren. Mit der Feststellung, dass das Ökosystem Wald hinsichtlich seines Wasserrückhaltepotenzials eine besondere Bedeutung für den Hochwasserschutz genießt, wurde die Forderung verknüpft, neue Erkenntnisse über das Abflussgeschehen und die (Wiederherstellung der) Wasseraufnahmefähigkeit von Waldböden zu sammeln. Daraus sollen Handlungsanleitungen und -empfehlungen zur Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens in den rheinland-pfälzischen Waldgebieten erarbeitet werden.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens war es zwei repräsentative rheinland-pfälzische Waldstandorte auszuwählen, um dort exemplarisch Untersuchungen zum Wassertransport vorzunehmen. Aus diesen Untersuchungen sollte ein detailliertes Verständnis für die ablaufenden Prozesse, die zur Abflussbildung aus Wäldern führen, abgeleitet werden. Die System steuernden Faktoren sollten identifiziert werden. Dabei sollten neben den natürlichen Einflussfaktoren insbesondere die anthropogenen Faktoren der forstlichen Bewirtschaftung ermittelt werden. Neben der Art der Bestockung spielt hierbei vor allem der Grad der Feinerschließung der Waldflächen eine gewichtige Rolle (DIETZ et al., 1984; SCHÜLER et al., 2002). Durch Fahr- und Wanderwege, Rückegassen oder Seillinienstrecken zur Bergung eingeschlagenen Holzes sowie durch künstliche Drainage- und Abflussgräben wird das natürliche System und seine Abflussdynamik stark verändert.

Da diese Faktoren nicht ohne weiteres im Gelände verändert werden können, sollte das Ökosystem Wald mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell im Hangmaßstab simuliert werden, um den Einfluss der verschiedenen forst- und wasserwirtschaftlichen Maßnahmen (z.B. Ausführung des Wegebbaus und der Grabensysteme, Änderung der Bestockung) auf das Retentionsvermögen von Waldstandorten zu bestimmen. Zu diesem Zweck sollte das zweidimensionale, physikalisch basierte Niederschlags-Abfluss-Modell CATFLOW (BOTT et al., 2002; CASPER, 2002; MAURER, 1996, 1997a/b; ZEHE, 1999; ZEHE & MAURER, 2000) eingesetzt werden, da es im gewählten Maßstab ein geeignetes Modellsystem darstellt, mit dem es möglich ist die wesentlichen Prozesse des Wassertransports zu simulieren. CATFLOW erlaubt die Berechnung der Bodenwasserbewegung sowohl unter ungesättigten wie auch bei gesättigten Bedingungen. Zudem beinhaltet es ein Verdunstungsmodul (KOLLE & FIEDLER, 1997; MAURER, 1997a).

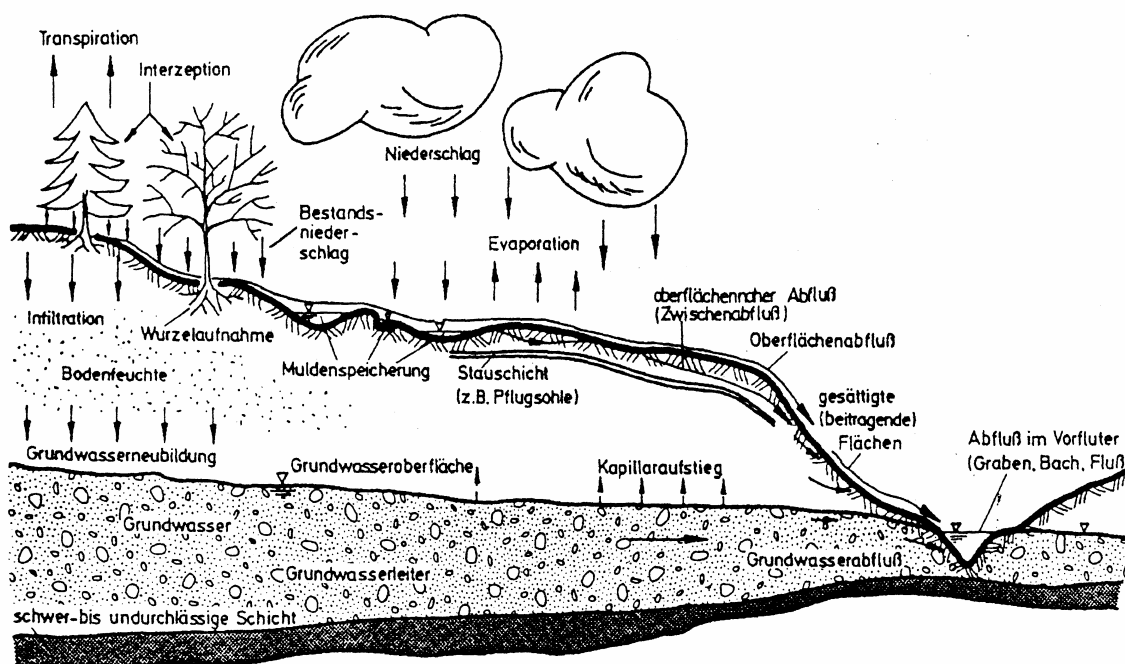
Die Simulationsergebnisse sollen zusammen mit Geländebefunden dazu dienen, den Einfluss vorgegebener waldbaulicher Maßnahmen zu prognostizieren. Sie sollen nach Möglichkeit von forstwirtschaftlichen Entscheidungsträgern genutzt werden, um Handlungsempfehlungen und konkrete Vorgaben hinsichtlich einer nachhaltigen Hochwasservorsorge in rheinland-pfälzischen Wirtschaftswäldern abzuleiten. Damit soll ein wertvoller Beitrag zur Verringerung von Hochwasserabflüssen aus bewaldeten Entstehungsgebieten geleistet werden.

## 2 Grundlagen

Die zentrale Hauptrolle im komplexen System des Wassertransportes spielt der Boden bzw. seine hydraulischen Eigenschaften. Nachfolgend werden daher einige wichtige Teilaspekte der Wasserbewegung mit ihren Teilprozessen in der ungesättigten Bodenzone etwas näher betrachtet. Es folgt eine kurze mathematische Beschreibung des Wassertransports sowie der Modellierung des Wassertransports. Nach der Vorstellung verschiedener Modellierungsstrategien erfolgt dann eine Einführung in das Modellsystem CATFLOW (BOTT et al., 2002; CASPER, 2002; MAURER, 1996, 1997a/b; ZEHE, 1999; ZEHE & MAURER, 2000), das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurde, um das Abflussverhalten zweier bewaldeter Standorte im Hangmaßstab zu modellieren.

### 2.1 Wassertransport in der ungesättigten Bodenzone

Bei der Untersuchung des allgemeinen Wasserkreislaufs über den Landflächen bzw. innerhalb natürlicher Gewässereinzugsgebiete ist man mit einem hoch komplexen und dynamischen System konfrontiert, welches aus einer Vielzahl von in Zeit und Raum variablen Prozessen besteht (Abb. 2.1). Die spezifische Kombination und das Zusammenwirken der Systemfaktoren eines Gebietes bestimmen, welche Prozesse das System dominieren und mit welcher Intensität sie ablaufen (BOTT et al., 2002; ETZENBERG, 1998). Zu nennen sind hier die klimatischen Randbedingungen des Systems, die geologisch-morphologische Gliederung, der daraus resultierende Bodenaufbau mit seinen spezifischen hydraulischen Eigenschaften und die Art der Landnutzung im betreffenden Gebiet. Diese weitestgehend natürlichen Systemfaktoren werden allerdings durch anthropogene Eingriffe verändert.



**Abb. 2.1:** Schematische Darstellung der Wassertransportprozesse an einem Hang (nach BRONSTERT, 1994)

### 2.1.1 Das Potenzialkonzept

Das Potenzialkonzept stellt eine Möglichkeit dar, alle Bewegungsvorgänge des Bodenwassers (Infiltration, lateraler Fluss und kapillarer Aufstieg) zusammenfassend zu beschreiben. Das Potenzial ist hierbei die Arbeit die notwendig ist, um eine Einheitsmenge (Volumen, Masse oder Gewicht) Wasser von einem beliebigen Punkt eines Kraftfeldes zu einem Bezugspunkt zu transportieren (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Die Fließbewegung erfolgt senkrecht zu den Äquipotenziallinien, von Ebenen höheren Potentials zu solchen mit niedrigerem Potenzial (BRONSTERT, 1994). Bei Vernachlässigung aller Arten thermischer und osmotischer Kräfte setzt sich das Gesamtpotenzial  $\Phi$  aus dem Matrixpotenzial  $\Psi$ , das bestimmt wird von Kapillar- und Adsorptionskräften in der Bodensubstanz, sowie dem Gravitationspotenzial  $z$  zusammen. Dieses entspricht der zu leistenden Arbeit die notwendig ist, um eine bestimmte Wassermenge von einem Bezugsniveau auf eine bestimmte Höhe anzuheben. Das Bezugsniveau wird stets so gewählt, dass das Gravitationspotenzial ein positives Vorzeichen erhält. Das Matrixpotenzial entspricht zahlenmäßig dem Wert der Saugspannung und ist als negative Größe definiert.

$$\Phi = z + \frac{p}{\rho_w g} = z - \Psi \quad (2.1)$$

- mit:
- $\Phi$  = Gesamtpotenzial
  - $z$  = Gravitationspotenzial, Koordinate entgegen der Schwerkraft
  - $p$  = Druck
  - $\rho_w$  = Dichte von Wasser
  - $g$  = Erdbeschleunigung
  - $\Psi$  = Saugspannung, negatives Druckpotenzial,  $\Psi = -p/(\rho_w g)$

Im Idealfall herrscht zwischen den Potenzialen ein Gleichgewicht, d.h. Matrixpotenzial  $\Psi$  und Gravitationspotenzial  $z$  sind an jedem beliebigen Punkt oberhalb des Bezugsniveaus betragsmäßig gleich groß. Unter natürlichen Bedingungen stellt sich über die gesamte Bodensäule allerdings nur selten der Gleichgewichtszustand ein. Bei Austrocknung verringert sich das Matrixpotenzial stark. Daher ist in niederschlagsarmen Perioden mit hohem Verdunstungsanspruch die Wasserbewegung in den obersten Bodenschichten nach oben gerichtet, ohne dass genügend Wasser durch kapillaren Aufstieg nachgeliefert werden kann. Mit zunehmender Tiefe kehrt sich dann die Richtung des Gradienten um. In der Ebene, in der der hydraulische Potenzialgradient gleich null ist, liegt dann eine unterirdische Wasserscheide (Abb. 2.2). Unterhalb dieser Grenze führen Bodenfeuchteänderungen zur Versickerung, oberhalb davon tragen sie zur Verdunstung bei (DYCK & PESCHKE, 1995). Wird das Gleichgewicht der Potenziale durch Niederschlagseinfluss oder Bewässerung gestört, erniedrigt sich die Saugspannung im Boden und es findet eine nach unten gerichtete Wasserbewegung statt. Diese kann einem nach oben gerichteten kapillaren Aufstieg entgegen gerichtet sein, da in tieferen Bereichen des Bodens eine andere Potenzialverteilung vorherrscht (Abb. 2.3). In der Übergangszone zwischen beiden Bewegungsrichtungen, in der sogenannten Konvergenzzone, findet keine Wasserbewegung mehr statt.

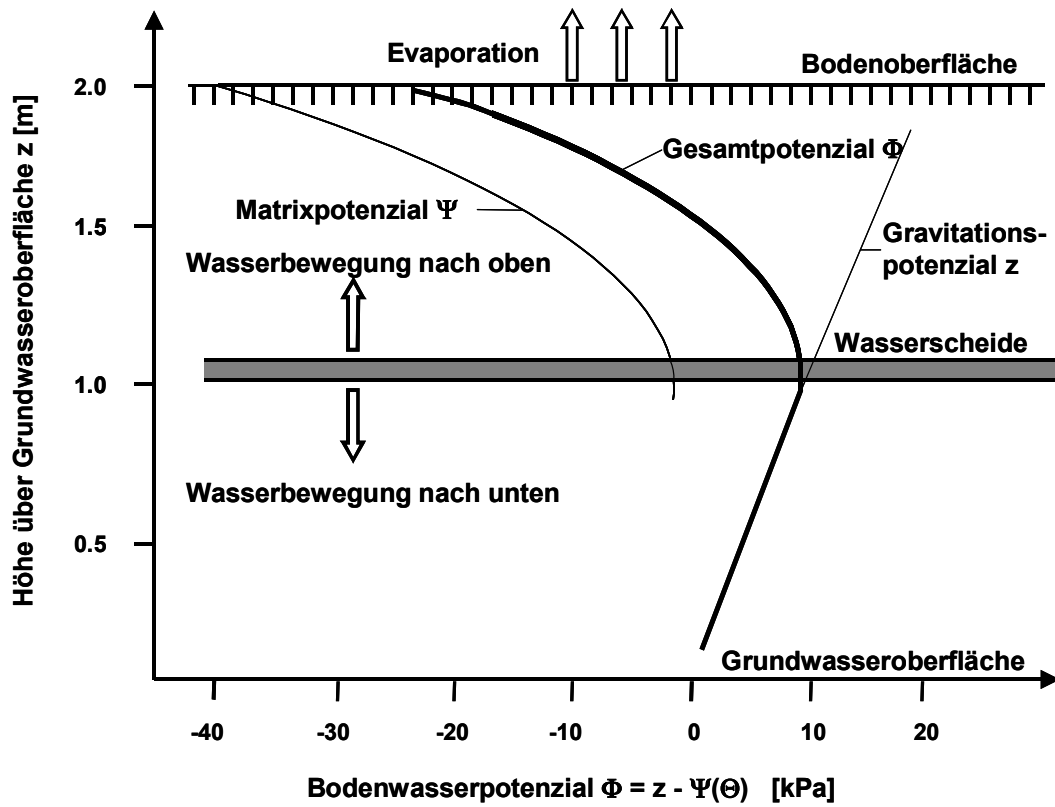


Abb. 2.2: Die Verteilung von Matrix-, Gravitations- und Gesamtpotenzial im Boden unter trockenen Bedingungen bei Verdunstung (verändert nach DYCK & PESCHKE, 1995)

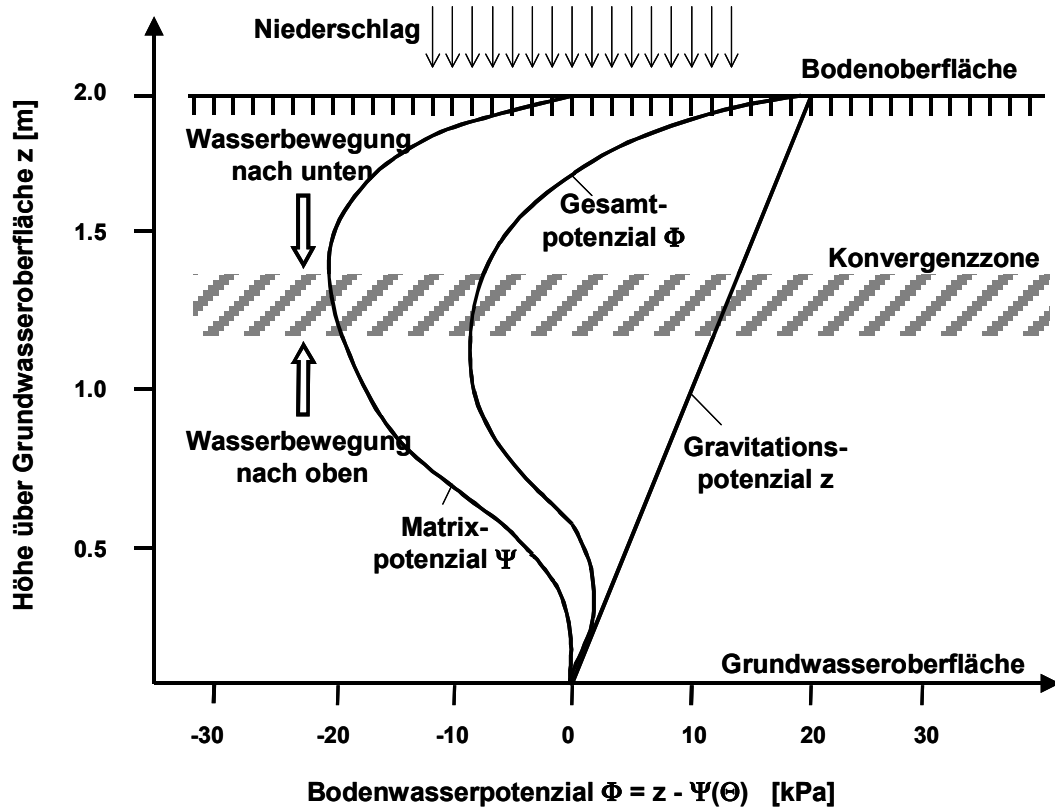


Abb. 2.3: Die Verteilung von Matrix-, Gravitations- und Gesamtpotenzial im Boden bei Niederschlag unter Infiltrationsbedingungen (verändert nach DYCK & PESCHKE, 1995)

### 2.1.2 Bodenwasser und Bodengefüge

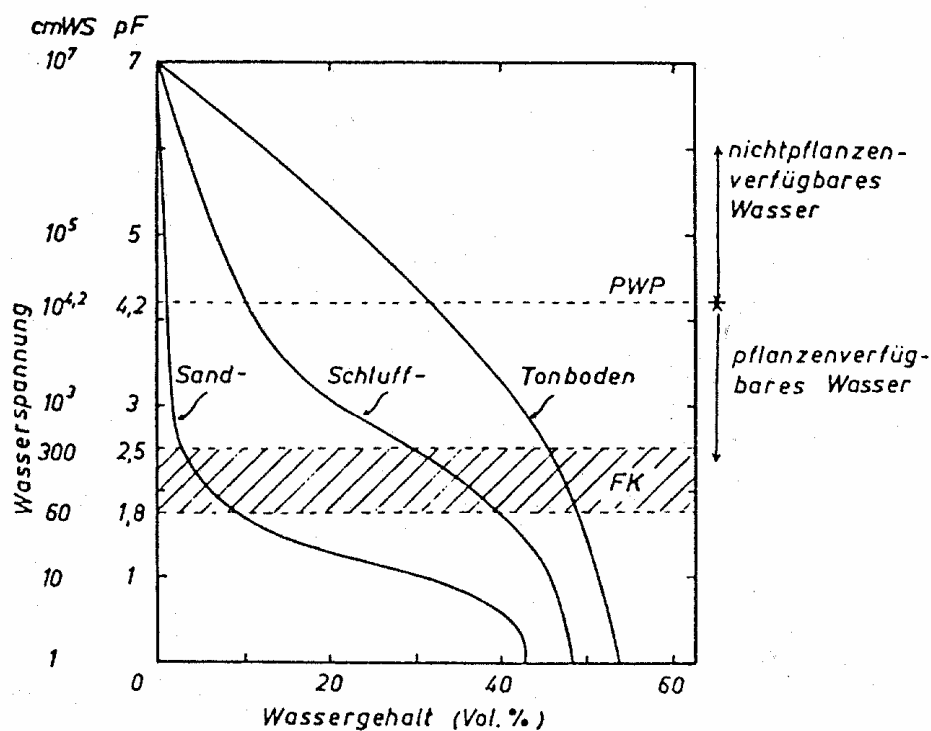
Allgemein wird unter Boden die oberste belebte Zone des lockeren Verwitterungsmaterials an der Grenzfläche Erdkruste-Atmosphäre verstanden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Böden sind dreiphasige Systeme, sie bestehen aus den festen mineralischen und organischen Teilchen, der Bodenlösung (Wasser mit den darin gelösten Salzen und löslichen organischen Substanzen) und der Bodenluft (DYCK & PESCHKE, 1995). Die Korngrößenverteilung der festen Bodenbestandteile bestimmt das Bodengefüge und damit das Hohlraum- oder Porenvolumen. Dieses wird üblicherweise in Mikro- und Makroporen unterteilt.

Innerhalb der Mikroporen kann das Wasser durch Kapillar- und Adsorptionskräfte gehalten werden. Nach Tabelle 2.1 (aus DISSE, 1995 nach KUNTZE et al., 1994) bestimmt die Porengrößenverteilung das hydraulische Verhalten eines Bodens.

**Tab. 2.1:** Porenraumgliederung (aus DISSE, 1995 nach KUNTZE et al., 1994, verändert)

Poren-Ø [µm]	Saugspannungsbereich		Poren- bereich	Poren- funktion	
	pF	mbar			
> 50	< 1,8	< 60	Grobporen	schnell dränend	LK
50 – 10	1,8 – 2,5	60 – 300	Grobporen	langsam dränend	FK
10 – 0,2	2,5 – 4,2	300 – 15000	Mittelporen	pflanzenverfügbar	nFK
< 0,2	> 4,2	> 15000	Feinporen	Totwasser	PWP

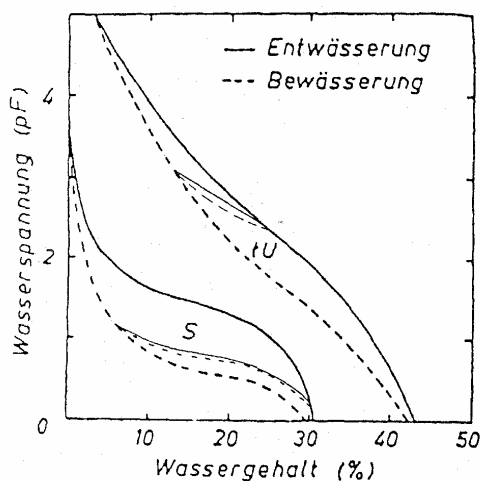
mit: LK = Luftkapazität; FK = Feldkapazität; nFK = nutzbare Feldkapazität; PWP = permanenter Welkepunkt



**Abb. 2.4:** Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt bei einem Sandboden, einem Schluffboden und einem Tonboden; mit FK = Feldkapazität, PWP = Permanenter Welkepunkt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002)



Der Zusammenhang zwischen Wassergehalt eines Bodens und den Porenfunktionen bzw. Saugspannungsbereichen aus Tab. 2.1 wird in der Wasserspannungskurve verdeutlicht (Abb. 2.4). Der relativ zum Atmosphärendruck aufzuwendende Unterdruck, mit dem das Wasser aus dem Boden entfernt werden kann, wird als Saug- oder Wasserspannung bezeichnet. Als Einheit wird der dekadische Logarithmus der (Unter-) Druckhöhe, der sogenannte pF-Wert, verwendet. Für die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt existieren mehrere gebräuchliche Bezeichnungen wie pF-Kurve, Wasserspannungskurve oder Bodenwassercharakteristik. Die Wasserspannung ist am höchsten bei niedrigem Bodenwassergehalt. Das Wasser befindet sich dann in den feinsten Poren (Kapillarwasser) und als dünner Film auf den Bodenteilchen (Adsorptionswasser).

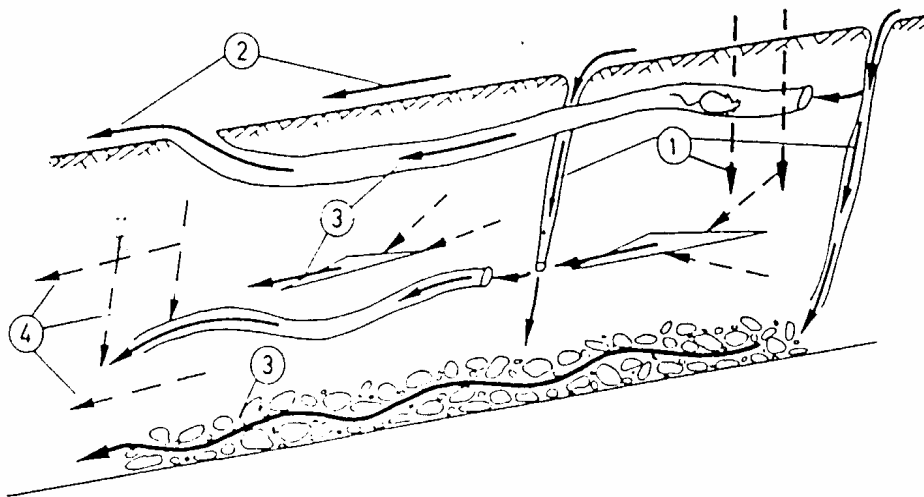


**Abb. 2.5:** Hysteresis bei der Be- und Entwässerung eines Sand- (S) und eines Lössbodens (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002)

Die Wasserspannungskurve ist nicht nur von der Körnung und vom Bodengefüge und dem sich daraus ableitenden Spannungszustand abhängig, sondern auch von der Richtung der Wassergehaltsänderung (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Es ergeben sich unterschiedliche pF-Kurven für Be- und Entwässerung (Abb. 2.5). Diese Erscheinung wird Hysteresis genannt. Ursachen für dieses Phänomen liegen vor allem in der gegensätzlichen Wirkung von Porenengpässen, unterschiedlichen Lufteinschlüssen, Veränderungen der Benetzbarkeit und in der durch Schrumpfung hervorgerufenen, nur teilweise reversiblen Gefügeänderungen.

Erreichen die Poren einen Äquivalentdurchmesser von etwa 3 mm, so werden sie nach BEVEN & GERMANN (1981) und BRONSTERT (1994) als Makroporen bezeichnet. Daneben existieren auch noch andere Definitionen von Makroporen, wobei es nach CHEN & WAGENET (1992) schwer ist, einen einheitlichen Grenzwert festzulegen. In BEVEN & GERMANN (1982) sowie in LEIBUNDGUT & UHLENBROOK (1997) finden sich entsprechende Aufstellungen verschiedener Autoren. Makroporen entstehen durch absterbende Pflanzenwurzeln, Aktivität der Bodenfauna (Regenwurm- und Wühlgänge), Bodenaggregation und -disaggregation, Schrumpfrisse und Bodenbearbeitung. Sie sind dadurch charakterisiert, dass sich das Wasser in ihnen ohne den Einfluss von Kapillarkräften bewegen kann. Dadurch können gegenüber der Bodenwasserbewegung in den Mikroporen 100 bis 400 mal schnellere Infiltrations- und Fließraten auftreten (BEVEN & GERMANN, 1981). Dabei kann die Wasserbewegung sowohl vertikal (Infiltration oder Tiefensickerung) als auch lateral erfolgen (Abb. 2.6). Die Geschwindigkeiten hängen ab vom Aufbau der Böden, ihrer Vorfeuchte und der Beschaffenheit der Poren, wie Durchmesser, Topologie und Interaktion mit der umgebenden Bodenmatrix (NAEF et al., 2000; WEILER, 2001). Der Fluss in den Makroporen kann bedeutend zu Abflussspitzen im Vorfluter beitragen (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK, 1997; MOSLEY, 1979, 1982; WILSON et al., 1990). Daneben können Makroporen aber auch Hochwasser vermindern, wenn durch sie die Infiltration und insbesondere die Tiefenperkolation erhöht wird und das Wasser im Boden oder im tieferen Untergrund gespeichert werden kann (NAEF et al., 2000). An der Grenzschicht zwischen Boden und anstehendem Untergrundgestein oder an Übergängen von besser zu schlecht durchlässigen Substraten kann

eine vorhandene Makroporosität von großer Bedeutung sein. So berichtet MOSLEY (1982) von der Auswaschung von Feinmaterial an der Horizontgrenze im Oberboden von bewaldeten Hangböden, was zu hoch durchlässigen Schichten führte. Im Zusammenspiel mit Makroporen, die durch das Wurzelsystem entstanden sind, können diese Schichten das Wasser als oberflächennahen Zwischenabfluss (Subsurface Flow) schnell durch den Boden leiten. Bei landwirtschaftlich genutzten Böden kann an der Pflugsohle eine solche Schicht ausgebildet sein (BRONSTERT et al., 1995).



**Abb. 2.6:** Schematische Darstellung der Fließwege im Porensystem an einem Hang: 1) Infiltration in Mikro- und Makroporen; 2) Oberflächenabfluss und Return Flow; 3) lateraler Makroporenfluss inkl. Abfluss an der Grenzschicht Boden-Gestein; 4) Mikroporendurchfluss oder Matrixfluss (aus BRONSTERT 1994, nach ZUIDEMA 1985)

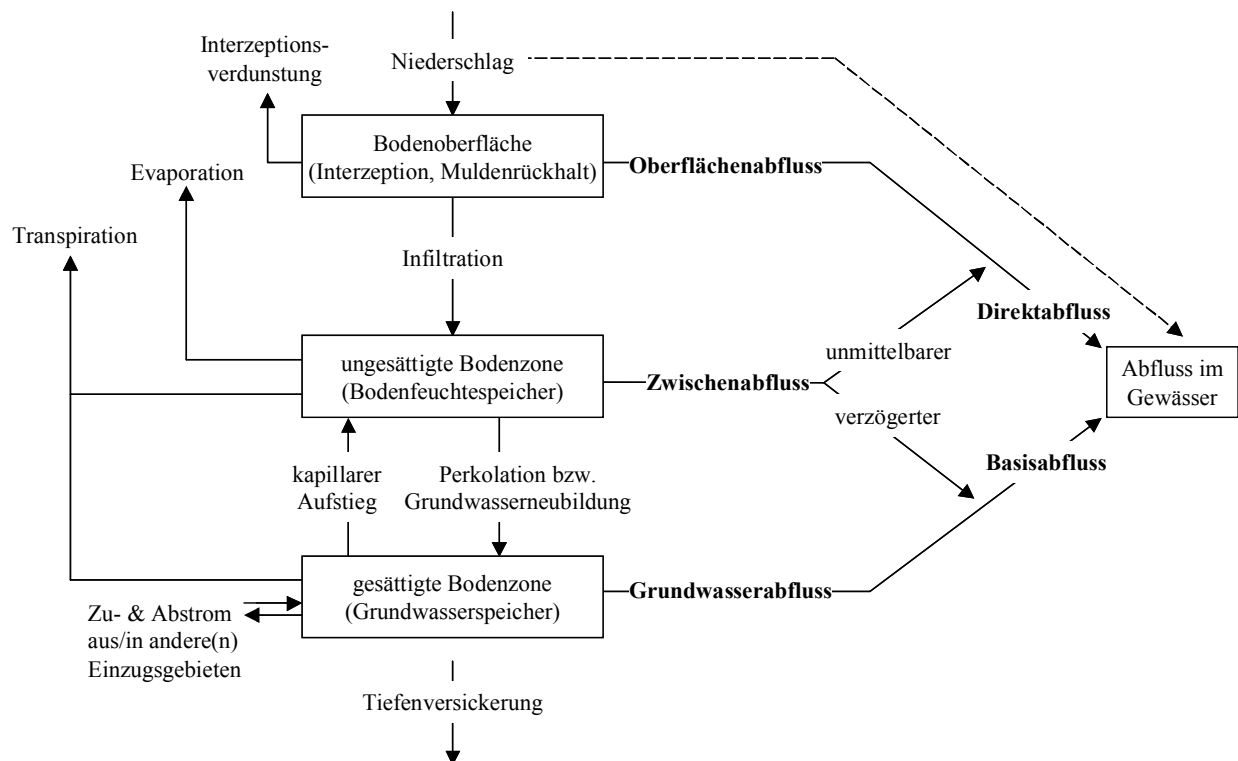
Durch Befahrung der Waldflächen, insbesondere durch Arbeitsmaschinen (Forstschlepper, Rückefahrzeuge und Harvester), werden Veränderungen der Bodenstruktur infolge mechanischer Einwirkung hervorgerufen (EISENBARTH, 1997). Wenn Druck- und Scherkräfte die Bodentragfähigkeit übersteigen, kommt es zu Verformungen. Diese können als elastische Verformung reversibel (organische Böden, Rohhumus), meistens jedoch irreversibel als konsolidierte Verformung (vertikale Pressung) oder als Grundbruch (Bodengleiten, viskoses Fließen) ablaufen (EISENBARTH, 1997). Dabei bestimmen vor allem der Wassergehalt, die Bodenart und die einwirkende Kraft die Art der Verformung und Gefügeänderung. Diese Strukturveränderungen führen zur Reduktion von Grob- und Mittelporen und zur Zerstörung der Porenkontinuität (BECKER et al., 1990). Gleichzeitig erhöht sich die Lagerungsdichte der Böden. Dadurch werden die Bodeneigenschaften erheblich verändert. Infiltrationskapazität, Wasserleitfähigkeit und Versickerungsintensität werden herabgesetzt und es kommt zur sekundären Pseudovergleyung durch Staunässebildung. Ferner führen die Gefügeänderungen zu einer Beeinträchtigung des Baumwachstums infolge von Sauerstoffarmut, Nährstoffmineralisation und einer Erhöhung des Wurzelungswiderstandes (EISENBARTH, 1997).

In der Literatur sind dazu in den letzten zwanzig Jahren eine Reihe von Beiträgen erschienen, die sich mit dem Thema der Bodenverdichtung und ihren Auswirkungen auseinandersetzen (BECKER et al., 1989, 1990; DVWK, 1995, 1997a/b, 1998; EBERLE, 1998; GÖTZ, 1985; GROLL, 1996; HETSCH et al., 1990; HILDEBRAND, 1987; HILDEBRAND & WIEBEL, 1981, 1982, 1986;

HILDEBRAND & WILPERT, 1992; HORN & HARTGE, 2001; LENHARD, 1986; MATTHIES et al., 1995; NAUMANN, 1987; SCHACK-KIRCHNER et al., 1993; WEIXLER, 1994). Vor allem auf die Änderungen in der Porengrößenverteilung und damit auch im Wasserhaushalt der verdichteten Böden wird dabei eingegangen (BECKER et al., 1989; HILDEBRAND, 1983a/b; HILDEBRAND & WIEBEL, 1981). Zusammenfassende Darstellungen mit Hintergründen zu Ursachen und Wirkungen der Bodenverdichtung in Waldstandorten finden sich in BECKER et al. (1990), EICHHORN (1993), HILDEBRAND (1996), HOFMANN (1989) und KWF (1988).

### 2.1.3 Abflussprozesse

Die Abflussbildung bestimmt den Anteil des Niederschlags, der zum Abflussgeschehen beiträgt (DVWK, 1999). Der Infiltrationsprozess ist wiederum entscheidend für die Art des Abflusses (NAEF et al., 2000). Kann nur wenig Niederschlagswasser in den Boden infiltrieren, werden Oberflächenabflussprozesse in Gang gesetzt. Dringt Wasser in den Boden ein, gibt es mehrere Möglichkeiten. Es kann vorübergehend im Boden (ungesättigte Zone) oder längerfristig im Grundwasser (gesättigte Zone) gespeichert werden oder es kann relativ schnell als unterirdischer Abflussprozess zum Gesamtabfluss beitragen. Entsprechend dieser vertikalen Dreiteilung können auch drei Abflusskomponenten unterschieden werden. Diese sind Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss. In der unten stehenden Abb. 2.7 sind die Prozesse der Abflussbildung und die Abflusskomponenten schematisch dargestellt.

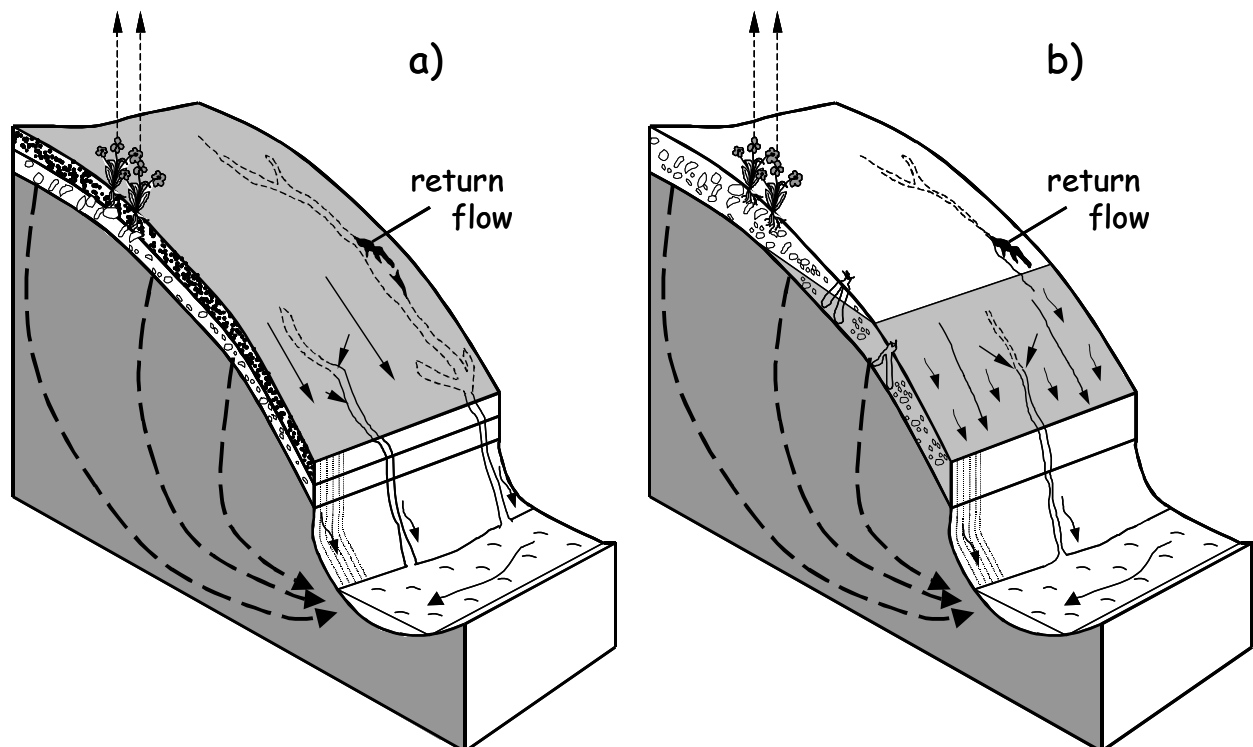


**Abb. 2.7:** Schematische Darstellung der Abflussprozesse und Abflusskomponenten (verändert nach BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996)

HORTON (1933) stellte im Rahmen von Infiltrationsuntersuchungen fest, dass Oberflächenabfluss entsteht, wenn die Niederschlagsintensität die momentane Infiltrationsrate des Bodens übersteigt (Hortonscher Oberflächenabfluss aufgrund von Infiltrationsüberschuss; Abb. 2.8a). In der Literatur (u.a. NAEF et al., 2000) wird dieser Landoberflächenabfluss noch in mehrere ver-

schiedene Arten untergliedert. Der Oberflächenabfluss ist stark von der Landnutzung des jeweiligen Bodens abhängig. So tritt Landoberflächenabfluss in den gemäßigten Klimaregionen bei (teil-) versiegelten Flächen, bei Böden mit sehr niedriger Infiltrationskapazität, bei anthropogen verdichteten oder gefrorenen Böden auf (UHLENBROOK, 1999). In bewaldeten Gebieten trägt Oberflächenabfluss wegen der ausgeprägten Mikrotopographie und Makroporen nur selten zum gesamten Abflussgeschehen bei (BONELL, 1993; LEANEY et al., 1993; PEARCE et al., 1986; TANAKA et al., 1988). SCHWARZ (1985, enthalten in DVWK, 1985) führt aus, dass basierend auf Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes lediglich hundertjährige Starkniederschlagsereignisse in der Lage sind selbst unter Wald Oberflächenabfluss hervorzurufen.

Neben dem klassischen Oberflächenabfluss nach Horton gibt es noch den sogenannten Sättigungsflächenabfluss (Abb. 2.8b). Hierbei handelt es sich um Landflächenabfluss auf gesättigten bzw. aufgesättigten Böden (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK, 1997). Hier fließt unabhängig von der Niederschlagsintensität jede weitere Wasserzugabe oberflächlich ab (KIRBY & CHORLEY, 1967). Zum Sättigungsflächenabfluss trägt häufig noch zusätzliches Wasser bei, welches bereits infiltriert war und als Return Flow wieder an die Oberfläche tritt. Im eigentlichen Sinne besteht Sättigungsabfluss aber nur aus Niederschlag, der direkt auf gesättigte Flächen fällt (ESHLEMAN et al., 1993; KIRNBAUER et al., 1996; LEIBUNDGUT & UHLENBROOK, 1997; UHLENBROOK, 1999). Niederschlag der direkt auf das Gerinne oder eine Wasserfläche fällt, gehört ebenfalls dazu und erzeugt die schnellste Reaktion. Insgesamt betrachtet tritt beim Sättigungsflächenabfluss der Einfluss der Gebietseigenschaften mit zunehmender Auffeuchtung des Bodens hinter den des Niederschlagsereignisses zurück (PESCHKE et al., 1999).



**Abb. 2.8:** Bildung von Landoberflächenabfluss a) infolge Infiltrationsüberschusses, b) infolge Sättigungsüberschusses (verändert nach KÖLLA, 1987)

Zwischenabfluss oder hypodermischer Abfluss, auch Interflow (aus dem Engl.) genannt, entsteht innerhalb der ungesättigten Bodenzone je nach Bodenbeschaffenheit und Morphologie der betrachteten Fläche auf mehreren Wegen. Am häufigsten tritt er in Form von gesättigtem und ungesättigtem Fluss von infiltriertem Niederschlagswasser, das sich im Substrat geneigter Flä-

chen oberhalb stauender Schichten zum Grundwasserkörper der Talau oder direkt zum Vorfluter bewegt und dort mit unterschiedlicher Verzögerung zum Gesamtabfluss beiträgt (FLÜGEL, 1993). Es muss also eine signifikante sprunghafte Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit zwischen aufeinanderfolgenden Bodenhorizonten oder -schichten gegeben sein. Nach DYCK & PESCHKE (1995) muss der Unterschied der hydraulischen Leitfähigkeit bei sandigen Substraten mindestens zwei bis drei Größenordnungen betragen und bei bindigen Böden sollte die Verringerung bei etwa einer Größenordnung liegen. Bei ausreichendem Gefälle der betrachteten Fläche reicht bereits eine stetige Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe, um merkliche Raten an Zwischenabfluss entstehen zu lassen (ETZENBERG, 1998; PESCHKE et al., 1999). Interflow kann aber auch bei großen Hangneigungen auftreten, wenn das Bodenprofil nahezu homogen aufgebaut ist und eine gute Durchlässigkeit aufweist (ETZENBERG, 1998).

Zwischenabfluss ist erst bei einer Quasi-Sättigung wirksam, d.h. der aktuelle Wassergehalt der Bodenschicht, in welcher der Interflow sich lateral bewegt, übersteigt den Wassergehalt bei Feldkapazität. Mit welcher Geschwindigkeit bzw. zeitlicher Verzögerung diese Abflusskomponente tatsächlich zum Gesamtabflussgeschehen beiträgt, hängt, neben der hydraulischen Leitfähigkeit des durchflossenen Mediums und der Neigung des durchflossenen Hangsegments, maßgeblich von der konkreten Entstehungstiefe innerhalb des Bodenprofils und den zu überwindenden Fließwegen zum Vorfluter ab (ETZENBERG, 1998).

Bereits in Abschnitt 2.1.2 wurde kurz der Einfluss der Makroporosität auf die Wasserbewegung im Boden erläutert. Der schnelle Beitrag des Zwischenabflusses, der zum Direktabfluss gezählt werden kann, bewegt sich dabei innerhalb der Makroporen, die als bevorzugte Fließbahnen wirken, als Preferential Flow oder auch als Macropore Flow (Makroporenfluss) oder Pipe Flow (Fluss durch Bodenröhren) (NAEF et al., 2000). FLÜGEL (1993) führt aus, dass die Interflowdynamik eines Hanges gemeinsam durch die substratbedingten Durchlässigkeitsunterschiede und die Grobporenverteilung bestimmt wird. Er beschreibt eine schnelle Zwischenabflusskomponente, die in den Makroporen bei Starkniederschlägen unabhängig von den gegebenen Durchlässigkeitsunterschieden im Substrat bis zur stauenden Schicht fließt, auf der das Wasser dann lateral als schneller Interflow abfließt. Das in der Matrix des Hangprofils langsam nachsickernde Wasser erreicht diese Schicht erst wesentlich später und erzeugt einen verzögerten Interflow. Erfolgt durch ein gegebenes Makroporensystem eine stärkere Tiefensickerung, die das Wasser dem Grundwasser zuführt, so kann es dort zum Basisabfluss aus dem Grundwasserspeicher beitragen.

Dieser Grundwasserabfluss (oder Basisabfluss) ist die langsamste Abflusskomponente. Hier bestimmen die Grundwasserneubildungsrate (vertikaler Zufluss) und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Aquifers die Neigung der Grundwasseroberfläche und damit die Fließgeschwindigkeit des Wassers. Je nach Mächtigkeit der überlagernden Schichten und der Beschaffenheit des Aquifers kann somit die Reaktion des Grundwasserabflusses auf einen einzelnen Niederschlagsimpuls sehr schwach sein und auch nur sehr verzögert erfolgen (CASPER, 2002). Durch Druckfortpflanzung in der gesättigten Zone (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK, 1997; UHLENBROOK, 1999) sind hier aber ebenfalls sehr hohe Übertragungsgeschwindigkeiten möglich (Groundwater Ridging bei aufgesteilteten Grundwasseroberflächen bzw. Piston Flow Effect unter gespannten Verhältnissen).

## 2.2 Mathematische Beschreibung des Wassertransports

In diesem Abschnitt erfolgt eine Darstellung der allgemeinen Grundlagen der mathematisch-physikalischen Beschreibung der Wassertransportprozesse, wie sie in den vorangegangenen Abschnitten für die ungesättigte Zone erläutert wurden.

### 2.2.1 Bodenwasserbewegung

Das Ziel der mathematischen Beschreibung des Wassertransports ist es, sowohl ungesättigte als auch gesättigte Verhältnisse zu beschreiben. D.h. man will für ein begrenztes System, unter Kenntnis der Randbedingungen und der Gesetzmäßigkeiten im Inneren, die interessierenden Größen bestimmen. Insbesondere der Wassergehalt  $\Theta$  oder der Fließvektor  $q$  sollen ermittelt werden, und zwar zur Zeit  $t$  und am Ort  $x, y, z$ . Damit sind folgende Funktionen  $\Theta(t, x, y, z)$  und  $q(t, x, y, z)$  zu bestimmen (HORNUNG & MESSING, 1984). Zu diesem Zweck bedient man sich der Saugspannung bzw. des Matrixpotenzials  $\Psi$  aus dem Potenzialkonzept (vgl. Abschnitt 2.1.1). Mit der Kenntnis dieser Größe lassen sich alle anderen relevanten Parameter ermitteln. Der Wassergehalt  $\Theta$  eignet sich dafür im allgemeinen nicht, da sich aus ihm der Fließvektor im gesättigten Bereich nicht berechnen lässt (HORNUNG & MESSING, 1984). RICHARDS (1931) leitete diese Zusammenhänge des Wassertransports in ungesättigt-gesättigten porösen Medien her. Die allgemeine Kontinuitätsgleichung für den vertikalen Fluss lautet:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Sie besagt, dass die während einer Zeiteinheit stattfindende Änderung des Wassergehaltes in einem Bodenvolumen gleich ist den Zu- und Abflüssen an Wasser im gleichen Bodenvolumen und gleicher Zeiteinheit. Dabei spielt es keine Rolle, ob Wasser von oben zusickert oder von unten durch kapillaren Aufstieg zuströmt. Entscheidend ist lediglich der Erhalt der Masse. Kombiniert man nun die Kontinuitätsgleichung (Gl. 2.2) mit der allgemeinen Form der Darcy-Gleichung (Gl. 2.3)

$$Q = -K \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad (2.3)$$

mit  $Q$  = Wasserbewegungs- bzw. Flussrate und  $K$  = hydraulische Leitfähigkeit, so ergibt sich die gemischte Form der Richards-Gleichung (HORNUNG & MESSING, 1984; MAURER, 1997a; RICHARDS, 1931; WANG & DOOGE, 1994):

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( -K \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

Die Leitfähigkeit  $K$  steht innerhalb der Klammer, weil sie eine Funktion der Wassersättigung ist und mit dem Matrixpotenzial  $\Psi$  bzw. dem Wassergehalt  $\Theta$  abfällt. Dies bedeutet, dass mit fortschreitender Wasserdesorption die Leitfähigkeit abnimmt und damit die Flussraten immer niedriger werden. Wenn dem Boden Wasser zugeführt wird, vergrößern sich Leitfähigkeit und Sickeraten (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996). Um die Rolle von Matrix- und Gravitationspotenzial (hier angegeben als  $\Psi_z$  zur klareren Unterscheidung von der Ortskoordinate  $z$ ) besser zu verdeutlichen, kann man Gl. 2.4 auch in der Form schreiben:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[ -K \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi_z}{\partial z} \right) \right] \quad (2.5)$$

Dieser Zusammenhang ist auch über die Wasserkapazität  $C$  gegeben. Sie ist die Steigung der Wasserspannungskurve:

$$C = \frac{\partial \Theta}{\partial \Psi} \quad (2.6)$$

Sie gibt die Änderung des Bodenwassergehaltes bei einer Änderung des Matrixpotenzials bzw. der Saugspannung an. Unter Beachtung von  $\partial \Psi / \partial t = -\partial \Phi / \partial t$  (aus Gl. 2.1) ergibt sich zusammen mit Gl. 2.4 folgende Form der RICHARDS-Gleichung:

$$-C \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Funktionen, die in der RICHARDS-Gleichung enthalten sind und die die charakteristischen Eigenschaften des Bodens widerspiegeln, wie Wasserkapazität  $C$ , Leitfähigkeit  $K$ , Saugspannung  $\Psi$  und Bodenwassergehalt  $\Theta$ , sind hochgradig nichtlinear (MAURER, 1997a; WANG & DOOGE, 1994). Aus diesem Grund kann die RICHARDS-Gleichung nur für bestimmte Anfangs- und Randbedingungen bei homogenen Bodeneigenschaften analytisch gelöst werden. Für allgemeinere Fälle wird auf numerische Lösungsverfahren zurückgegriffen, die vor allem für mehrdimensionale Aufgabenstellungen sehr aufwendig zu lösen sind (BRONSTERT, 1994; MAURER, 1997a).

Die oben genannten Beziehungen lassen sich allerdings nicht auf den Wassertransport in Makroporen anwenden. Bisher gibt es noch keine adäquate Gleichung für dieses Problem (BEVEN, 2000). Es existieren aber eine Reihe von Ansätzen zur Beschreibung der Makroporeninfiltration. Übersichten hierzu finden sich u.a. in BRONSTERT, 1994; DURNER, 1991; MAURER, 1997a; MERZ, 1996; ZUIDEMA, 1985). Dabei wird die Makroporosität durch veränderte Bodenparameter innerhalb der ansonsten unveränderten Beschreibung nach dem Potenzialkonzept erfasst (DURNER, 1991) oder der Boden wird durch sogenannte „double porosity“-Ansätze in zwei, jeweils wiederum mit dem Potenzialkonzept beschriebene, Bereiche aufgeteilt, die über einen Senkenterm miteinander in Kontakt stehen (ZUIDEMA, 1985).

Die Ermittlung der bodenhydraulischen Kenngrößen zur Lösung der RICHARDS-Gleichung durch Gelände- oder Labormessungen sind mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Es existieren jedoch vereinfachende Ansätze, die die bodenhydraulischen Funktionen mit der einfacher zu bestimmenden Korngrößenverteilung der Böden korrelieren. Eine weit verbreitete Methode zur Bestimmung dieser sogenannten Pedotransferfunktionen ist der in Gleichung 2.8 wiedergegebene Ansatz nach VAN GENUCHTEN (1980) und MUALEM (1976):

$$\Theta^* = \left( \frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right)^m = \frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \quad (2.8)$$

mit:	$\psi$	$[LT^{-1}]$	=	Matrixpotential
	$\Theta^*$	$[-]$	=	effektiver Wassergehalt (Grad der Sättigung)
	$\Theta_r$	$[-]$	=	residualer Wassergehalt
	$\Theta_s$	$[-]$	=	gesättigter Wassergehalt
	$\alpha$	$[L^{-1}]$	=	Faktor zur Beschreibung des Porengrößenmaximums, Kehrwert $1/\alpha$ heißt Lufteintrittspunkt
	$n$	$[-]$	=	Maß für die „Glätte“ der Porenverteilung
	$m$	$[-]$	=	abgeleitete Konstante $m = 1 - 1/n$ mit $1 = 0,5$

Nach VAN GENUCHTEN & NIELSEN (1985) liegen die Werte für  $n$  stets  $> 1$ . VEREECKEN et al. (1989) fanden allerdings im Gegensatz dazu durchaus Werte für  $n < 1$ .

Ganz ähnliche Verfahren und Ansätze findet man bei zahlreichen Autoren, die sich bereits seit Langem mit der Ermittlung von Pedotransferfunktionen zur Bestimmung der Bodenwassercharakteristik beschäftigten, wie ARYA & PARIS (1981), BROOKS & COREY (1964, 1966), BUCHAN et al. (1993), HAVERKAMP & PARLANGE (1986), MISHRA et al. (1989), RAWLS & BARKENSIEK (1985), RAWLS et al. (1992), VEREECKEN et al. (1989), WÖSTEN & VAN GENUCHTEN (1988). Im Artikel von WILLIAMS et al. (1993) findet man einen Vergleich von vier verschiedenen Methoden. BACHMANN & HARTGE (1991) wiederum zeigen einen Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung der Wasserspannungskurven u.a. mit dem Nomogrammverfahren (HARTGE et al., 1986; RENGER, 1971). TIETJE & TAPKENHINRICHS (1993) liefern eine zusammenfassende Darstellung solcher Pedotransferfunktionen. Aber auch in neueren Arbeiten finden sich zahlreiche Beispiele zur Ermittlung der Bodenwassercharakteristik aus Korngrößenverteilungen, Lagerungsdichten und organischem Gehalt der Böden (u.a. ARYA, 1999; DURNER, 1994; MAYR & JARVIS, 1999; SCHEINOBST et al., 1996; SINOWSKI et al., 1997). PESCHKE et al. (1999) geben in ihrer Arbeit Korrekturwerte und Modifikationen für die hydraulische Bodenkennwerte von weit verbreiteten Bodenarten an, die durch erhöhte Skelettanteile und Humusgehalte der Böden nötig werden. TIETJE & HENNINGS (1996) beschreiben, dass die Abweichung in den ermittelten Parametern am größten ist für lehmig-tonige Böden und dass darüber hinaus das Vorhandensein von Makroporen einen starken Einfluss auf die notwendige Größe der Bodenproben bedingt. Daneben gibt es auch Ansätze zur inversen Bestimmung der bodenhydraulischen Parameter (z.B. VAN GENUCHTEN et al., 1991; MONTENEGRO, 1995; ŠIMŮNEK et al., 1998). Die Arbeiten von JURY et al. (1990), VAN GENUCHTEN (1991), KOOL et al. (1987) beinhalten zusätzlich den Einfluss auf ungesättigten Stofftransport. In KIENZT et al. (1991) finden sich weitere Artikel zu diesem Thema.

### 2.2.2 Verdunstung

Zur Berechnung der Verdunstung gibt es viele verschiedene Ansätze. Eine umfassende Darstellung, sowohl zur Ermittlung der potentiellen als auch der aktuellen Verdunstung, findet sich in den Merkblättern 238 des DVWK (1996). An dieser Stelle sei lediglich auf den Ansatz von MONTEITH (1965) eingegangen, der das Verfahren von PENMAN (1948) etwas modifiziert hat. Dieser ist allgemein als PENMAN-MONTEITH-Modell bekannt und international weit verbreitet. Hier wird die aktuelle reale Evapotranspiration  $ET_{akt}$  aus den jeweiligen meteorologischen Bedingungen berechnet, die durch die effektive Strahlungsbilanz, das Sättigungsdefizit der Luft und die temperaturabhängige Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve gekennzeichnet ist. Zusätzlich sind zwei Verdunstungswiderstände enthalten, und zwar der von Windgeschwindigkeit, Höhe und Struktur der Pflanzendecke abhängige aerodynamische Oberflächenwiderstand und der die Wasserversorgung der Pflanzen kennzeichnende mittlere Stomatawiderstand. Der Ansatz kann noch allgemeiner gefasst werden, indem man die Verdunstungswiderstände nicht auf die Pflanzenschicht begrenzt, sondern als Widerstände einer beliebigen Grenzfläche definiert, wie etwa der (unbewachsenen) Bodenoberfläche. In diesen Fällen ändert sich der Oberflächenwiderstand  $r_x$ . Zur Berechnung der Interzeptionsverdunstung und der Verdunstung von einer freien Wasseroberfläche gilt für den Oberflächenwiderstand  $r_x \rightarrow \infty$ , bei der Verdunstung vom Boden oder von der Vegetationsoberfläche werden anstatt  $r_x$  die entsprechenden Boden- bzw. Pflanzenwiderstände eingesetzt.



Die PENMAN-MONTEITH-Gleichung lautet:

$$ET_{akt} = \frac{s(R_n - Q_b) + c_a \rho_a e_s (1 - \psi) C_{atm}}{\rho_w \lambda_v [s + \gamma(1 + C_{atm} / C_x)]} \quad (2.9)$$

mit:	$ET_{akt}$	$[L T^{-1}]$	= Aktuelle Evapotranspiration
	$R_n$	$[M T^{-3}]$	= Nettostrahlung
	$Q_b$	$[M T^{-3}]$	= Bodenwärmestrom
	$c_a$	$[L^2 T^{-2} \text{°K}^{-1}]$	= spezifische Wärme der feuchten Luft
	$\lambda_v$	$[L^2 T^{-2}]$	= spezifische Verdampfungswärme von Wasser
	$\rho_a$	$[M L^{-3}]$	= Dichte Luft
	$\rho_w$	$[M L^{-3}]$	= Dichte Wassers
	$\psi$	$[-]$	= relative Luftfeuchte
	$e_s$	$[M L^{-1} T^{-2}]$	= Wasserdampfdruck bei Sättigung
	$s$	$[M L^{-1} T^{-2} \text{°K}^{-1}]$	= Steigung der Wasserdampf-sättigungskurve
	$\gamma$	$[M L^{-1} T^{-2} \text{°K}^{-1}]$	= psychrometrische Konstante, $\gamma = (c_a - p_a)/(R_a/R_v \lambda_v)$
	$p_a$	$[M L^{-1} T^{-2}]$	= Luftdruck
	$R_a/R_v$	$[-]$	= 0,622; Molekulargewicht Wasserdampf / Luft
	$C_{atm}$	$[L T^{-1}]$	= $1/r_{atm}$ , Leitfähigkeit der atmosphärischen Grenzschicht
	$C_x$	$[L T^{-1}]$	= $1/r_x$ , Leitfähigkeit einer Grenzschicht für Wasserdampf
	$r_{atm}$	$[T L^{-1}]$	= atmosphärischer Widerstand für Wasserdampfübergang
	$r_x$	$[T L^{-1}]$	= Widerstand einer Grenzfläche für Wasserdampfübergang

### 2.3 Modellierungsstrategien

Die Modellierung des Wasserhaushaltes hat in den letzten Jahrzehnten, bedingt durch den Fortschritt in der Computertechnologie, eine rasante Entwicklung erlebt. Als eines der ersten Modelle etablierte sich 1966 das Stanford Watershed Modell von CRAWFORD & LINSLEY (1966, zitiert aus SAMBALE, 1998). Es gehört zur Kategorie der konzeptionellen Parameter- oder Blockmodelle, für die es in der Literatur eine Reihe weiterer Beispiele gibt, u.a. das Einzugsgebietsmodell HBV (BERGSTRÖM, 1995) oder das Wasserhaushaltsmodell AKWA-M (MÜNCH, 1995). Auf der anderen Seite finden Modelle mit überwiegend physikalisch basierter Prozessbeschreibung Anwendung, wie z.B. das SHE-Modell (ABBOTT et al., 1986). Dazwischen existiert ein weites Spektrum von Modellen, die mit einer Kombination aus physikalisch basierten, vereinfachten physikalischen und konzeptionellen Prozessbeschreibungen arbeiten. Zu nennen wären hier u.a. das Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM (OSTROWSKI, 1982) oder das Simulationsmodell PRMS (MMS) des US Geological Survey (LEAVESLEY et al., 1983, 1996; LEAVESLEY & STANNARD, 1995), das als kleinste Modelleinheit mit der Hydrological Response Unit (HRU) (LÜLLWITZ, 1992, 1993; FLÜGEL, 1995a/b, 1996a/b, 1997) arbeitet. Ebenfalls sowohl physikalisch basiert als auch konzeptionell begründet ist das Einzugsgebietsmodell WASIM-ETH (SCHULLA, 1997; SCHULLA & JASPER, 1999) dessen Abflussroutine auf dem TOPMODEL-Ansatz (BEVEN & KIRKBY, 1979) beruht.

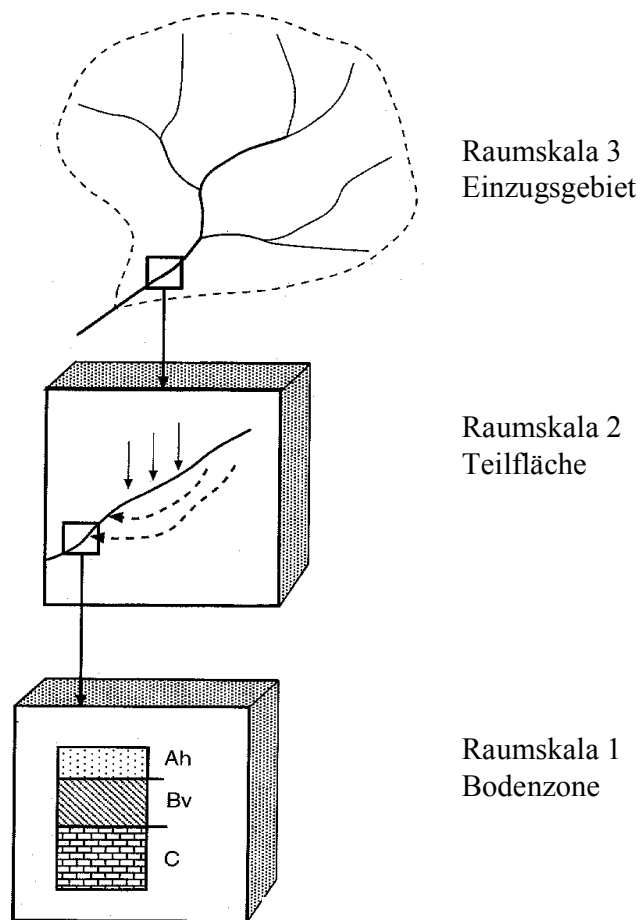
Eine sehr umfassende Darstellung der aktuellen Entwicklungen und die am häufigsten benutzten Techniken in der Modellierung der ungesättigten Zone über Niederschlags-Abfluss-Modelle mit vielen weiterführenden Literaturangaben liefert das Buch von BEVEN (2000). Eine etwas ältere Aufstellung verschiedener Modelle ist in den Mitteilungen des DVWK (1987) enthalten. Weitere Beispiele von Modellanwendungen bei der Betrachtung des Wassertransportes in der ungesättigten Zone finden sich u.a. in ABBOTT et al. (1986a/b), ARMBRUSTER (1998), AUERSWALD (2001), BRONSTERT (1994), CASPER (2002), FEISTEL (1998), KREMB et al. (2000), MANDERSCHIED (1992), MARKERT (1996), MAURER (1996, 1997), MOREL-SEYTOUX (1989), SAMBALE (1998), VOHLAND et al. (2000).

Zur Identifizierung einzelner Teilprozesse des Wassertransports werden dabei verstärkt Markierungsstoffe, sogenannte Tracer, eingesetzt. Anwendungsbeispiele für den Einsatz dieser Tracertechniken und -methoden finden sich in DELBRÜCK (1997), HERRMANN et al. (1984), HERRMANN & RICHTER (1989), HERRMANN & SCHÖNIGER (1989, 1992), LEIBUNDGUT (1996), MEHLHORN (1998) und UHLENBROOK (1999) sowie zahlreiche Beiträge in LEIBUNDGUT et al. (2001). In BERG et al. (2001) findet sich eine zusammenfassende Darstellung zum möglichen Tracereinsatz in der ungesättigten Bodenzone mit Hinweisen zu Modellkonzepten.

Zur Unterstützung der Wasserhaushaltsmodellierung in der ungesättigten Zone werden oftmals Geoinformationssysteme (GIS) eingesetzt. Diese Systeme erlauben eine einfache Verwaltung raumbezogener Informationen. So ist es möglich Zusammenhänge zwischen Wasser- und Schadstofftransport mit den jeweiligen Gebietseigenschaften herzustellen. Insbesondere geotopographische Basisdaten werden von den meisten Modellen im Rahmen der räumlichen Diskretisierung der untersuchten Gebiete eingesetzt. In Deutschland sind diese Basisdaten im Amtlich Topographisch-Kartographischen Informationssystem ATKIS (BUZIEK, 1995, HARBECK, 1995; KOPHSTAHL, 1994, 1995; WERNER, 1995; PASCHE, 1996) der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen in Form von digitalen Höhenmodellen (DHM od. DEM) und als digitale Landschaftsmodelle (DLM) erhältlich. Zusammenfassende Beispiele für den Einsatz von GIS in der Modellierung sind bei GOODCHILD et al. (1993, 1996), KOVAR & NACHTNEBEL (1996), MARKERT (1996), ØVERLAND & KLEEGERG (1992) oder auch SINGH (1995) gegeben. Sie enthalten eine Reihe von Einzelbeiträgen zu diesem Thema, z.B. ACEVEDO et al. (1996), BATTAGLIN et al. (1996), FUHRMANN et al. (1999), GAO et al. (1993), MOORE et al. (1993, 1996), VIEUX et al. (1996). Weitere Anwendungsbeispiele von GIS in der Wasserhaushaltsmodellierung finden sich bei PESCHKE et al., (1999), LÜLLWITZ (1992, 1993) MICHL (1999), STÖDTER (1993) oder SCHUMANN (1993, 1995). Mit der Erfassung und Integration von Geo-Daten aus unterschiedlichen Quellen befasst sich RAPPE (1995). WILKE (1995) geht in seinem Artikel auf die zu beachtenden Qualitätsaspekte bei der Nutzung von Geoinformationssystemen ein.

Die Diskussion über den Nutzen der jeweiligen Modellklasse ist stark an den spezifischen Einsatzzweck gebunden (SAMBALE, 1998). Des weiteren ist die Frage nach der zu betrachtenden Raumskala von entscheidender Bedeutung für die Modellauswahl. UHLENBROOK & LEIBUNDGUT (1997) unterscheiden für die Abflussbildung drei verschiedene Dimensionen (Abb. 2.9), wobei die jeweils unterschiedlichen Abflussmechanismen aufeinander aufbauen. Die hydrologische Mikroskala umfasst Gebiete kleiner  $10^{-1}$  km<sup>2</sup>, die hydrologische Mesoskala reicht von  $10^{-1}$  bis  $10^3$  km<sup>2</sup> und die hydrologische Makroskala gilt für Gebiete größer  $10^3$  km<sup>2</sup> (BECKER, 1992). Eine umfassende Diskussion der verschiedenen Skalen in der Hydrologie ist in BLÖSCHL (1996) oder auch ETZENBERG (1998) gegeben. Die Klärung des Skalenproblems gehört zu den drängenden Fragen der Wasserhaushaltsmodellierung. Ihr wird in zahlreichen Arbeiten auf den verschiedenen Raumskalen nachgegangen und sie ist Inhalt der Regionalisierung in der Hydro-

logie (KLEEBERG, 1992; KLEEBERG et al. 1999). Die Frage nach der richtigen Modellierungsstrategie oder dem richtigen Modelltyp muss für jede Anwendung auf eine bestimmte Aufgabenstellung immer wieder neu beantwortet werden.



**Abb. 2.9:** Raumskalen der Abflussbildung (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT, 1997)

## 2.4 Modellsystem CATFLOW

### 2.4.1 Modellkonzept

Das Simulationssystem CATFLOW wurde von MAURER (1997a,b) im Rahmen der Bearbeitung des Weiherbachprojektes (PLATE, 1992) am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe entwickelt. Es wurde von ZEHE (1999) durch ein optionales Stofftransportmodul ergänzt. Das System gehört zur Gruppe der physikalisch basierten Niederschlag-Abfluss-Modelle und erlaubt die zweidimensionale, zeitkontinuierliche, räumlich differenzierte Simulation des Wassertransports an Hängen. Dabei wird für den Matrixfluss im Bodenkörper die RICHARDS-Gleichung mit Hilfe eines Finiten-Differenzen-Verfahrens in einem krummlinigen, orthogonalen Koordinatensystem gelöst (CASPER, 2002). Das Modell erlaubt aber auch die Simulation des Wassertransports in kleinen Einzugsgebieten. Hierzu werden die Hänge, die auf eine Hangfalllinie projiziert werden (vgl. Abschnitt 2.4.2, Abb. 2.11 und Abb. 2.12), über ein Gewässernetz gekoppelt, so dass eine räumlich verteilte 2D-Struktur entsteht (CASPER, 2002; MAURER, 1997a,b; ZEHE & MAURER, 2000).

Das Simulationsmodell CATFLOW verfügt aus Gründen der numerischen Stabilität über eine flexible Zeitschrittsteuerung. Sämtliche Prozesse der Wasserbewegung auf einem Hang werden durch Kopplung mehrerer Teilmodule mittels ineinander geschachtelter Berechnungsschleifen simuliert (Abb. 2.10). Allerdings führt dies bei ungünstigen hydraulischen Bedingungen zu sehr langen Berechnungszeiten. Diese Erfahrung wird von CASPER (2002) bestätigt. Die physikalische Begründetheit der Teilmodule variiert und kann für einzelne Teilmodelle so stark abstrahieren, dass man sie eher als konzeptionell bezeichnen sollte (Casper, 2002). Dies gilt z.B. für das Makroporenmodell oder die Interzeptionsverdunstung, die in einem einfachen Speichermodellansatz realisiert ist. Die Verdunstung wird nach dem Ansatz von Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) für jeden Oberflächenpunkt in einem Verdunstungsmodell (KOLLE & FIEDLER, 1997) gerechnet. Niederschlagswasser gelangt durch Infiltration über die Bodenmatrix bzw. durch Makroporen in den Boden. Die Makroporosität wird dabei durch eine oberhalb eines Grenzwassergehaltes linear ansteigende Leitfähigkeitserhöhung der oberen Horizonte simuliert (MAURER, 1997b; ZEHE, 1999; ZEHE & MAURER, 2000). Das Modell erlaubt die Berücksichtigung von Anisotropie. Überschüssiges Wasser bewegt sich als Oberflächenabfluss von Oberflächenknoten zu Oberflächenknoten. An jedem Knoten ist sowohl Infiltration als auch Exfiltration möglich. Die Fließgeschwindigkeit wird durch die Neigung und Rauigkeit der Oberfläche bestimmt. Am Hangfuß wird das Wasser in das Gerinnenetz übergeben. Dort wird es bis zum

Gebietsauslass geroutet (CASPER, 2002). Die Berechnung des Oberflächenabflusses und des Gerinneabflusses erfolgt nach dem Ansatz der kinematischen Welle von ST. VENANT (MAHMOOD & YEVJEVICH, 1975; MAURER, 1997).

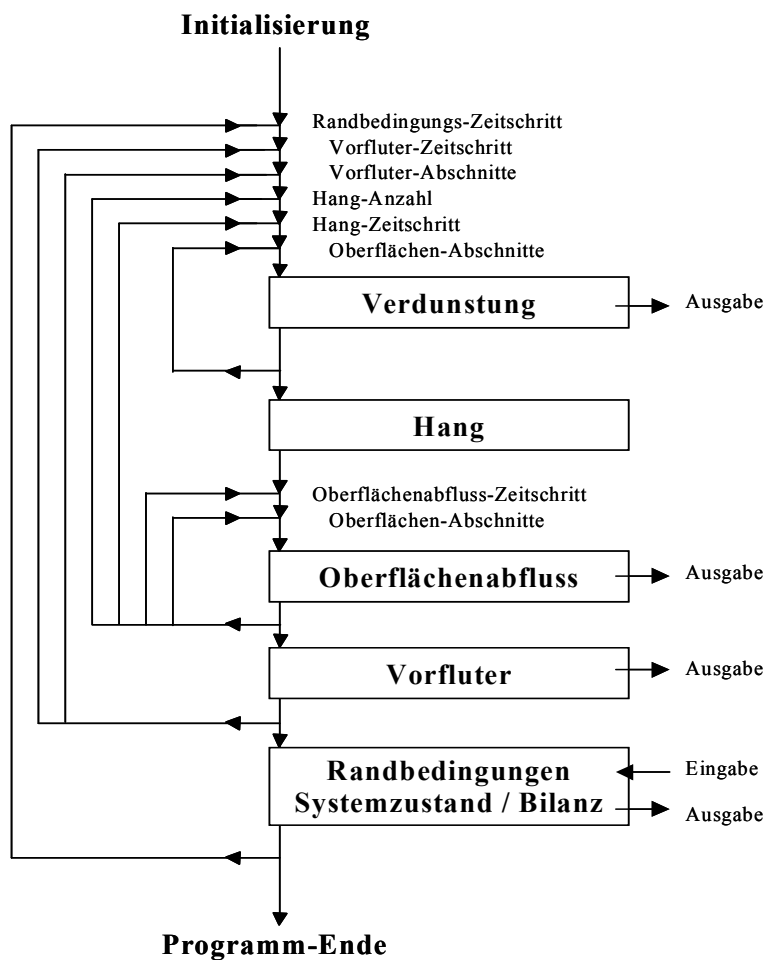
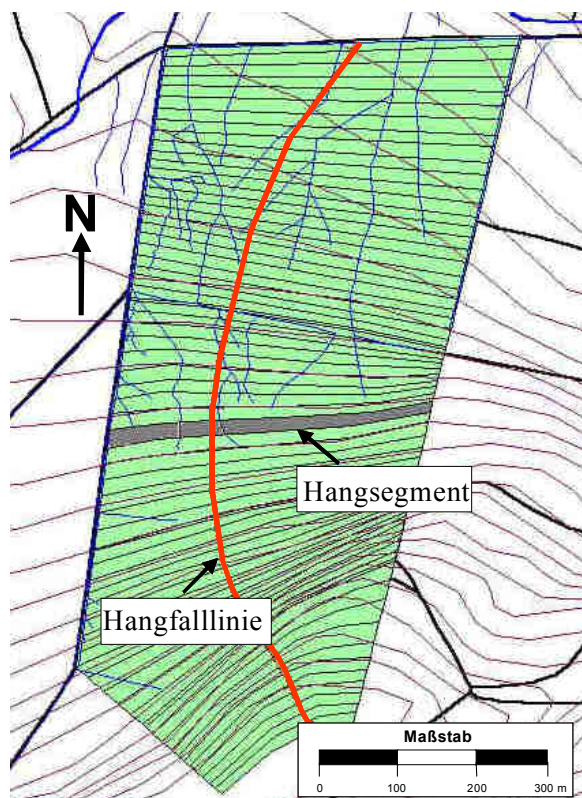


Abb. 2.10: Zeitschrittsteuerung und Prozesskopplung der Programm-Module von CATFLOW (aus MAURER, 1997)

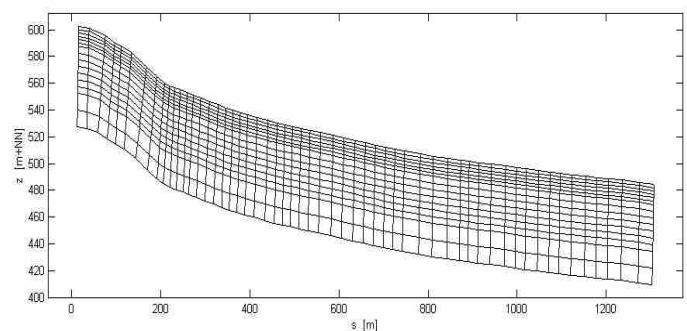
Die Berechnung der Wasserbewegung erfolgt in CATFLOW nicht über die Wassergehalte an den einzelnen Knotenpunkten sondern über Potenziale. Dies ermöglicht die Verwendung einer ganzen Reihe von Randbedingungen. So ist am unteren Systemrand neben einer Potenzial- und Fluss-Randbedingung auch eine Freie-Drainage- bzw. Gravitationsfluss-Randbedingung wählbar. Am Hangfuß kann eine Sickerrand-Bedingung oder eine Potenzial-Randbedingung gesetzt werden, die es erlaubt, eine Interaktion des Hangfußes mit dem Wasser im Gerinne darzustellen (ZEHE & MAURER, 2000). Basisabfluss kann in CATFLOW nur als Quellenterm entlang der Gewässerstrecke berücksichtigt werden und ist nicht als eigentlicher Grundwasserabfluss beschreibbar. Wasser, das das Kontrollvolumen des Hanges am unteren Systemrand verlässt, kann zwar als Grundwasserneubildung bilanziert werden, es wird aber sonst nicht berücksichtigt. Des weiteren besteht zur Zeit keine Möglichkeit mit CATFLOW eine Schneeakkumulation zu berücksichtigen, um so die Abflussdynamik infolge von einsetzendem Tauwetter beim Vorhandensein einer Schneedecke zu simulieren.

## 2.4.2 Diskretisierung

Die räumliche Diskretisierung der untersuchten Testflächen erfolgte in mehreren Schritten. Auf der Grundlage eines digitalen Geländemodells (DGM) wurde in einem Geoinformationssystem (ArcView/ArcInfo) jeder Hang entlang der Hangfalllinie (rote Linie in Abb. 2.11) in diskrete Teilabschnitte unterteilt, die hinsichtlich ihrer Bodenparameter und Landnutzungsmuster als quasi homogen betrachtet werden können. Zur Verdeutlichung ist ein solches Segment in Abb. 2.11 grau hervorgehoben. Nach der Festlegung der Knotenpunkte auf der Hangfalllinie wurden x-, y- und z-Koordinaten bestimmt und die zugehörige Fläche eines jeden Segments mittels



**Abb. 2.11:** Darstellung eines Berechnungshanges mit Hangsegmenten (gelb) und der roten Hangfalllinie



**Abb. 2.12:** Diskretisierung eines Hanges entlang der Hangfalllinie

THIESSEN-Polygonverfahren ermittelt. Die Geometrieinformationen wurden in das Programm MATLAB importiert und unter Zuhilfenahme spezieller ProgrammROUTINEN erfolgte dann für jeden Hang die Berechnung des krummlinigen orthogonalen Koordinatensystems. Die Lage der Knotenpunkte entlang der Hangfalllinie wurde in Abhängigkeit von den vorher festgelegten homogenen Teilflächen so gewählt, dass ihr Abstand zwischen 15 m und 20 m beträgt. In die Tiefe wurden über das 1,5 m mächtige Bodenprofil 16 Knoten verteilt. Dabei erfolgte in den obersten 30 cm eine Aufteilung in 5 cm Schritten, zwischen 30 cm und 1m wurden 10 cm Schritte gewählt und der verbleibende Bereich bis zur Endtiefe wurde in einer Abstufung von 25 cm vorgenommen. Damit kann der Tatsache Rechnung getragen werden, dass in den oberen Bodenhorizonten die Dynamik des Wassertransports ausgeprägter ist als im unteren Bereich. Abb. 2.12 zeigt ein Beispiel für eine so entstandene Hangdiskretisierung.

MAURER (1997a) begründet die Verwendung von krummlinigen, orthogonalen Koordinaten damit, dass es so leichter möglich ist unregelmäßig berandete Gebiete flexibel und (im Vergleich zu kartesischen Koordinaten) ohne Stufen zu beschreiben. So gestaltet sich die Formulierung der Randbedingungen für das numerische Schema zur Lösung der 2D-Richards-Gleichung einfacher. Diese lautet in einem zweidimensionalen, krummlinigen, orthogonalen Koordinatensystem  $(\xi, \eta)$  unter anisotropen Verhältnissen für einen Hang variabler Breite  $b$  folgendermaßen (MAURER, 1997a):

$$f^\xi f^\eta \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ bK(\Phi) f^\eta \left( k^{\xi\xi} \frac{1}{f^\xi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + k^{\xi\eta} \frac{1}{f^\eta} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ bK(\Phi) f^\xi \left( k^{\eta\xi} \frac{1}{f^\xi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + k^{\eta\eta} \frac{1}{f^\eta} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) \right] - S \quad (2.10)$$

mit:	$\Phi$	=	Gesamtpotenzial bzw. hydraulisches Potenzial
	$\Theta$	=	Bodenwassergehalt
	$b$	=	Variable Hangbreite
	$K$	=	skalare ungesättigte Leitfähigkeit
	$K$	=	$K = \begin{pmatrix} k^{\xi\xi} & k^{\xi\eta} \\ k^{\eta\xi} & k^{\eta\eta} \end{pmatrix}$ Tensor der relativen Leitfähigkeit für anisotropen Boden
	$S$	=	Senken- bzw. Quellterm
	$f^\xi, f^\eta$	=	Quadratwurzel der metrischen Koeffizienten des diskreten Gitters

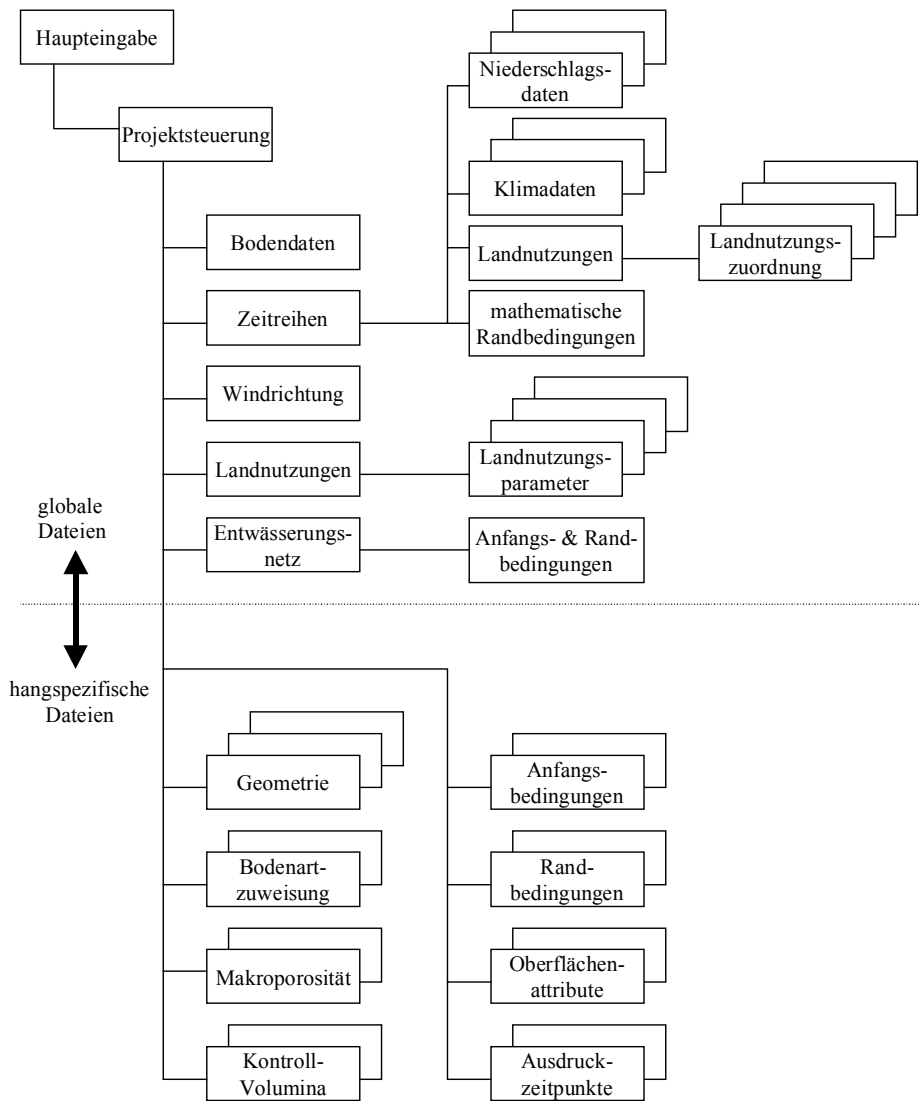
Zur Beschreibung des genauen Algorithmus zur Koordinatentransformation der kartesischen Koordinaten in krummlinige, orthogonale Koordinaten wird auf die Arbeiten von MAURER, (1997a) und KIEFER et al. (1990) verwiesen.

### 2.4.3 Parametrisierung

Zur Simulation des Wassertransports in CATFLOW über die beschriebenen Berechnungsmodulare wird eine umfangreiche Parametrisierung benötigt. Diese beinhaltet im wesentlichen Daten zur Beschreibung der Bodeneigenschaften, der klimatischen und modelltechnischen Randbedingungen, der Landnutzung sowie des Entwässerungsnetzes, sofern man über die Kopplung mehrerer Einzelhänge ein Einzugsgebiet modellieren will. Tabelle 2.2 enthält alle wesentlichen Eingabeparameter des Modellsystems. Sämtliche Veränderungen im betrachteten Modellgebiet werden über diesen Parametersatz erfasst und beschrieben.

**Tab. 2.2:** Eingabeparameter in CATFLOW

Bodendaten	Zeitreihen	Landnutzung	Entwässerungsnetz
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ spez. Speicherkoeffizient</li> <li>▪ hydraul. Leitfähigkeit</li> <li>▪ Bodenfeuchte</li> <li>▪ Feldkapazität</li> <li>▪ Saugspannung bzw.</li> <li>▪ Matrixpotenzial</li> <li>▪ Porengrößenverteilungsparameter</li> <li>▪ Anisotropiefaktoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Niederschlag</li> <li>▪ Lufttemperatur</li> <li>▪ Landnutzungen</li> <li>▪ Mathematische Randbedingungen</li> <li>▪ Luftfeuchtigkeit</li> <li>▪ Globalstrahlung</li> <li>▪ Nettostrahlung</li> <li>▪ Windgeschwindigkeit</li> <li>▪ Windrichtung</li> <li>▪ Zu- und Abflüsse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Blattflächenindizes</li> <li>▪ Bodenbedeckungsgrad</li> <li>▪ Wurzeltiefe</li> <li>▪ Pflanzenhöhe</li> <li>▪ Pflanzenalbedo</li> <li>▪ Oberflächenrauheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Breite, Länge und Tiefe des Vorfluters</li> <li>▪ Strahler-Ordnung</li> <li>▪ Größe des Einzugsgebiets</li> <li>▪ Startbedingungen</li> <li>▪ Randbedingungen</li> </ul>



**Abb. 2.13:** Hierarchie der Eingabedateien im Modellsystem CATFLOW (verändert nach MAURER, 1997)

Der modulare Aufbau von CATFLOW spiegelt sich auch in der Datenstruktur des Modells wider (Abb. 2.13) (MAURER, 1997a). Diese teilt sich in einen Datensatz, der die allgemeinen Bedingungen des Systems beschreibt und alle Eingabeparameter enthält (globale Dateien) sowie in die hangspezifischen Dateien, über die die Zuweisung der Parameter auf den entsprechenden Berechnungshang erfolgt. D.h. in den globalen Dateien werden die Landnutzungsparameter für verschiedene Waldformen festgelegt und über die hangspezifischen Dateien den entsprechenden Hangabschnitten zugewiesen. Das erlaubt eine einfache Szenarienvariation ohne erneute Eingabe des kompletten Parametersatzes. Auf die genaue Eingabestruktur mit allen Details kann hier nicht eingegangen werden, dazu sei auf die Programmdokumentationen von MAURER (1997b) und ZEHE & MAURER (2000) verwiesen.



### 3 Beschreibung der Untersuchungsgebiete

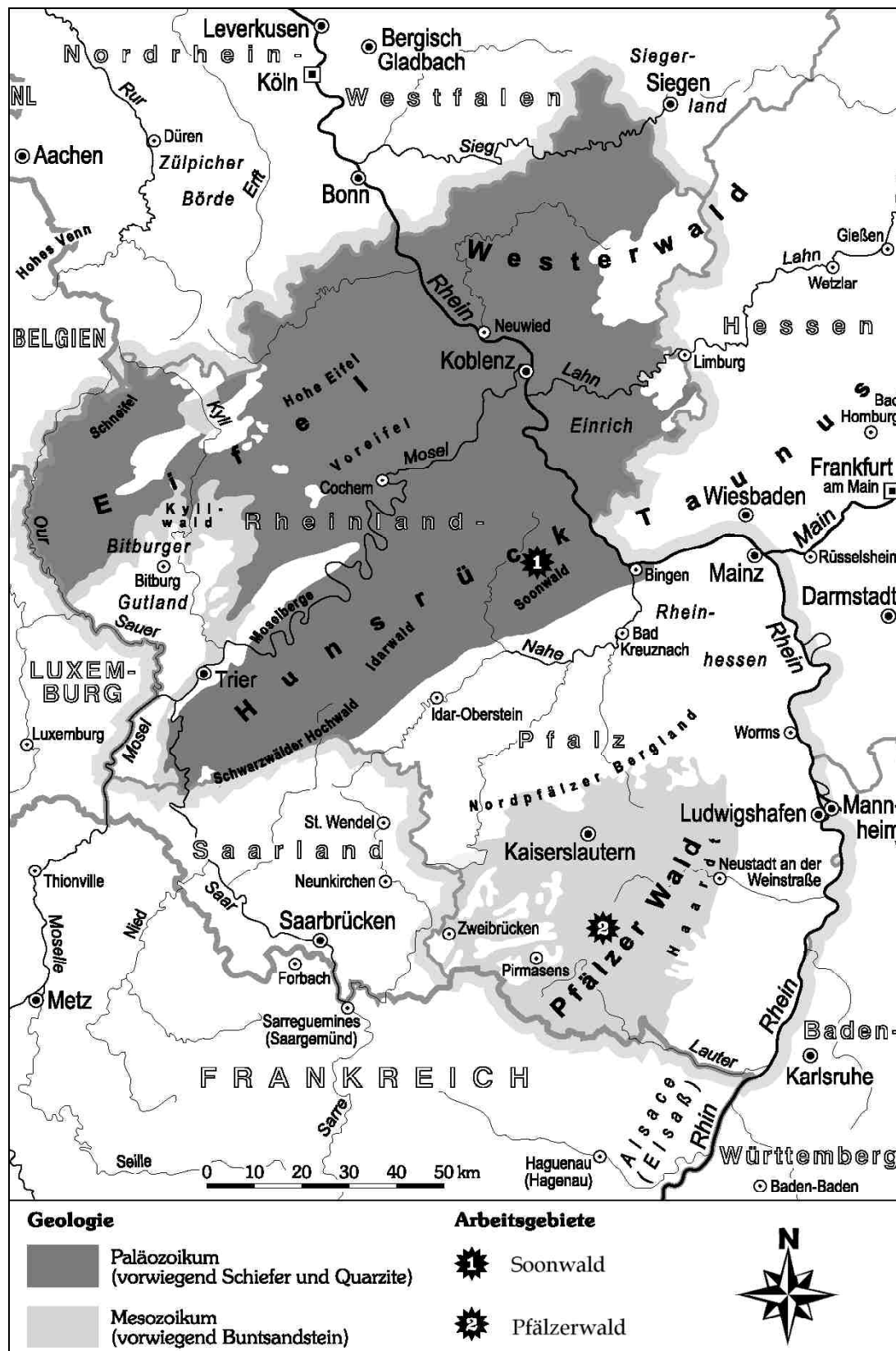


Abb. 3.1: Übersichtskarte von Rheinland-Pfalz mit der Lage der beiden Untersuchungsgebiete und den zugehörigen geologischen Einheiten

Zur Erhebung der Eingangsdaten und zur Plausibilisierung der Simulationsergebnisse aus den Modellrechnungen wurden in Absprache mit der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz zwei hydrogeologisch unterschiedliche, aber für Rheinland-Pfalz repräsentative Waldstandorte ausgewählt. Beim ersten Gebiet handelt es sich um eine etwa 0,5 km<sup>2</sup> große Hangfläche im Soonwald. Diese erstreckt sich entlang der beiden Höhenzüge des Hölzer Kopf (603 m ü. NN) und des Ellerspring (657 m ü. NN) und reicht bis zu den Talböden des oberen Gräfenbachs (480 m ü. NN). Der Bewuchs besteht am Oberhang zur Hauptsache aus einem Buchen-Eichenmischwald, der im Bereich des Mittelhangs in einen Fichtenbewuchs übergeht. Auf den Windwurfflächen des ehemals Fichten bestockten Unterhangs findet man Aufforstungen mit Laub- und Nadelbäumen. Daneben finden sich kleinere Bereiche mit Wiesen. Das zweite, etwa genauso große Testgelände befindet sich im Pfälzerwald östlich der Ortschaft Merzalben. Der Hang reicht von seinem höchsten Punkt am Mühlenberg bei ca. 540 m ü. NN bis hinab zum Floßbach (380 m ü. NN). Im Pfälzerwald ist der gesamte Modellhang von Oberhang bis hinunter zum Bach mit einem ca. 100jährigen Rotbuchenwald bestockt. Abb. 3.1 zeigt die Lage der beiden Untersuchungsgebiete in einer Übersichtskarte von Rheinland-Pfalz mit den dazugehörigen geologischen Einheiten. Die Charakterisierung der Gebiete hinsichtlich ihrer klimatischen und geologisch/bodenkundlichen Eigenschaften ist nachfolgend dargestellt.

### 3.1 Klima

Klimatisch sind sich die beiden Testgebiete sehr ähnlich. Sie stehen beide unter den für Mitteleuropa typischen Einflüssen sowohl atlantisch-maritimer als auch kontinentaler Luftmassen (BAUER, 1962; GEIGER 1981, 1987). Insgesamt kann das Klima als kühl gemäßigt bis gemäßigt klassifiziert werden (RHEINLAND PFALZ, Erläuterungen zur Forstlichen Standortaufnahme Merzalben 1998 und Neupfalz 1962).

Die Jahresmitteltemperatur liegt jeweils zwischen 6 und 7 °C, die Juli-Mitteltemperaturen betragen 15 °C im Soonwald (BAUER, 1962) und 16 °C im Pfälzerwald (GEIGER, 1981). Die Januar-Mitteltemperaturen liegen in beiden Fällen bei – 1,5 °C. Nachtfröste bis in den Mai hinein sind in beiden Gegenden keine Seltenheit.

Die Jahresniederschläge in beiden Gebieten liegen in etwa auf dem gleichen Niveau. Im Soonwald liegen sie zwischen 650 und 800 mm. Im Pfälzerwald werden Jahresniederschläge von 650 bis 900 mm erreicht. Nach der FORSTLICHEN STANDORTSAUFNAHME (1962, 1998) kann man sie als mäßig feucht bezeichnen. Laut FEZER (1981) zeigen die Niederschläge im Pfälzerwald zwei etwa gleich hohe Jahresmaxima, ein durch Zyklonalregen bedingtes Maximum im Dezember und ein durch Konvektionsregen bedingtes im Juli. Gleiches gilt für die Niederschlagsverteilung im Soonwald (BAUER, 1962). TEMPEL (2000) konnte diese Angaben für die extrem feuchten Jahre 1999 und 2000 im Soonwald bestätigen. Die Messstation am Forsthaus Thiergarten verzeichnete im Jahr 2000 mit 1062,8 mm Jahresniederschlag und einem Maximum von 199,6 mm im Juli das niederschlagreichste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahre 1930 (ÖFFENTLICHER ANZEIGER, Bad Kreuznach, 5.1.2001). Auch im Pfälzerwald gehörte dieser Zeitraum zu den feuchtesten seit Jahren (freundl. mündl. Mitteilung, Herr Huckschlag, FVA). Die Niederschläge fallen überwiegend als Regen und nur zum geringen Teil als Schnee. Man findet an ca. 50 Tagen im Jahr eine geschlossene Schneedecke vor. Nebel trägt in beiden Gebieten mit unterschiedlichen Anteilen zum Niederschlag bei. Im Soonwald findet man ca. 50 – 100 Nebeltage (RHEINLAND PFALZ, Erläuterungen zur Forstlichen Standortaufnahme Neupfalz, 1962). Im Pfälzerwald ist häufiger mit Nebeltagen (ca. 140) zu rechnen (RHEINLAND PFALZ, Erläuterungen

zur Forstlichen Standortaufnahme Merzalben, 1998). Die engen Täler begünstigen hier die Entstehung von Inversionswetterlagen und damit Talnebel. Insgesamt fallen in den höheren Lagen beider Gebiete etwas höhere Niederschläge als in den tiefer gelegenen Teilen.

Die Winde wehen überwiegend aus westlichen Richtungen von SW bis WNW und zum Teil aus nordöstlicher Richtung. Im Winterhalbjahr treten recht häufig Stürme auf. BAUER (1962) gibt für den Soonwald 25 - 30 Sturmtage an. Diese Stürme führten in den vergangenen Jahren teilweise zu schweren Windbruchschäden (Orkane Wiebke am 28.2.1990 und Lothar am 15.12.1999).

Weitere klimatische Details und Beschreibungen der saisonalen Unterschiede und Gemeinsamkeiten in beiden Gegenden finden sich in den FORSTLICHEN STANDORTSAUFNAHMEN sowie in den Arbeiten von BAUER (1962), FEZER (1981) und GEIGER (1981).

### **3.2 Geologisch-morphologische und bodenkundliche Beschreibung**

Hinsichtlich des geologischen Ausgangsgesteins, der Morphologie und der darauf entstandenen Böden bestehen in beiden Untersuchungsgebieten erhebliche Unterschiede. In den folgenden Absätzen sind diese, für den gesamten Wasserhaushalt und Wassertransport bestimmenden Faktoren, für die beiden Untersuchungsangflächen näher beschrieben.

Auf eine Beschreibung der geologischen Entwicklung und der Paläogeographie sowie der genauen Stratigraphie wird an dieser Stelle verzichtet. Informationen hierzu für den Bereich des Soonwalds bzw. für den gesamten Hunsrück finden sich in den Arbeiten u.a. von KNEIDL (1980, 1993), LEPPLA (1895), MARTIN (1980), MEYER & STETS (1975, 1980), MITTMEYER (1974, 1996) WERNER (1950, 1952) und WILDBERGER (1992). Für den Pfälzerwald liefern die Arbeiten von DACHROTH (1988), GEIGER (1987) KONRAD (1979, 1990) und insbesondere SPUHLER (1957) einen Überblick zur Geologie und Stratigraphie. Der Aufbau der Deckschichten im Pfälzerwald wird im Aufsatz von HEITELE (1972) erläutert. Informationen zur näheren Umgebung des Testgeländes liefert darüber hinaus die Diplomarbeit von MARTUS (1996), die im Rahmen der Überarbeitung der geologischen Karte des Blattes Merzalben erstellt wurde.

#### **3.2.1 Soonwald**

Der konvex-konkave Hang im Soonwald auf der Nordseite des Hölzer Kopfes besitzt folgenden geologischen Bau: Im breiten, flach-konkaven Unterhanggebiet stehen Tonschiefer, die sog. bunten Schiefer (Unterdevon, Gedinne) an. Am darüber liegenden Mittelhang folgen die Hermeskeilschichten, Tonschiefer mit sandigen Einschaltungen und, nach oben zunehmend, eingelagerten Quarzitbänken (Unterdevon). Am steilen Oberhang stehen weiße Taunusquarzite an, die infolge ihrer Klüftigkeit im Periglazialklima der Eiszeiten mechanisch intensiv verwitterten und daher heute von einer Grobschuttdecke mit Blockmeercharakter überzogen sind. Kräftige eiszeitliche Solifluktion bewirkte eine Schuttverlagerung hangab, so dass die Hermeskeilschichten und selbst der obere Abschnitt der Tonschiefer überdeckt wurden. Der an der Schichtgrenze zu den Tonschiefern vorhandene Quellhorizont wirkt daher geringfügig hangabwärts verschleppt. Am Mittelhang dünnt die Schuttdecke rasch aus. Tonreiches Substrat dominiert den gesamten Unterhang. In allen Teilen des Hanges besitzt die Schuttdecke, die als quartäre Deckschicht bezeichnet wird, eine vertikale Zweiteilung in eine lössreiche obere, sog. Hauptlage und eine lössfreie, aber stark tonhaltige, mehr oder weniger schuttreiche Basislage. Es handelt sich

um zähplastischen tertiären Ton, der im wesentlichen aus dem Zweischicht-Tonmineral Kaolinit aufgebaut und daher nur bedingt quellfähig ist. Diese, von MÜCKENHAUSEN (1954, 1958) als „Graulehm“ bezeichnete Basislage, wirkt am Unterhang stark wasserstauend. Ähnliche Verhältnisse finden sich im gesamten Rheinischen Schiefergebirge und sind dort u.a. von SEMMEL (1968), SPIES (1986), FELIX-HENNINGSSEN (1990) und FELIX-HENNINGSSEN et al. (1991) beschrieben worden.

In Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat wirkte sich die holozäne Bodenbildung auf den einzelnen Hangabschnitten unterschiedlich aus. Auf dem Bergrücken entstand unter Buchenwald eine mittelgründige Lockerbraunerde (P7), die am Oberhang in eine Ranker-Braunerde übergeht (P6). Am oberen Mittelhang (P5) weist diese im Unterbodenbereich (Basislage) bereits deutliche Spuren einer Pseudovergleyung auf. Am unteren Mittelhang erfolgt der Übergang zu einem schuttreichen Pseudogley (P4). Stagnogleye auf stark toniger Basislage stellen die Böden am Unterhang dar (P3, P2). In der Nähe des Gräfenbaches findet sich ein Fluvisol (P1) auf geschichteten fluvialen Sedimenten. Er ist nur schwach hydromorph beeinflusst. Abb. 3.2 zeigt eine Skizze des Hangprofils sowie der Bodenprofile, die von der Arbeitsgruppe Prof. Grunert aufgenommen und illustriert wurden (BOTT et al., 2001). Eine detailliertere Beschreibung der Bodenprofile entlang der Hangcatena findet sich in der Arbeit von TEMPEL (2000).

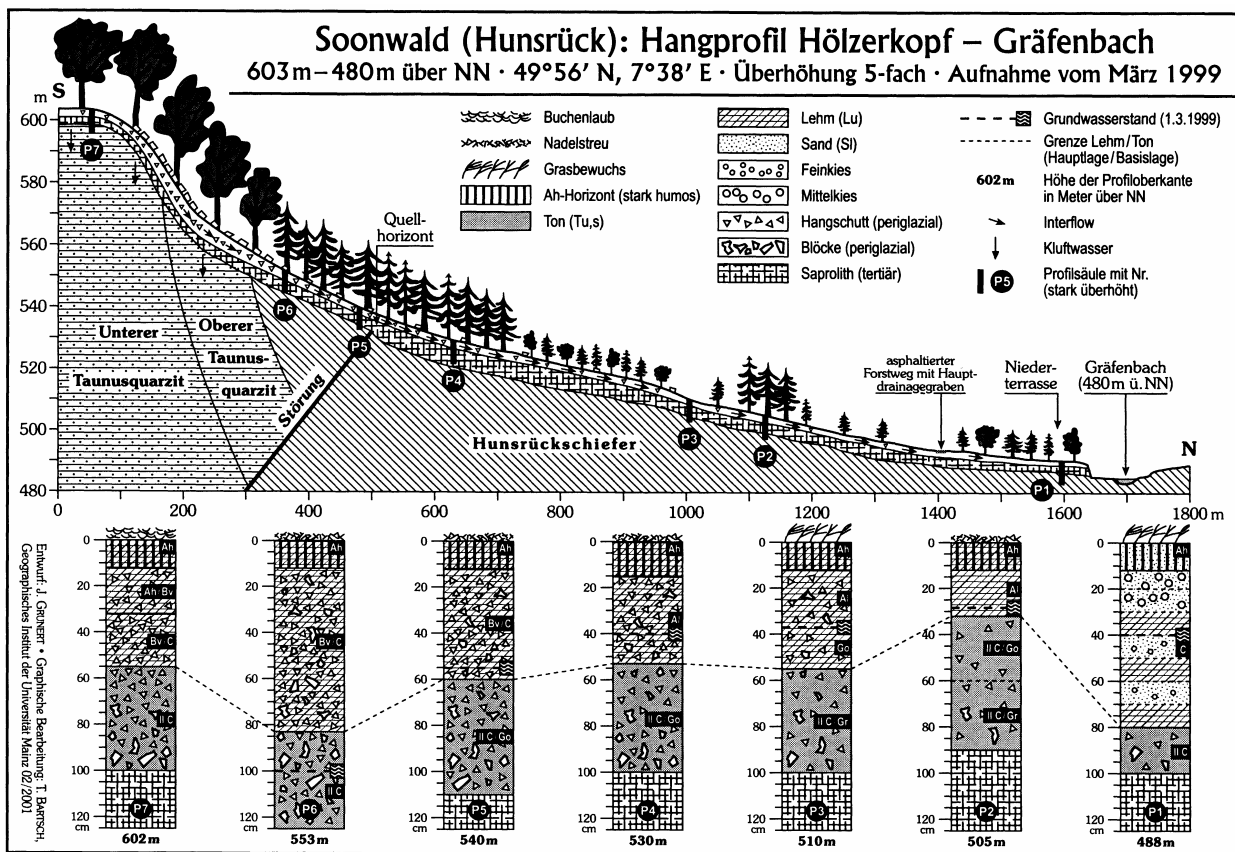


Abb. 3.2: Hangprofil Testgebiet Soonwald, Hölzerkopf – Gräfenbach

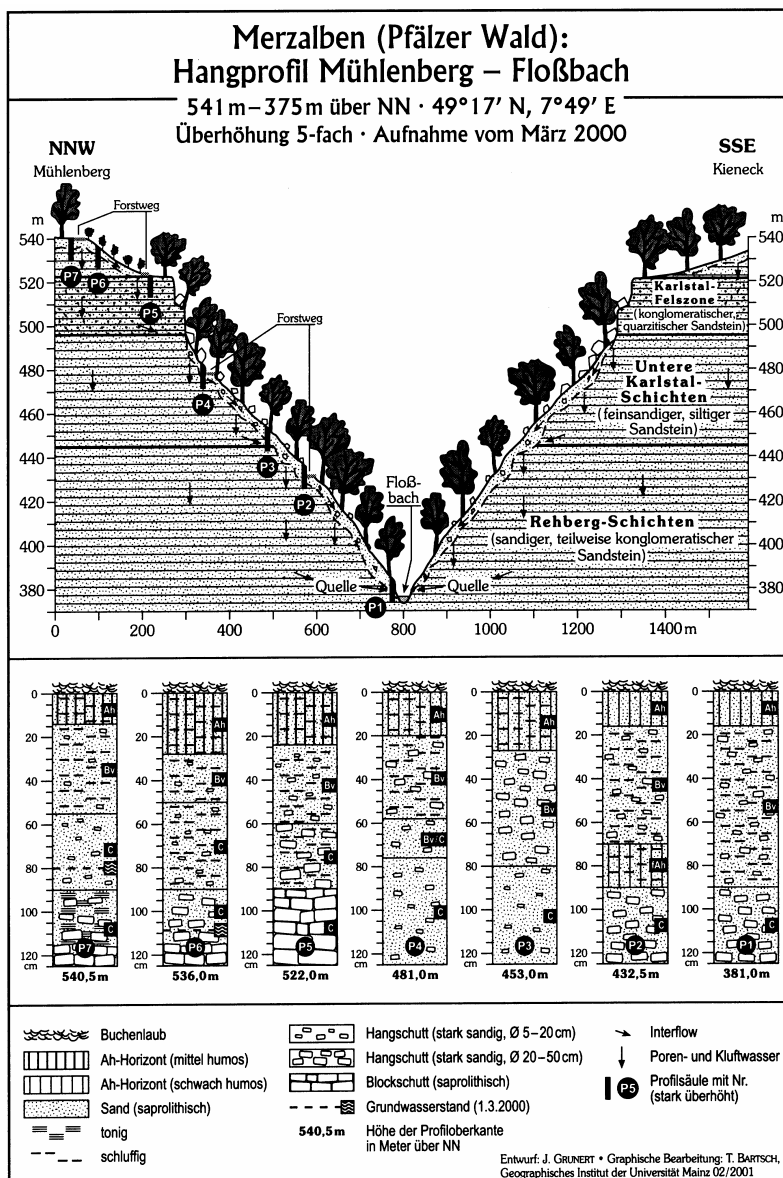
### 3.2.2 Pfälzer Wald

Der gestreckte sehr steile Untersuchungsang im Pfälzerwald auf der Südostseite des Mühlberges (540 m ü. NN) ist geologisch wie folgt aufgebaut: Am Unterhang stehen, von dünnen

Konglomeratbänken durchzogene, Sandsteine an (Rehberg-Schichten). Infolge ihrer Widerständigkeit entstand bei der Tiefenerosion des Floßbaches ein mit 40° Neigung ungewöhnlich steiler Hangabschnitt. Die gut 100 m mächtige Schichtfolge wird von weniger widerständigen, feinsandig-siltigen Sandsteinen (untere Karlstal-Schichten) überlagert. Wegen der größeren Erosionsanfälligkeit beträgt die Neigung am Mittelhang daher "nur" 35°. Am extrem steilen (45°) Oberhang stehen die konglomeratischen teilweise quarzitischen oberen Karlstal-Schichten an, die eine durchgängige Felszone mit einer markanten oberen Geländekante bilden. Riesige Blöcke bedecken den Hang unterhalb der Felsen. Die Schichten fallen alle in einem sehr flachen Winkel von 1-2° nach NW ein (MARTUS, 1996). Oberhalb der Hangkante in 520 m dehnt sich das sanft ansteigende Plateau aus, dessen Untergrund aus feinsandigen Sandsteinen besteht. Auf ebenen Bereichen und in flachen Mulden kommt es, begünstigt durch die Akkumulation von organischem Material, teilweise zu Vernässungen. Dies ist beispielsweise im Bereich des nur 1 km entfernten Messfeldes der Forstlichen Versuchsanstalt Trippstadt der Fall.

Der gesamte Steilhang, mit Ausnahme der Felsausbisse, ist von einer mindestens 1 m mächtigen quartären (periglazialen) Deckschicht überzogen, die aus rotem bzw. buntem, lehmigen Sand mit eingelagertem Sandsteinschutt besteht. Eine Gliederung in Basislage und Hauptlage ist kaum möglich. Die holozäne Bodenbildung führte in allen Hangabschnitten zur Entstehung skelettreicher Braunerden, die teilweise Podsolierungsspuren erkennen lassen. Auf dem Plateau kam es stellenweise zur Pseudovergleyung. Die zum Teil sehr großen Gesteinsbrocken am Hang stammen von Felsabbrüchen am Oberhang und bilden unterhalb der Karlstaler Felszone einen durchgehenden Saum. Einzelne Blöcke gelangen auch in tiefere Hanglagen. In Abb. 3.3 ist das, ebenfalls von der Arbeitsgruppe Prof. Grunert aufgenommene und skizzierte Profil des Untersuchungsangs dargestellt (BOTT et al., 2001). Ergänzt wird die Abbildung durch die Darstellung der aufgenommenen Bodenprofile.

kam es stellenweise zur Pseudovergleyung. Die zum Teil sehr großen Gesteinsbrocken am Hang stammen von Felsabbrüchen am Oberhang und bilden unterhalb der Karlstaler Felszone einen durchgehenden Saum. Einzelne Blöcke gelangen auch in tiefere Hanglagen. In Abb. 3.3 ist das, ebenfalls von der Arbeitsgruppe Prof. Grunert aufgenommene und skizzierte Profil des Untersuchungsangs dargestellt (BOTT et al., 2001). Ergänzt wird die Abbildung durch die Darstellung der aufgenommenen Bodenprofile.



**Abb. 3.3:** Hangprofil Testgebiet Pfälzerwald, Mühlenberg - Floßbach - Kieneck

## 4 Feldbefunde

Im Vorfeld und begleitend zu den Niederschlag-Abfluss-Simulationen mit CATFLOW, wurden Geländeuntersuchungen durchgeführt. Diese dienten dem Zweck, einerseits ein besseres System- und Prozessverständnis zu erlangen und andererseits die Modellresultate zu überprüfen und zu plausibilisieren. Im Wesentlichen wurden die bodenhydraulischen Parameter erfasst und das „natürliche“ Abflussverhalten sowie das Verhalten von Testflächen bei künstlicher Beregnung in den Gebieten Soonwald und Pfälzerwald untersucht. Infiltrationskapazität, Wasserleitfähigkeit und das Abflussverhalten wurden bestimmt. Aufgrund erster Geländebeobachtungen und den Ergebnissen der Laboruntersuchungen wurde der Schwerpunkt der Geländearbeiten in das Gebiet Soonwald gelegt.

### 4.1 Untersuchung des Bodens

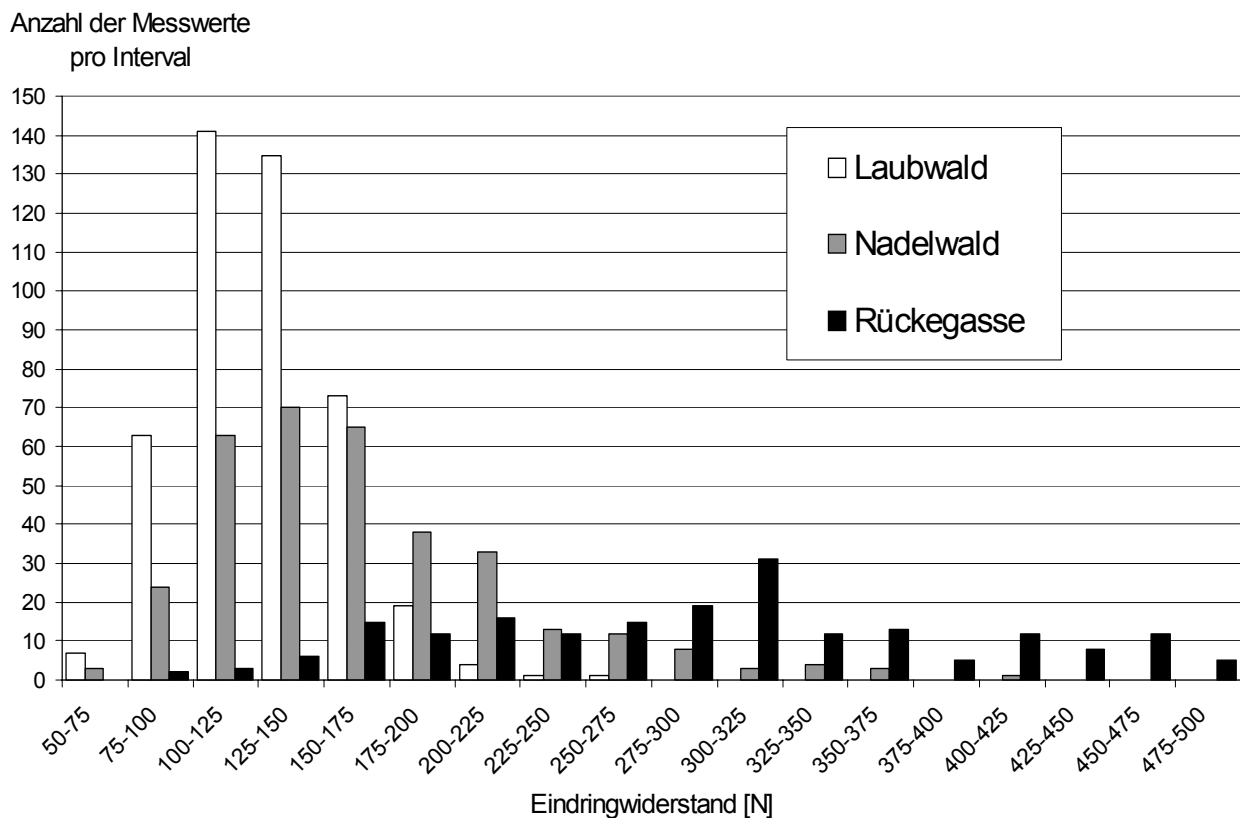
Zunächst erfolgte nach AG BODEN (1994) in Analogie zur FORSTLICHEN STANDORTSAUFNAHME (1996) die Aufnahme der Bodenprofile an beiden Untersuchungshängen. Dazu wurden jeweils sieben Profilgruben angelegt. Zusätzlich wurden mit dem Bohrstock entlang der Hangcatena in beiden Testgebieten weitere Profile aufgenommen. Im Pfälzerwald sind am gesamten Hang skelettreiche Braunerden, die teilweise Podsolierungsspuren erkennen lassen, ausgebildet. Auf dem Plateau trifft man zudem stellenweise pseudovergleyte Bereiche (vgl. Abschnitt 3.2.2). Im Soonwald wirkte sich die holozäne Bodenbildung etwas differenzierter aus. Am Hangtop herrscht eine mittelgründige Lockerbraunerde vor, die im Bereich des Oberhangs in eine Ranker-Braunerde übergeht. Weiter hangabwärts tritt eine zunehmende Pseudovergleyung auf, die über schuttreichen Pseudogley am Mittelhang schließlich in einen Stagnogley mit stark toniger Basislage am Unterhang übergeht (vgl. Abschnitt 3.2.1). Eine detaillierte Beschreibung der Böden entlang der Hangcatena im Untersuchungsgebiet Soonwald findet sich in der Diplomarbeit von TEMPEL (2000).

In den Profilgruben entlang der Hangcatenen wurden in den beiden Untersuchungsgebieten sowohl gestörte Bodenproben zur Korngrößenanalyse, als auch etwa 350 ungestörte Stechzylinderproben zur direkten Bestimmung der Bodenwassercharakteristik (pF-Kurve) nach DIN ISO 11274 (2001) gewonnen. Dabei gestaltete sich insbesondere die Entnahme der Stechzylinderproben aufgrund des hohen Skelettanteils (Korngrößen  $> 2$  mm) der Böden als äußerst schwierig. Aus einigen Horizonten konnte zum Teil keine Probe entnommen werden.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123 (1996) ergab nach der Einordnung in die Bodenartenbezeichnungen der AG BODEN (1994) bzw. der DVWK Regeln 129 und 136 (DVWK, 1995a und 1999b) für das Testgebiet Soonwald siltig-tonige Lehme im Bereich des Mittel- und Unterhangs sowie sandig-lehmige Substrate am Oberhang. Im Untersuchungsgebiet Pfälzerwald herrschen lehmige Sande bis hin zu reinen Sanden vor. Die Feldkapazität der Böden im Pfälzerwald liegt aufgrund der gefundenen Porengrößenverteilung erwartungsgemäß unter der im Soonwald. Die Böden des Testhangs im Pfälzerwald weisen in erster Linie Grobporen auf, während im Soonwald Fein- und Mittelporen vorherrschend sind. Die Ergebnisse beider Untersuchungen sind im Anhang tabellarisch aufgeführt (Abschnitt 10.1, Tab. A1 bis A6). Die ermittelten Werte zeigen typische Größenordnungen für ungestörte Böden von Waldstandorten an, wie sie auch in einer Studie von SCHNEIDER (1997) bestimmt wurden.

## 4.2 Bestimmung der Eindringwiderstände

Die im vorherigen Abschnitt gefundenen Ergebnisse gelten nur für den ungestörten Waldboden. Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 ausgeführt, führt die Befahrung der Waldflächen mit schweren Arbeitsmaschinen zu Gefüge- und Strukturänderungen in den Böden. Diese Änderungen des Bodenzustands durch Verdichtung lassen sich durch die Messung des Eindringwiderstandes auf einfache Weise empirisch ermitteln (BECKER et al., 1986, 1989; EISENBARTH, 1997; HOFMANN, 1989). Zur Bestimmung des Eindringwiderstandes wurde ein Handpenetrometer der Firma Eijkelkamp verwendet. Dabei wird eine genormte Kegelspitze mit konstantem Vorschub in den Boden gedrückt und die dazu benötigte Kraft gemessen. Die Untersuchungen wurden im Pfälzerwald im Bereich der Hochlagen (nur hier treten Rückegassen auf) sowohl unter Laub- als auch Nadelwaldbeständen durchgeführt. Es wurden jeweils die obersten 30 cm des Bodenprofils untersucht. Im Testgelände Soonwald konnten aufgrund des Skelettgehaltes und der starken Durchwurzelung keine repräsentativen Messungen durchgeführt werden.



**Abb. 4.1:** Eindringwiderstände in Bereich der Höhenlagen im Untersuchungsgebiet Pfälzerwald

Abb. 4.1 zeigt die Ergebnisse von ca. 1200 Einzelmessungen. Dargestellt sind die Messwerte der unterschiedlichen Bestockungen und die der Rückegassen. Die Rückegassen wurden nicht nach unterschiedlichen Waldtypen getrennt. Es zeigt sich deutlich, dass im Bereich der Rückegassen die Eindringwiderstände um das zwei- bis dreifache höher liegen, als bei ungestörtem, unbefahrenem Waldboden. Die gemessenen Eindringwiderstände für die ungestörten Waldflächen lassen sich sehr gut mit den Ergebnissen von EISENBARTH (1997) vergleichen, der ebenfalls Werte im Bereich 75 bis 175 N/cm<sup>2</sup> für Waldstandorte im Pfälzerwald bestimmt hat. Des weiteren kann man eine leichte Verschiebung unter Nadelwald hin zu höheren Eindringwiderständen feststellen. Dies lässt sich möglicherweise mit der stampfenden Wirkung der flachwurzelnden Nadelbäume infolge von Winddruck in der Baumkrone korrelieren (HARTGE et al.,

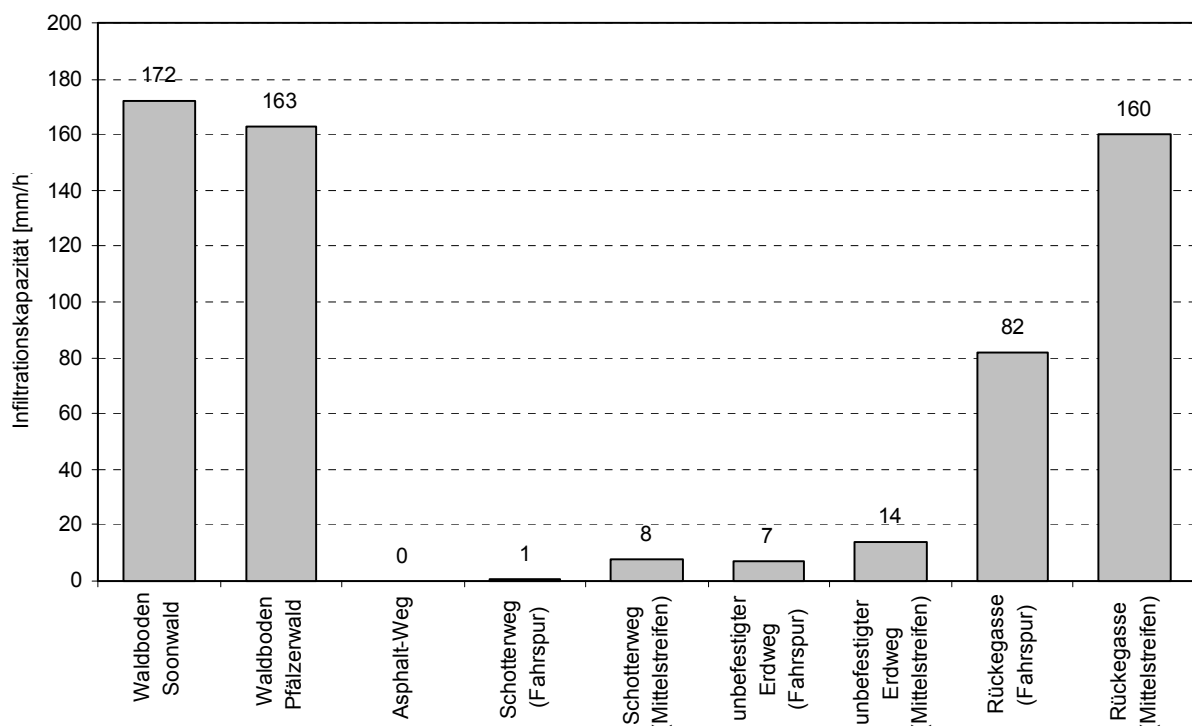
1983; SCHÜLER et al., 2002). Allerdings ist der Unterschied in den gemessenen Werten nicht ausreichend, um diese These zu untermauern. REHFUSS (1990) schreibt, dass die befürchtete Verschlechterung des Bodengefüges durch Verdichtung infolge des Fichtenanbaus nirgends nachgewiesen werden konnte.

### 4.3 Infiltrationskapazität und Wasserleitfähigkeit der Böden

Zur Bestimmung der Infiltrationskapazität der Böden in den beiden Testgebieten wurden Be-  
regnungs- und Infiltrationsversuche auf unterschiedlichen Forstwegen, Zubringerwegen, Rücke-  
gassen und ungestörten Waldflächen durchgeführt. Ferner wurde die gesättigte hydraulische  
Leitfähigkeit mit einem Guelph-Permeameter an verschiedenen Hangpositionen im Soonwald  
sowie im Pfälzerwald gemessen (GIEK, 2001).

#### 4.3.1 Bestimmung der Infiltrationskapazität mit dem Doppelring-Infiltrometer

Das Doppelring-Infiltrometer nach DIN 19628 (1972) wurde zur Bestimmung der Infiltrations-  
raten auf ungestörtem Waldboden, verdichteten Rückgassen und Fahrspuren in den Flächen  
sowie auf befestigten Wegen und Zubringern eingesetzt. Bei den letztgenannten wurde die  
Methode leicht abgewandelt, da die Ringe nicht in den Boden eingeschlagen werden konnten.  
Sie wurden auf die Messstelle gestellt und mit Ton abgedichtet (KRASS et al., 1999).



**Abb. 4.2:** Infiltrationskapazität des Waldbodens und der verschiedenen Forstwegtypen

Die Mittelwerte der gemessenen Infiltrationsraten beider Untersuchungsgebiete und der unter-  
schiedlichen Wegtypen sind in Abb. 4.2 dargestellt. Es zeigt sich, dass unabhängig vom Unter-  
suchungsgebiet, die Infiltrationskapazität des Waldbodens mit Werten von ca. 170 mm/h sehr  
hoch ist. Teilweise wurden Extremwerte von über 1000 mm/h ermittelt, die aber in der Abbil-



derung nicht berücksichtigt wurden, da sie höchst wahrscheinlich die Infiltration in ein ausgeprägtes Makroporensystem belegen. Bei den Wegetypen fällt auf, dass die Unterscheidung in Asphalt-, Schotter-, befestigte und unbefestigte Erdwege, die in Anlehnung an BUWAL (1995), DVWK (1999), UHLIG (1998) gewählt wurde, hinsichtlich der Infiltrationseigenschaften keinen großen Sinn macht. Zwar weisen sowohl Schotterweg als auch die Erdwege noch minimale Restinfiltrationsraten auf, doch liegen diese in erster Linie im Bereich des Mittelstreifens. Insgesamt betrachtet können somit die genannten Wegetypen als 100 % abflusswirksam angesehen werden. Lediglich die Rückegassen liefern eine deutliche Restinfiltrationskapazität, die etwa bei 50 % des ungestörten Waldbodens liegt. Damit liefert die Anwendung des Doppelring-Infiltrometers trotz der hinlänglich bekannten Schwächen der Methode (Beachten der Vorfeuchte, wechselnder Wasserstand im Infiltrometer) zumindest eine relative Aussage zu den verschiedenen Infiltrationskapazitäten. SCHWARZ (1985) rät davon ab, das Doppelring-Infiltrometer auf bewaldeten Flächen einzusetzen, da die minimale Infiltrationsrate von Waldstandorten aufgrund der hohen kleinräumigen Variabilität der Durchlässigkeiten mit vertretbarem Aufwand nicht genau und repräsentativ zu bestimmen ist. Es müssten vielmehr mehrere hundert Messungen durchgeführt werden. Er schlägt alternativ Verfahren vor, die mit akzeptablem Aufwand eine erheblich größere Fläche erfassen. Es bleibt daher festzuhalten, dass die absoluten Zahlenwerte der Messergebnisse mit Vorsicht zu behandeln sind. Dennoch lassen sich Tendenzen eindeutig erkennen.

#### 4.3.2 Bestimmung der Infiltrationskapazität mittels Beregnungsexperimenten

Aufgrund der beschriebenen Schwächen der Methode mit dem Doppelring-Infiltrometer wurden ebenfalls Beregnungsexperimente in beiden Untersuchungsgebieten an unterschiedlichen Standorten durchgeführt. Dabei wurden ein kleiner transportabler Niederschlagssimulator und eine größere Sprüh-Beregnungsanlage eingesetzt (GIEK, 2001).

Der Kleinregner besteht aus einer Zeltkonstruktion von 1,5 m Seitenlänge und einer Höhe von ca. 3 m (Abb. 4.3). Mit diesem kann eine, durch Stahlbleche begrenzte, Fläche von 0,64 m<sup>2</sup> beregnet werden (Abb. 4.4). An einer Seite wird eine Auffangrinne eingesetzt, die den eventuell auftretenden Oberflächenabfluss auffängt. Die Beregnung erfolgt über eine zentral befestigte Düse. Dabei sind variable Beregnungsintensitäten einstellbar.



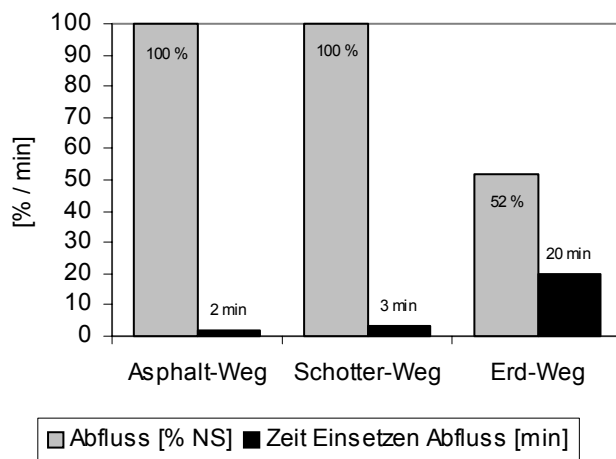
**Abb. 4.3:** Kleinregner auf befestigtem Fahrweg (aus GIEK, 2001)



**Abb. 4.4:** Beregnete Fläche des Kleinregners während einer Beregnung (Foto, GIEK)

Bei sämtlichen Beregnungen mit dem Kleinregner auf ungestörtem Waldboden bei unterschiedlichen Beregnungsintensitäten wurde kein Oberflächenabfluss festgestellt. Das komplette Wasser infiltrierte sowohl bei den Böden im Pfälzerwald als auch im Soonwald. Daneben wurde ein Asphaltweg beregnet und erwartungsgemäß lief alles Niederschlagswasser in Form von Oberflächenabfluss ab. Ähnlich waren die Resultate für geschotterte Wege und sonstige befestigte Zubringerwege. Hier lag der Abfluss immer bei mindestens 80 % des simulierten Niederschlags. Bei den Rückegassen ergab sich ein etwas uneinheitliches Bild, hier lagen die Abflussanteile zwischen fast null und 30 % des aufgebrachten Niederschlags.

Mit der Anlage zur Großberegnung konnte eine Fläche von jeweils 10 m<sup>2</sup> beregnet werden. Es wurde ein asphaltierter Forstweg, ein geschotterter Weg und ein unbefestigter Erdweg mit leichtem Grasbewuchs zwischen den Fahrspuren beregnet. Daneben wurden in einem Fichten- und Buchenwald des Soonwaldes sowohl der ungestörte Waldboden als auch eine Rückegasse beregnet. Im Bereich des Pfälzerwaldes wurde nur in einem Buchenwald der ungestörte Boden beregnet. Die Beregnungsintensitäten lagen für die Waldböden im Pfälzerwald bei 75 mm/h und für den Soonwald bei 50 mm/h. In beiden Fällen wurde kein Oberflächenabfluss festgestellt. Das komplette Niederschlagswasser infiltrierte. Allerdings wurde es im Untersuchungsgebiet



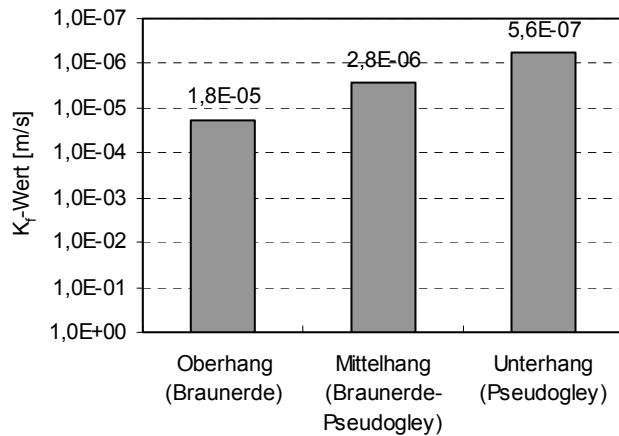
**Abb. 4.5:** Abfluss von verschiedenen Wegetypen bei künstlicher Beregnung

Soonwald nach einer kurzen Passage im Boden als Zwischenabfluss oberhalb der vergleyten Bodenhorizonte wieder abflusswirksam. Leider war hier keine Messvorrichtung installiert um den Interflow aufzufangen und zu bilanzieren. Im Pfälzerwald ist das komplette Wasser nach der Infiltration tiefenversickert. Hier trat keinerlei Zwischenabfluss auf. In Abb. 4.5 ist der Abflussanteil in Prozent des Niederschlags (NS) für drei unterschiedliche Wegetypen aufgetragen. Zusätzlich zum Anteil des Abflusses ist der Zeitpunkt des Einsetzens des Abflusses dargestellt.

### 4.3.3 Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit mit dem Permeameter

Durch den Einsatz eines Guelph-Permeameters war es möglich Nährungswerte für die gesättigte Leitfähigkeit der Böden in den beiden Testgebieten zu ermitteln. In einem kleinen Bohrloch wird ein fester Gradient angelegt und die Infiltrationsrate aufgenommen. Da sich bis zum Erreichen einer konstanten Sickerrate gesättigte Bedingungen eingestellt haben, ist es durch erneute Messung bei einem höheren Gradienten möglich, die gesättigte Leitfähigkeit zu ermitteln.

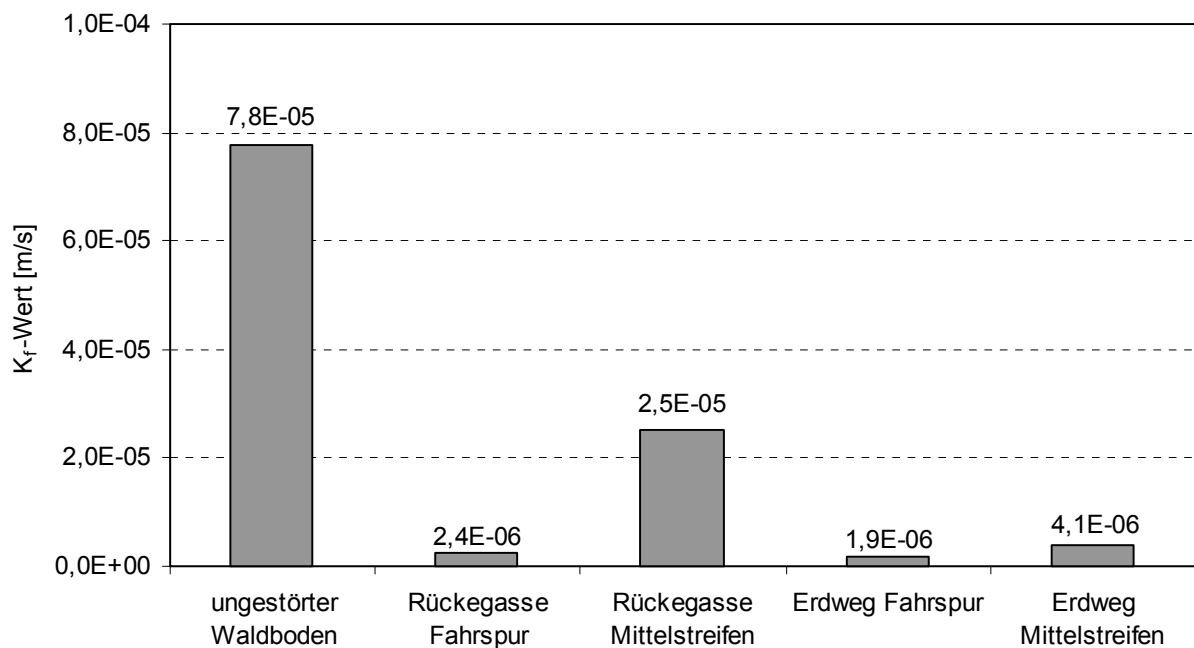
Wie in den vorangegangenen Abschnitten ausgeführt, ist die Infiltrationskapazität der Waldböden im Soonwald durchgehend hoch. Die, mit dem Guelph-Permeameter bestimmten, gesättigten Wasserleitfähigkeiten dagegen unterscheiden sich im Unterboden entlang der im Untersuchungsgebiet angelegten Hangcatena deutlich. Die Werte der Wasserleitfähigkeit können aufgrund der hohen Skelettgehalte und der Heterogenität der Böden aber nur Anhaltswerte liefern. Sie sind in Abb. 4.6 dargestellt. In den Lockerbraunerden auf dem Hölzerkopf selbst



**Abb. 4.6:** Gesättigte Wasserleitfähigkeit unverdichteter Böden im Testgebiet Soonwald

sowie auf dem von Solifluktionsschutt bedeckten Oberhang erreichen die in 15–20 cm Bodentiefe gemessenen Wasserleitfähigkeiten erwartungsgemäß hohe Werte. Bereits die auf den Braunerde-Pseudogleyen am Mittelhang gemessenen Werte liegen dagegen in einem Bereich, der bei Niederschlägen höherer Intensität lateralen Abfluss erwarten lässt. Die Wasserleitfähigkeit der Pseudogleye im unteren Hangbereich ist so gering, dass es bereits bei geringen Niederschlagsintensitäten zu Interflow kommt. TESCH (2002) fand für den Bereich des unteren Mittelhanges  $K_f$ -Werte von  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Im Bereich Pfälzerwald sind die gesättigten Leitfähigkeiten entlang des gesamten Hanges relativ gleichbleibend. Sie bewegen sich zwischen  $4 \cdot 10^{-5}$  m/s bis  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s im Bereich der Bodentiefe von etwa 20 cm. Sie stimmen damit sehr gut mit den angegebenen Werten von HEITELE (1972) überein. GIEK (2001) untersuchte zudem die Leitfähigkeiten im Bereich von Rückegassen und Erdwegen im Pfälzerwald (Abb. 4.7). Es zeigt sich deutlich, dass die Leitfähigkeiten unter Rückegassen und Erdwegen aufgrund der Verdichtung gegenüber dem ungestörten Waldboden herabgesetzt sind. Insgesamt liegt die Verminderung der Leitfähigkeit bei 1 bis 1,5 Größenordnungen. Lediglich zwischen den Fahrspuren im Mittelstreifen sind die  $K_f$ -Werte noch etwas höher.

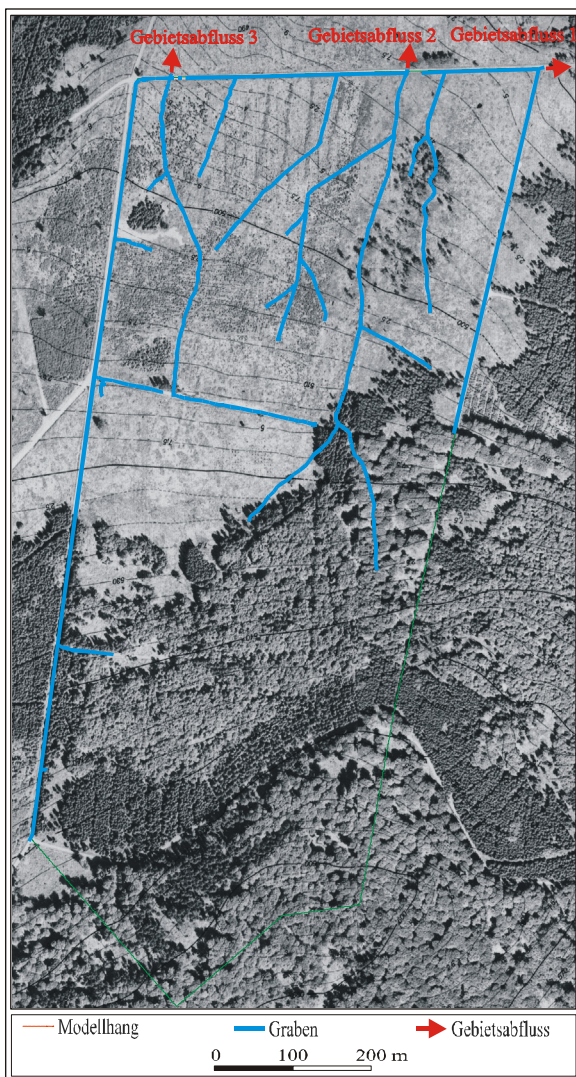


**Abb. 4.7:** Gesättigte Leitfähigkeiten im Bereich Pfälzerwald für ungestörten Waldboden, Rückegassen und Erdwege

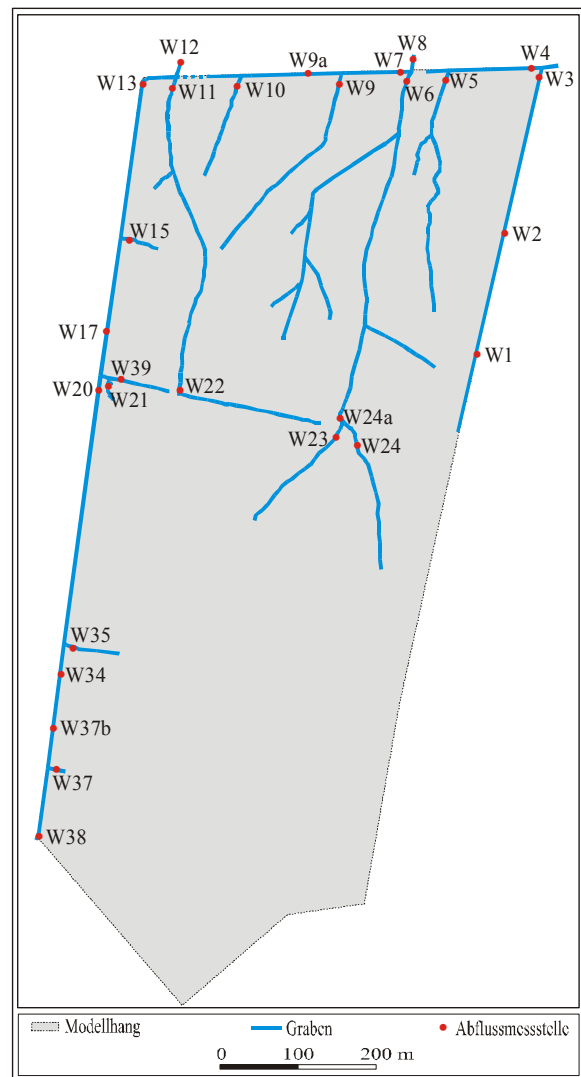
## 4.4 Abflussmessungen

Die Bestimmung des Abflussverhaltens in den beiden Untersuchungsgebieten erfolgte im Rahmen eigener Geländemessungen. Im Soonwald wurde über einen Zeitraum von 2 Jahren eine detaillierte Beschreibung und Analyse des Abflussverhaltens durchgeführt (TEMPEL, 2000), die durch eine 30-tägige hydrogeologische Kartierung mit Quellschüttungs- und Abflussmessungen ergänzt wurde (SCHUWIRTH, 2001). Im Bereich des Modellhanges im Pfälzerwald erfolgten im Frühjahr 1999 Quellkartierungen und Abflussmessung in drei kleinen Einzugsgebieten in der Umgebung von Merzalben (CHRIST, 1999; FISCHER, 1999 und RABE, 1999). Zusätzlich wurden Abfluss- und Quellschüttungsdaten herangezogen, die vom Landesamt für Wasserwirtschaft sowie von der Forstlichen Versuchsanstalt bereit gestellt wurden, um die Abflusssituation in den beiden Gebieten zu charakterisieren.

### 4.4.1 Abflussgeschehen im Gebiet Soonwald



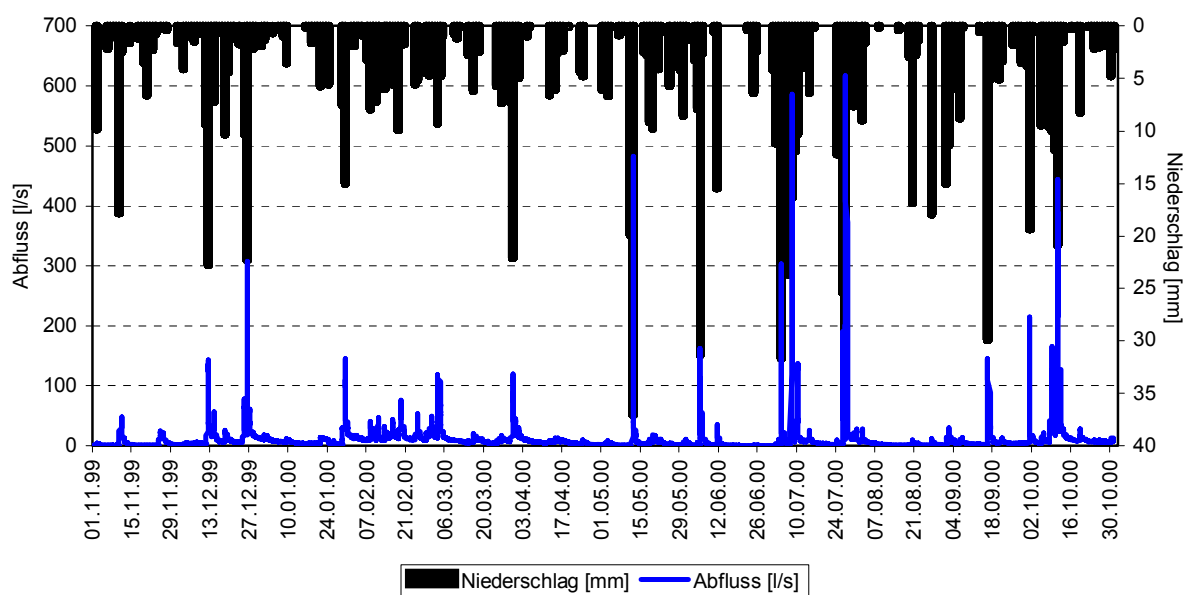
**Abb. 4.8:** Luftbild des Modellhanges Soonwald mit Grabensystem (TEMPEL, 2000)



**Abb. 4.9:** Darstellung des Modellhanges mit Grabensystem und Abflussmesswehren. (TEMPEL, 2000)

Im Bereich des Untersuchungsgebietes im Soonwald erfolgte nach der Kartierung des Grabensystems die Installation mehrerer Messwehre zur Bestimmung des Abflusses (Abb. 4.8 und Abb. 4.9). Hauptaugenmerk dabei war die gesamte flächenhafte Erfassung des Abflusses im Grabensystem. Es wurden insgesamt 39 Abflussmessstellen (W1 bis W39) am Modellhang sowie 6 Abflussmessstellen (W I bis W VI) an einem Vergleichshang errichtet. Die direkte Messung des Abflusses erfolgte ab April 1999 im wöchentlichen Turnus. Im hydrologischen Winterhalbjahr 1999/2000 wurde die Messdichte bis auf maximal 5 Messungen pro Woche erhöht und ab Mai 2000 auf ca. zweiwöchige Messintervalle reduziert. Die Abflussmessungen am Vergleichshang wurden nur sporadisch zu Vergleichszwecken durchgeführt. Die so ermittelten Abflusswerte sind als Ganglinien für die Gebietsausläufe zusammen mit der zugehörigen Niederschlagsverteilung im Anhang in Abbildung A1 dargestellt. Die Messwerte aller bestimmten Abflussmengen an den Wehren sind in Tabelle A7 aufgeführt.

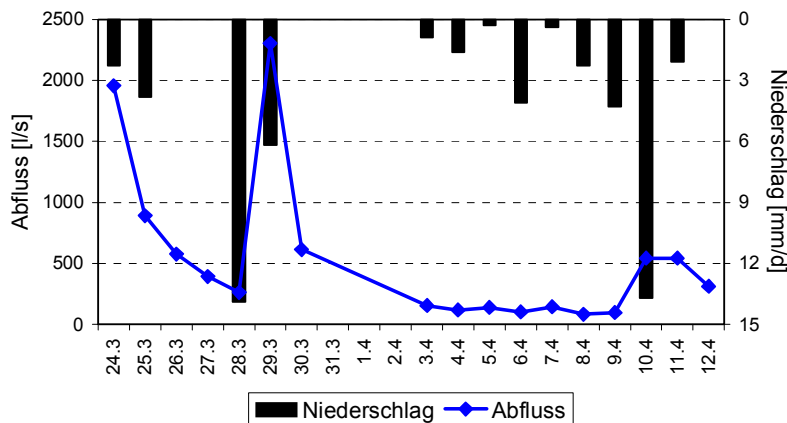
Ab November 1999 standen drei elektronische Pegelmessstationen (Pegel 1 bis Pegel 3) zur Verfügung mittels derer die Wasserstände im Gerinne an den drei Gebietsausläufen 15-minütig bestimmt wurden. Die so aufgenommenen Werte wurden mittels Eichung über die Einzelmessungen an den Wehren auf Abflusswerte umgerechnet (TEMPEL, 2000). Die Abflussmengen am den drei Gebietsausläufen sind zusammen mit dem Niederschlag als Gesamtabfluss in Abb. 4.10 für das hydrologische Jahr 1999/2000 dargestellt.



**Abb. 4.10:** Abflussganglinie des Gesamtabflusses aus dem Untersuchungsgebiet Soonwald, berechnet als Summenwert aus den 15-minütigen Pegeldata der drei separaten Gebietsabläufe

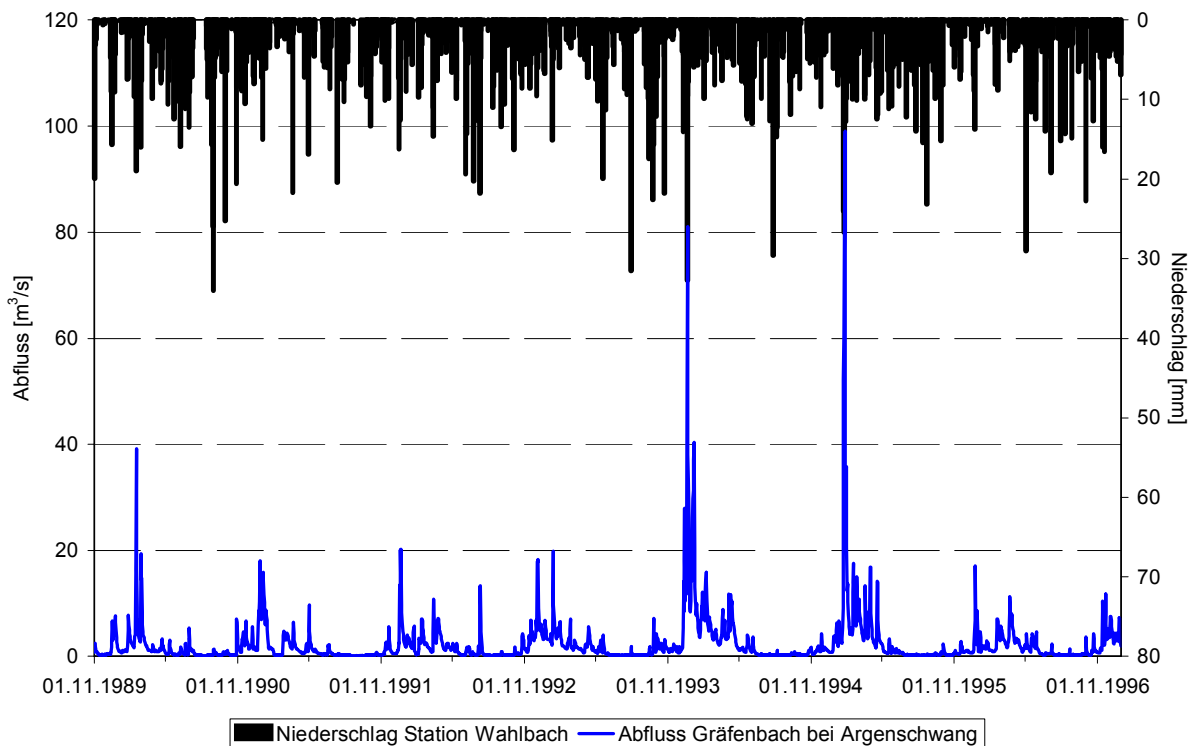
Wie in der Darstellung zu erkennen ist, reagiert der Abfluss direkt auf das Niederschlagsgeschehen. Die zeitliche Verzögerung ist nur gering. Des Weiteren fällt auf, dass die höheren Niederschlagsereignisse im Sommer 2000 ebenfalls zu sehr hohen Abflusswerten führen. Dagegen liefert das Ereignis im September nur einen vergleichsweise niedrigen Abfluss. Hier spiegelt sich der Einfluss der unterschiedlichen Bodenvorfeuchte wider. Diese war im Sommer aufgrund der hohen Vorsättigung im Winter noch hoch, während sie bis zum September durch die starke Evapotranspiration am Hang niedriger war. Der Boden konnte daher die Septemberregen besser zurückhalten. Im Oktober war diese Rückhaltekapazität der Böden allerdings bereits wieder aufgebraucht, so dass hier wieder stärkerer Abfluss nach den hohen Niederschlägen in der zweiten Oktoberwoche auftrat.

Im Rahmen der hydrogeologischen Kartierung des Einzugsgebietes des oberen Gräfenbachs, in welchem der Untersuchungshang liegt, wurden diese Aussagen bestätigt (SCHUWIRTH, 2001). So führten im Zeitraum Ende März bis Mitte April 2001 vergleichsweise niedrige Niederschläge zu einem starken Anstieg der Abflusshöhen im Gräfenbach (Abb. 4.11). Nach dem Nachlassen der Niederschläge sinken die Abflusswerte stets wieder schnell ab. Die Abflussspenden im beobachteten Zeitraum lagen zwischen  $160 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$  am 29. März und lediglich  $6 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$  am 8./9. April. Die Abflussspitze am 10./11. April wurde nicht erfasst, da sie zum Zeitpunkt der Abflussmessung am 11.4. die Messstelle bereits passiert hatte (freundl. Mitteilung Schuwirth 2002).



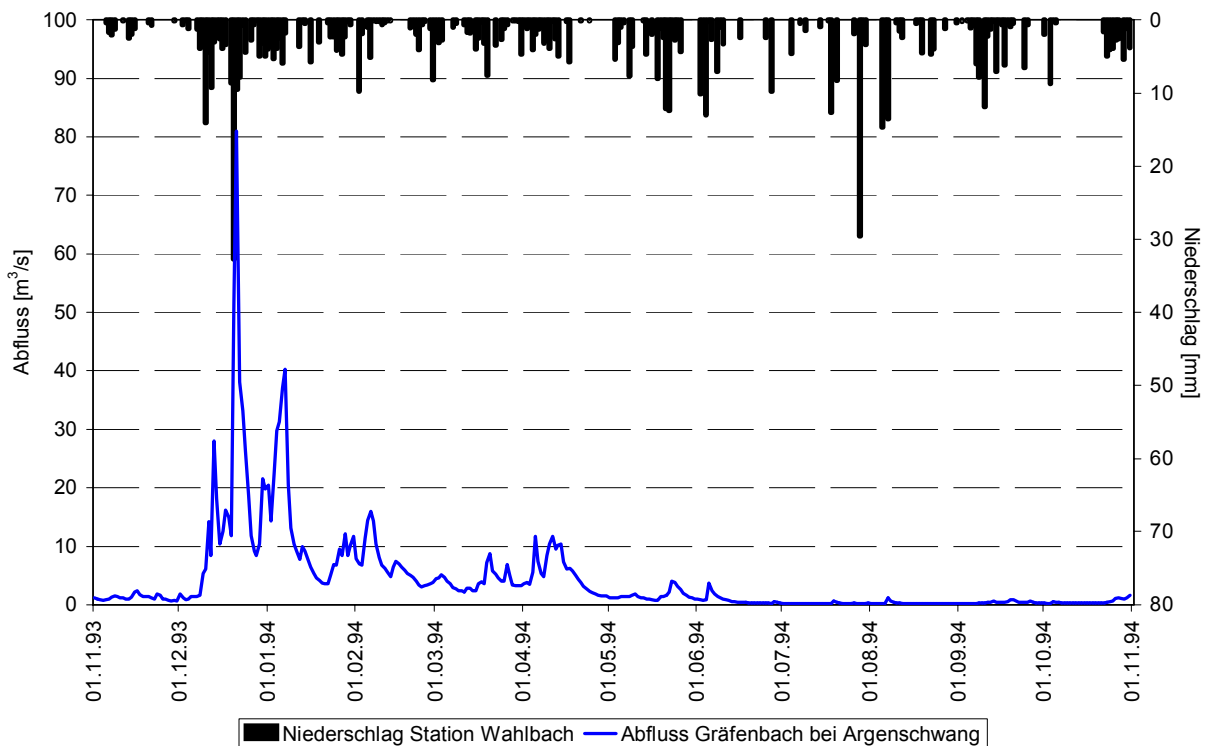
**Abb. 4.11:** Abflusswerte und Niederschlagshöhen im März/April 2001 am oberen Gräfenbach

Insgesamt erkennt man aus den Darstellungen in Abb. 4.10 und 4.11, dass im Untersuchungsgebiet Soonwald das Abflussgeschehen fast ausschließlich durch Oberflächen- und oberflächennahen Abfluss geprägt ist. Eine Grundwasserkomponente ist nur schwerlich zu erkennen. Der Abfluss weist keinerlei Anteile auf, die kontinuierlich zum Abfluss im Vorfluter beitragen, wie am Abfallen der Abflusswerte bis auf Werte von fast null zu sehen ist. Diese Aussage wird



**Abb. 4.12:** Abflussganglinie Gräfenbach bei Argenschwang und Niederschlagsmengen der Station Wahlbach aus Tagesmittelwerten für den Zeitraum Nov. 1989 bis Dez. 1996

durch Abflussdaten des Landesamtes für Wasserwirtschaft belegt. In Abbildung 4.12 sind die Abflussmengen des Gräfenbachs am Pegel Argenschwang für den Zeitraum Nov. 1989 bis Dez. 1996 zusammen mit der Niederschlagsverteilung der Station Wahlbach im gleichen Zeitraum aufgetragen. Auch hier zeigt sich deutlich ein saisonaler Gang mit einer stärkeren Reaktion des Abflusses auf extreme Niederschlagsereignisse im Winter. Im Sommer können die Böden bei niedrigeren Anfangsbodenfeuchten die Niederschläge besser zurückhalten. Deutlicher wird dies, wenn man aus der oben dargestellten Zeitreihe das Jahr 1994 herausnimmt und alleine betrachtet (Abb. 4.13).

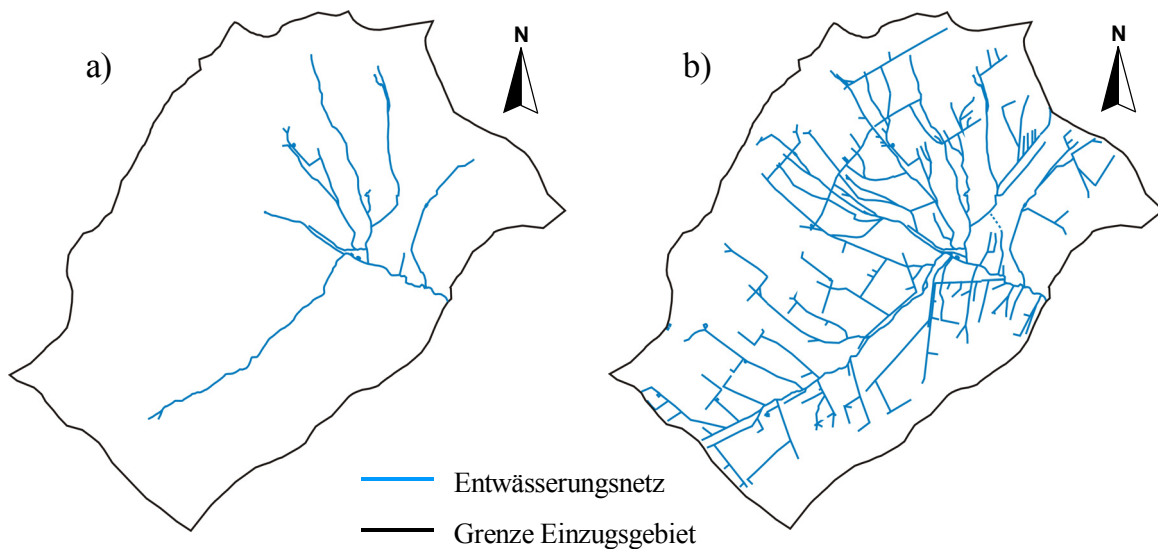


**Abb. 4.13:** Abflussganglinie Gräfenbach bei Argenschwang und Niederschlagsmengen der Station Wahlbach aus Tagesmittelwerten für das hydrologische Jahr 1994

Klar ist wiederum das direkte Ansteigen des Abflusses infolge der Niederschlagsereignisse im Winterhalbjahr erkennbar. Im Sommer führen ähnlich hohe Niederschlagswerte zu keinem nennenswerten Abflusszuwachs. Insbesondere in diesem Jahr zeigt sich das Phänomen des kompletten Abflussversiegens im Sommer. Dies ist ein typisches Verhalten von Vorflutern, die in erster Linie aus Oberflächenwasser gespeist werden.

Im Bereich des Untersuchungsgebietes im Einzugsgebiet des Gräfenbachs wird die direkte Reaktion des Abflussverhaltens im Vorfluter durch die drainierende Wirkung von Linienstrukturen verstärkt. Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt, wenn man das ganzjährig wasserführende Entwässerungsnetz mit dem kartierten Entwässerungsnetz im Frühjahr 2001, während einer Hochwasserzeit, vergleicht. Es ist in Abb. 4.14 dargestellt. Zu Zeiten mit normaler Entwässerungssituation weist das Entwässerungsnetz eine Gesamtlänge von ca. 14 km auf. Daraus ergibt sich eine Gewässerdichte von etwa  $1 \text{ km}/\text{km}^2$ . Diese erreichte im März/April 2001 einen ca. fünffach höheren Wert von  $5 \text{ km}/\text{km}^2$ , bei einer Gesamtlänge des engmaschigeren Entwässerungsnetzes von ca. 75 km. Dieses nur zu Zeiten starker Niederschläge ausgeprägte System fällt in trockeneren Perioden wieder trocken. Der überwiegende Teil dieses nur zeitweilig wasserführenden Entwässerungssystems ist durch Drainagegräben, Fahrspuren schwerer Forstmaschinen,

Entwässerungsgräben entlang der Forstwege und Waldstraßen sowie durch die Waldwege selbst entstanden. Dieses künstliche Drainagesystem trägt maßgeblich dazu bei, dass das Niederschlagswasser relativ schnell aus dem Gebiet oberirdisch bzw. oberflächennah abgeführt wird und somit einen erheblichen Beitrag zu Hochwasserspitzen liefert.



**Abb. 4.14:** Entwässerungsnetz am oberen Gräfenbach: a) ganzjährig wasserführendes Entwässerungsnetz und b) Entwässerungsnetz zu Zeiten starker Niederschläge (verändert nach SCHUWIRTH, 2001)

Ein weiterer Beleg für die Dominanz der oberflächennahen Abflusskomponenten am Gesamtabfluss liefert die Quellkartierung von SCHUWIRTH (2001). Es treten vorwiegend Quellsümpfe auf, die aus Niederschlagswasser bzw. oberflächennahem Wasser der ungesättigten Bodenzone gespeist werden. Das Niederschlagswasser sickert in die Deckschichten des Bodens ein und wird an den tiefer liegenden undurchlässigeren Schichten der ungesättigten Bodenzone gestaut und bewegt sich am Hang abwärts. Daher liegen die meisten Quellsümpfe im Bereich direkt unterhalb steilerer Hangabschnitte. Eine weitere Möglichkeit des Wasseraustritts ist die Verringerung der Mächtigkeit einer wasserführenden Schicht. Viele dieser Quellbereiche sind durch das Drainagesystem erfasst und leiten das Wasser auch aus höher gelegenen Bereichen direkt oberflächlich ab.

Es wurden im gesamten Einzugsgebiet des oberen Gräfenbachs nur drei Quellen gefunden, die wahrscheinlich mit echtem Grundwasser kommunizieren. Ihre Identifizierung erfolgte über die Messung der Wassertemperatur. Allerdings schütteten diese Quellen alle extrem gering mit werten unter 1 l/s (SCHUWIRTH, 2001).

#### 4.4.2 Abflussgeschehen im Gebiet Pfälzerwald

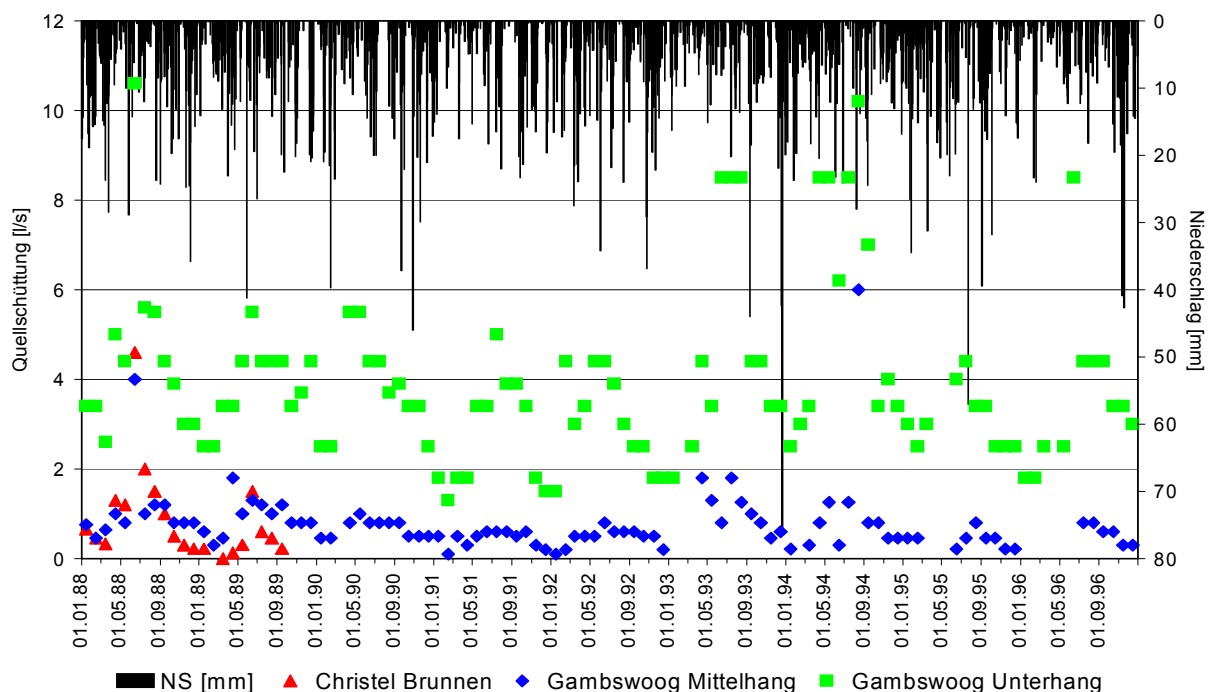
Im Bereich des Pfälzerwaldes wurden hinsichtlich der Untersuchung des Abflussverhaltens weniger intensive Geländearbeiten durchgeführt. Hier erfolgten im Frühjahr 1999 lediglich Quellkartierungen und Abflussmessung in drei kleinen Einzugsgebieten in der Nähe des dortigen Modellhanges in der Umgebung von Merzalben (CHRIST, 1999; FISCHER, 1999 und RABE, 1999). Insgesamt wurde eine andere Situation angetroffen als im Soonwald. Übereinstimmend



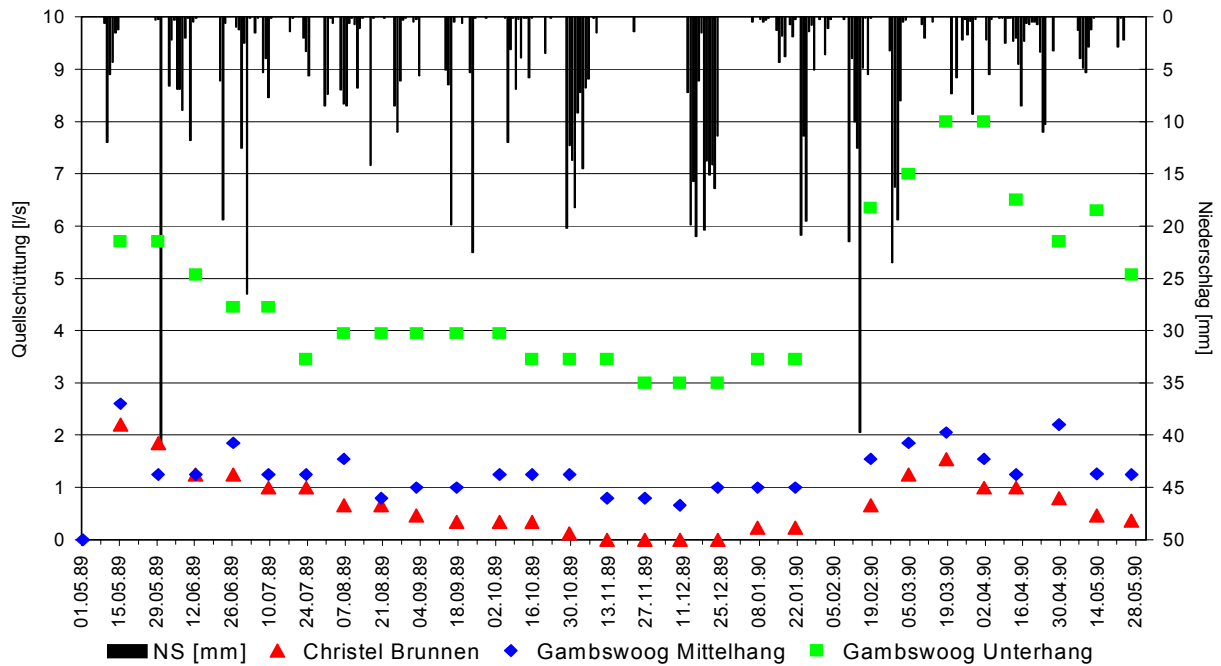
für die drei Gebiete wurde festgestellt, dass etwa 90 % aller gefundenen Quellen ganzjährig schütten, wobei etwa die Hälfte Abflüsse von 1-6 l/s liefern. Die meisten Quellen sind Schichtquellen, die oftmals in Form von Grund- und Hangschuttquellen sowie als Quellsümpfe auftreten. Die bestimmten Abflusspenden in den untersuchten Teileinzugsgebieten betragen zwischen  $14 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$  und  $23 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ . Eine Korrelation des Abflussgeschehens mit Niederschlagsdaten war leider nicht möglich, da im Untersuchungszeitraum vom 22. März bis 24. April der Niederschlagsmesser der forstlichen Versuchsanstalt nicht fehlerfrei arbeitete.

Im Quellbereich des Floßbaches, nahe des untersuchten Modellhanges im Pfälzerwald, hat die forstliche Versuchsanstalt bis vor einigen Jahren mehrere Messwehre zur Ermittlung der Quellschüttung der drei Quellen des Floßbaches betrieben. In Abb. 4.15 ist die Korrelation der monatlichen Stichtagsmessungen mit den Tageswerten des zugehörigen Niederschlags für den Zeitraum vom 01.01.1988 bis zum 31.12.1996 dargestellt. Deutlich sind die saisonalen Schwankungen zwischen Sommer- und Winterhalbjahr erkennbar. Eine direkte Reaktion der Quellschüttung auf den Niederschlag ist in dieser Auflösung nicht zu beobachten. Selbst in der etwas höher aufgelösten Darstellung für den Zeitraum 01.05.1989 bis 31.05.1990 mit 14-tägigen Quellschüttungsmessungen (Abb. 4.16) ist ein solcher nicht auszumachen. Es scheint aber, dass die Quellschüttung etwa 4 Wochen zeitverzögert auf den Niederschlag reagiert, wie man im Feb./Mrz. 1990 erkennen kann.

Deutlicher wird die Reaktion des Abflussverhaltens auf den Niederschlag aus den Abflussdaten des rheinland-pfälzischen Landesamtes für Wasserwirtschaft für den Schwarzbach an der Messstelle Thaleischweiler. Der Schwarzbach fließt etwa 5 km nördlich des Untersuchungsgebietes Pfälzerwald und ist in seinem Verhalten vergleichbar zum Floßbach.



**Abb. 4.15:** Korrelation Quellschüttung [l/s] der Floßbachquellen mit dem Niederschlag für den Zeitraum Jan. 1988 bis Dez. 1996. Die Quellschüttungsdaten sind monatliche Stichtagsmessungen, die Niederschlagsdaten sind Tageswerte

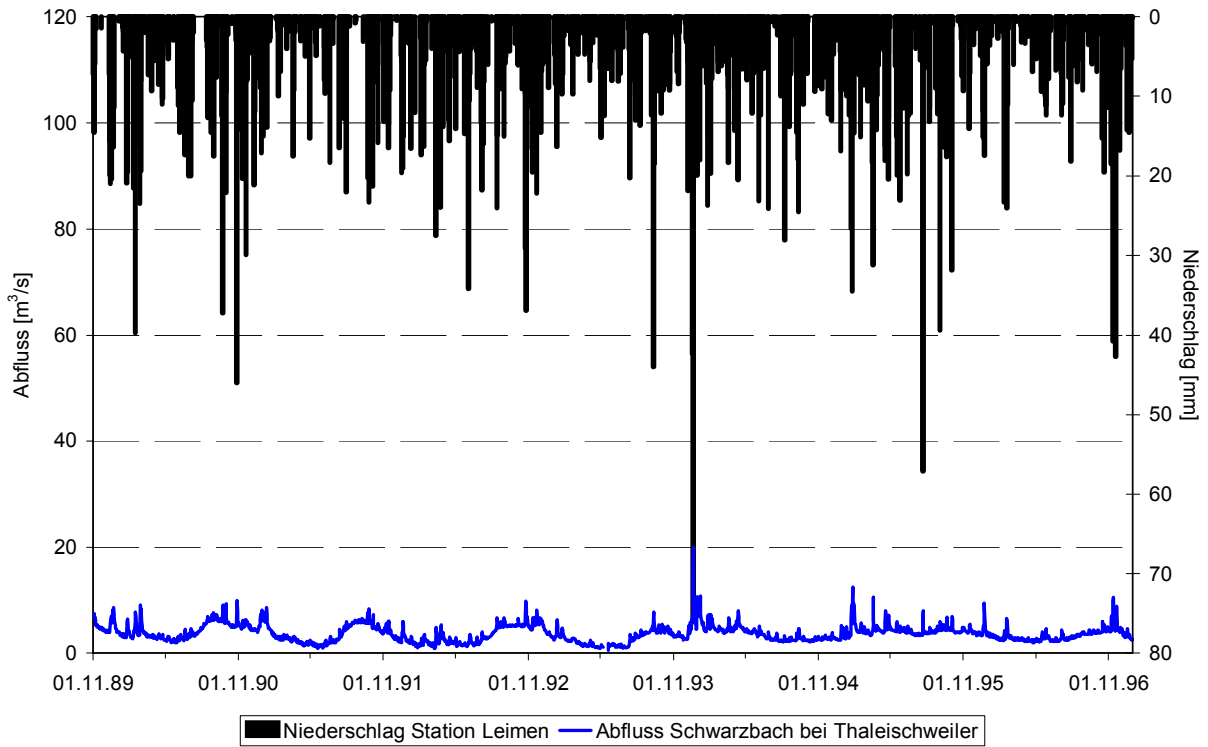


**Abb. 4.16:** Korrelation Quellschüttung [l/s] der Floßbachquellen mit dem Niederschlag für den Zeitraum Mai 89 bis Mai 90. Die Quellschüttungsdaten sind 14-tägig aufgenommen, die Niederschlagsdaten sind Tageswerte

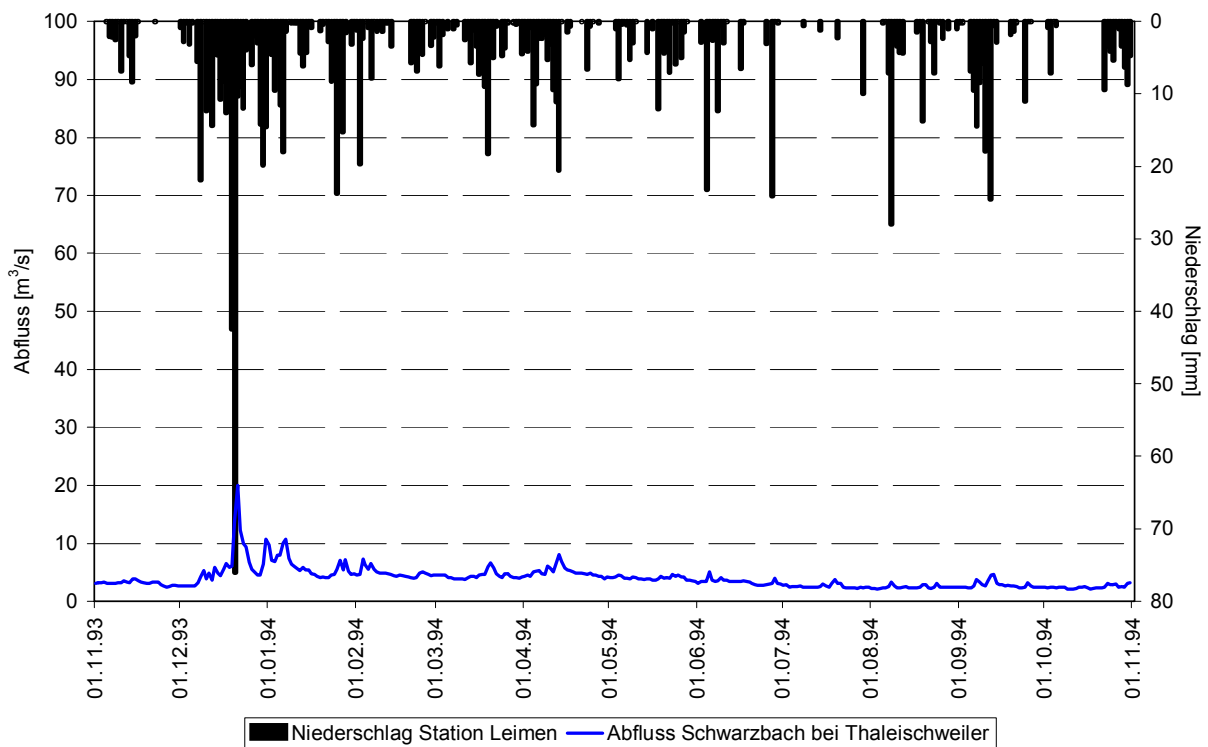
In den nachfolgenden Abbildungen 4.17 und 4.18 sind die Abflussganglinien des Schwarzbaches für die gleichen Zeiträume, wie im vorherigen Abschnitt für den Gräfenbach (Abb. 4.12 und 4.13) dargestellt. In Abb. 4.17 sieht man die Abflussganglinie in Abhängigkeit vom Niederschlagsaufkommen für den Zeitraum von Nov. 1989 bis Dez. 1996. In Abbildung 4.18 ist wiederum das hydrologische Jahr 1994 mit dem hohen Niederschlagsereignis im Dezember 1993 dargestellt. Zum besseren Vergleich mit den Verhältnissen des Gräfenbachs sind die Abbildungen in gleicher Weise skaliert.

Für den Schwarzbach lässt sich, wie für alle Bäche im Pfälzerwald, feststellen, dass hier das Abflussgeschehen in erster Linie vom Grundwasser gesteuert wird. Zwar reagiert das Vorflutersystem auch auf die Niederschlagsereignisse, doch zeigt sich eine deutliche Dämpfung in den Abflussspitzen. Der saisonale Gang im Abflussgeschehen spiegelt sich auch hier wider. Im Winterhalbjahr liegen die Abflussmengen höher als im Sommer. Im Gegensatz zum Soonwald liefern die Bäche im Pfälzerwald ganzjährig Wasser. Ein Wechsel im bestehenden Entwässerungsnetz ist nicht zu beobachten.

Insgesamt betrachtet treten keine so extremen Hochwasserspitzen wie im Soonwald auf, obwohl die Niederschlagsmengen bei Einzelereignissen teilweise erheblich höher liegen als im Soonwald. Insbesondere bei den Darstellungen für 1994 wird dies deutlich. Der Schwarzbach liefert bei einer Tagesniederschlagssumme von fast 80 mm einen Gerinneabfluss von lediglich knapp  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  und das, obwohl sein Einzugsgebiet mit ca.  $380 \text{ km}^2$  mehr als zehnmal so groß ist wie das des Gräfenbachs mit  $32 \text{ km}^2$ . Dieser liefert bei einem Niederschlag von etwas mehr als  $30 \text{ mm/d}$  einen Abfluss von über  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Abb. 4.17:** Abflussganglinie Schwarzbach bei Thaleischweiler und Niederschlagsmengen der Station Leimen aus Tagesmittelwerten für den Zeitraum Nov. 1989 bis Dez. 1996



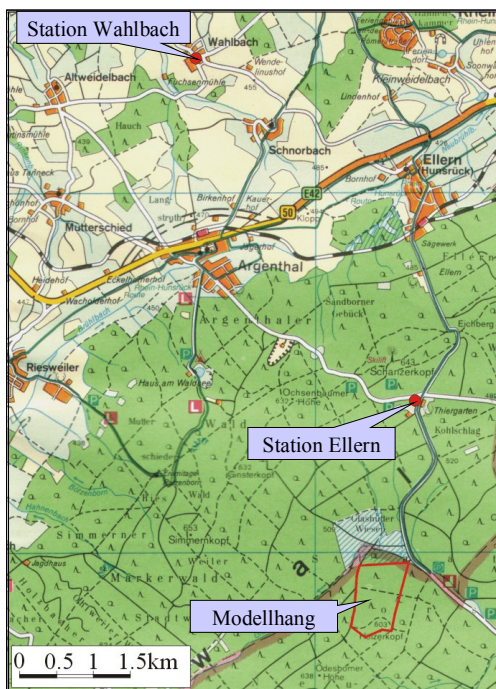
**Abb. 4.18:** Abflussganglinie Schwarzbach bei Thaleischweiler und Niederschlagsmengen der Station Leimen aus Tagesmittelwerten für das hydrologische Jahr 1994

## 5 Datengrundlage der Modellierungen

Die in Abschnitt 2.4.3 dargestellten Eingangsdaten für die Modellierung mit CATFLOW wurden von verschiedenen Ämtern und Behörden zur Verfügung gestellt und durch eigene Messungen und Geländeaufnahmen ergänzt. Die nachfolgenden Ausführungen liefern eine Übersicht der Daten mit der jeweiligen Art der Bezugsquelle.

### 5.1 Klimadaten

Die im Datensatz zur klimatischen Beschreibung der vorgestellten Untersuchungsgebiete enthaltenen Parameter konnten leider nicht durch Messungen in den Testgebieten selbst ermittelt werden, da keine eigenen Klimastationen zur Verfügung standen. Lediglich im Untersuchungsgebiet Soonwald wurden im Rahmen der Diplomarbeit von TEMPEL (2000) Monatsmittel der Lufttemperatur und des Niederschlags aufgenommen. Da aber zur prozessorientierten physikalischen Niederschlags-Abfluss-Modellierung eine hohe zeitliche Auflösung notwendig ist, wurden die entsprechenden Daten zu Niederschlag, Temperatur, Strahlung, Windverhältnissen und Luftfeuchtigkeit von anderen Stellen bezogen.



**Abb. 5.1:** Lage der Klimastationen Simmern-Wahlbach, Ellern und des Testgebietes Soonwald (aus TEMPEL, (2000))

Die rheinland-pfälzische Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz lieferte Stundenwerte der Luft- und Bodentemperatur, Strahlung, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit. Für das Gebiet Soonwald stammen die Daten von der Station Simmern-Wahlbach. Die Niederschlagsdaten wiederum wurden vom Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz als Minutenwerte der Station Ellern bereitgestellt. Beide Stationen liegen, wie in Abb. 5.1 dargestellt, in relativer Nähe zum Untersuchungsgebiet. Die Daten für das zweite Untersuchungsgebiet im Pfälzerwald wurden ebenfalls von den gleichen Stellen bereit gestellt und liegen in der gleichen zeitlichen Auflösung vor. Dabei stammen die Stundenwerte der Luft- und Bodentemperatur, Strahlung, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit von der Station Martinshöhe, die etwa 25 km in NW-Richtung entfernt liegt. Für den Niederschlag lagen Daten der Station Felsalben (ca. 23 km südwestlich vom Testgelände) und Taubensuhl (8 km östlich des Testgeländes) vor.

Aus der Lage der Klimastationen ergeben sich zwar zwangsläufig Unterschiede zu den tatsächlichen Bedingungen in den Testgeländen, allerdings wurden diese nicht als Problem angesehen, da es nicht das primäre Ziel war die tatsächlichen Verhältnisse zu simulieren, sondern es sollte lediglich eine Modellierung möglicher Einflussfaktoren auf das Gesamtsystem erfolgen. In Abschnitt 6.2 sind die Ergebnisse des Einflusses unterschiedlicher Niederschlagsverteilungen auf das Abflussgeschehen dargestellt.

### 5.2 Bodenparameter

Die Darstellung der Bodendaten in CATFLOW erfolgt weitestgehend über die, in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen, bodenhydraulischen Kenngrößen von VAN GENUCHTEN (1980) und MUALEM (1976) über Pedotransferfunktionen im Ansatz von CARSEL & PARRISH (1988). Diese unterscheiden 12 standardisierte Bodenklassen der US-Soil-Taxonomy (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002) mittels derer die realen Bodenverhältnisse abgebildet werden. Die Eingliederung der Bodenarten, die aus der Korngrößenverteilungen der Böden in beiden Untersuchungsgebieten ermittelt wurden (vgl. Abschnitt 4.1), erfolgte durch eine Gegenüberstellung mit den Bodenklassen von CARSEL & PARRISH (1988) und einen Vergleich der beiden VAN GENUCHTEN-Parameter  $\alpha$  und  $n$ . Im Anhang (Abschnitt 10.1) ist diese Eingliederung in Tabelle A1 und A2 dargestellt.

Da die Böden der beidem untersuchten Standorte teilweise sehr hohe Anteile an Skelett (Korngröße > 2 mm) aufweisen, wurden Korrekturen in den Leitfähigkeiten der Bodentypen nötig. PESCHKE et al. (1999) geben in ihrer Arbeit hydraulische Bodenkennwerte für weit verbreitete Bodenarten mit entsprechenden Modifikationen infolge von Skelettanteil und Humusgehalt als Tabellenwerte an. Die dort getroffenen Korrekturvorschläge wurden bei der Bestimmung der bodenhydraulischen Größen angewendet.

In Abbildung 5.2 und 5.3 sind die mittels Pedotransferfunktionen und Korrektur erhalten  $K_f$ -Werte für zwei Bodentiefestufen den hydraulischen Leitfähigkeiten, die im Labor bestimmt wurden, für die beiden Untersuchungsgebiete gegenüber gestellt. Wie man erkennen kann, liegen die gemessenen Leitfähigkeitsbeiwerte für die schlechter durchlässigen Bodenhorizonte am Mittel- und Unterhang im Soonwald, etwas niedriger als die  $K_f$ -Werte, die mittels Pedotransferfunktionen bestimmt wurden. Bei den höheren Leitfähigkeiten ist es genau umgekehrt. Dennoch liefern die Ergebnisse gute Übereinstimmungen.

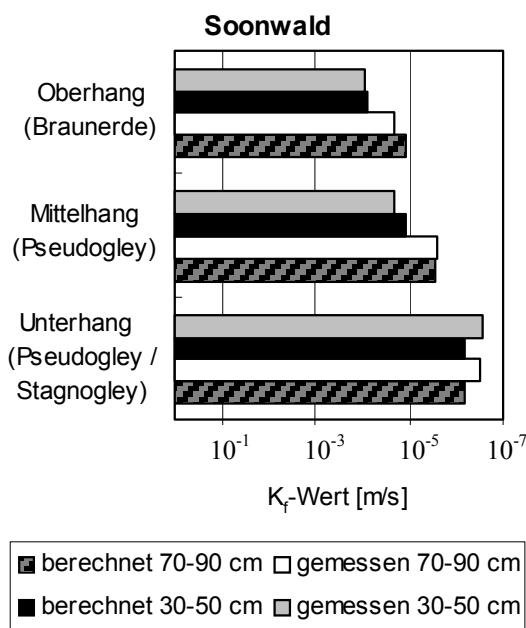


Abb. 5.2:  $K_f$ -Werte Testgebiet Soonwald

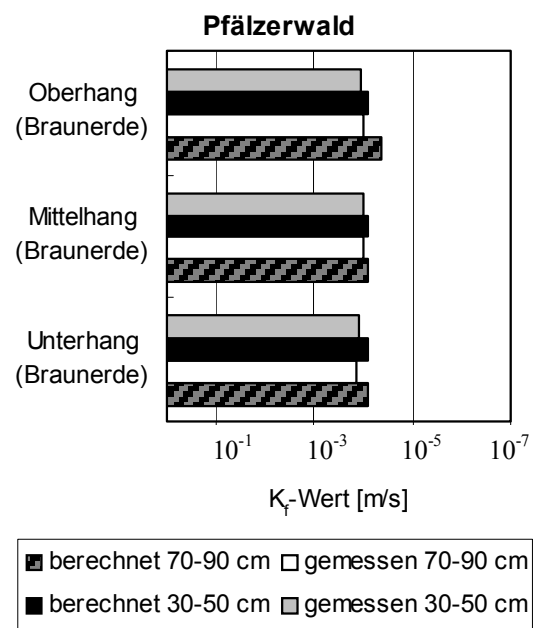


Abb. 5.3:  $K_f$ -Werte Testgebiet Pfälzerwald

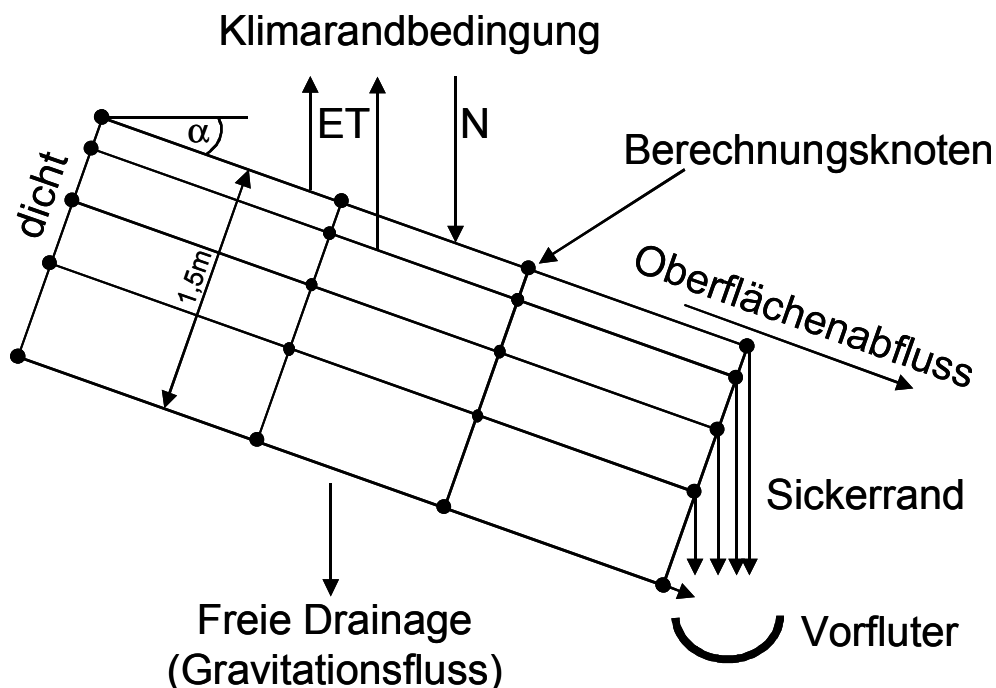
### 5.3 Vegetationsparameter

Bereits in Abschnitt 2.4.3 wurde auf das Problem der Parametrisierung unterschiedlicher Landnutzungsformen hingewiesen. Zur Beschreibung der Vegetationsdecke in den bewaldeten Untersuchungsgebieten stehen im Modellsystem CATFLOW die dort aufgeführten Parameter zur Verfügung.

Da im Rahmen dieser Arbeit keine genaue Bestimmung der oben angegebenen Parameter im Gelände erfolgte, wurden Angaben aus der Literatur (DVWK, 1990; HEIDERICH, 1989; JÄGER & KESSLER, 1980; KESSLER, 1985; OTTO, 1994; MAURER, 1997a; MITSCHERLICH, 1971, 1977; RHEINLAND PFALZ, 1962, 1998; WICKE & BERNHOFER, 1995) verwendet, um die jeweilige Vegetation zu parametrisieren. Da die Literaturangaben insbesondere zu Blattflächenindex und Bodenbedeckungsgrad sehr weit streuen und sich oftmals nur auf spezielle Detailuntersuchungen eines bestimmten Standortes beziehen, fehlt diesen die Allgemeingültigkeit. D.h. Laub- und Nadelwald können anhand dieser Angaben nur unzureichend beschrieben werden. Daher wurde zu diesen Eingabegrößen eine Sensitivitätsstudie durchgeführt. Dabei wurden die Parameter über einen weiten Bereich variiert und ihr Einfluss auf das Abflussgeschehen bestimmt (vgl. Abschnitt 6.3.1). Die Parametrisierung für Grasland wurde aus Maurer (1997a) übernommen.

### 5.4 Rand- und Startbedingungen

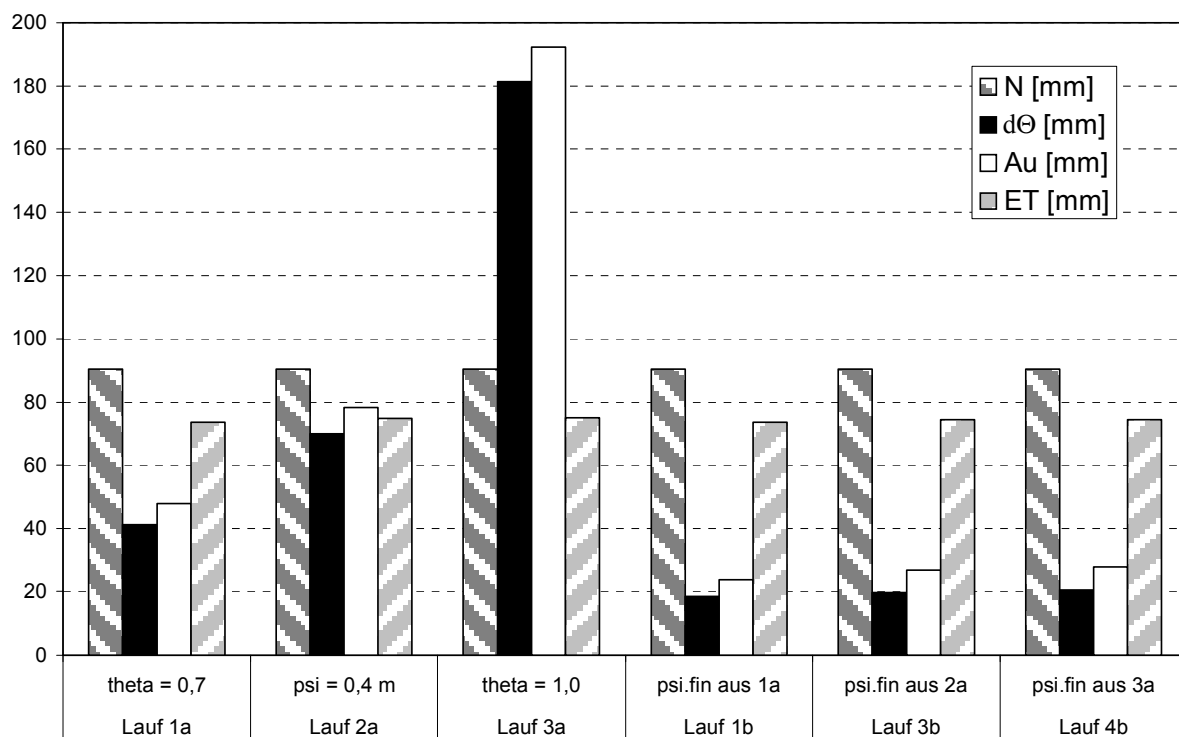
Die Zuweisung der Randbedingungen und des initialen Systemzustands am Berechnungshang erfolgt über zwei hangspezifische Dateien. Die Art der Rand- und Startbedingungen wird in den globalen Dateien festgelegt (vgl. Abschnitt 2.4.3). Die verschiedenen Varianten, die in CATFLOW frei gewählt werden können, sind in MAURER (1997b) und ZEHE & MAURER (2000) angegeben. Hier werden nur die tatsächlich verwendeten Bedingungen erläutert.



**Abb. 5.4:** Schematische Darstellung der Flussrandbedingungen an einem Hangsegment in CATFLOW (verändert nach CASPER, 2002)

Jedem Hang wurden an allen vier Rändern sogenannte Flussrandbedingungen zugewiesen (Abb. 5.4). Der linke Rand wurde dabei als „dicht“ definiert, d.h. es findet hier keinerlei Fluss über den Rand statt. Am rechten Rand wurde über die gesamte Mächtigkeit vom 1,5 m eine Sicker- randbedingung festgelegt, d.h. es tritt nur in den Fällen Fluss auf, wenn mindestens ein Knoten Sättigung erreicht. Bei der Kopplung mehrerer Hänge über ein Grabensystem, wird der gesamte Fluss über den rechten Rand (einschließlich Oberflächenabfluss) einem Gewässerknoten zugewiesen und an ihn übergeben. Am oberen Rand steht das System unter dem Einfluss von Klima- randbedingungen. Wasser wird aus dem Niederschlag zugeführt und über Transpiration und Bodenverdunstung teilweise wieder entzogen. Am unteren Rand herrscht freie Drainage, d.h. Fluss unter Gravitationseinfluss. Wasser, welches das Bodenprofil durchströmt hat und über den unteren Rand das System verlässt, erscheint als Grundwasserneubildung in der Bilanz.

Die Startbedingungen des Berechnungshanges, d.h. seine Bodenfeuchtebedingungen können sowohl über die Zuweisung von Wassergehalten als auch über die Zuweisung von Saugspan- nungen erfolgen. Für gesättigte Bedingungen wurde der Bodenfeuchtwert  $\Theta$  auf eins gesetzt. Für trockene Startbedingungen wurde jeder Hang bei sommerlichen Temperatur-, Strahlungs- und Windbedingungen künstlich getrocknet. Dazu wurde das Modell mit gleichen niedrigen Bodenfeuchtwerten über das gesamte Bodenprofil mit den klimatischen Randbedingungen, allerdings ohne Niederschlag, laufen gelassen. Die Bodenfeuchteverteilung am Ende wurde dann als initiale Bodenfeuchte für den nächsten Modelllauf benutzt. Dieses Prozedere wurde solange durchgeführt, bis sich die maximale Restfeuchtigkeit im Boden eingestellt hatte. Diese Bedingungen wurden dann für die eigentliche Simulation als Startbedingung für trockene Böden eingesetzt.



**Abb. 5.5:** Ergebnisse der Simulationen zur Einstellung der Anfangsbedingungen am Modell- hang ausgehend von unterschiedlichen Bodenfeuchteverteilungen zu Beginn des einmonatigen Initialisierungszeitraums (nähere Erklärung siehe Text nächste Seite)

Das Einstellen der Bodenfeuchtebedingungen an einem Berechnungshang zur Simulation bestimmter Szenarien erfolgte über eine Initialisierung mittels „Einschwingen“ des Modells. Dabei werden beliebige Bodenfeuchtwerte bzw. Saugspannungen am Modellhang vorgegeben und die Berechnung wird zu einem Zeitpunkt gestartet, der vor dem eigentlich interessierenden Anfangszeitpunkt liegt. Als Initialisierungszeitraum wurde jeweils ein Monat gewählt. Die sich einstellenden Bodenfeuchteverteilungen am Berechnungshang wurden dann als Anfangsbedingung für die eigentliche Szenariensimulation eingesetzt.

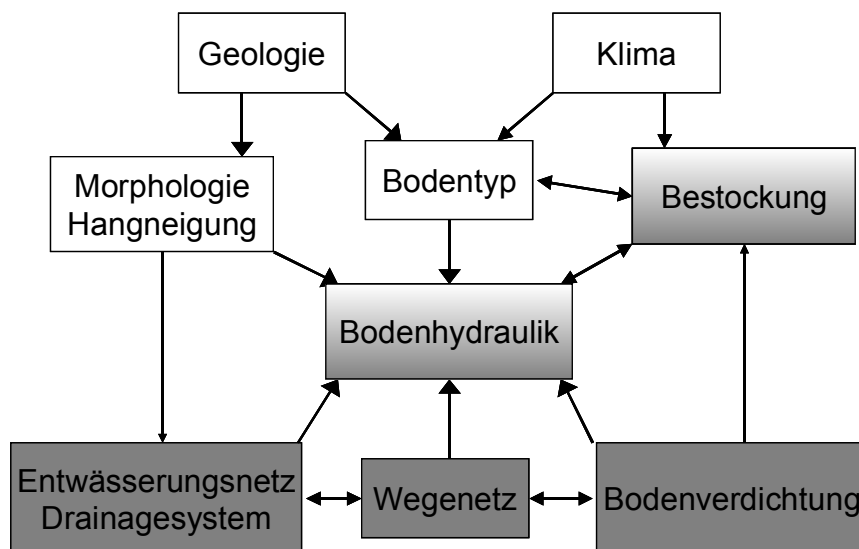
Da die gewählte Zeitspanne von einem Monat ausreichend ist, lässt sich anhand der Ergebnisse belegen, die in Abb. 5.5 dargestellt sind. Gezeigt sind jeweils Niederschlagshöhe, Änderung der Bodenfeuchte, Fluss am unteren Modellrand (als unterirdischer Abfluss  $A_u$  angegeben) und die Evaporation am Ende des Initialisierungszeitraums. Dabei wurden zunächst feste Bodenfeuchtwerte (Lauf 1a mit  $\Theta = 0,7$  und Lauf 3a mit  $\Theta = 1$ ) bzw. feste Saugspannungswerte (Lauf 2a mit  $\Psi = 0,4$  m) vorgegeben und über einen Monat mit atmosphärischen Randbedingungen berechnet. Die sich einstellenden Feuchteverteilungen im Boden wurden anschließend als Anfangsbedingungen für eine erneute Berechnung über den gleichen Zeitraum mit den gleichen atmosphärischen Randbedingungen eingesetzt (Lauf 1b bis 3b). Es zeigt sich deutlich, dass sich dabei am Ende der zweiten Simulation immer die gleichen Bedingungen am Modellhang eingestellt haben - unabhängig vom gewählten ursprünglichen Anfangszustand.



## 6 Szenariensimulationen unterschiedlicher Einflussfaktoren auf das Abflussgeschehen

Im folgenden Kapitel sind die unterschiedlichen Szenariensimulationen des Wassertransportes in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflussfaktoren, welche das Fließverhalten maßgeblich bestimmen, dargestellt. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Anschluss am Ende jedes Abschnittes. Im abschließenden Kapitel 7 werden sie dann im Gesamtzusammenhang betrachtet und in ihrer Bedeutung hinsichtlich der Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen in bewaldeten Gebieten erläutert.

In Abb. 6.1 ist ein Überblick über die wesentlichen Systemfaktoren dargestellt, die den Wassertransport in der ungesättigten Bodenzone, wie er in Kapitel 2 beschrieben wurde, bestimmen. Diese teilen sich auf in die natürlich gegebenen Einflussgrößen Geologie, Morphologie/Hangneigung und Bodentyp als sogenannte geogene Faktoren und das Klima. Auf der anderen Seite findet man die anthropogen bestimmten Einflussfaktoren wie Dichte und Art des Wege- und Entwässerungs- bzw. Drainagenetzes sowie alle Formen von Bodendegradation, insbesondere durch Bodenverdichtung. Diese werden durch unterschiedliche Walderschließungsformen und forstliche Bewirtschaftungsweise geprägt. Daneben gibt es Mischgrößen wie die forstliche Bestockung, die durch menschliche Eingriffe kaum noch als natürlich angesehen werden kann und das aus allen auftretenden Größen resultierende hydraulische Verhalten des Bodens.



**Abb. 6.1:** System kontrollierende Einflussfaktoren des Wassertransports unter bewaldeten Gebieten und ihre Interaktionen: weiß = natürliche Faktoren, grau = anthropogene Faktoren, grau/weiß = Faktoren, die sowohl natürlich als auch anthropogen beeinflusst werden

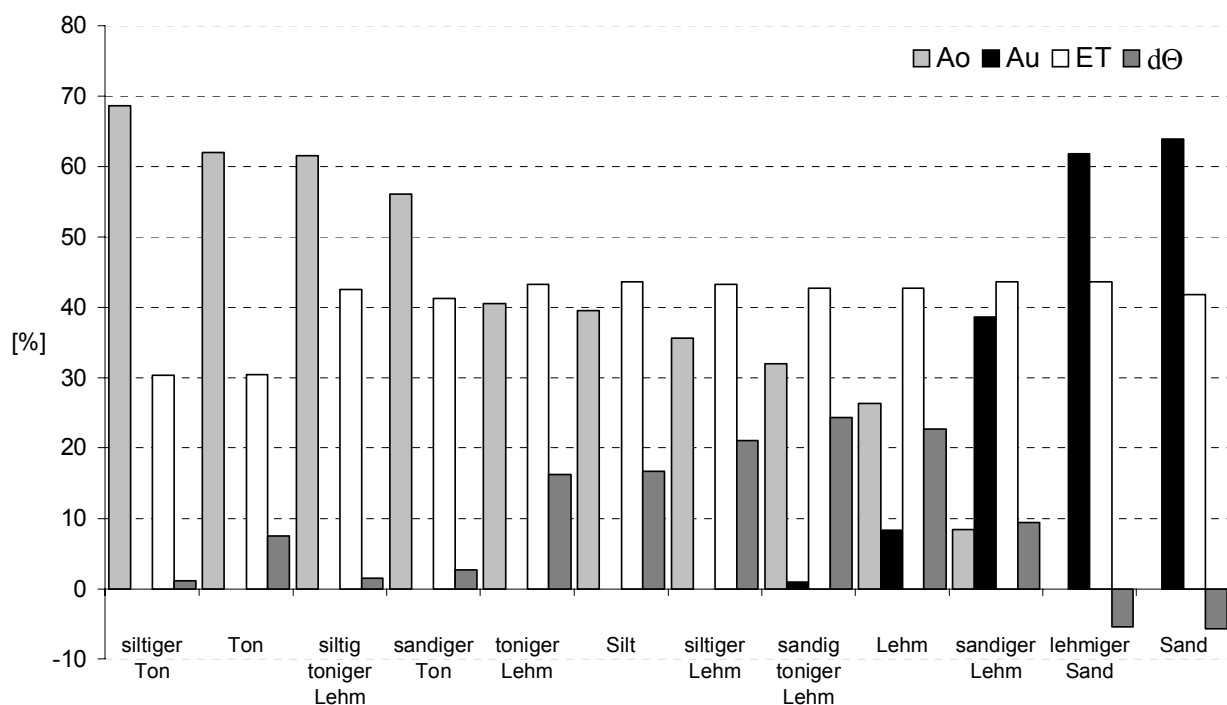
### 6.1 Geogene Faktoren

Der Einfluss der geogenen Faktoren auf den Wassertransport und insbesondere auf das Abflussgeschehen wurde über die Niederschlag-Abfluss-Simulation verschiedener Bodentypen und unterschiedlicher Hangneigungen auf den jeweiligen Hanggeometrien der beiden Untersuchungsgebiete realisiert. Dazu wurde der komplette Boden als homogener Körper betrachtet, der

nur aus einem Bodentyp aus dem Modell von CARSEL & PARRISH (1988) besteht. Die entsprechenden Parameter wurden jedem Berechnungsknoten am Hang zugewiesen. Analog wurde bei der Bestimmung des Einflusses der Hangneigung auf das Abflussgeschehen vorgegangen. Danach erfolgte die Parametrisierung der beiden Modellhänge Soonwald und Pfälzerwald gemäß ihres tatsächlichen natürlichen Aufbaus, um so den Einfluss der unterschiedlichen geologischen Verhältnisse in den Testgebieten zu erfassen. Weitere Aussagen zur Bedeutung der geogenen Faktoren auf die Abflussgenerierung in den Untersuchungsgebieten leiten sich aus den Simulationsergebnissen ab, die in den nachfolgenden Abschnitten 6.2 bis 6.4 dargestellt sind.

### 6.1.1 Bodentypen

Zur Beschreibung des Einflusses unterschiedlicher Bodentypen auf das Abflussgeschehen, wurden zunächst Simulationen durchgeführt, bei denen die Hänge standardisiert komplett mit einem Bodentyp aus dem Modell von CARESEL & PARRISH (1988) belegt wurden. In der Ergebnisdarstellung in Abb. 6.2 sind die prozentualen Werte des oberirdischen Abflusses (Ao), des unterirdischen Abflusses bzw. der Grundwasserneubildung (Au), der Evapotranspiration (ET) und der Änderung im Bodenfeuchtegehalt ( $d\Theta$ ) für einen einwöchigen Simulationszeitraum mit einem sommerlichen Starkregenereignis aufgetragen.



**Abb. 6.2:** Einfluss unterschiedlicher Bodentypen auf das Abflussverhalten

Man erkennt deutlich, dass bei den feinkörnigen, stark Ton haltigen Substraten der Oberflächenabfluss dominiert. Diese Tendenz verliert sich über die mittelkörnigen Bodentypen hin zu den sandigeren Substraten, wo kein Oberflächenabfluss mehr auftritt. Stattdessen findet man hier hohe Anteile an Grundwasserneubildung, da diese Böden nicht in der Lage sind das einsickernde Niederschlagswasser zu speichern. Verdeutlicht wird dies zusätzlich dadurch, dass man bei diesen Böden zusätzlich eine Abnahme in der Bodenfeuchte feststellen kann.

Im siltig, lehmigen Übergangsbereich zwischen Ton- und Sandböden sind die Abflussbeiwerte niedriger ( $< 40\%$ ) und man findet gleichzeitig eine Erhöhung des Bodenfeuchtegehaltes gegenüber der initialen Bodenfeuchte.

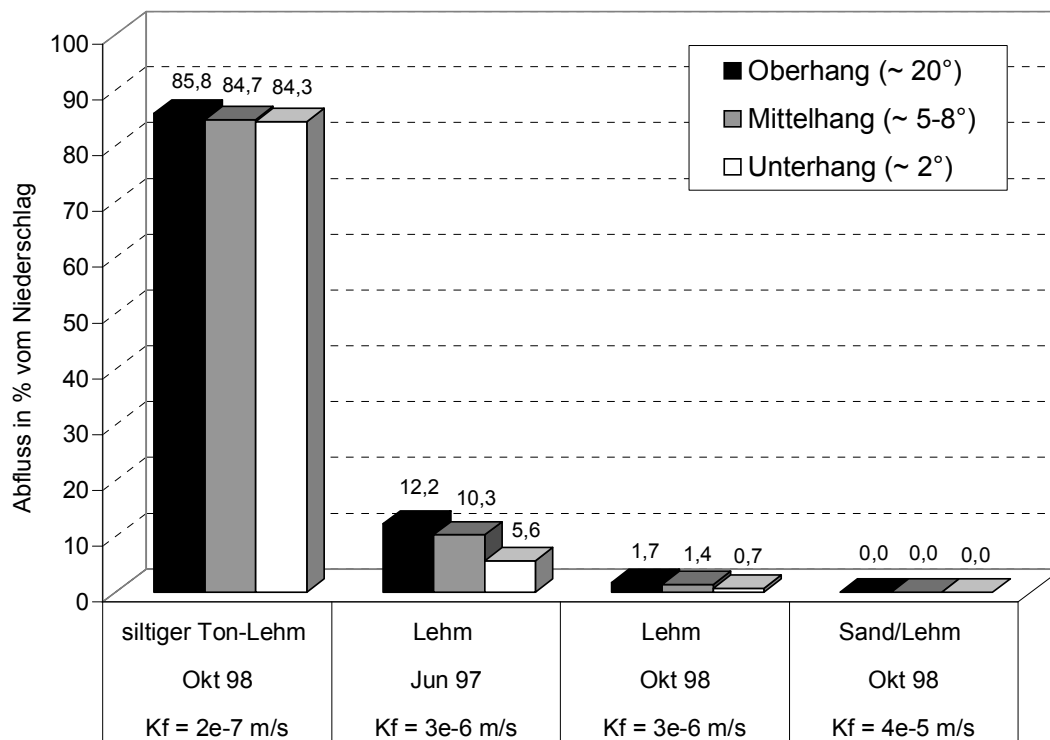
Die Evapotranspiration ist bei allen Bodentypen erwartungsgemäß etwa gleich hoch und beträgt ca.  $40\%$  des Niederschlags. Bei Ton und siltigem Ton beträgt sie mit ca.  $30\%$  etwas weniger, was in der geringeren Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers begründet liegt.

Im Anhang (Abschnitt 10.3, Abb. A2) finden sich ergänzend die ermittelten Wasserspannungskurven für die zwölf Bodentypen.

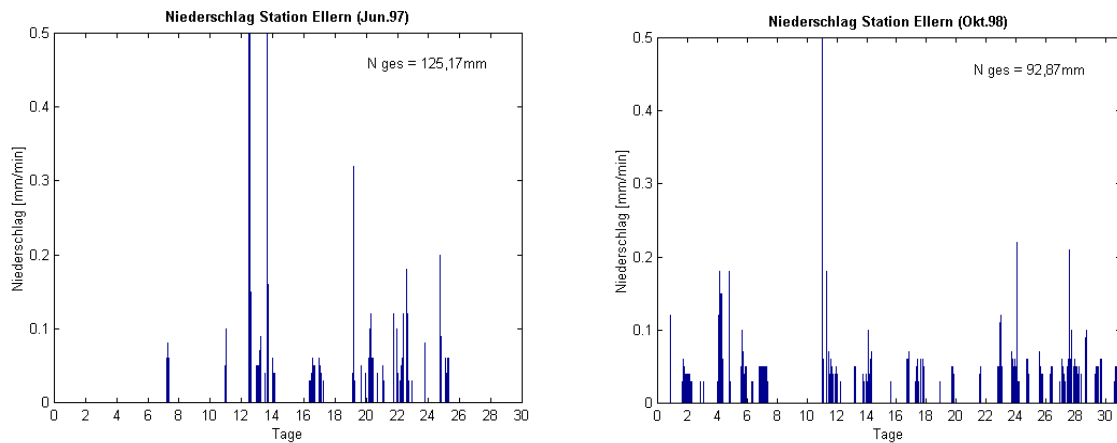
### 6.1.2 Hangneigung

Des Weiteren wurde das Abflussverhalten gleicher Substrate auf unterschiedlichen Hangneigungen simuliert, um so den Einfluss der Morphologie als weiteres geogenes Faktor zu erfassen. Dazu wurde die Hanggeometrie des Untersuchungshanges im Soonwald in drei Abschnitte unterteilt, die jeweils eine andere Hangneigung aufweisen. Am Oberhang findet man Neigungswinkel von etwa  $20^\circ$ , am Mittelhang liegen sie bei etwa  $5 - 8^\circ$  und am Unterhang beträgt die Hangneigung nur noch ca.  $2^\circ$ .

Für alle drei Morphologien wurden die Abflussbeiwerte in Abhängigkeit vom Boden und von zwei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen, deren Daten in Abb. 6.4 dargestellt sind, ermittelt. In Abb. 6.3 sind die resultierenden Abflussbeiwerte für siltig-tonigen Lehm Boden, für Lehm Boden und für sandig-lehmigen Boden dargestellt. Alle Böden sind zu Beginn der Simulation etwa zu  $70\%$  gesättigt, d.h. sie weisen eine relativ hohe initiale Bodenfeuchtigkeit auf.



**Abb. 6.3:** Ermittelte Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Hangneigung und vom Substrat



**Abb. 6.4:** Niederschlagsverteilungen an der Station Ellern im Juni 1997 und im Oktober 1998

Es zeigt sich eine Zunahme der Abflusserhöhung, je steiler die Hanglage ist. Allerdings ist sie nicht so deutlich ausgeprägt, wie man vermuten könnte. So beträgt die Differenz im Abflussbeiwert für den 30-tägigen Simulationszeitraum bei Lehm Boden mit dem sommerlichen Niederschlag, wie er an der Station Ellern im Juni 1997 aufgezeichnet wurde, lediglich ca. 6 % zwischen steilem Oberhang und flachem Unterhang. Für die anderen Simulationen sind die Unterschiede noch geringer. Über siltig, tonigem Lehm liegen die Abflussbeiwerte alle deutlich über 80 %, was einen sehr extremen Zustand darstellt. Für einen Bodenaufbau aus Lehm liegt der Abfluss bei wesentlich moderateren Werten zwischen etwa 1 % bis maximal etwa 12 %. Auf sandigen Standorten tritt, unter den gegebenen Niederschlagsbedingungen, an allen Hangabschnitten kein Oberflächenabfluss auf.

Trotz der zunehmenden Abflussbeiwerte bei steigender Hangneigung wird insgesamt deutlich, dass die Hangneigung gegenüber dem Bodenaufbau eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die Abflusstestehung spielt. Begründet ist diese Aussage in der Tatsache, dass die Unterschiede der Abflusswerte an den einzelnen Hangabschnitten weitaus kleiner sind, als zwischen den unterschiedlichen Bodentypen.

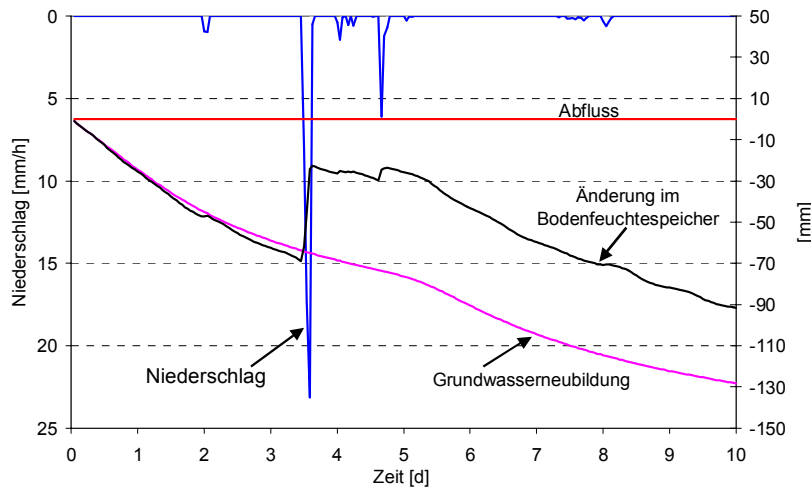
Die Niederschlagsverteilung hat ebenfalls einen stärkeren Einfluss auf die Abflusshöhe an einem Hang als die Hangneigung selbst, wie der Vergleich der Simulationen mit den lehmigen Böden für die Zeiträume mit den Niederschlägen Juni 97 und Oktober 98 zeigt. Auf diesen Sachverhalt wird in Abschnitt 6.2 näher eingegangen.

### 6.1.3 Vergleich Soonwald – Pfälzerwald

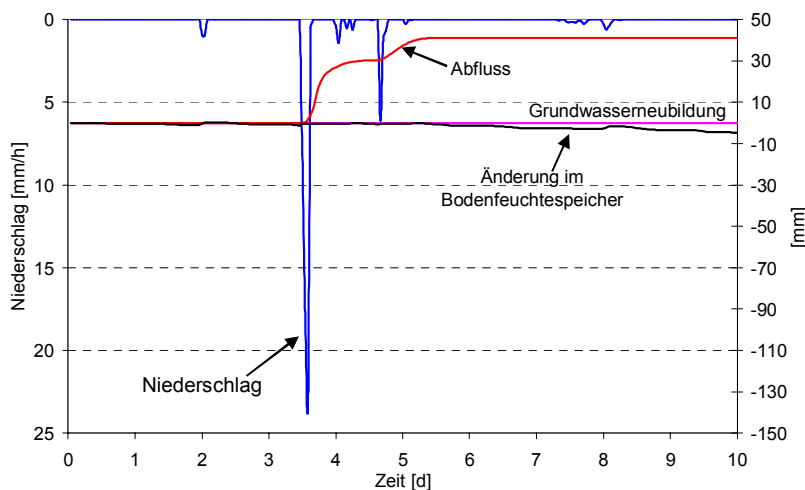
Wie erwähnt, erfolgte die weitere Bestimmung des Einflusses der geogenen Faktoren in den Untersuchungsgebieten Soonwald und Pfälzerwald über die Zuweisung der entsprechenden Bodenparameter, wie sie im Gelände ermittelt wurden (vgl. Abschnitt 4.1), auf die jeweiligen Hanggeometrien.

Hier in diesem Abschnitt sind die Simulationsergebnisse für einen 10-tägigen Berechnungszeitraum mit einem Starkregenereignis am dritten Tag, das innerhalb weniger Stunden über 90 % des gesamten Niederschlags (65,2 mm) im betrachteten Zeitraum lieferte, dargestellt. Die initiale Sättigung der Böden betrug bei beiden Szenarien etwa 30 % mit mittleren Durchlässigkeiten ( $K_f$ -Werten) von  $1,2 \cdot 10^{-5}$  m/s für die siltig-sandigen Böden im Pfälzerwald und von  $5,0 \cdot 10^{-7}$  m/s für die tonig-lehmigen Böden im Soonwald. In Abb. 6.5 (Pfälzerwald) und Abb. 6.6 (Soon-

wald) sind die kumulativen Größen für die sich ergebende Änderung im Bodenfeuchtespeicher, den oberirdischen Abfluss und den unterirdische Abfluss, welcher der Grundwasserneubildung gleich gesetzt werden kann, dargestellt.



**Abb. 6.5:** Simulation Pfälzerwald:  $K_f = 1,2 \cdot 10^{-5}$  m/s, Bodenfeuchte  $\Theta = 28,7$  %



**Abb. 6.6:** Simulation Soonwald:  $K_f = 5,0 \cdot 10^{-7}$  m/s, Bodenfeuchte  $\Theta = 30,1$  %

Die Ergebnisse bestätigen den erwarteten Unterschied in der Wasserdynamik der beiden Untersuchungsgebiete als Konsequenz aus ihrem geologischen Ausgangssubstrat.

Insgesamt liefern die Simulationen für den Bereich des Pfälzerwaldes (Abb. 6.5) sehr hohe Infiltrations- und Perkolationsraten. Der Boden nimmt sämtliches Niederschlagswasser auf und führt es über eine Tiefenversickerung dem Grundwasser zu. Aufgrund der hohen Wasserleitfähigkeit wird eine Bodensättigung kaum erreicht. Oberflächenabfluss findet nicht statt. Zwischenabflusskomponenten (Interflow) sind als Transportprozess unbedeutend. Resultierend aus den beschriebenen Gegebenheiten, ergibt sich eine hohe Grundwasserneubildungsrate, die zum Teil bis 50 % vom Niederschlag erreicht. Dadurch wird die Abflussbildung stark gedämpft und birgt nur eine sehr geringe Hochwassergefahr.

Anders sieht die Situation für die Simulationsergebnisse des Soonwaldes aus. Durch die geringen Durchlässigkeiten der Böden ist die Versickerungskapazität geringer und durch eine schnelle Auffüllung im Bodenfeuchtespeicher wird oft partielle Bodensättigung erreicht. Dadurch ist hier eine hohe Neigung zu schnellem Zwischenabfluss gegeben, teilweise tritt Oberflächenabfluss auf. Das System ist nur wenig in der Lage die Abflussbildung zu dämpfen. Der Boden ist kaum in der Lage das Niederschlagswasser zu speichern. Das ganze System reagiert sehr schnell und birgt ein relativ hohes Hochwasserrisiko. Grundwasserneubildung im simulierten Zeitraum wird nicht gefunden. Diese Ergebnisse passen sehr gut mit den Geländebefunden für die Infiltrationskapazität und Wasserleitfähigkeit der Böden im Soonwald überein (vgl. Abschnitt 4.3).

#### 6.1.4 Bewertung und Bedeutung der geogenen Faktoren

Die oben gezeigten Simulationsergebnisse zeigen eine Abhängigkeit der Abflusststehung von den jeweiligen geogenen Gegebenheiten an einem Hang. Insbesondere hat der vorliegende Bodentyp bzw. die Korngrößenverteilung des entsprechenden Bodens einen entscheidenden Einfluss auf die bodenhydraulischen Eigenschaften und damit auf die Wasserdynamik. So weisen vor allem feinkörnige Substrate eine hohe Anfälligkeit für das Entstehen von Oberflächen- bzw. oberflächennahem Abfluss auf, der in besonderem Maße zum Hochwassergeschehen in einem Einzugsgebiet beitragen kann. Verstärkt wird diese Tendenz zusätzlich durch einen lagigen Aufbau des Bodenprofils, wie man ihn bei den, zu Staunässe neigenden, Pseudogleyen im Soonwald antrifft. Solch ein System ist nur wenig in der Lage die Abflussbildung zu dämpfen. Der Boden ist kaum in der Lage das Niederschlagswasser zu speichern. Das ganze System reagiert sehr schnell, es wird Sättigung erreicht und oberflächennah tritt Abfluss auf. Insbesondere bei hoher Vorsättigung der Böden, wie dies im Winterhalbjahr der Fall ist, erfolgt der Abfluss sehr schnell und birgt ein relativ hohes Hochwasserrisiko.

Grobkörnige und offenporige Böden, wie die Braunerden im Bereich des Pfälzerwaldes, liefern dem gegenüber gute Infiltrationskapazitäten mit hohen Anteilen an Tiefenversickerung bzw. Grundwasserneubildung. Hier wirken sich die Geologie und die sich daraus entwickelnden Böden positiv auf die Systemeigenschaften aus. Hier ist die Hochwassergefährdung insgesamt als niedrig einzustufen.

Die Morphologie oder Hangneigung spielt gegenüber der Substratzusammensetzung nur eine untergeordnete Rolle. Zwar nimmt die Wahrscheinlichkeit von Hochwasser relevanten Abflussereignissen mit zunehmender Hangneigung zu, doch ist diese weit weniger ausgeprägt, als der Substrateinfluss (vgl. Abb. 6.3). Bei hypothetisch angenommenem gleichen Bodentyp auf allen Hangabschnitten erfolgt in den steileren Teilen ein schnellerer Anstieg des Gesamtabflusses wie in den flacheren Abschnitten. Wobei dieser Effekt zu feinkörnigeren, d.h. weniger durchlässigen Bodentypen hin am stärksten ausgeprägt ist. Bei sandigem Substrat spielt die Hangneigung keine entscheidende Rolle, da sie von der hohen Infiltrationskapazität bzw. hohen Leitfähigkeit überdeckt wird. Beleg hierfür sind die Geländeversuche im Pfälzerwald (Abschnitt 4.3), wo man diese sandigen Waldböden vorfindet. Im Soonwald dagegen sehen die tatsächlichen Gegebenheiten anders aus (Kap. 3). So weisen die Braunerde-Böden in den steileren Hangabschnitten am Oberhang verstärkt durch ihren Skelettreichtum eine höhere Infiltrationskapazität auf als die lehmig-tonigen Pseudogleye auf den flacheren Teilen. Daher findet man dort in den steileren Hangbereichen eine bessere Versickerung von Niederschlagswasser. Das bedeutet, dass flache Hanglagen mit undurchlässigen Böden bei weitem einen höheren Beitrag zur Hochwassergefährdung liefern, als steile Hangabschnitte mit durchlässigen Böden.

Die geogen bedingten Eigenschaften eines Gebietes sind in der Regel natürlich vorgegeben und lassen somit wenig Spielraum für mögliche Eingriffe in das System. Die vorgegebene Geländemorphologie und das geologische Ausgangsgestein sind unabänderlich festgelegt. Allerdings besteht die Möglichkeit das Bodengefüge zu verändern und somit Einfluss auf die Wasserdynamik zu nehmen. Diese Eingriffsmöglichkeiten sind jedoch meistens negativ. Wird das Bodengefüge beispielsweise durch Verdichtung infolge von Befahrung der Fläche mit schweren Maschinen gestört, so werden dadurch die bodenhydraulischen Eigenschaften verschlechtert und es kommt zu einer weiteren Verminderung der Infiltrationsfähigkeit, die das gesamte Abflussgeschehen zusätzlich verstärkt und damit die Hochwassergefährdung verschärft. Strukturelle Eingriffe in das Bodengefüge, wie etwa beim Tiefenlockern verdichteter Bodenhorizonte oder beim Einbringen von Basen in tiefgründig versauerte Bodensubstrate, bergen ebenfalls gewisse Risiken. Werden staunasse, ton- und schluffreiche, gefügelabile Standorte bearbeitet, so sollte darauf geachtet werden nur abgetrocknete Böden zu bearbeiten. Auf feuchten Böden kann durch eine knetende Bearbeitung das vorhandene Porengefüge empfindlich gestört bzw. zerstört werden (Abb. 6.7). In Abschnitt 6.4 wird die Frage nach Eingriffsmöglichkeiten bei der Behandlung des Einflusses unterschiedlicher Walderschließungsformen auf den Wasserhaushalt erneut aufgegriffen.



**Abb. 6.7:** Bearbeitung von trockenen Böden mit Lockerungseffekten (links) und von nassen Böden mit Zerstörung des Porengefüges (rechts), aus SCHÜLLER et al. (2002)

Somit lässt sich abschließend festhalten, dass es Gebiete gibt, die allein aufgrund ihrer geogen bedingten Gebietseigenschaften ein erhöhtes Risiko einer Hochwassergefährdung aufweisen, wie dies beispielsweise im Bereich des Untersuchungsgebietes Soonwald der Fall ist. Andererseits weisen Regionen mit günstigeren geogenen Eigenschaften bezüglich des Wassertransports, wie zum Beispiel der Pfälzerwald kein oder nur ein vermindertes Hochwasserrisiko auf.

## 6.2 Niederschlagsverteilung

Die Niederschlagsverteilung hat als maßgeblicher Faktor der klimatischen Systembedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Wasserdynamik eines Gebietes. Sie beschreibt die Inputfunktion des zur Verfügung stehenden Wassers im System und bestimmt, wie bereits kurz in Abschnitt 6.1.2 gezeigt, in hohem Maße das Abflussgeschehen.

Zur Verdeutlichung sind in diesem Abschnitt die Ergebnisse von Niederschlag-Abfluss-Simulationen für die beiden Hänge in den Untersuchungsgebieten bei unterschiedlichen Niederschlagsszenarien dargestellt. Beschrieben wird das Abflussverhalten bei Starkregenereignissen und bei länger andauerndem Landregen. Als Startbedingungen wurden jeweils die beiden extremen Bodenfeuchtezustände gesättigt und trocken (bis zur residualen Bodenfeuchte) gewählt.

### 6.2.1 Starkregenereignis

Nach BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) gibt es für Starkregen (Wolkenbrüche, Platzregen) keine allgemeine Definition in Bezug auf die Niederschlagshöhe bzw. die Intensität der Nieder-

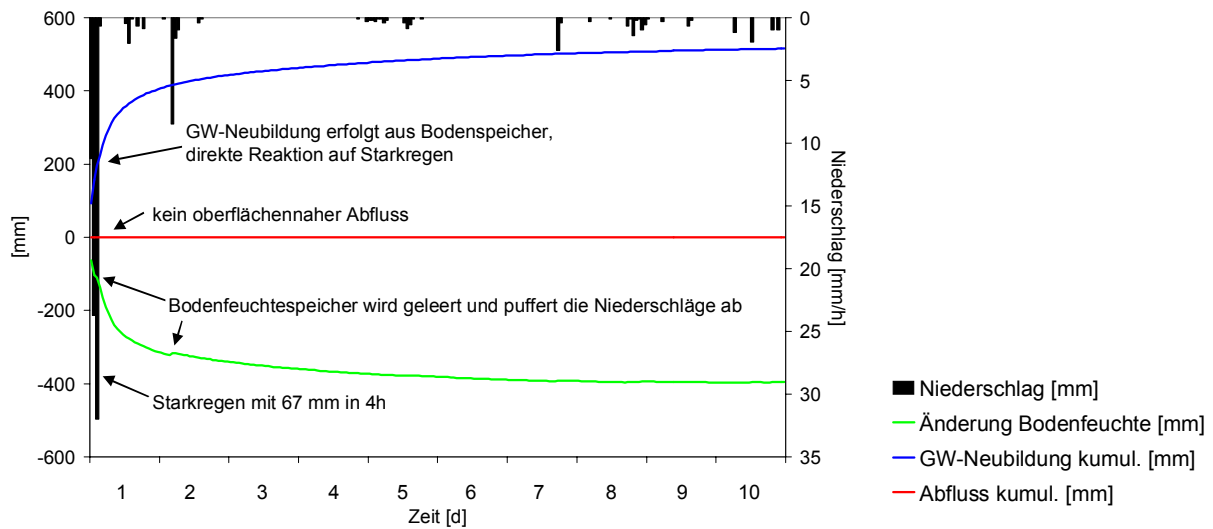
schläge. Starkregen sind nach der Festlegung des Deutschen Wetterdienstes Niederschläge, die in einer bestimmten Zeiteinheit folgende Mindesthöhen liefern:

$$P = \sqrt{5 * t - \left(\frac{t}{24}\right)^2} \quad , \quad (6.1)$$

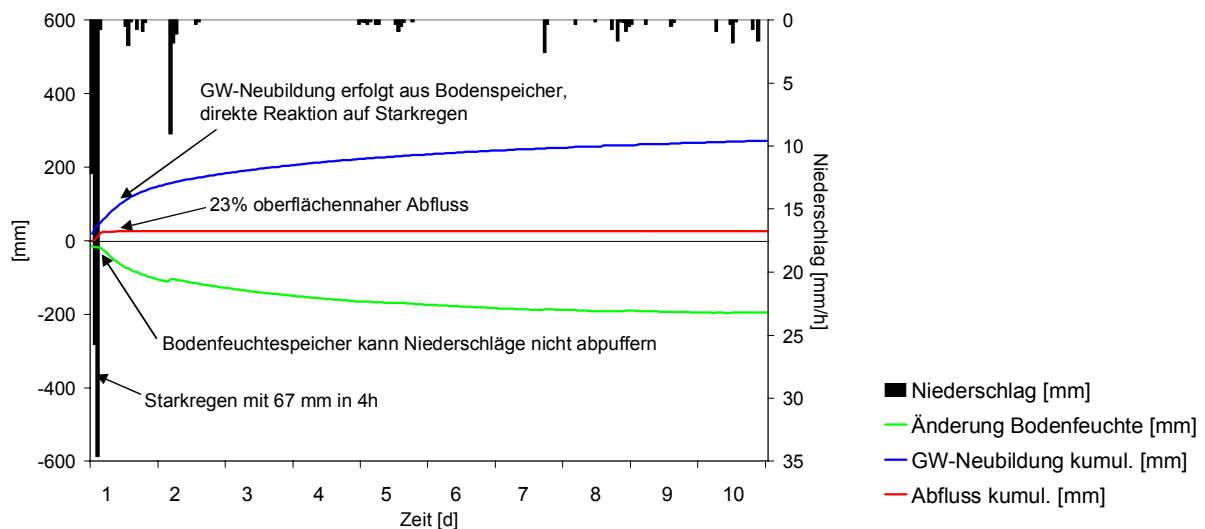
wobei der Niederschlag P in mm und die Zeitdauer t des Regens in Minuten angegeben sind.

Das Starkregenereignis, das für die Simulationen eines 10-tägigen Berechnungszeitraumes ausgewählt wurde, liefert in 4 h insgesamt 67 mm Niederschlag und erfüllt so die oben aufgeführte Bedingung um mehr als das Doppelte.

In den Abb. 6.8 (Pfälzerwald) und Abb. 6.9 (Soonwald) sind zunächst die resultierenden Bedingungen bei gesättigten Böden in den jeweiligen Testgebieten dargestellt. Neben dem Niederschlag enthalten die Abbildungen die Änderung im Bodenwassergehalt, den unterirdischen Abfluss, der der Grundwasserneubildung gleich gesetzt wird, sowie den oberflächennahen Abfluss, welcher sich aus echtem Oberflächenabfluss und Interflow zusammensetzt.



**Abb. 6.8:** Simulation Starkregen Testgebiet Pfälzerwald bei gesättigtem Boden



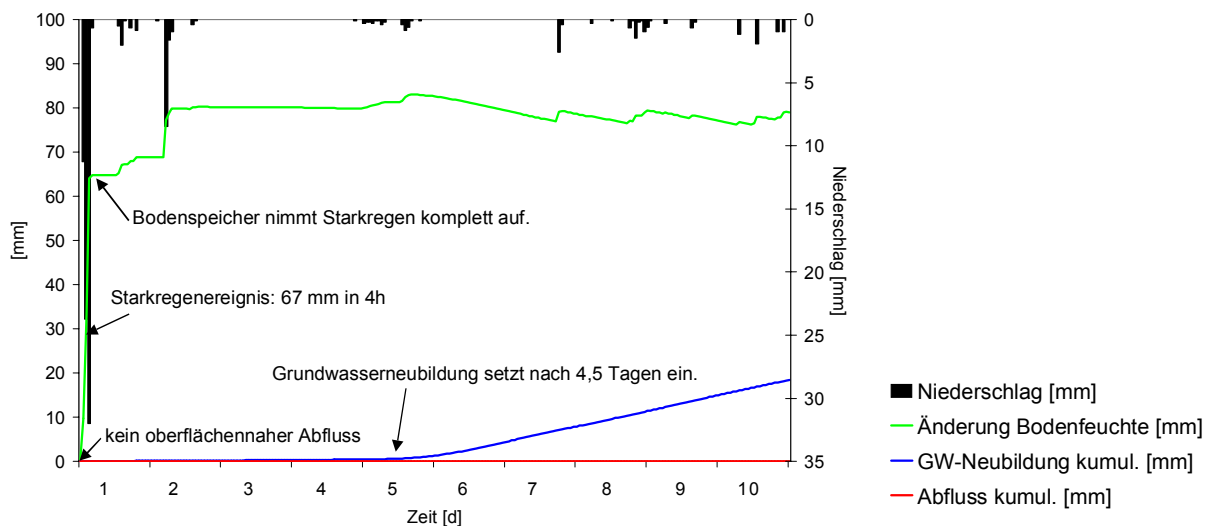
**Abb. 6.9:** Simulation Starkregen Testgebiet Soonwald bei gesättigtem Boden



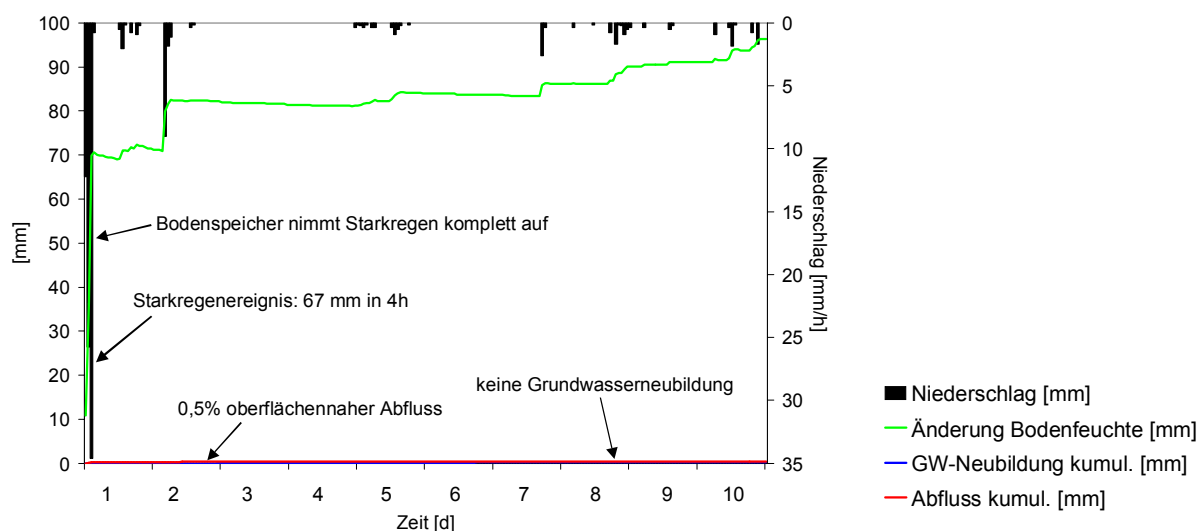
Man erkennt in den Abbildungen deutlich, dass in beiden Gebieten unmittelbar eine Grundwasserneubildung durch Wasserflüsse am unteren Systemrand auftritt. Die Böden sind nicht in der Lage das Bodenwasser zu halten. Im Pfälzerwald ist diese Tendenz ca. doppelt so hoch wie im Soonwald, da hier die Böden wesentlich durchlässiger sind und eine verstärkte Tiefenperkolation begünstigen. Damit einhergehend verringert sich entsprechend der Bodenwassergehalt.

Ein wesentlicher Unterschied im Verhalten der beiden Modellhänge liegt aber im direkten Abflussgeschehen, das durch das Starkregenereignis hervorgerufen wird. So erkennt man im Simulationsergebnis für den Pfälzerwald (Abb. 6.8), dass hier trotz der hohen Niederschlagsintensität von 67 mm in 4 h keinerlei Oberflächenabfluss entsteht. Die offenporigen sandig-lehmigen Braunerden sind in der Lage das gesamte Wasser aufzunehmen und in die Tiefe abzuleiten.

Anders sieht das Abflussverhalten im Soonwald (Abb. 6.9) aus. Hier führt der Starkregen zu einem sprunghaften Anstieg des Oberflächenabflusses, welcher durch hohe Anteile an schnellem Zwischenabfluss verstärkt wird. Insgesamt werden etwa 23 % des Niederschlagsaufkommens oberflächennah und Hochwasser wirksam abgeführt. Diese Verhältnisse findet man vor allem im Winterhalbjahr im Soonwald vor (vgl. Abschnitt 4.4).



**Abb. 6.10:** Simulation Starkregen Testgebiet Pfälzerwald bei trockenem Boden



**Abb. 6.11:** Simulation Starkregen Testgebiet Soonwald bei trockenem Boden

Betrachtet man nun die Verhältnisse für das gleiche Starkregenereignis beim Auftreffen auf trockene Böden in den Testgebieten, so ergibt sich ein anders Bild. Abb. 6.10 zeigt die Ergebnisse für das Gebiet Pfälzerwald und in Abb. 6.11 sind die Ergebnisse für den Soonwald dargestellt. Der Simulationszeitraum beträgt wiederum 10 Tage.

Unter diesen residualen Bodenfeuchtebedingungen sind die Böden in beiden Gebieten in der Lage das Niederschlagswasser zurück zu halten. Im Pfälzerwald tritt keinerlei oberflächennaher Abfluss auf und selbst im Soonwald werden lediglich etwa 0,5 % des Regens als Interflow Abfluss wirksam. Liegt der Bodenwassergehalt allerdings etwas höher, was in Natura sehr wahrscheinlich ist, so erhöht sich auch die Abflussmenge entsprechend. Diese Situation findet man bevorzugt im Sommerhalbjahr vor, wo konvektive Gewitterregen des öfteren Hochwasserwellen hervorrufen (vgl. Abschnitt 4.4 sowie Abschnitt 6.1, Abb. 6.6).

Ein großer Unterschied besteht für diese Modellrechnungen in dem Sachverhalt, dass am Testhang Soonwald im Simulationszeitraum kein unterirdischer Abfluss zu beobachten ist. Im Pfälzerwald dagegen erreicht nach ca. 4½ Tagen das Niederschlagswasser den unteren Systemrand in 1,5 m Tiefe und verlässt als Grundwasserneubildung die obere Bodenzone.

Die bodenhydraulischen Eigenschaften, bedingt durch den Bodenaufbau und die Korngrößenverteilung bzw. die Durchlässigkeiten des Substrates, wirken sich also wieder maßgeblich auf die Wasserdynamik in den betrachteten Gebieten aus. Die Niederschlagshöhe selbst spielt zwar eine gewichtige Rolle hinsichtlich der Abflusststehung, doch zeigt sich ein mehr als deutlicher Zusammenhang zwischen Abflusshöhe, Vorfeuchte des Boden und der Bodenhydraulik.

## 6.2.2 Landregen

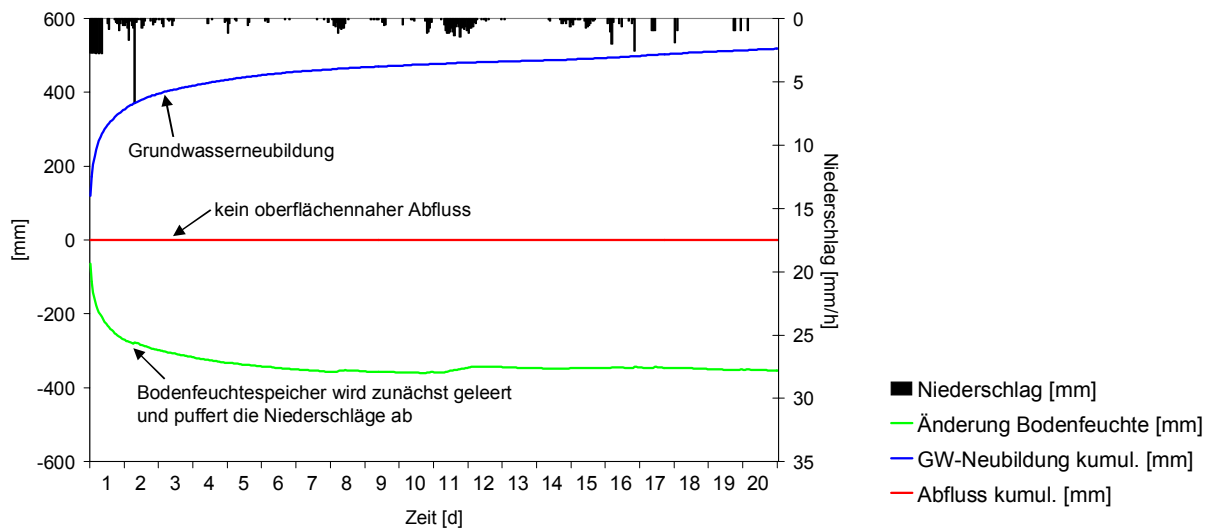
Landregen stellen einen lang anhaltenden Niederschlag dar, der dabei aber nur geringe Intensitäten aufweist. Zur Erfassung des Einflusses von Landregenereignissen auf die Abflussdynamik an den beiden Modellhängen wurde ein 20-tägiger Simulationszeitraum ausgewählt. Dieser ist charakterisiert durch einen künstlichen Landregen über eine Dauer von 9 h mit einer Intensität von 3 mm/h. Im gesamten Zeitraum treten weitere Regenereignisse auf, die ebenfalls in die Kalkulation mit eingehen.

Die Ergebnisdarstellungen sind analog zu denen aus Abschnitt 6.2.1 für den Starkregen aufgebaut. Zunächst sind in den Abb. 6.12 und Abb. 6.13 die Szenarien für gesättigte Bodenverhältnisse im Pfälzerwald und im Soonwald aufgezeigt. Daran schließen sich die Darstellungen der Simulationsergebnisse bei trockenen Böden in den beiden Untersuchungsgebieten an (Abb. 6.14 und Abb. 6.15).

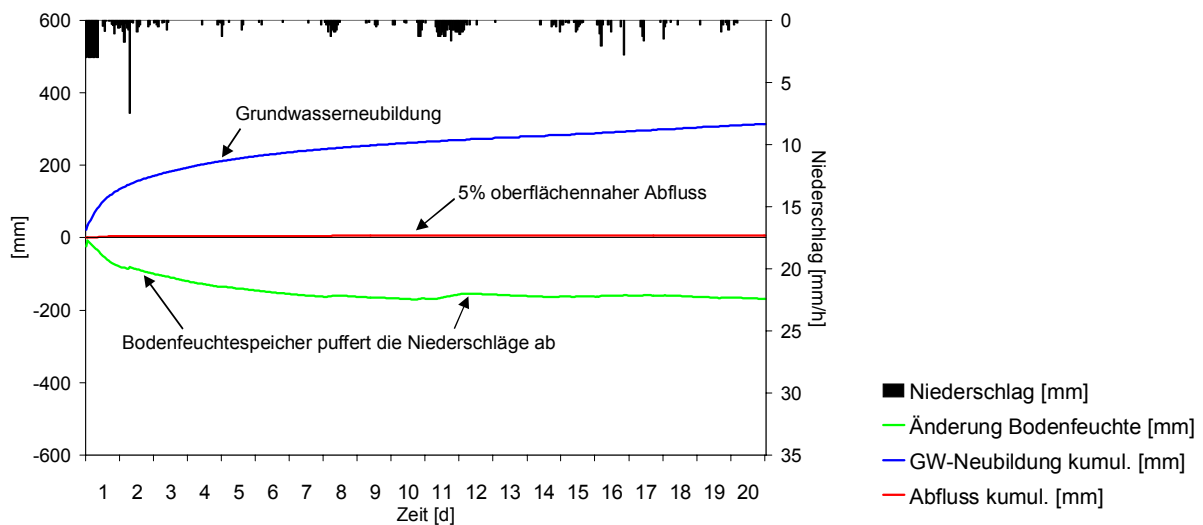
Deutlich sind in den Abbildungen für die gesättigten Bodenverhältnisse wieder die relativ hohen Beträge des unterirdischen Abflusses zu erkennen, der gut mit der Änderung im Bodenfeuchtespeicher korrespondiert. Dabei fällt auf, dass die Grundwasserneubildungsrate im Pfälzerwald (Abb. 6.12) wie erwartet um einiges höher liegt als diejenige im Soonwald (Abb. 6.13). Sie erreicht mit über 500 mm etwa einen doppelt so hohen Wert. Oberflächennaher Abfluss tritt am Modellhang Pfälzerwald nicht auf, da der Niederschlag des Landregens problemlos vom Boden aufgenommen wird. Auch im Soonwald kann der Boden die Niederschläge gut kompensieren, allerdings entsteht hier, durch Interflow hervorgerufen, ein oberflächennaher Gesamtabfluss von etwa 5 % des Niederschlags. Da dieser aber zur Hauptsache zu Beginn des betrachteten Zeitraums auftritt, kann davon ausgegangen werden, dass es sich dabei um Interflow handelt, der durch die hypothetisch angenommene komplette Sättigung des Modellhangs hervorgerufen

wird. Wie man im weiteren Verlauf der Ganglinien sieht, werden die nächsten Landregen am siebten und elften Tag durch den Bodenfeuchtespeicher sowohl am Hang Soonwald als auch am Hang Pfälzerwald zurück gehalten und abgepuffert.

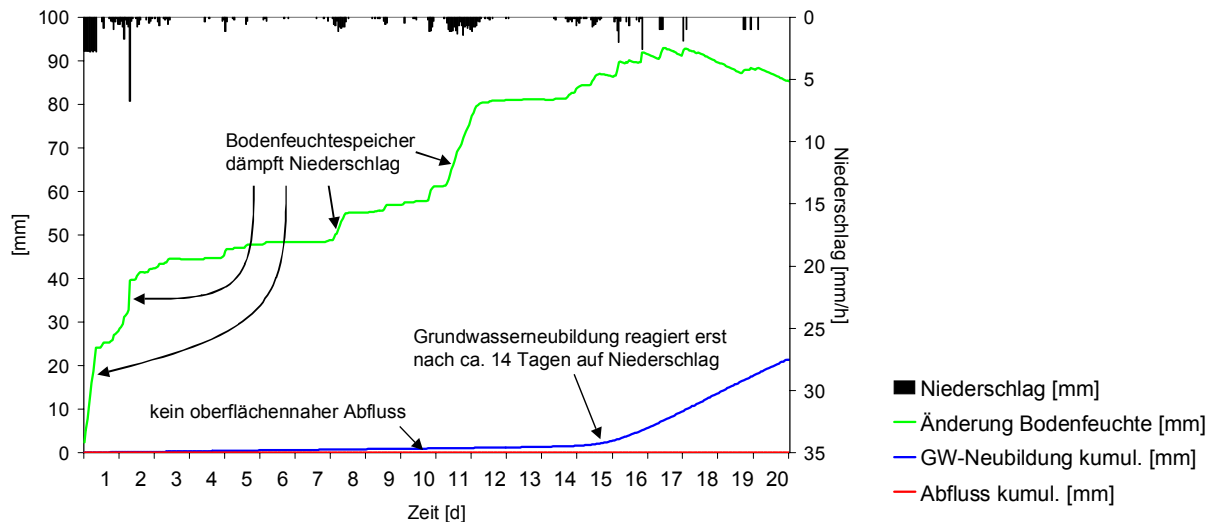
Damit bleibt festzuhalten, dass Landregen hinsichtlich einer Hochwassergefährdung im Bereich des Pfälzerwaldes keine Rolle spielen und im Soonwald lediglich dann, wenn durch vorausgegangene Niederschlagsereignisse der Boden weitestgehend gesättigt ist und damit der Boden keine weitere Infiltrationskapazität mehr aufweist. Diese Verhältnisse findet man bevorzugt im ausklingenden Winter vor (vgl. Abschnitt 4.4). Wobei dann die Abflusssituation durch die begleitende Schneeschmelze zusätzlich verschärft werden kann.



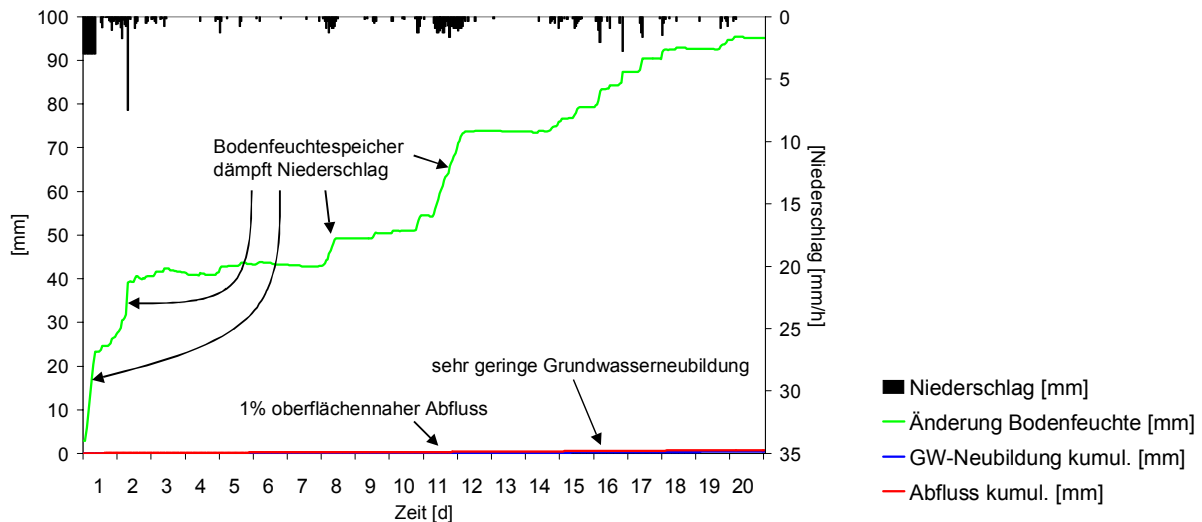
**Abb. 6.12:** Simulation Landregen Testgebiet Pfälzerwald bei gesättigtem Boden



**Abb. 6.13:** Simulation Landregen Testgebiet Soonwald bei gesättigtem Boden



**Abb. 6.14:** Simulation Landregen Testgebiet Pfälzerwald bei trockenem Boden



**Abb. 6.15:** Simulation Landregen Testgebiet Soonwald bei trockenem Boden

Fallen die gleichen Landregen auf Hänge mit Böden, die bis zur residualen Bodenfeuchte ausgetrocknet sind, so ergibt sich folgendes Bild. In den ersten 14 Tagen nimmt der Boden sowohl im Pfälzerwald (Abb. 6.14) als auch im Soonwald (Abb. 6.15) sämtliches Niederschlagswasser auf und dämpft sie komplett ab. Die Bodenfeuchteverhältnisse lassen an beiden Hängen keine nennenswerte Grundwasserneubildung zu. Im Bereich des Soonwaldes bleibt das über den gesamten Simulationszeitraum so. Im Pfälzerwald beginnt dagegen, wiederum bedingt durch die gute Tiefenversickerung, nach 2 Wochen ein merklicher unterirdischer Fluss über den unteren Systemrand einzusetzen. Grundwasser wird gebildet und eine Reaktion darauf ist im Verlauf des Bodenwassergehaltes zu sehen. Im Soonwald ist keine solche Reaktion zu erkennen. Hier findet man als Auswirkung auf das etwas stärkere Niederschlagsereignis am zweiten Tag ein leichtes Einsetzen von oberflächennahem Abfluss. Dieser hat seine Ursache, wie auch schon bei der Beschreibung des Starkregenereignisses im vorherigen Abschnitt ausgeführt, im Einsetzen von Interflow auf Zwischenschichten in den obersten Bodenhorizonten.

### 6.2.3 Bewertung und Bedeutung der Niederschlagsverteilung

Wie die oben gezeigten Simulationsergebnisse bestätigen, hat die Niederschlagsverteilung einen entscheidenden Einfluss auf die Wasserdynamik und somit auf das Abflussverhalten auf den untersuchten Hangbereichen. Der Niederschlag erst liefert die Wassermengen, die dann je nach Systembedingungen zu einer möglichen Hochwasserwelle führen können. Insbesondere Starkregen, die zumeist als Konvektionsregen nieder gehen, spielen eine wesentliche Rolle, da nur sie mit entsprechend hoher Niederschlagsintensität stark erhöhte Abflussbeiwerte erzwingen.

Länger anhaltende Landregen hingegen bergen nur ein relativ geringes Risiko der Hochwasserentstehung. Wie die Simulationsergebnisse zeigen, reicht hier im allgemeinen die Infiltrations- und Versickerungskapazität der Böden aus, um schnelle Abflussspitzen zu dämpfen. Treffen Landregen jedoch auf eine Kombination von ungünstigen Faktoren wie schlechte bodenhydraulische Eigenschaften und hohe Bodenfeuchtegehalte, so besteht auch hier die Möglichkeit Hochwasserabflüsse zu erzeugen. Die ist vornehmlich im Untersuchungsgebiet Soonwald der Fall und wird nicht nur durch die Modellergebnisse dokumentiert, sondern auch durch die gemessenen Abflussganglinien im Gebiet belegt (vgl. Abschnitt 4.4, sowie TEMPEL, 2000).

Die Möglichkeiten der Einflussnahme in Bezug auf das Niederschlagsaufkommen sind eigentlich nicht vorhanden. Es bleibt lediglich wieder dafür Sorge zu tragen, dass die gegebenen bodenhydraulische Eigenschaften durch menschliche Eingriffe nicht verschlechtert werden.

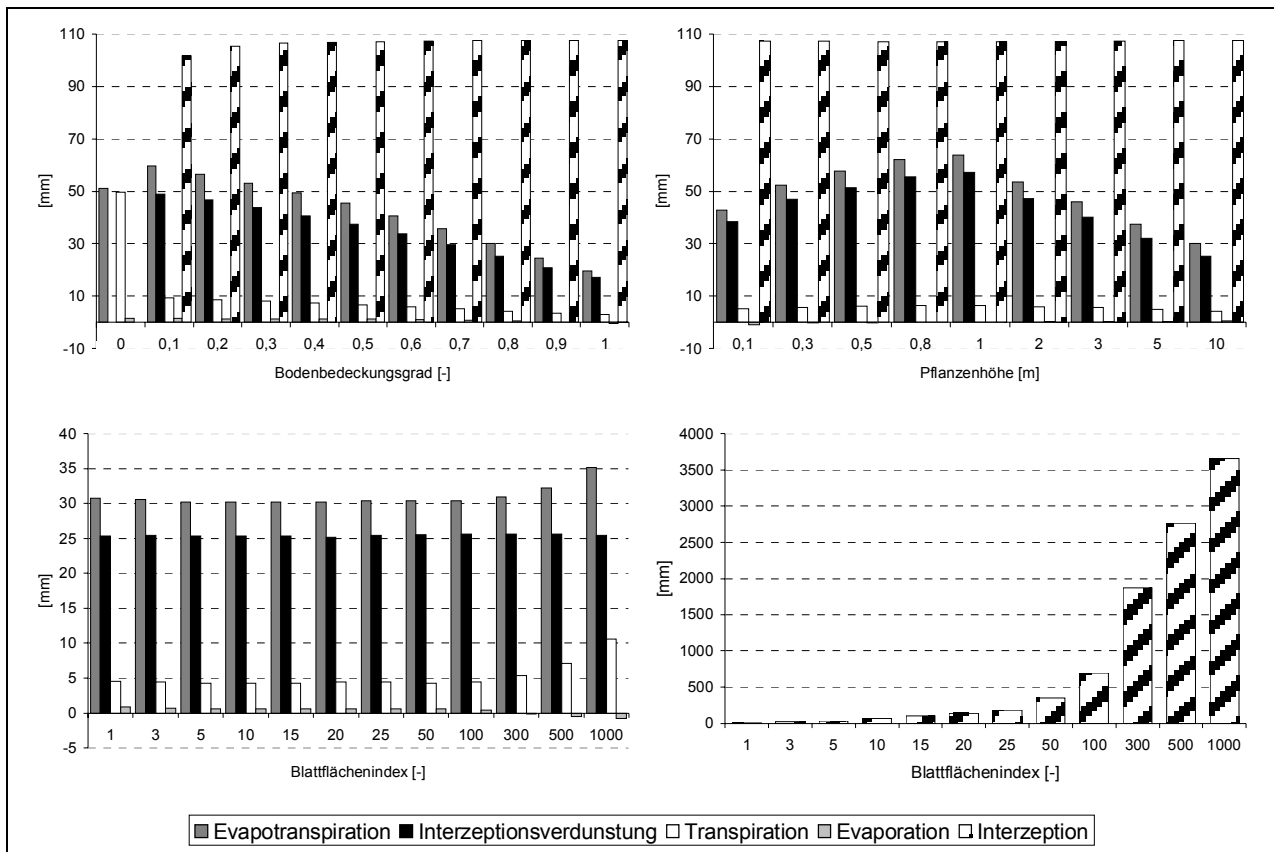
Insgesamt betrachtet kann die Einflussgröße Niederschlagsverteilung nicht verändert werden. Damit liegt das Risiko eines Hochwassers in den Gebietseigenschaften begründet. Im Pfälzerwald ist es so gut wie nicht vorhanden, der Soonwald dagegen stellt ein potenzielles Entstehungsgebiet für Hochwässer dar.

## 6.3 Bestockung

### 6.3.1 Sensitivitätsanalyse der Landnutzungsparameter

Der Einfluss der Bestockung (= forstlicher Bewuchs) ist bei der Fragestellung nach der Relevanz von Waldstandorten hinsichtlich ihres Rückhaltevermögens für Hochwässer von großem Interesse. Aus diesem Grund und da zur Beschreibung der Pflanzendecke im Modellsystem CATFLOW nur ein begrenzter Parametersatz zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 2.4.3), wurde zunächst eine Sensitivitätsanalyse der drei Parameter durchgeführt, mit denen in der Literatur (u.a. DVWK, 1990, HEIDERICH, 1989 und MITSCHERLICH, 1971, 1977) der forstliche Bewuchs zur Hauptsache charakterisiert wird. Bei den ausgewählten Parametern handelt es sich um den Bodenbedeckungsgrad (BBG), die Pflanzenhöhe (PFH) und den Blattflächenindex (BFI). Abb. 6.16 zeigt in einer Gesamtübersicht die Ergebnisse. Dargestellt sind die Interzeption der Pflanzendecke, die Bodenverdunstung (Evaporation), die Pflanzenverdunstung (Transpiration), die Interzeptionsverdunstung sowie die Evapotranspiration als Summe über die drei letztgenannten in Abhängigkeit von Änderungen im Bodenbedeckungsgrad, der Pflanzenhöhe und im Blattflächenindex.

Durchgeführt wurde der Sensitivitätstest mittels einer Parametervariation über einen Simulationszeitraum von drei Tagen mit einem kontinuierlichen Niederschlag von 0,03 mm/min bzw. 1,8 mm/h. Im Anhang unter Abschnitt 10.4, Tab. A8 findet sich eine tabellarische Aufstellung der verwendeten Modellläufe mit den zugehörigen Parameter- und Ergebnisgrößen.



**Abb. 6.16:** Ergebnisse Sensitivitätsanalyse der Bestockungs-Parameter

Betrachtet man den Parameter Bodenbedeckungsgrad, dessen Variation in Abb. 6.16 links oben darstellt ist, so erkennt man zwei Dinge. Zum einen eine sehr starke direkte Abhängigkeit der Größe des Interzeptionsspeichers und zweitens die Abhängigkeit der Evapotranspiration. Bei einem Bodenbedeckungsgrad von null, was de facto bedeutet, dass kein Bewuchs vorhanden ist, findet keine Interzeption statt. Demzufolge kann auch keine Verdunstung aus dem Interzeptionsspeicher erfolgen. In diesem Fall setzt sich die Evapotranspiration nur aus Bodenverdunstung und Pflanzentranspiration zusammen. Das letztere überhaupt auftritt verwundert zunächst. Streng genommen ist Pflanzentranspiration ohne Pflanzendecke nicht möglich. Allerdings wurde in der Variation des Bodenbedeckungsgrades im Parametersatz eine Durchwurzelung des Bodens über die Eingabe der Wurzeltiefe vorgegeben. Somit wird über den Wurzelraum dem Boden Wasser entzogen und transpiriert. Wenn man die Wurzeltiefe bei dieser Einstellung zusätzlich auf null einstellt, dann fällt auch der Transpirationsbeitrag weg.

Sobald jedoch der Bodenbedeckungsgrad vorgegeben wird, also tatsächlich ein Bewuchs vorhanden ist, steigt die Interzeption der Pflanzendecke enorm an und ändert sich nur wenig mit steigendem Bodenbedeckungsgrad. Sobald in der Pflanzendecke eine Interzeption simuliert wird, besteht auch die Möglichkeit der Interceptionsverdunstung, die dann den wesentlichen Anteil an der gesamten Evapotranspiration ausmacht. Des weiteren kann man erkennen, dass mit zunehmender Möglichkeit der Verdunstung aus dem Interzeptionsspeicher heraus, die Evapotranspiration nachlässt.

Bei der Variation der Pflanzenhöhe (Abb. 6.16 oben rechts) lag der Bodenbedeckungsgrad in allen Fällen bei 0,8 und der Blattflächenindex bei 15. Wie man erkennen kann, liegt die Interzeption unabhängig von der Wuchshöhe immer auf dem gleichen Niveau. Das deutet darauf hin, dass sie nur vom Bodenbedeckungsgrad und vom Blattflächenindex abhängen. Dass der Blatt-

flächenindex einen gewaltigen Einfluss auf die Interzeptionsleistung hat, verdeutlicht die Darstellung in Abb. 6.16 unten rechts. Hier wurde der Blattflächenindex von einem Wert 1 bis auf 1000 erhöht, was zur Folge hat, dass die Interzeption fast exponentiell ansteigt. Allerdings kommen die Werte des Blattflächenindex über 25 in der Natur so gut wie gar nicht vor. HEIDERICH (1989) gibt in seiner Arbeit über 1000 Blattflächenindizes an und nur einer erreicht mit 30 einen Wert über 25. Aus diesem Grund sind die extremen Werte in Abb. 6.16 eher hypothetischer Natur.

Der Einfluss der Pflanzenhöhe auf die Evapotranspiration gibt kein einheitliches Bild. So nimmt bis zu einer Wuchshöhe von 1 m die Evapotranspiration mit steigender Pflanzenhöhe zu, doch danach nimmt sie wieder ab und hat bei einer Höhe von 10 m den niedrigsten Wert erreicht. Bei Bewuchshöhen über 10 m läuft das Modell nicht und liefert keine Ergebnisausgaben. Da dieses Problem nicht behoben werden konnte, können hierzu keine Aussagen gemacht werden.

Der Einfluss des Blattflächenindex auf die Evapotranspirationsleistung ist in Abb. 6.16 unten links dargestellt. Hier ist keine direkte Korrelation zu sehen. Im Bereich realistischer Blattflächenindizes ändern sich die Beträge von Interzeptionsverdunstung, Transpiration und Evaporation nicht. Erst bei Werten von  $> 100$  nimmt die Bodenverdunstung merklich ab und erreicht sogar negative Werte, so dass die Evapotranspiration um den entsprechenden Betrag ansteigt.

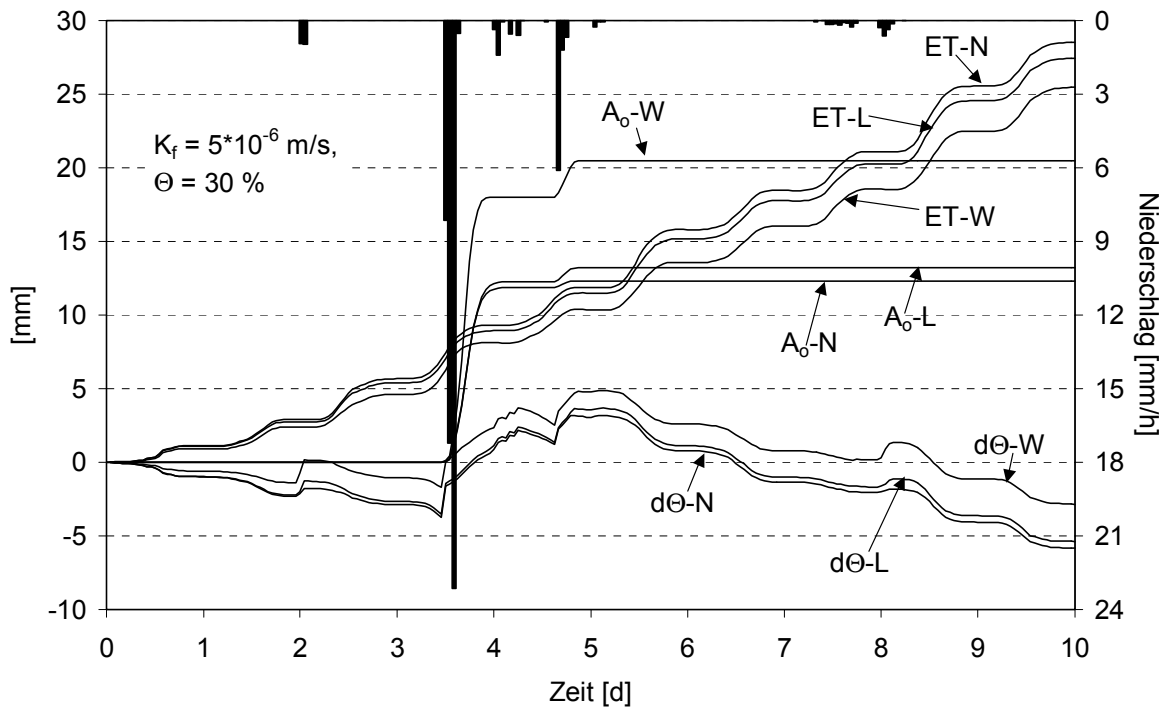
Insgesamt bestimmen Bodenbedeckungsgrad und Blattflächenindex als maßgebliche Parameter den Wasserhaushalt über die Bestockung. Mit steigendem Bodenbedeckungsgrad nimmt die Interzeption zu und die Evapotranspiration ab. Beim Blattflächenindex ist kein Einfluss auf die Evapotranspiration zu sehen, aber die Interzeption nimmt auch hier mit steigendem Blattflächenindex zu. Der Einfluss der Pflanzenhöhe bleibt kritisch zu sehen.

### 6.3.2 Einfluss unterschiedlicher Bestockungen Wiese-Laubwald-Nadelwald

Um den Unterschied verschiedener Bestockungen in forstlich genutzten Gebieten und deren Einfluss auf die Wasserdynamik zu erfassen, wurden Simulationen mit drei Parametersätzen durchgeführt, die die Landnutzungen Wiese, Laubwald und Nadelwald beschreiben sollen. Im Anhang in Abschnitt 10.6 sind die Tabellen der Parametersätze zur Beschreibung der drei Nutzungstypen aufgeführt.

Eine weitere Abstufung in verschiedene Waldbestandsformen und Wuchsgesellschaften wurde nicht durchgeführt. Denn sowohl der zur Verfügung stehende Parametersatz als auch die Literaturangaben ließen einen solchen als nicht sehr sinnvoll erscheinen. Es bleibt generell das Problem bestehen, in wie weit forstliche Wuchsformen überhaupt mit dem Modell CATFLOW beschrieben werden können. Daher sind auch die hier aufgezeigten Ergebnisse mit der nötigen Vorsicht zu bewerten.

Die Modellergebnisse des Einflusses der drei Vegetationsformen Grasland (W), Laubwald (L) und Nadelwald (N) sind in Abb. 6.17 zu sehen. Dargestellt ist der gleiche 10-tägige Simulationszeitraum mit einem Starkregenereignis (65,2 mm) am dritten Tag wie in den Abbildungen 6.6 und 6.7 in Abschnitt 6.1.3. In Abhängigkeit der verschiedenen Pflanzendecken sind die Änderung in der Bodenfeuchte ( $d\Theta$ ), die Evapotranspiration (ET) und der Oberflächenabfluss ( $A_o$ ) dargestellt. Die Simulationen wurden auf der Hanggeometrie des Testhanges im Soonwald mit den entsprechenden Bodenparametern durchgeführt, da man hier die Auswirkungen auf das Abflussgeschehen besser sehen kann.



**Abb. 6.17:** Simulation unterschiedlicher Vegetationstypen am Modellhang Soonwald

Deutlich zeigt sich, wie zu Beginn Änderungen im Bodenfeuchtespeicher mit der Evapotranspiration einhergehen. Das kleine Regenereignis am zweiten Tag wird problemlos durch eine Auffüllung des Bodenspeichers aufgefangen. Das Extremereignis am dritten Tag dagegen übersteigt die Aufnahmekapazität des Bodens und Oberflächenabfluss und oberflächennaher Abfluss setzen ein. Dabei ist dieser auf der Wiese am höchsten. Bei den Waldstandorten vermag der Nadelwald aufgrund seiner etwas höheren Transpirationsleistung den Abfluss etwas besser abzufangen. Der Regen am fünften Tag löst erneut oberflächennahen Abfluss aus, da der Bodenfeuchtespeicher noch gefüllt ist. Es fällt auf, dass die Unterschiede unter den forstlichen Flächen nicht allzu groß sind. Auch wenn der Interzeptionsspeicher bei Nadelwald etwas größer ist, so spielt dies bei diesem Niederschlagsereignis keine Rolle mehr, da nach Sättigung des Speichers alles weitere Wasser nicht mehr zurück gehalten werden kann. Insgesamt ist der Wald gegenüber der Grasfläche besser in der Lage Niederschläge zurück zu halten, da er zum einen ein höheres Interzeptionsvermögen besitzt und zum anderen seine Verdunstungsleistung höher liegt als bei Wiesen. Die Abflusshöhe unter Grasland liegt bei diesem Beispiel annähernd doppelt so hoch wie für forstliche Nutzungen.

### 6.3.3 Bewertung und Bedeutung der Bestockung

Generell zeigt sich, dass Baumbestände ein wesentlich höheres Rückhaltevermögen aufweisen als Wiesen. Aufgrund ihres höheren Interzeptionsspeichers und ihrer stärkeren Evapotranspiration werden Niederschläge stärker gedämpft. Ein Wechsel in der Bestockung zwischen Nadel- und Laubwald hat nur geringe Auswirkungen auf die Wasserdynamik. So beträgt unter Nadelwald die Interzeption zwar teilweise bis zu 75 % vom Niederschlag (MITSCHERLICH, 1977), doch werden diese Raten nur bei leichtem Regen erreicht. Bei den Hochwasser relevanten Starkregen oder ergiebigen Dauerregen hingegen liegt die Interzeptionsleistung beider Baumarten auf dem annähernd gleichen Niveau von 25-30 %. Selbst im Winterhalbjahr verschiebt sich dieses, bedingt durch den Laubfall, nur geringfügig (OTTO, 1994).



Als weiter positiver Aspekt muss die verstärkte Wurzelbildung von Bäumen gegenüber anderen Vegetationsarten angesehen werden. Diese fördert das Entstehen von Makroporositäten, die eine bessere Leitfähigkeit zur Folge haben (CASPER, 2002). Allerdings können diese Makroporen auch bevorzugte Fließbahnen im Boden schaffen über die das Niederschlagswasser sehr schnell lateral verfrachtet werden kann (vgl. Abschnitt 2.1).

Die Möglichkeiten der Einflussnahme durch menschliche Eingriffe in Waldsystemen ist zweifelsfrei gegeben. Doch wird kein Forstamtsleiter oder Waldbesitzer von heute auf morgen seine Bestandszusammensetzung ändern. Auch können durch die Simulationsergebnisse mit dem Modell CATFLOW keine konkreten Handlungsempfehlungen in diese Richtung gegeben werden. Der Parametersatz und die daraus resultierenden Ergebnisse sind, wie die Sensitivitätsanalyse gezeigt hat, sehr kritisch zu bewerten. Es darf angezweifelt werden, dass über die Zuordnung von Bodenbedeckungsgraden, Blattflächenindizes, Wurzeltiefen und Pflanzen- bzw. Baumhöhen die Vielfalt der denkbaren und tatsächlich vorhandenen Bestandsstrukturen hinreichend beschrieben werden kann.

Dennoch lässt sich feststellen, dass selbst ein Waldbestand mit niedrigem Bedeckungsgrad ein besseres Rückhaltevermögen aufweist als eine Kahlfläche, die sich ähnlich einer Wiese verhält. Wahrscheinlich ist die Rückhaltekapazität jedoch noch niedriger, da Kahlschlagsflächen besonders anfällig gegenüber Erosionserscheinungen sind, die die Situation noch weiter verschlechtern. Hinsichtlich einer Hochwasserprävention sollte versucht werden nur auf kleinen Flächen Holz einzuschlagen und wo möglich könnte auch auf gezielten Einzelhieb von Bäumen zurückgegriffen werden. Generell sollte versucht werden bestehende Waldbestände auf Hochwasser relevanten Standorten zu erhalten und durch naturnahen, angepassten Waldbau eventuell sogar die prinzipiell günstigen Eigenschaften für die Wasserretention zu fördern.

## **6.4 Walderschließungsformen**

### **6.4.1 Einfluss unterschiedlicher Walderschließungsformen**

In den bisher dargelegten Ergebnissen sind Fragen nach dem Einfluss der forstlichen Bewirtschaftung auf die Abflussdynamik von Waldstandorten nur am Rande erwähnt worden. Diese sollen im folgenden Abschnitt eingehender anhand von Simulationsergebnissen zu bestimmten Walderschließungsformen erörtert werden.

Hinter dem Punkt Walderschließungsformen verbergen sich alle anthropogenen Eingriffe in die Systemfaktoren des Wassertransports, wie sie zu Beginn dieses Kapitels beschrieben wurden. In erster Linie sind hier die Dichte und Art des Wege- und Drainagenetzes zu nennen. Wobei gerade in forstlich genutzten Gebieten neben dem permanent befahrbaren Waldwegen und Forststraßen auch noch zusätzlich die temporär genutzten Rückegassen und Rückewege sowie die Anlage von Seillinien zur Holzbringung zu berücksichtigen sind. Ferner spielen Eingriffe in den Bodenkörper und seine hydraulischen Eigenschaften durch die Waldbewirtschaftung eine Rolle.

Um ein möglichst breites Spektrum unterschiedlicher Walderschließung zu erfassen, wurden in enger Absprache mit der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz unter freundlicher Mithilfe von Herrn Dr. Schüler die nachfolgend aufgelisteten Varianten verschiedener Walderschließungsformen ausgewählt (Tab. 6.1). Diese wurden für das Untersuchungsgebiet Pfälzerwald auf der Hanggeometrie des Gesamthanges und für das Testgelände im Soonwald auf den Hanggeo-

metrien des steileren Ober- und Mittelhangbereiches sowie den flachen Bereich des Unterhanges mit CATFLOW simuliert. Berechnungsgrundlage im 10-tägigen Simulationszeitraum waren sowohl das Starkregenereignis (67 mm innerhalb von 4 h) wie auch der Landregen (3 mm/h über 9 h hinweg), die bereits bei den Modellläufen aus Abschnitt 6.2 verwendet wurden. In den Ergebnisdarstellungen sind jeweils die resultierenden Abflussbeiwerte in Abhängigkeit der Walderschließungsform aufgetragen für das Auftreten des Niederschlagsereignisses bei trockenem und gesättigtem Boden. Die angegebenen Abflussbeiwerte beziehen sich bei allen Darstellungen nur auf das entsprechende Niederschlagsereignis und nicht auf weitere Niederschläge im weiteren Verlauf des Simulationszeitraums.

**Tab. 6.1:** Variationen der simulierten Walderschließungsformen

Variante	Walderschließungsform	
1	normaler Waldbestand ohne Erschließung	= Wald ohne Wege- und Drainagenetz
2	3% Wege mit 2 Drainagegräben, 14% Rückegassen	= Wald mit 50 lfm/ha Wegen mit beidseitigen Drainagegräben, Normalerschließung mit Rückegassen im Abstand von 25 m = 400 lfm/ha
3	6% Wege mit 2 Drainagegräben, 14% Rückegassen	= Wald mit 100 lfm/ha Wegen mit beidseitigen Drainagegräben, Normalerschließung mit Rückegassen im Abstand von 25 m = 400 lfm/ha
4	6% Wege ohne Drainagegräben, Wasser reinfiltiert in Waldbestand, 14% Rückegassen	= Wald mit 100 lfm/ha Wegen ohne Drainagegräben, Normalerschließung mit Rückegassen im Abstand von 25 m = 400 lfm/ha
5	3% Wege mit 2 Drainagegräben, 7% Seillinienstrecken	= Wald mit 50 lfm/ha Wegen mit beidseitigen Drainagegräben, Normalerschließung mit Seillinien im Abstand von 15 m = 240 lfm/ha
6	6% Wege mit 2 Drainagegräben, 7% Seillinienstrecken	= Wald mit 100 lfm/ha Wegen mit beidseitigen Drainagegräben, Normalerschließung mit Seillinien im Abstand von 15 m = 240 lfm/ha
7	6% Wege ohne Drainagegräben, Wasser reinfiltiert in Waldbestand, 7% Seillinienstrecken	= Wald mit 100 lfm/ha Wegen ohne Drainagegräben, Normalerschließung mit Seillinien im Abstand von 15 m = 240 lfm/ha

Bei den einzelnen Simulationen wurde der Wald mit dem Parametersatz für Laubwald (vgl. Tab. A9 im Anhang) und für die normalen Bodenparameter für den entsprechenden Hang beschrieben. Bereiche der Seillinien wurden durch die Landnutzungsparameter für Wiese bei normalen Bodenparametern dargestellt. Die Realisierung der Rückegassen erfolgte über normale Bodenparameter mit um den Faktor 10 verringerten Durchlässigkeiten und ohne jeglichen Bewuchs. Das die Verminderung der Durchlässigkeiten um den Faktor zehn als gute Annäherung an die durch Bodenverdichtung gestörten bodenhydraulischen Bedingungen in diesen Bereichen als realistisch betrachtet werden kann, ergibt sich aus den eigenen Infiltrationsversuchen und Messungen der Leitfähigkeiten und wird bereits von HILDEBRAND (1983a) als vernünftige Größenordnung angegeben. Der Flächenanteil an Wegen wird durch Bereiche gekennzeichnet, die zu 100 % Abfluss wirksam sind. Damit werden alle Wege als befestigte Wege angesehen, die im Gegensatz zu den unbefestigten Erdwegen noch eine Restinfiltrationskapazität aufweisen (vgl. Abschnitt 4.3).

### Simulation Starkregen Pfälzerwald

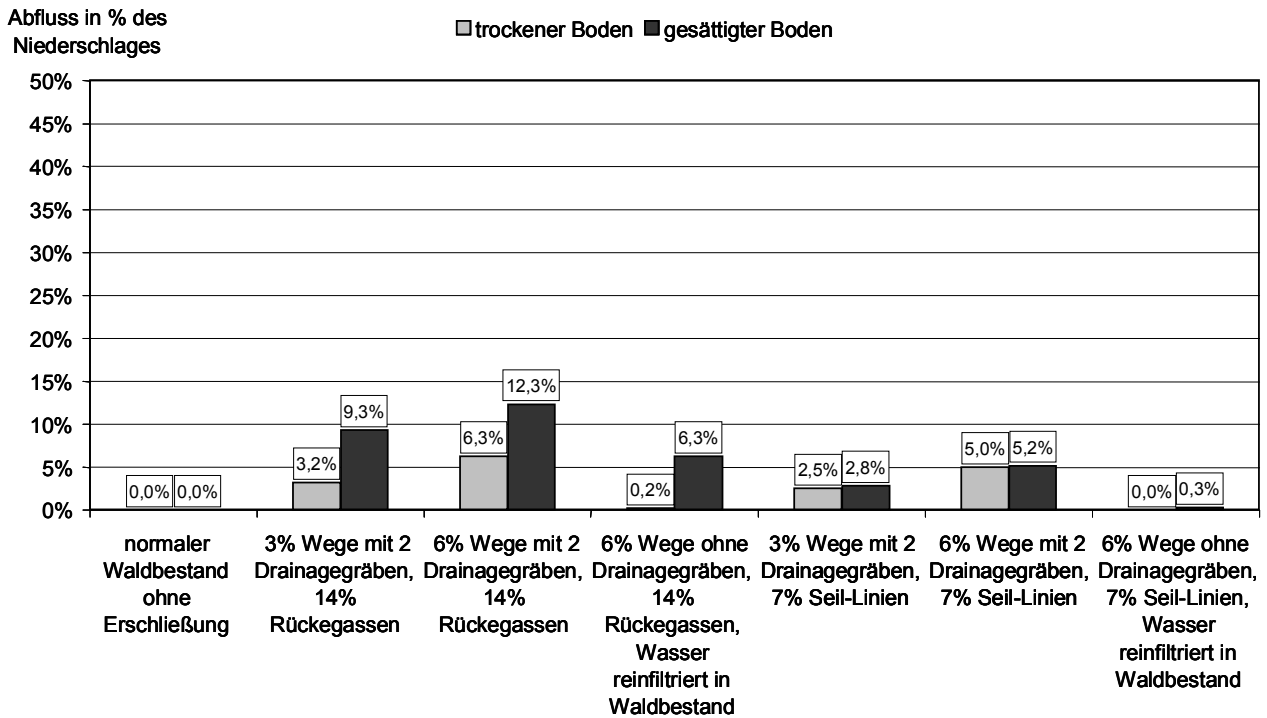


Abb. 6.18: Simulation Walderschließungsformen: Starkregen Pfälzerwald

### Simulation Starkregen Soonwald flacher Unterhang

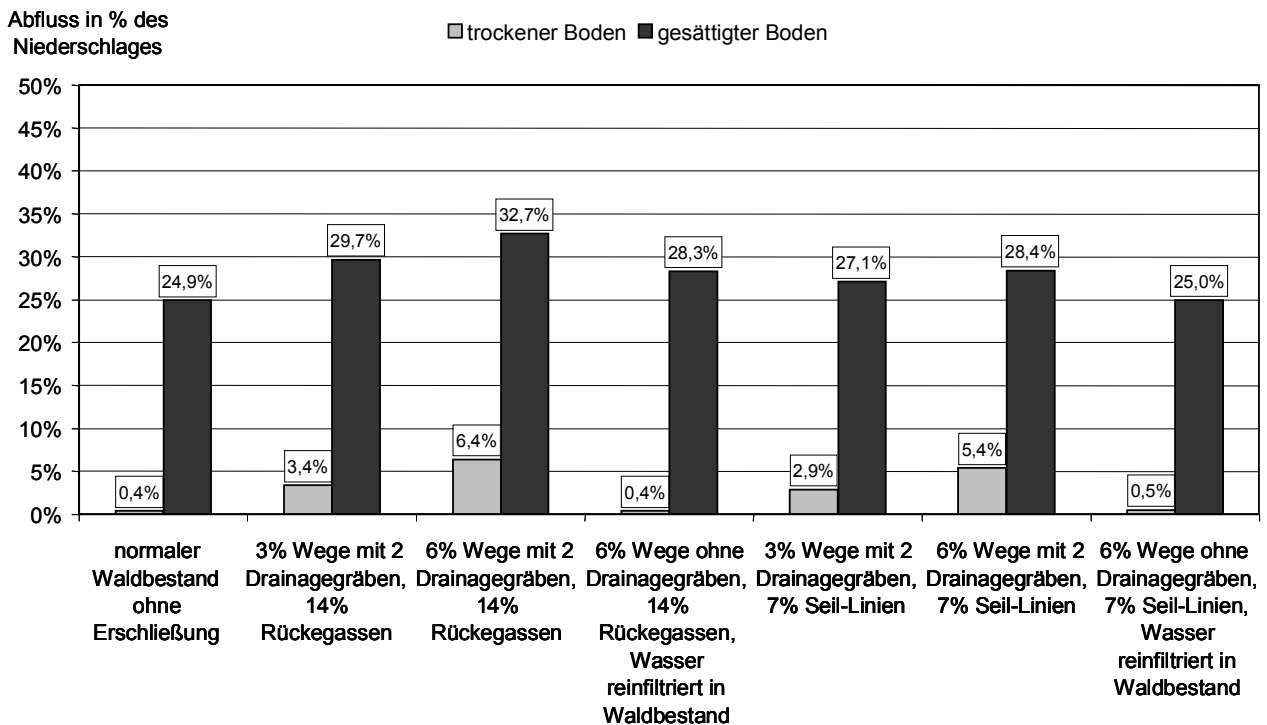


Abb. 6.19: Simulation Walderschließungsformen: Starkregen Soonwald flacher Unterhang

### Simulation Starkregen Soonwald steiler Ober- und Mittelhang

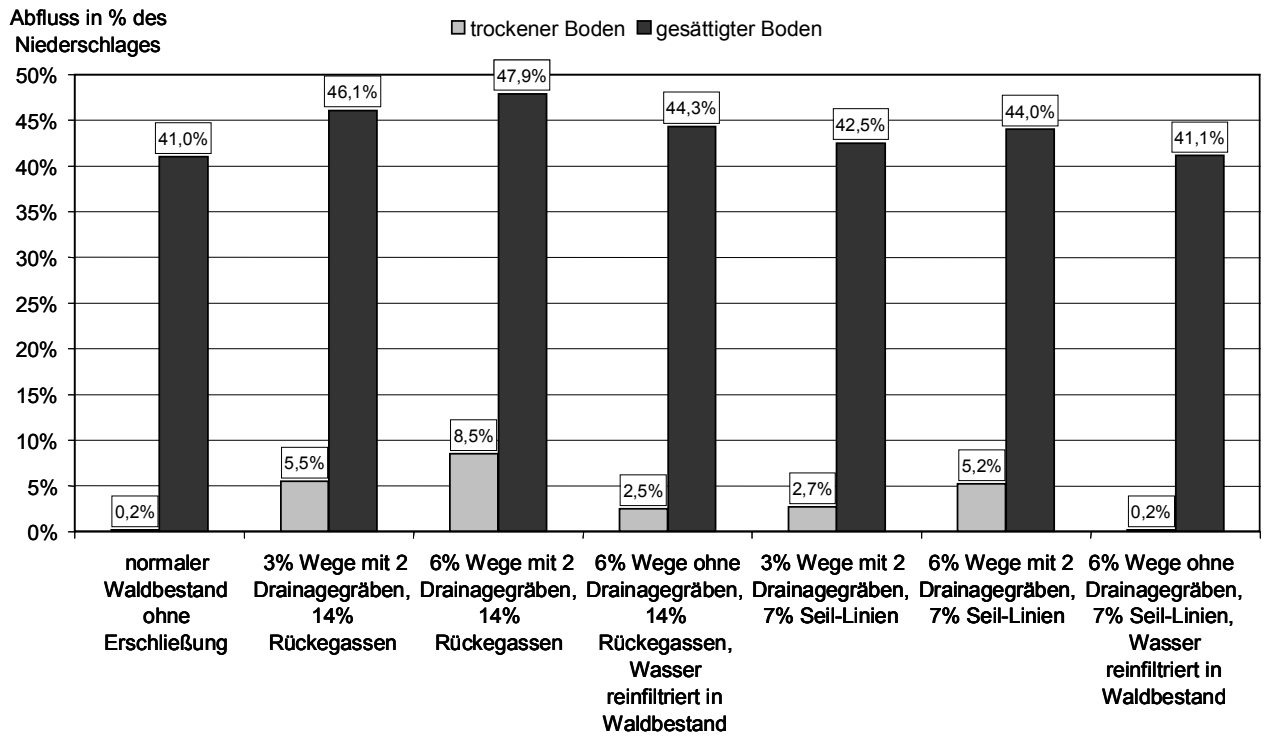


Abb. 6.20: Simulation Walderschließungsformen: Starkregen Soonwald steiler Ober- und Mittelhang

### Simulation Landregen Pfälzerwald

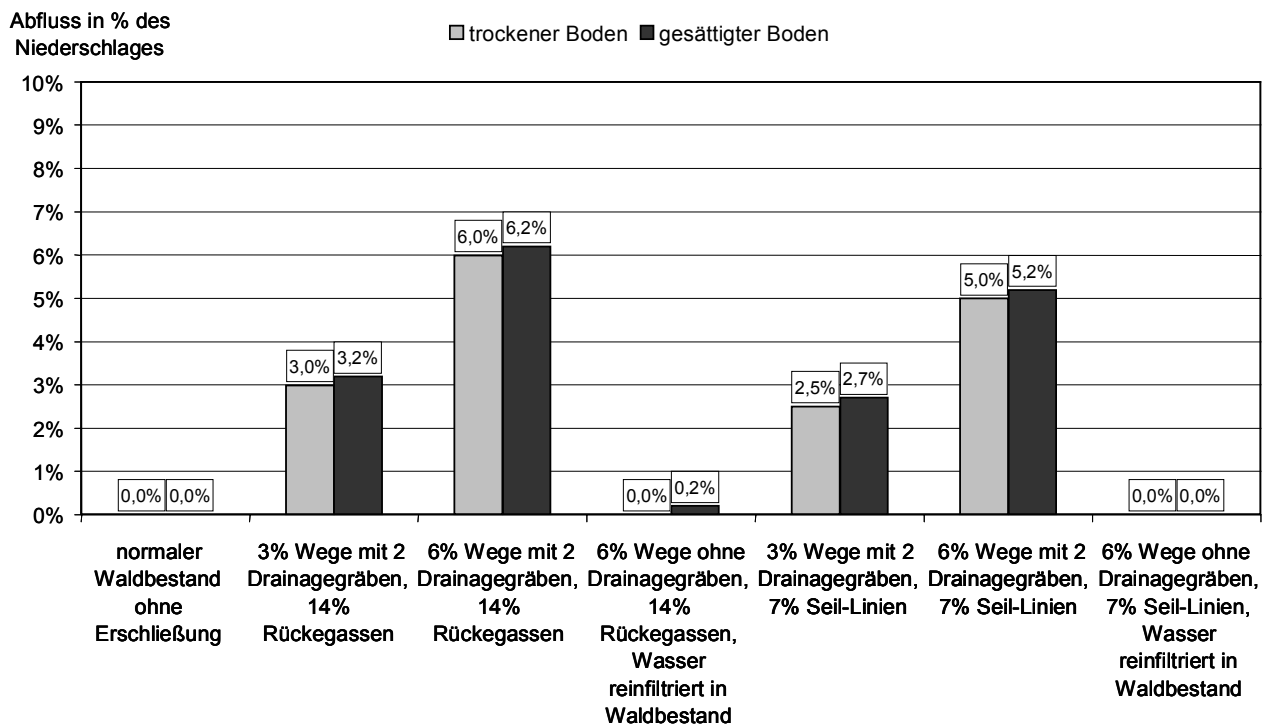


Abb. 6.21: Simulation Walderschließungsformen: Landregen Pfälzerwald

### Simulation Landregen Soonwald flacher Unterhang

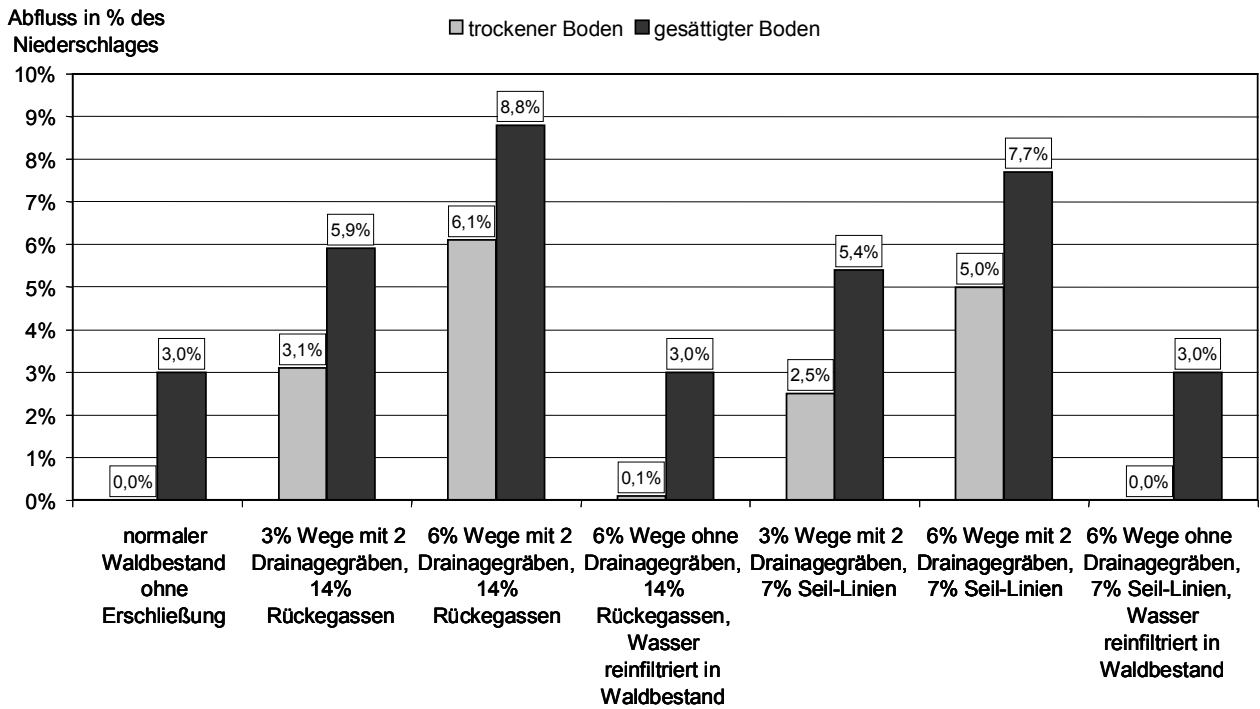


Abb. 6.22: Simulation Walderschließungsformen: Landregen Soonwald flacher Unterhang

### Simulation Landregen Soonwald steiler Ober- und Mittelhang

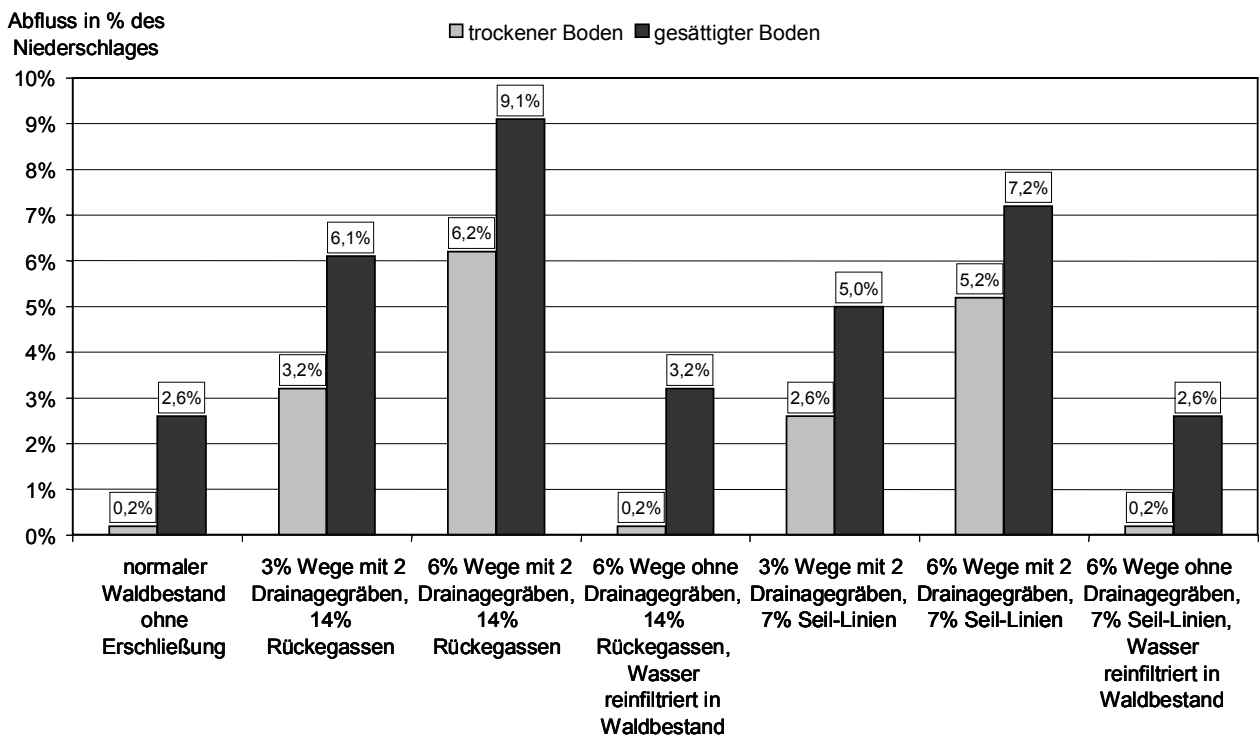


Abb. 6.23: Simulation Walderschließungsformen: Landregen Soonwald steiler Ober- und Mittelhang

Wie bereits bei der Beschreibung der geogenen Faktoren und der Niederschlagsverteilung ausgeführt, so zeigt sich auch hier bei den Simulationen der unterschiedlichen Walderschließungsformen im Bereich des Pfälzerwaldes, dass die Abflusswerte sehr niedrig liegen (Abb. 6.18 und Abb. 6.21). Im ungestörten Waldbestand kommt es bei keinem der beiden Niederschlagsformen unabhängig von der Bodenvorfeuchte zu Abfluss in Oberflächennähe. Sämtlicher Abfluss fließt nur von den Wegen ab, wie man anhand der Prozentwerte, insbesondere bei trockenen Verhältnissen, leicht sehen kann. Bei gesättigten Böden fließt zusätzlich ein Anteil von etwa 3 % des Niederschlags von den Rückegassen ab, da hier die gute Infiltrations- und Perkulationskapazität der Böden durch Bodenverdichtung vermindert ist. Gelingt es hier das abfließende Wasser von den Wegen und aus den begleitenden Gräben in den Wald zurückzuführen, so kann bei Starkregen der Abflussbeiwert halbiert werden und bei Landregen wird sogar fast die vollständige Vermeidung von Abfluss erreicht.

Beim Vergleich zur Nutzung konventioneller Rückegassen zu Seillinienstrecken fällt auf, dass der Abfluss sich dort nur auf die Wege und Gräben beschränkt und von den Seillinien kein Abfluss zu erwarten ist. Leitet man den Wege- und Drainageabfluss hier wieder zurück in den ungestörten Waldbestand, so gelingt es, bis auf das Starkregenereignis, den Abfluss komplett zurückzuhalten.

Insgesamt überwiegen an den bewaldeten Hangstandorten im Pfälzerwald die guten bodenhydraulischen Eigenschaften des Boden so stark, dass Unterschiede in der Walderschließung nicht weiter ins Gewicht fallen, da das gesamte Abflussaufkommen ohnehin sehr niedrig ist.

Betrachtet man sich nun dagegen die Verhältnisse im Bereich der tonig-lehmigen Böden im Soonwald, findet man andere Abflusshöhen vor. Bei trockenen Bodenverhältnissen sind selbst die schlechter Wasser durchlässigen Substrate in der Lage den Niederschlag unabhängig vom Niederschlagsereignis zu retadieren. Lediglich der Wege- und Drainageabfluss wird aus dem Gebiet ausgetragen. Es zeigt sich wieder der Zusammenhang mit der Wege- und Grabendichte, wie er auch im Pfälzerwald aufgezeigt wurde. Je höher die Wege- und Grabendichte ausfallen, desto höher ist der Abflussbeiwert. Seillinienstrecken bewirken auch hier eine Verringerung der Abflussmengen.

Bei gesättigten Bedingungen liegen die Abflussbeiwerte im flachen Unterhangbereich mit Hangneigungen von maximal 2 Grad bei extremen Starkregenereignissen zwischen 25 % und 33 %, je nach Wege- und Grabendichte und ob Rückegassen oder Seillinien betrieben werden. Im Bereich des steileren Ober- und Mittelhangs liegen die Abflusswerte nochmals insgesamt etwa 15 % höher. Hier werden maximale Abflussbeiwerte von fast 50 % erreicht bei einer Wegedichte von 100 lfm/ha mit beidseitigen Drainagegraben und etwa 400 lfm/ha Rückegassen. Beim Vorhandensein von Seillinien im Gebiet wird der Anteil des Niederschlags, der zurückgehalten werden kann zwar um 3 % erhöht, doch entlastet das die Situation insgesamt nur wenig. Das natürliche Rückhaltepotenzial ist aufgrund der widrigen Bodenverhältnisse selbst schon sehr gering.

Bei länger andauernden Landregen spiegelt sich der Einfluss der Walderschließung besser wider. Verglichen mit den Ergebnissen im Pfälzerwald, liegen die Abflussbeiwerte bei gesättigten Böden in etwa im gleichen Rahmen. Insgesamt ist das Abflussaufkommen bei Walderschließung mit Rückegassen etwa 3 % und bei Seillinien etwa 2-2,5 % höher als im Pfälzerwald.

Die Rückführung des abfließenden Niederschlagswassers von den Wegen und aus dem Drainagenetz in den ungestörten Waldbestand bringt auch hier eine spürbare Entlastung der gesamten Abflusssituation. Allerdings liefern insbesondere die Bereiche der Rückegassen, mit ihrer durch

Verdichtung noch stärker Verminderten Infiltrationskapazität, noch deutliche Abflussanteile die nicht retadiert werden können.

#### 6.4.2 Bewertung und Bedeutung unterschiedlicher Walderschließungsformen

Wie Ergebnisse der durchgeführten Simulationen für die verschiedenen Erschließungsgrade in den beiden Untersuchungsgebieten belegen, lässt sich das Abflussaufkommen bewaldeter Gebiete bis zu einem bestimmten Maß beeinflussen. Es zeigt sich deutlich, dass eine Erhöhung der Feinerschließung durch ein engmaschigeres Wegenetz, direkt zu einem Anstieg des Abflusses aus diesen Bereichen führt. Verstärkt wird dieser Effekt noch durch Weg begleitende Drainagegräben. Werden diese auch noch so tief angelegt, das sie selbst die ungestörte Waldfläche entwässern, verschärft sich die Abflusssituation weiter.

Eine wichtige Rolle kommt ferner den Linienstrukturen zu, die zur Hauptsache zur Holzernte benutzt werden. Rückegassen und Rückewege tragen zu einem nicht unerheblichen Teil zur Erhöhung des Abflussaufkommens bei. Geht man nun davon aus, dass die tatsächliche Dichte dieser temporären Fuhrwege um einiges höher liegt als der Anteil von 14 %, was einer Normalerschließung mit 25 m Gassenabstand bzw. 400 lfm/ha entspricht, so kann man davon ausgehen, dass die gezeigten Abflussbeiwerte noch höher ausfallen können. Die Erhöhung des Flächenanteils durch Rückegassen kommt in erster Linie dadurch zustande, dass die Maschinenführer der schweren Forstmaschinen sich in der Praxis nicht streng an die vorgegebenen Linienführungen halten und aus Gründen des Arbeitsfortschrittes teilweise quer dazu den Bestand befahren, wie Abb. 6.24 belegt.



Abb. 6.24: Forwarder im Einsatz, Arbeiten auf und neben der Rückegasse (Fotos, SCHÜLER)

Da jedoch aus betriebstechnischen Gründen eine Mindesterschließung der Flächen durch Rückegassen gegeben sein muss, kann man durch eine gezielte Befahrung eine zusätzliche Standortverschlechterung hinsichtlich ihres Retentionspotential vermeiden. Man sollte auf eine Befahrung im durchnässten Zustand verzichten, da unter diesen Bedingungen die Standfestigkeit der Gassen herabgesetzt ist, was dann zu einem tieferen Eingraben der Fahrspuren führt. Doch die moderne Maschinenteknik, wie Breitreifen, geringer Luftdruck oder gute Gewichtsverteilung auf mehrere Achsen kann helfen die technische Befahrbarkeit zu erhalten. Zudem kann sie durch die Armierung mit Ast- und Kronenreisig verbessert werden.

Wie die Modellergebnisse weiter zeigen, bietet die Anlage von Seillinien eine mögliche Alternative zu Rückegassen. Seillinien werden nicht befahren und damit unterbleibt eine schädliche Bodenverdichtung. Das macht sich im Abflussaufkommen der Seillinienstrecken bemerkbar, die Abflussbeiwerte hier liegen um einige Prozent niedriger als diejenigen von Rückegassen.

Den größten Erfolg in Bezug auf eine Verbesserung des Retentionsvermögens von Waldstandorten kann man unabhängig von der Bewirtschaftung mittels Rückegassen oder Seillinien mit der Rückführung von abfließendem Niederschlagswasser auf den Wegen und im Grabensystem in ungestörte Waldflächen erreichen. Die Simulationsergebnisse für diese Varianten in den Abb. 6.18 bis Abb. 6.23 belegen dies.

Auf der anderen Seite zeigen sie aber auch deutlich die Grenzen der Einflussnahme durch Änderungen in den Walderschließungsformen auf. So tragen im Bereich Pfälzerwald zwar alle genannten Möglichkeiten zur Verringerung des Abflusses bei, doch ist dort die Hochwassergefährdung an sich relativ niedrig, da die gut durchlässigen sandigen Böden ohnehin nur geringe Mengen oberflächennahen Abfluss zulassen. Anders sieht die Lage im Bereich des Soonwaldes aus. Hier bergen die relativ undurchlässigen Böden mit ihrem lagigen Profilaufbau auch schon auf ungestörten Waldflächen ein hohes Risiko der Hochwasserentstehung. Wie Abb. 6.20 belegt, werden Abflussbeiwerte von über 40 % bei Starkregenereignissen und gleichzeitigen hohen Bodenfeuchten erreicht. Treffen solche Faktoren zusammen, dann kann selbst die schonendste Waldbewirtschaftung mit dem geringst möglichen Maß an Wege- und Entwässerungsdichte, einen Hochwasserabfluss nicht verhindern. Dennoch ist ein Potenzial zur Verringerung kleiner Hochwässer durch die Form der Walderschließung und Forstbewirtschaftung gegeben. Es wird nur sehr stark von den geogen gegebenen natürlichen Systembedingungen überlagert.



## 7 Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Hinblick auf die vorgegebene Zielsetzung der vorliegenden Arbeit (Abschnitt 1.2) sollen in diesem Kapitel einige Aspekte der Vorgehensweise kritisch hinterfragt werden und die gewonnenen Ergebnisse abschließend bewertet werden. Daraus abgeleitet werden die Schlussfolgerungen und ein Ausblick auf den künftigen Forschungsbedarf zur fortführenden Beantwortung noch offener Fragen.

### 7.1 Kritische Betrachtung der angewandten Methodik

Der Frage nach der Relevanz von rheinland-pfälzischen Waldstandorten hinsichtlich ihres Retentionsvermögens für Niederschlagswasser zur Minderung von Hochwasserabflüssen wurde mit Geländeuntersuchungen in zwei repräsentativen Waldstandorten und physikalisch basierten Modellrechnungen mit einem Niederschlags-Abfluss-Modell nachgegangen.

Zunächst wurde ein Modellsystem gesucht, das in der Lage sein sollte, die wesentlichen Wassertransportprozesse im Maßstab eines Einzugsgebietes zu beschreiben. CATFLOW stellt ein solches Modellsystem dar, das es erlaubt sowohl prozessorientiert die Wasserdynamik im Hangmaßstab zu simulieren als auch über die Kombination mehrerer solcher Hänge ein kleines Einzugsgebiet zu beschreiben. Zeitgleich wurden die zu untersuchenden Waldstandorte ausgewählt und erste Prozesskenntnisse über Geländeuntersuchungen gesammelt. Es stellte sich bald heraus, dass die ausgewählten Standorte zwar als repräsentativ hinsichtlich ihres hydrologischen Verhaltens angesehen werden konnten, allerdings war es nicht möglich abgeschlossene Einzugsgebiete bzw. Teileinzugsgebiete zu erfassen. Daher wurden die Modellsimulationen nur für einzelne Hangsegmente und nicht für gekoppelte Hangsysteme durchgeführt.

Hinsichtlich der Prozessidentifikation stellte dies kein Problem dar. Jedoch war es so leider nicht möglich in den Untersuchungsgebieten ein Messsystem zu installieren, mit dem es möglich gewesen wäre den Wasserhaushalt der betreffenden Hänge in einer geschlossenen Bilanz zu erfassen. Zudem war keine meteorologische Messstation in den Testgebieten vorhanden, um die entsprechenden klimatischen Gebietsdaten mit ausreichender Sicherheit zu erfassen. Daher war es nicht möglich Modellergebnisse mittels Geländedaten zu kalibrieren. Es konnte lediglich eine Plausibilitätskontrolle angestellt werden. Somit sind die getroffenen Aussagen zum Einfluss einzelner Faktoren nicht exakt belegbar und mit den entsprechend hohen Unsicherheiten belegt. Aus diesem Grund wurden die Geländekampagnen zur Identifizierung der maßgeblichen Wassertransportprozesse verstärkt. Daraus konnten wertvolle Hinweise auf die dominierenden Systemfaktoren abgeleitet werden. Insbesondere die in Kapitel 4 beschriebenen Untersuchungen des Bodens und seiner hydraulischen Eigenschaften sind in diesem Zusammenhang zu nennen. So konnten einzelne Tendenzen klar erkannt und über die Modellsimulation gut erfasst und im Gelände belegt werden (beispielsweise der starke Einfluss der wegetechnischen Erschließung der Waldstandorte).

Generell gilt, dass ohne eine vernünftige Systemkenntnis der ablaufenden Prozesse und ihrer möglichen Interaktionen, keine sinnvolle Modellierung möglich ist. Denn nur mit dieser Kenntnis ist es möglich den Abstraktionsgrad des realen Systems mit einer genügenden Ähnlichkeit in das Modellsystem zu übertragen. Aus diesem Grund ist eine begleitende Geländeuntersuchung unerlässlich für einen erfolgreichen Modelleinsatz.

## 7.2 Bewertung der erzielten Ergebnisse

Über die durchgeführten Modellrechnungen und die begleitenden Geländeuntersuchungen konnten die beiden ausgewählten Waldstandorte im Soonwald und im Pfälzerwald hinsichtlich ihrer Hochwassergefährdung gut erfasst und die erwarteten Unterschiede in der Wasserdynamik der beiden Gebiete bestätigt werden. Die wesentlichen Systemfaktoren wurden bestimmt und die sich daraus ergebenden maßgeblichen Transportprozesse im Hangmaßstab konnten abgeleitet und erfasst werden.

Es konnten Abschätzungen zu Auswirkungen in Änderungen bestimmter Systemparameter gemacht werden. So konnte vor allem der Einfluss des Wegebbaus und der Wegedichte bzw. der allgemeinen Form der Walderschließung ermittelt und seine Wirkung auf das Abflussgeschehen in den untersuchten Gebieten erfasst werden. Die Beschreibung der morphologischen und pedologischen Parameter und ihr Einfluss auf den Wassertransport war ebenfalls möglich. Allerdings weisen insbesondere die Aussagen bezüglich der Vegetationsdecke erhebliche Schwächen auf. So muss kritisch hinterfragt werden, ob es tatsächlich möglich ist einen mehrstufig geschichteten Waldbestand aus diversen Mischbeständen mit unterschiedlichen Wuchsformen im Unterholz lediglich durch den gegebenen Parametersatz für Landnutzung hinreichend zu beschreiben. Doch gerade die Frage nach der Auswirkung von waldbaulichen Bestandsänderungen auf den Wasserhaushalt sind für viele Forstleute und Waldbesitzer von Interesse. An dieser Stelle weist das verwendete Modellsystem CATFLOW doch erhebliche Schwächen auf.

Ein weiterer kritisch anzumerkender Punkt ist das fehlende Schneemodul in CATFLOW. Gerade in den beiden ausgewählten Untersuchungsregionen wird das winterliche Abflussgeschehen oftmals stark von der vorhandenen Schneedecke bestimmt. Ein Schneemodul zusammen mit einer verbesserten Routine zur Beschreibung der forstlichen Bestandparameter könnte helfen weitere Detailkenntnisse zu erhalten und das Abflussverhalten besser zu verstehen. Über die Simulation des Einflusses verschiedener Niederschlagsverteilungen auf unterschiedlichen Böden bei gesättigten Verhältnissen konnten entsprechende Aussagen gemacht werden, die vergleichbar zu denen sind, die bei winterlichen Bedingungen zu erwarten wären.

Insgesamt erlauben es die erzielten Simulationsergebnisse, trotz der gegebenen Unsicherheiten innerhalb einzelner Parameter, aussagekräftige Schlussfolgerungen hinsichtlich der Verbesserung des Retentionsvermögens bewaldeter Gebiete abzuleiten. Insbesondere der Vergleich der Modelldaten mit den Geländebefunden führte zu plausiblen Aussagen.

## 7.3 Schlussfolgerungen

Wie die durchgeführten Modellrechnungen und Geländeuntersuchungen eindrucksvoll bestätigt haben, wird der Wasserrückhalt und das Abflussgeschehen im Bereich des Pfälzerwaldes aufgrund der bodenhydraulischen Eigenschaften der Buntsandstein-Verwitterungsböden so stark von der günstigen geologischen Ausgangssituation geprägt, dass denkbare Verbesserungen durch waldbewirtschaftende Maßnahmen kaum ins Gewicht fallen. Hier kommt es vielmehr darauf an, das Retentionsvermögen zu erhalten und in geeigneten Waldbereichen, wie etwa den Bachauen, eventuell zu verbessern.

Der Schwerpunkt der Maßnahmen zur Verbesserung des Wasserrückhaltes in Wäldern liegt daher in Standorten mit devonischem Untergrund aus Schiefen und Quarziten, wie beispielsweise im Soonwald. Hier bedingen die relativ undurchlässigen Böden mit ihrer verminderten

Infiltrations- und Tiefenversickerungskapazität, eine große Wahrscheinlichkeit für hohe Abflüsse.

Die Möglichkeiten zur Einflussnahme sind zwar begrenzt, doch kann durch eine angepasste Waldbewirtschaftung einiges zur Verbesserung der Situation beigetragen werden. Insbesondere anthropogene Bodenverdichtungen durch das Befahren der Waldflächen mit schweren Holzern- und Rückemaschinen müssen weitestgehend vermieden werden, um das empfindliche System nicht noch weiter zu schwächen. Ist eine verdichtete Fläche erst einmal entstanden, so dauert es Jahrzehnte, bis sie sich natürlich wieder regeneriert hat. Vielmehr muss es Aufgabe der Forstwirtschaft sein durch geeignete Meliorationsmaßnahmen geschädigte Flächen wieder zu verbessern bzw. die Flächen schonender zu bewirtschaften. Denkbar sind hier der Anbau standortgerechter Baumarten mit tiefen bodenlockernden Wurzelsystemen, das Herausnehmen von sensiblen Flächen aus der Holzproduktion, der Einsatz schonender Holzertetechniken wie z.B. Fahrzeuge mit breiten Niederdruckreifen oder Schreitharvester, die Astarmierung von Rückegassen, die Anlage von Seillinienstrecken, evtl. auch der Einsatz von Pferden zur Einzelholzbringung oder ähnliches.

Generell konnte gezeigt werden, dass alle Waldwege, unabhängig von der Art des Wegeaufbaus annähernd zu 100 % abflusswirksam sind. D. h., die Diskussion ob ein befestigter Erdweg anstelle eines Asphaltwegs besser ist, erübrigt sich. Vielmehr muss die Frage gestellt werden, ob eventuell einige Wege rückgebaut werden können. Denn bei einer Wegefläche von etwa 4 % in rheinland-pfälzischen Wäldern, bräute eine Reduzierung um nur 10 % eine Steigerung des Retentionsvolumens von etwa 2,5 Mio m<sup>3</sup> allein für Regionen mit devonischem Untergrundgestein. Eine weitere günstige Maßnahme kann das Zurückführen von Abflusswasser von Wegen und Drainagegräben in den ungestörten Waldbestand darstellen.

Allerdings dürfen alle diese positiv auf das Abflussgeschehen wirkenden Maßnahmen nicht überbewertet werden. Auch unter günstigsten Voraussetzungen wird es nicht gelingen große Hochwässer zu vermeiden, da diese durch schnelle oberflächennahe Abflüsse auf wassergesättigten Böden entstehen. Das bedeutet, dass selbst der größte Retentionsraum wirkungslos wird, wenn er bereits gefüllt ist. Gleichwohl können kleinere bis mittlere Ereignisse örtlich gedämpft werden und so zur Entspannung der gesamten Hochwassersituation beitragen.

#### **7.4 Zukünftige Arbeiten auf dem Gebiet**

Die vorliegende Arbeit hat zwar dazu beigetragen einige Antworten bezüglich der Wasserdynamik von Waldstandorten zu liefern. Dennoch sind noch etliche Fragen offen bzw. wurden neu aufgeworfen. Dabei bleiben für künftige Arbeiten und Forschungsvorhaben mehrere verschiedene Möglichkeiten und Tätigkeitsbereiche bestehen.

##### **Modellverbesserung**

Das Modellsystem CATFLOW hat sich ohne Zweifel als geeignetes System erwiesen, mit dem es sehr gut möglich ist prozessorientiert den Wassertransport im Hangmaßstab zu beschreiben. Insbesondere der modulare Aufbau mit der prozessgekoppelten Zeitschrittsteuerung und der Datenverwaltung in einer relationalen Datenbank haben sich als effektiv erwiesen. Allerdings muss CATFLOW als absolutes Expertensystem angesehen werden, das ein hohes Maß an Prozess- und Systemverständnis erfordert. Die Programmdokumentation ist in weiten Teilen nicht vollständig und mit Fehlern behaftet.

Durch die nicht ganz benutzerfreundliche Programmoberfläche ist die Dateneingabe nicht immer leicht zu bewerkstelligen. So sind erhebliche Vor- und Nachbearbeitungsschritte nötig um den Eingabedatensatz einzugeben und um den Ausgabedatensatz aufzuarbeiten. Ein bedienerfreundlicheres Interface mit den entsprechenden automatisierten Ein- und Ausgabemöglichkeiten wäre wünschenswert. Damit könnte dann eine leichter handhabbare Visualisierung der Eingabeparameter und der ausgegebenen Simulationsergebnisse erzielt werden.

An zusätzlichen Prozessmodulen sind neben dem bereits erwähnten Schneemodul auch ein verbessertes Modul zur Berücksichtigung einer detaillierteren Landnutzungscharakterisierung bei der Verdunstungsberechnung hilfreich. Aber da CATFLOW es erlaubt extern berechnete Verdunstungsgrößen in die Berechnung des Wasserhaushaltes einzubeziehen, ist auch die Variante über ein spezielles „Pflanzen-Bewuchs-Modell“ denkbar, welches die bessere Parametrisierung einzelner Landnutzungsformen erlaubt.

Die Kopplung verschiedener Modellhänge über ein Vorflutersystem bedarf auch einiger Verbesserungen. Es gibt zwar zwischenzeitlich eine neuere Version von CATFLOW, die die Interaktion zwischen Hangfuß und Vorfluter erlaubt, doch kann auch in ihr das Leerlaufen des Systems in Trockenzeiten nicht ausreichend vermieden werden sowie die schnelle Druckübertragung bei hohen Gewässerständen in der Drainage nicht gut genug realisiert werden. Eine Ankopplung an ein einfaches Grundwassermodell, etwa über einen Speicheransatz, das als Quellterm Eingang in die Modellsimulation gewinnen könnte, wäre hierbei sicherlich lohnend. CASPER (2002) kommt in diesem Punkt zu den gleichen Schlüssen.

### **Prozessmodellierung**

Mit der Frage des Wasserhaushaltes von Waldstandorten beschäftigt sich die Forschung seit längerer Zeit (BENECKE & VAN PLOEG, 1978a,b; DELFS, 1955; DE HAAR & HOFFMANN, 1982; HAUHS, 1996; HOFFMANN 1984, FLECK, 1987, PECK & MAYER, 1996 ). Die Ergebnisse werden auch oft in Form von Modellbeschreibungen forstlicher Bestände erarbeitet (ARMBRUSTER, 1998; BENECKE, 1982; FEISTEL, 1998; FINKE, 1989; MANDERSCHIED, 1992; MICHL, 1999; ZIMMERMANN, 1997). Doch trotz der zahlreichen Einzelarbeiten ist bis heute kein Modellsystem verfügbar, das es erlaubt die vielfältigen Prozesse in der Wasserdynamik von Wäldern in ihrer ganzen Komplexität zu berücksichtigen. Allein die Aufspaltung des Freilandniederschlags in seine Einzelkomponenten ist schwierig zu erfassen. Ebenso wird der Einfluss der forstlichen Bestockung mit seiner hohen Diversität nur unzureichend berücksichtigt. Wie wirken sich beispielsweise verschiedene Wurzeltiefen auf den Bodenwasserhaushalt aus und welche Rolle spielt das Makroporensystem bei der lateralen oder auch vertikalen Wasserverlagerung?

Alle diese Teilprozesse zu erfassen und modelltechnisch abzubilden, sei es über die Entwicklung eines separaten Modells oder auch Moduls zur Kopplung mit anderen Modellsystemen, stellt eine herausfordernde Aufgabe dar.

### **Regionalisierung**

Eine weitere naheliegende Frage ist die, nach der Übertragbarkeit der Aussagen, die in dieser Arbeit für die beiden untersuchten Testgebiete getroffen wurden. Mittels zusätzlicher Prozessstudien in vergleichbaren Waldgebieten könnten die getroffenen Aussagen auf ihre Allgemeingültigkeit hin überprüft und verifiziert werden.

In einem ersten Schritt sollte man dabei sicherlich die getroffenen Modellaussagen vom Hangmaßstab auf den kleineren Einzugsgebietsmaßstab übertragen. In einem weiteren Schritt ist dann auch die Übertragung auf eine ganze Flusseinzugsgebietslandschaft vorstellbar.

Wenn man daran denkt, ein System zu erarbeiten, das als Entscheidungshilfe für Fragestellungen bezüglich Hochwasser relevanter Flächen dienen kann, so muss man sicherlich außer Waldflächen auch ergänzend zusätzlich landwirtschaftlich genutzte Flächen sowie Industrie- und Siedlungsflächen mit berücksichtigen. Da in verschiedenen Raumskalen auch unterschiedliche Prozesse an Bedeutung gewinnen, muss man dann ein geeignetes Modell oder eine Modellkombination auswählen, um die betreffende Fragestellung zu erfassen.

Beim Einsatz eines überregional greifenden Maßnahmenprogramms zu Verbesserung des Rückhaltepotenzials besteht eine Möglichkeit in der Nutzung von Geoinformationssystemen. Diese ermöglichen die leichter Verarbeitung flächendifferenzierter Einzugsgebietsinformationen. Dabei ist unterstützend auch der weitere Einsatz von prozessbasierten Modellen in kleineren Raum- und Zeitskalen möglich, um so die jeweiligen Gebietsinformationen zu erarbeiten und in das Gesamtsystem einfließen zu lassen.

Über eine solche Kopplung können dann relevante Abflussreaktionen identifiziert und der Einfluss möglicher Maßnahmen prognostiziert werden. Am Ende könnte so etwas wie eine Gefährdungs-Abschätzungs-Karte entstehen, die von entsprechenden Entscheidungsträgern dazu benutzt werden kann bestimmte Baumaßnahmen zu genehmigen oder abzulehnen. Auch könnte ein solches Informationssystem dazu dienen neue oder auch bestehende Flächennutzungspläne zu ändern.

## 8 Literaturverzeichnis

- ABBOTT, M. B., BATHURST, J.C., CUNGE, J.A., O'CONNELL, P.E., RASMUSSEN, J. (1986): An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, SHE. 2. Structure of a physically-based, distributed modelling system. - *Journal of Hydrology* **87**, S.61-77.
- ABBOTT, M. B., BATHURST, J.C., CUNGE, J.A., O'CONNELL, P.E., RASMUSSEN, J. (1986): An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, SHE. 1. History and philosophy of physically-based, distributed modelling system. - *Journal of Hydrology* **87**, S. 45-59.
- ACEVEDO, M. F., URBAN, D.L., ABLAN, M. (1996): Landscape Scale Forest Dynamics: GIS, GAP, and Transition Models. - In: GOODCHILD, M. F., STEYAERT, L.T., BRADLEY, O.P. (Hrsg.) (1996): *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. Fort Collins: S.181-185.
- AG-BODEN (1994): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. - 4. Aufl., 392 S., Stuttgart.
- ARMBRUSTER, M. (1998): Zeitliche Dynamik der Wasser- und Elementflüsse in Waldökosystemen - Zeitreihenanalysen, Simulationsmöglichkeiten und Reaktionen auf experimentell veränderte Stoffeinträge in die ARINUS-Wassereinzugsgebiete. - *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen* **38**, 301 S., Freiburg.
- ARYA, L. M., PARIS, J.F. (1981): A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. - *Soil Sci. Soc. of Am. J.* **45**, S. 1023-1030.
- ARYA, L. M., LEIJ, F.J., VAN GENUCHTEN, M.T., SHOUSE, P.J. (1999): Scaling Parameter to Predict the Soil Water Characteristic from Particle-Size Distribution Data. - *Soil Sci. Soc. of Am. J.* **63**, S. 510-519.
- AUERSWALD, K., SCHRÖDER, R. (2001): Simulation von verschlammungsgesteuertem Abfluss heterogen genutzter Einzugsgebiete. - *Wasser & Boden* **53**(10), S. 17-20.
- BACHMANN, J., HARTGE, K.H. (1991): Die Berechnung von Wasserspannungskurven aus Primärdaten - Ein Methodenvergleich. - *Zeitschrift Pflanzenernährung und Bodenkunde* **155**, S. 109-114.
- BATTAGLIN, W. A., KUHN, G., PARKER, R. (1996). Using GIS to Link Digital Spatial Data and the Precipitation Runoff Modeling System: Gunnison River Basin, Colorado. - In: GOODCHILD, M. F., STEYAERT, L.T., BRADLEY, O.P. (Hrsg.) (1996): *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. Fort Collins: S.159-163.
- BAUER, E. (1962): *Der Soonwald im Hunsrück - Forstgeschichte eines deutschen Waldgebietes*. - 250 S., Freiburg.
- BAUMGARTNER, A., LIEBSCHER, H.J. (1996): *Allgemeine Hydrologie*. - 2. Aufl., 694 S., Borntraeger, Berlin.
- BECKER, G., HOFMANN, R., GROSS, M. (1986): Boden- und Wurzelschäden durch Befahren von Waldbeständen. - *Der Forst- und Holzwirt* **41**(14), S.367-370.
- BECKER, G., HOFMANN, R., ROEDER, A., EISENBARTH, E., HANEWINKEL, M. (1989): Bodenschäden durch Forstmaschinen auf Tonstandorten? - *Forst und Holz* **44**(19), 507-512.
- BECKER, G., HOFMANN, R., SEELING, U. (1990): Bodenschäden im Wald durch den Einsatz von Forstmaschinen. - Abschlussbericht Projekt Wasser-Abfall-Boden (PWAB), Kernforschungszentrum Karlsruhe, 189 S..
- BECKER, A. (1992). Methodische Aspekte der Regionalisierung. - In: DFG (1992): *Regionalisierung hydrologischer Parameter*. VCH-Verlag, Weinheim,.
- BENECKE, P., PLOEG VAN, R.R. (1978): Wald und Wasser, Komponenten des Wasserhaushaltes von Waldökosystemen. - *Forstarchiv* **49**, H1, S. 1-7.
- BENECKE, P., PLOEG VAN, R.R. (1978): Wald und Wasser, Qualifizierung des Wasserumsatzes am Beispiel eines Buchen- und Fichtenaltbestandes im Solling.- *Forstarchiv* **49**, H1, S. 26-32.
- BENECKE, P. (1982): Potentielle und aktuelle Verdunstung von Waldbeständen. - In: DE HAAR, U, HOFFMANN, D. (1982): *Wasser aus dem Wald, Wasser für den Wald*. S. 195-218., Verlag Beiträge zur Hydrologie. Sonderheft 4, Kirchzarten.
- BENECKE, P. (1982). Modellierung des Wasserhaushaltes von Ökosystemen. - In: DE HAAR, U, HOFFMANN, D. (1982): *Wasser aus dem Wald, Wasser für den Wald*. S. 235-266., Verlag Beiträge zur Hydrologie. Sonderheft 4, Kirchzarten.
- BERG, W., CENČUR ČURK, B., FANK, J., FEICHTINGER, F., NÜTZMANN, G., PAPESCH, W., RAJNER, V., SCHNEIDER, S., SEILER, K.-P., STEINER, K.-H., STENITZER, E., STICHLER, W., TRČEK, B., VARGAY, Z., VESELIC, M., ZOJER, H. (2001). Tracers in the unsaturated zone. *Tracer Studies in the Unsaturated Zone and Groundwater (Investigations 1996-2001)*. - Association of Tracer Hydrology (ATH). Graz, Beiträge zur Hydrologie. Band 52, S. 7-102.

- BERGSTRÖM, S. (1995). The HBV Model. - In: SINGH, V. P. (1995): *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, S. 443-476.
- BEVEN, K. J., KIRKBY, M.J. (1979): A physically based, variable contribution area model of basin hydrology. - *Hydrol. Sci. Bull.* **24**(3), S. 43-69.
- BEVEN, K., J., GERMANN, P. (1981): Water flow in soil macropores I. An experimental approach. - *Soil Science* **32**, S. 1-13.
- BEVEN, K., J., GERMANN, P. (1981): Water flow in soil macropores II. A combined flow model. - *Soil Science* **32**, S. 15-29.
- BEVEN, K., J., GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research* **18**(5), S. 1311-1325.
- BEVEN, K., J. (2000): *Rainfall-Runoff Modelling - The Primer*. - 360 S., Wiley, New York.
- BLÖSCHL, G. (1996): *Scale and scaling in hydrology*. - Wiener Mitteilungen 132, Wasser-Abwasser-Gewässer. Technische Universität Wien, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Habilitation.
- BONELL, M. (1993): Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology* **150**: 217-276.
- BOTT, W., GRUNERT, J., SCHENK, D. (2001): Endbericht zum Forschungsprojekt: Wasserrückhalt in Wäldern - Hochwassermanagement in Entstehungsgebieten - Vorsorge aus forstlicher und wasserwirtschaftlicher Sicht. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 30 S.
- BOTT, W., HOFMANN, T., SCHENK, D. (2002): Physically based modelling of runoff generation. - Contribution "International Conference on Flood Estimation", Berne, March 2002, Extended Abstracts, Special Publications, in press.
- BRECHTEL, H. M. (1969). Die Nutzung des Bodens durch den Menschen als Faktor im Wasserhaushalt. Landnutzung und Wasser. - Schriftenreihe der Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. **22**, S. 3-33, Bonn-Bad Godesberg.
- BRECHTEL, H. M. (1970): Wald und Retention - Einfache Methoden zur Bestimmung der lokalen Bedeutung des Waldes für die Hochwasserdämpfung. - *Dtsch. Gewässerkd. Mittl.* **14**, S. 91-103.
- BRECHTEL, H. M., PAVLOV, M.B. (1977): Niederschlagsbilanz von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen in der Rhein-Main-Ebene. - KWK-Arbeitsgruppe Wasserwirtschaft in der Kultur- und Erholungslandschaft, Bonn.
- BRECHTEL, M., BALÁZS, Á. (1988): Wieviel Wasser kommt aus dem Bramwald? - *Allgemeine Forst Zeitschrift* **15**, S. 397-400.
- BRONSTERT, A. (1994): Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. - Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, IHW, **46** Universität Karlsruhe (TH).
- BRONSTERT, A., VOLLMER, S., IHRINGER, J. (1995): Die Bedeutung von Flurbereinigungsmaßnahmen für das Abflussverhalten von Starkniederschlägen in ländlichen Gebieten. - *Wasser & Boden* **47**(9), S. 29-46.
- BROOKS, R. H., COREY, A.T. (1964): Hydraulic properties of porous media. - Hydrology Paper. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- BROOKS, R. H., COREY, A.T. (1966): Properties of porous media affecting fluid flow. - *Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Irrigation Drainage Division IR2*, S. 61-68.
- BUCHAN, G. D., GREWAL, K.S., ROBSON, A.B. (1993): Improved models of particle-size distribution: an illustration of model comparison techniques. - *Soil Sci. Soc. of Am. J.* **57**, S. 901-908.
- BUWAL (1995): Forst- und Güterstrassen: Asphalt oder Kies? - Schriftenreihe Umwelt Nr. 247, 175 S..
- BUZIEK, G. (Hrsg.) (1995): *GIS in Forschung und Praxis*. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Bd. **29**, 335 S., Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- CARSEL, R. F., PARISH, R.S. (1988): Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. *Wat. Resour. Res.* **24**(5), S. 755-769.
- CASPER, M. C. (2002): Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald). - 197 S., Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).
- CHEN, C., WAGENET, R.J. (1992): Simulation of water and chemicals in macropore soils. Part I: Representation of the equivalent macropore influence and its effect on soil water flow. - *Journal of Hydrology* **130**, S.105-126.

- CHEN, C., WAGENET, R.J. (1992): Simulation of water and chemicals in macropore soils. Part 2: Application of linear filter theory. - *Journal of Hydrology* **130**, S.127-149.
- CHRIST, A. (1999): Hydrogeologische Diplommkartierung im Raum Merzalben/Pfalz – Gebiet Merzalbe. 45 S., Bericht zur Diplommkartierung unveröffentl., *Geologie*. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.
- CRAWFORD, N. N., LINSLEY, R.K. (1966): Digital simulation in hydrology. Stanford Watershed Model IV. - Dept. of Civil Eng., Stanford.
- DACHROTH, W. (1988): Genese des linksrheinischen Buntsandsteins und Beziehungen zwischen Ablagerungsbedingungen und Stratigraphie. - *Jber. Mitt. Oberrhein. geol. Ver.*, N.F. **70**, S. 267-333.
- DELBRÜCK, M. (1997): Großflächiges Bromid-Tracerexperiment zur räumlichen und zeitlichen Variabilität des Wassertransports an einem Lößhang. – 195 S., Dissertation, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg.
- DELFS, R. (1955): Die Niederschlagszurückhaltung im Walde. - Arbeitskreis "Wald und Wasser", **53**, Selbstverlag des Arbeitskreises "Wald und Wasser", Koblenz.
- DIETZ, P., KNIGGE, W., LÖFFLER, H. (1984): Walderschließung. Ein Lehrbuch für Studium und Praxis unter besonderer Berücksichtigung des Waldwegebbaus, Hamburg/Berlin.
- DIN ISO 11274 (2001): Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens. - 5. Erg.-Lieferung, 11/2001.
- DIN 18123 (1998). Bestimmung der Korngrößenverteilung. - DIN Taschenbuch 113: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds, 7. Aufl., Beuth Verlag.
- DIN 19628 (1972): Bestimmung der Infiltrationskapazität mit dem Doppelring-Infiltrimeter.
- DISSE, M. (1995): Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in ebenen Einzugsgebieten. - Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, IHW, **53** Universität Karlsruhe (TH).
- DURNER, W. (1991): Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit strukturierter Böden. - *Bayreuther bodenkundliche Berichte* **20**, 188 S..
- DURNER, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Wat. Resour. Res.* **30**, S. 211-223.
- DVWK (Hrsg.) (1985): Beiträge zu Oberflächenabfluß und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen. - DVWK Schriften 71, 260 S., Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- DVWK (Hrsg.) (1987): In der Bundesrepublik Deutschland angewandte wasserwirtschaftliche Simulationsmodelle. - DVWK Mitteilungen 12, 296 S., DVWK, Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. - DVWK Schriften 92, 303 S., Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- DVWK (Hrsg.) (1995a): Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standort-sicherung, Teil I: Ansprache der Böden. - DVWK Regeln 129, 42 S., DVWK, Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1995b): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil I: Mechanische Belastbarkeit. - DVWK Merkblätter 234, 11 S., DVWK, Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. - DVWK Merkblätter 238, 177 S., Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin
- DVWK (Hrsg.) (1997a): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil II: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. - DVWK Merkblätter 235, 7 S., DVWK, Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1997b): Bodenphysikalische Untersuchung über Ursachen und Auswirkungen von Bodenverdichtungen. - DVWK Materialien 1/1997, 91 S., DVWK, Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1999a): Hochwasserabflüsse. - DVWK Schriften 124, 254 ., Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- DVWK (Hrsg.) (1999b): Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standort-sicherung, Teil II: Ableitungen zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden. - DVWK Regeln 136, 29 S., DVWK, Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1999c): Richtlinien für den ländlichen Wegebau. - DVWK Regeln 137, 52 S., DVWK, Bonn.
- DYCK, S., PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. - 3. Aufl., 536 S., VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- EBERLE, J. (1998): Bodendegradierung mehrschichtiger Waldböden: Ergebnisse einer Fallstudie im Keuper-Lias Bergland Baden-Württembergs. - *Die Erde* **128**, S. 103-120.



- EISENBARTH, E. (1997): Bodenphysikalische Auswirkungen einer maschinellen Flächenräumung im Forstamt Merzalben. - Merkblatt der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, 41 S., Trippstadt.
- ESHLEMAN, K. N., POLLARD, J.S., KUEBLER-O'BRIEN (1993): Determination of contributing areas for saturation overland flow from chemical hydrograph separations. - *Wat. Resour. Res.* **29** (10), S. 3577-3587.
- ETZENBERG, C. (1998): Zur Regionalisierung der Abflussbildung - Bestimmung flächenspezifischer Abflussbeiträge aus Gebietseigenschaften. - 146 S., Dissertation, IHI-Zittau.
- FEISTEL, U. (1998): Untersuchungen zum Wasserhaushalt zweier Fichtenstandorte in unterschiedlichen Höhenlagen des Erzgebirges. - Dissertation, IHI-Zittau.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. (1990): Die mesozoisch-tertiäre Verwitterungsdecke im Rheinischen Schiefergebirge - Aufbau, Genese und quartäre Überprägung. - Relief, Boden, Paläoklima, 192 S., Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- FELIX-HENNINGSSEN, P., SPIES, E.-D., ZAKOSEK, H. (1991): Genese und Stratigraphie periglazialer Deckschichten auf der Hochfläche des Ost-Hunsrücks (Rheinisches Schiefergebirge). - *Eiszeitalter und Gegenwart* **41**, S. 56-69.
- FEZER, F. (1981). Der Niederschlag im Pfälzerwald und in seinem Windschatten. In: GEIGER, M., PREUSS, G., ROTHENBERGER, K.H. (1981): *Pfälzische Landeskunde - Beiträge zu Geographie, Biologie, Volkskunde und Geschichte*. S. 95-100, Landau i. d. Pfalz.
- FISCHER, D. (1999): Hydrogeologische Diplomkartierung auf Blatt TK 6712 Merzalben – Gebiet Wies-Lauter. 50 S., Bericht zur Diplomkartierung unveröffentl., *Geologie*. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.
- FINKE, B., HERRMANN, A., SCHÖNIGER, M. (1989). Simulation von Wasserflüssen in der Langen Bramke (Oberharz) mit dem forsthydrologischen Wasserhaushaltsmodell BROOK. – In: DVWK *Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden - Gefahr für die Gewässer?*, S. 343-349, DVWK Mitteilungen 17, Bonn.
- FLECK, W. (1987). Einfluß des Bodenaufbaus und des Waldbestandes auf Verdunstung und Abflußbildung im Naturpark Schönbuch bei Tübingen. – 111 S., Dissertation, Universität Tübingen.
- FLÜGEL, W. A. (1993): Hangentwässerung durch Interflow. - *Berliner Geographische Arbeiten*, S. 68-94.
- FLÜGEL, W. A.. (1995a): Hydrological response units (HRUs) to preserve basin heterogeneity in hydrological modelling using PRMS/MMS - case study in the Bröl basin, Germany. - *IAHS Publ. No. 231*, S. 79-87.
- FLÜGEL, W. A.. (1995b): Delineating Hydrological response Units by GIS analysis for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. – *Hydrol. Processes* **9**, S. 423-436.
- FLÜGEL, W. A.. (1996a): Hydrological Response Units (HRUs) as modelling entities for hydrological river basin simulation and their methodological potential for modelling complex environmental process systems - Results from the Sieg catchment. - *Die Erde* **127**, S. 43-62.
- FLÜGEL, W. A. (1996b). 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 Bröhl, Germany. – In: MÄUSBACHER, R., SCHULTE A. (Hrsg.)(1996): *Festschrift für Dietrich Barsch - Beiträge zur Physiogeographie* **104**, S. 441-449, Geographisches Institut der Universität Heidelberg, Heidelberg.
- FLÜGEL, W. A. (1997): Combining GIS with regional hydrological modelling using hydrological response units (HRUs): An application from Germany. - *Mathematics and Computers in Simulation* **43**, S. 297-304.
- FUHRMANN, S., KRAUSE, J., STREIT, U. (1996). Werkzeuge für die hydrologische Informationsverarbeitung, Modellierung und Visualisierung. – In: MARKER, B. *Wasser im System Boden - Pflanze - Atmosphäre*. S. 192-201, IHI-Schriften 2, Zittau.
- GAO, X., SOROOSHIAN, S., GOODRICH, D.C. (1993). Linkage of a GIS to a Distributed Rainfall-Runoff Model. - In: GOODCHILD, M.F., PARKS, B.O., STEYAERT, L.T. (1993): *Environmental Modeling with GIS*. S. 182-187, Oxford University Press, New York, Oxford.
- GEIGER, M. (1981). Wetter und Klima in der Pfalz. *Pfälzische Landeskunde* - In: GEIGER, M., PREUSS, G., ROTHENBERGER, K.H. (1981): *Beiträge zu Geographie, Biologie, Volkskunde und Geschichte*. S. 49-94, Landau i. d. Pfalz.
- GEIGER, M (1987). Der Pfälzerwald im geographischen Überblick. In: GEIGER, M., PREUSS, G., ROTHENBERGER, K.H (1987): *Der Pfälzerwald, Porträt einer Landschaft*. S. 9-58, Verlag Pfälzische Landeskunde, Landau i. d. Pfalz.
- GEIGER, M., PREUSS, G. ROTHENBERGER, K.H (1981): *Pfälzische Landeskunde - Beiträge zu Geographie, Biologie, Volkskunde und Geschichte*. - 464 S., Landau i. d. Pfalz.

- GEIGER, M., PREUSS, G. ROTHENBERGER, K.H. (1987): Der Pfälzerwald, Porträt einer Landschaft. - 480 S., Verlag Pfälzische Landeskunde, Landau i. d. Pfalz.
- GENUCHTEN VAN, M. T. (1980): A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. - *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**, S. 892-965.
- GENUCHTEN VAN, M. T., NIELSEN, D.R. (1985): On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. - *Annales Geophysicae* **3**, S.615-628.
- GENUCHTEN VAN, M. T. (1991). Recent progress in modelling water flow and chemical transport in the unsaturated zone. Hydrological interactions between atmosphere, soil and vegetation – In: KIENITZ, G., MILLY, P.C.D., VAN GENUCHTEN, M.T., ROSBJERG, D., SHUTTLEWORTH, W.J (1991): Proceedings of an international symposium held during the XXth General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics at Vienna, 11-24 August 1991. Wallingford, IAHS. Publ. No 204, S. 169-183.
- GIEK, M. (2001): Infiltrationsmessungen auf Waldwegen und Rückegassen im Hinblick auf die Hochwasserproblematik. 82 S., Diplomarbeit unveröffentl., *Geographie*. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.
- GOODCHILD, M. F., PARKS, B.O., STEYAERT, L.T. (Hrsg.) (1993): Environmental Modeling with GIS. 488 S., Oxford University Press, New York, Oxford.
- GOODCHILD, M. F., STEYAERT, L.T., BRADLEY, O.P. (Hrsg.) (1996): GIS and Environmental Modeling - Progress and Research Issues. 486 S., Fort Collins.
- GÖTZ, R. (1985): Waldbodenzerstörung durch moderne Rücketechnik und Möglichkeiten der Gegensteuerung. - *Allgemeine Forst Zeitschrift* **40/41**, S.1083-1085.
- GROLL, M. (1996): Boden-, Bestandes- und Wurzelschäden beim Einsatz eines Harvesters. – *Forst und Holz* **51**(12), S.409.
- GUTKNECHT, D. (1993): Grundphänomene hydrologischer Prozesse - Aktuelle Aspekte in der Hydrologie. Züricher Geographische Schriften, **H 53**, Verl. Geogr. Inst. ETH Zürich.
- HAAR DE, U., HOFFMANN, D. (Hrsg.) (1982): Wasser aus dem Wald, Wasser für den Wald, 340 S., Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten.
- HARBECK, R. (1995). Überblick über Konzeption, Aufbau und Datenangebot des Geoinformationssystems ATKIS-Datenintegrationskonzept. - ATKIS Symposium der AdV am 27./28. Juni 1995, Hannover.
- HARTGE, K. H., BLÄSING, D., HERKLOTZ, K. (1983): Veränderungen des Bodengefüges unter dem Einfluss mehrjähriger Baumwurzeln. - *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **102**, S. 99-110.
- HARTGE, K. H., BOHNE, H., EXTRA, M. (1986): Die Bestimmung der Wasserspannungskurve aus Körnungssummenkurven und Porenvolumen mittels Nomogrammen. - *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* **27**, S.83-87.
- HAUHS, M. (1996): Das Problem der Prozeßidentifikation in Waldökosystemen am Beispiel Wassertransport. – In: MARKER, B. *Wasser im System Boden - Pflanze - Atmosphäre*. S. 212-222, IHI-Schriften 2, Zittau.
- HAVERKAMP, R., PARLANGE, J.Y. (1986): Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: I. Sandy soils without organic matter. - *Soil Science* **142**, S.325-339.
- HEIDERICH, S. U. (1989): Die Bedeutung und Verwendung von Blattflächenindex und Blattflächendichte unter besonderer Berücksichtigung der Forstmeteorologie, nebst einer praktischen Bestimmung dieser Größen in einem Kiefern-(*Pinus sylvestri* L.)bestand. – 101 S., Diplomarbeit unveröffentl., *Meteorologisches Institut*, Universität Freiburg, Freiburg.
- HEITALE, H. (1972): Versickerung von Niederschlägen in Deckschichten und im Gebirge des pfälzischen Buntsandsteingebietes. - *Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen* **1**, S. 70-81.
- HERRMANN, A., MALOSZEWSKI, P., RAU, R., ROSENOW, W., STICHLER, W. (1984): Anwendung von Tracertechniken zur Erfassung des Wasserumsatzes in kleinen Einzugsgebieten. - *Dt. Gewässerkundliche Mitt.* **28**(H. 3), S. 65-74.
- HERRMANN, A., RICHTER, O. (1989): Wasserumsatz in einem kleinen Einzugsgebiet im paläozoischen Mittelgebirge. - *Institut für Geographie und Geoökologie der Technischen Universität Braunschweig*.
- HERRMANN, A., SCHÖNIGER, M. (1989). Neue Erkenntnisse zum Wasser- und Stoffumsatz kleiner hydrologischer Systeme im paläozoischen Mittelgebirge (Lange Bramke/Oberharz). Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden - Gefahr für die Gewässer? - *DVWK Mitteilungen*. 17, S. 249-257. DVWK. Bonn.

- HERRMANN, A., SCHÖNIGER, M.. (1992): Anwendung von Tracertechniken zur Erfassung des Wasserumsatzes in kleinen Einzugsgebieten. Fortsetzung und Abschluss der Arbeiten. - Dt. Gewässerkundliche Mitt. **36**(H. 3/4), S. 94-107.
- HETSCH, W., HESSE, S., MÜNTE, M. (1990): Absterben von Buchen auf pseudovergleyten Böden nach starker Befahrung. - Allgemeine Forst Zeitschrift **20**: 481-483.
- HILDEBRAND, E. E., WIEBEL, M. (1981): Befahrung und Bodenverdichtung unter dem Aspekt der Bodenfunktionen als Waldstandort. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft **32**, S. 51-58.
- HILDEBRAND, E. E., WIEBEL, M. (1982): Der Einfluss der Befahrung auf die Qualität von Forststandorten, dargestellt an bodenphysikalischen Kenngrößen. - Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung **153**(1/2), S. 24-34.
- HILDEBRAND, E. E (1983a): Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktion im forstlichen Standort. - Forstwissenschaftliches Centralblatt **102**: 111-125.
- HILDEBRAND, E. E. (1983b): Mechanisierte Holzernte und Bodenstruktur. - Allgemeine Forst Zeitschrift **38**(42): 1131-1143.
- HILDEBRAND, E. E., WIEBEL, M. (1986): Zur Bedeutung des Bodenwassergehaltes von Feuchtlehmstandorten bei der Entstehung von Bodenschäden durch Befahrung. Allgemeine Forst Zeitschrift **4**(25/26), S.617-622.
- HILDEBRAND, E. E (1987): Die Struktur von Waldböden - eingefährdetes Fließgleichgewicht. - Allgemeine Forst Zeitschrift **42**(16+17), S.424-426.
- HILDEBRAND, E. E, WILPERT VON, K. (1992): Bodenbelastung durch Befahren. - Allgemeine Forstzeitschrift **47**(9), S. 495-489.
- HILDEBRAND, E. E (1996). Forstliche Bodenbewirtschaftung. Handbuch der Bodenkunde.
- HOFFMANN, D. (1984): Die Bedeutung des Waldes für die Wasserwirtschaft. - Agrarspectrum **6**, S. 79-101.
- HOFMANN, R. (1989): Bodenschäden durch Forstmaschineneinsatz - Untersucht am Beispiel lehmig-sandiger Böden auf Buntsandstein bei Befahrung im Zustand der Frühjahrsfeuchte. 141 S., Dissertation, *Forstwissenschaftliche Fakultät*, Universität Freiburg, Freiburg.
- HORN, R., HARTGE, K.H. (2001): Bas Befahren von Ackerflächen als Eingriff in den Bodenwasserhaushalt. - Wasser & Boden **53**(9), S. 13-19.
- HORNUNG, U., MESSING, W. (1984): Poröse Medien - Methoden und Simulation. - Verlag Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten.
- HORTON, R. E. (1933): The role of infiltration in the hydrological cycle. - Trans. Am. Geophys. Union **14**, S.446-460.
- JÄGER, L., KESSLER, A. (1980): Langzeitmessungen der Strahlungsbilanz und ihrer Komponenten über einem Kiefernbestand der südlichen Oberrheinebene. - Allgemeine Forst- und Jagdz. **151**(11): 210-218.
- JURY, W. A., DYSON, J.S., BUTTERS, G.L. (1990): Transfer function model of fieldscale solute transport under transient flow. Soil Sci. Soc. of Am. J. **54**(1), S. 327-332.
- KESSLER, A. (1985): Über die kurzweilige Albedo eines Kiefernwaldes. Eine klimatologische Langzeitstudie. - Meteorol. Rdsch **38**, S.82-91.
- KIEFER, E. M., LIEDL, R., SCHMITZ, G.H., SEUS, G.J. (1990): Konservative Strömungsmodelle auf der Basis krummliniger Koordinaten unter besonderer Berücksichtigung von Wasserbewegungen im ungesättigt-gesättigten Boden. - Berichte der Versuchsanstalt Oberrhein und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft **64**, Technische Universität München.
- KIENITZ, G., MILLY, P.C.D., VAN GENUCHTEN, M.T., ROSBERG, D., SHUTTLEWORTH, W.J. (Hrsg.) (1991): Hydrological Interactions between Atmosphere, Soil and Vegetation. Proceedings of a symposium held during the XX Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysica at Vienna, August 1991. IAHS Publication No. 204, 494 S..
- KIRBY, M. J., CHORLEY, R.J. (1967): Throughflow, Overland Flow and Erosion. - Bulletin International Association Science Hydrology **12**, S. 5-21.
- KIRNBAUER, R., PIRKL, H., HAAS, P., STEIDL, R. (1996): Abflussmechanismen - Beobachtungen und Modellierung. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft **48**(1/2), S. 15-26.
- KLEEBOG, H.-B. (1996): Extreme Hochwasser - Ursachen und Einflüsse. - Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung **37**, S.103-107.

- KLEEBERG, H.-B., MAUSER, W., PESCHKE, G. STREIT, U. (Hrsg.) (1999): Hydrologie und Regionalisierung. - DFG-Forschungsbericht, 475 S., Wiley-VCH Weinheim.
- KNEIDL, V. (1980): Zur Geologie des Hunsrücks. Der Aufschluß, S. 87-100, Sonderheft 30, Koblenz.
- KNEIDL, V. (1993): Hunsrück und Nahe: Geologie, Mineralogie und Paläontologie; ein Wegweiser für den Liebhaber, 128 S., Gondrom, Bindlach.
- KOLLE, O., FIEDLER, F. (1997): Messung und numerische Simulation der Energie- und Feuchtebilanz der Bodenoberfläche. – Schlussbericht des BMBF-Verbundprojekts "Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus kleinen Einzugsgebieten" 215 S., IMK, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- KONRAD, H. J. (1979): Zur Gliederung des höheren Buntsandsteins der Pfalz. - Mainzer geowiss. Mitt. **2**, S. 35-44.
- KONRAD, H. J. (1990): Besonderheiten der faziellen Entwicklung des Buntsandsteins der Pfälzer Mulde. - Mainzer geowiss. Mitt. **19**, S. 119-128.
- KOOL, J. B., PARKER, J.C., VAN GENUCHTEN, M.T., WILLIAMS, J.R. (1987): Parameter estimation for unsaturated flow and transport models - a review. – Journal of Hydrology **91**, S. 255-293.
- KOPHSTAHL, E. (1994). Überblick über Anwendungen des Geoinformationssystems ATKIS-Datenintegrationskonzept. - ATKIS Symposium der AdV, Bonn.
- KOPHSTAHL, E (1995). Überblick über Anwendungen des Geoinformationssystems ATKIS. In: BUZIEK, G.(1995): *GIS in Forschung und Praxis*. **29**, S. 315-324, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- KOVAR, K., NACHTNEBEL, H.P. (1996). Applicatin of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Recources Management. HydroGIS-96, IAHS Publication, Vienna, Austria.
- KÖLLA, E. (1987): Estimating flood peaks from small rural catchments in Switzerland. - Journal of Hydrology **95**, S. 203-225.
- KRASS, K., STOPPKA, B., WILLMEROOTH, K.P. (1999): Infiltrationsmessungen an wasserdurchlässigen Schichten. - Straße und Autobahn **11/99**, S.601-604.
- KREMB, S., RÖTZER, T., SCHAUPP, H (2000): Berechnung des Sickerwasseranfalls nach verschiedenen Wasserhaushaltsmodellen. Wasser & Boden **52**(4), S. 26-30.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G., SCHWERDTFEGGER, G. (1994): Bodenkunde. 5. Aufl., Ulmer Verlag, Stuttgart.
- KWF, Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V. (Hrsg.) (1988): Bodenschäden durch Forstmaschinen. - KWF-Bericht Nr. 4/1988, Groß-Umstadt, 140 S.
- LEANEY, F. W., SMETTEN, K.R.J., CHITTLEBOROUGH, D.J. (1993): Estimating the contributin of preferential flow to subsurface runoff from a hillslope using deuterium and chloride. - Journal of Hydrology **159**, S.291-303.
- LEAVESLEY, G. H., LICHTY, R.W., TROUTMAN, B.M., SAINDON, L.G. (1983): Precipitation-Runoff Modeling System: User's Manual, Water-Resources Investigations Report. Denver: 83-4238.
- LEAVESLEY, G. H. (1995). The Precipitation-Runoff Modeling System -PRMS. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA.
- LEAVESLEY, G. H. (1996): The modular modeling system (MMS): User's manual, U.S. Geological Survey Open File Report. Denver: 96-151.
- LEIBUNDGUT, C., LINDENLAUB, M., MEHLHORN, J. (1996). Tracerhydrologische Ansätze in der Niederschlag-Abfluß-Modellierung. - In: MARKER, B. (1996): *Wasser im System Boden - Pflanze - Atmosphäre*. S. 243-255. IHI-Schriften 2, Zittau.
- LEIBUNDGUT, C., UHLENBROOK, S. (1997): Abflussbildung bei Hochwasser. - Ministerium für Umwelt und Forsten, Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Mainz, 81 S..
- LEIBUNDGUT, C., UHLENBROOK, S., MCDONNELL, J. (2001): Runoff generation and implications for river basin modelling. - Freiburger Schriften zur Hydrologie **Bd 13**, 401 S..
- LENHARD, R. J. (1986): Changes in void distribution and volume during compacting of a forest soil. - Soil Science Society of America Journal **50**, S.462-464.
- LEONHARD, J. (1999): Waldland Rheinland-Pfalz - Zahlen, Fakten, Übersichten. - Lebendiges Rheinland-Pfalz Heft 1/1999 (Jahrg. 34/35), Mainz.
- LEPPLA, A. (1895): Zur Geologie des linksrheinischen Schiefergebirges. - Jb. preuß. geol. L.-A. **16**, S.74-94.

- LIEBSCHER, H.-J. (1982). Abflußverhalten von bewaldeten Einzugsgebieten und dessen modellmäßige Beschreibung. - In: DE HAAR, U., HOFFMANN, D. (1982): *Wasser aus dem Wald, Wasser für den Wald*. S. 301-317. Verlag Beiträge zur Hydrologie. Sonderheft 4, Kirchzarten.
- LÜLLWITZ, T. (1992): Der Einsatz eines GIS zur Charakterisierung von Gebietsparametern für Hydrologische Modellzwecke. - Salzburger Geographische Materialien **18**, S. 187-193.
- LÜLLWITZ, T. (1993): Vergleichende Hydrologische Modellierung mit dem Modell PRMS unter Anwendung von Geographischen Informationssystemen. - Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- MANDERSCHIED, B. (1992): Modellentwicklung zum Wasser- und Stoffhaushalt am Beispiel von vier Monitoringflächen. - Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, 161 S., Reihe A, Bd. 87, Göttingen.
- MARKERT, B. (Hrsg.) (1996): Wasser im System Boden - Pflanze - Atmosphäre. IHI-Schriften 2, 255 S., Zittau.
- MARTIN, E. (1980): Der Taunusquarzit im nordöstlichen Soonwald - Analyse eines Kluftwasserspeichers. - 235 S., Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.
- MARTUS, P. (1996): Geologische Kartierung des Gebietes südlich von Merzalben / Pfälzerwald. - Kartierbericht, *Fachbereich Geologie*, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- MATTHIES, D., WEIXLER, H., HESS, U. (1995): Befahrungsbedingte Strukturveränderungen von Waldböden. - Allgemeine Forst Zeitschrift **22**, S.1218-1221.
- MAURER, T. (1996). Modellierung des Wassertransports: Gebietsmodell CATFLOW. BMBF-Verbundprokekt "Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus kleinen Einzugsgebieten" - Weiherbachprojekt -, Karlsruhe.
- MAURER, T. (1997): Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. - Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, IHW, **61** Universität Karlsruhe (TH).
- MAURER, T. (1997): CATFLOW - A physically based and distributed hydrological model for continuous simulation of catchment water dynamics, User Guide. - Institute of Hydrology and Water Resources Planning (IHW), University of Karlsruhe, Karlsruhe.
- MAYR, T., JARVIS, N.J. (1999): Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameter for a modified Brooks-Corey type model. - Geoderma **91**, S.1-9.
- MEHLHORN, J. (1998): Tracerhydrologische Ansätze in der Niederschlags-Abfluß-Modellierung. - Freiburger Schriften zur Hydrologie **Bd 8**, 148 S., Freiburg.
- MERZ, B. (1996): Modellierung des Niederschlag-Abfluß-Vorgangs in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität. - Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, IHW, **56** Universität Karlsruhe (TH).
- MEYER, W., STETS, J. (1975): Das Rheinprofil zwischen Bonn und Bingen. - Z. dt. geol. Ges. **126**, S. 15-29.
- MEYER, W., STETS, J. (1980): Zur Paläogeographie von Unter- und Mitteldevon im westlichen und zentralen Rheinischen Schiefergebirge. - Z. dt. geol. Ges. **131**, S. 725-751.
- MICHL, C. (1999): Prozeßorientierte Modellierung des Wasserhaushalts zweier Quelleinzugsgebiete im Thüringer Wald. - 190 S., Dissertation, *Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät*, Universität Jena, Jena.
- MISHRA, S., PARKER, J.C., SINGHAL, N. (1990): Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty from particle-size distribution data. - Journal of Hydrology **108**, S. 1-18.
- MITSCHERLICH, G. (1971): Wald, Wachstum und Umwelt. 1. Aufl., 2. Band, Waldklima und Wasserhaushalt, 365 S., J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a.M.
- MITSCHERLICH, G. (1977): Wald, Wachstum und Umwelt. 2. Aufl., 1. Band, Form und Wachstum von Baum und Bestand, J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a.M.
- MITTMEYER, H. G. (1974): Zur Neufassung der Rheinischen Unterdevon-Stufen. - Mainzer geowiss. Mitt. **3**, S.69-79.
- MITTMEYER, H. G. (1996): Geologie des Unterdevons im Südhunsrück sowie am Mittelrhein (Exkursion F1 am 11. und F2 am 12. April 1996). - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **78**: 135-154.
- MONTEITH (1965): Evaporation and environment - In: FOGG, G.T. (Hrsg.) (1965): *Symposium, The state and movement of water in living organism*. S. 205-233, Cambridge Univ. Press, New York.

- MONTENEGRO, H. (1995): Parameterbestimmung und Modellierung der Bodenwasserbewegung in heterogenen Böden. - Fortschritt-BerichteVDI, Reihe 15, **134**, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- MOORE, I. D., TURNER, A.K., WILSON, J.P., JENSON, S.K., BAND, L.E. (1993): GIS and Hydrologic Modeling - In: GOODCHILD, M. F., PARKS, B.O., STEYAERT, L.T (1993): *Environmental Modeling with GIS*. S. 197-223, Oxford University Press, New York, Oxford.
- MOORE, I. D. (1996). Hydrologic Modeling and GIS. - In: GOODCHILD, M. F., STEYAERT, L.T., BRADLEY, O.P. (1996): *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. S. 143-148, Fort Collins.
- MOREL-SEYTOUX, H. J. (1989): Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling. 275, NATO SAI Series C, 531, Kluwer Academic Pub., Dordrecht, Boston, London.
- MOSLEY, M. P. (1979): Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand. - Water Res. Research **15**(4), S. 795-806.
- MOSLEY, M. P. (1982): Subsurface flow velocities through selected forest soils, south island, New Zealand. - Journal of Hydrology **55**, S. 65-92.
- MUALEM, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. - Water Resources Research **12**(3), S. 513-522.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1954): Fossile Böden im Rheinland. Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenk. **65**, S. 81-103.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1958): Bildungsbedingungen und Umlagerung der fossilen Böden der Eifel. - Fortschr. Geol. Rheinl. u. Westf. **2**, S. 495-502.
- MÜNCH, A. (1995): Wasserhaushaltsberechnungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung. - Dissertation, TU Dresden.
- NAEF, F., FACKEL, P., KULL, D., SCHERRER, S., THOMA, C., WEILER, M. (2000): Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihren Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung - aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz. – 174 S., Inst. für Hydromechanik und Wasserwirtschaft ETH, Zürich.
- NAUMANN, G. (1987): Bodenbeeinflussung durch waldbauliche Maßnahmen. - Allgemeine Forst Zeitschrift **42**(16+17), S. 122-124.
- OSTROWSKI, M. W. (1982): Ein Beitrag zur kontinuierlichen Simulation der Wasserbilanz. – Bericht RWTH-Aachen, Aachen.
- OTTO, H.-J. (1994). Waldökologie. - 391 S., Ulmer, Stuttgart.
- ØVERLAND, H., KLEEBERG, H.-B. (1992): Möglichkeiten der Abflussmodellierung unter Nutzung von Geoinformationssystemen. - Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen, 45/1993, Univ. der Bundeswehr, München.
- PASCHE, E. (1996). Das Geoinformationssystem ATKIS und seine Nutzung in Wirtschaft und Verwaltung. - 3. AdV-Symposium ATKIS am 29. und 30. Okt. 1996, Koblenz, Landesvermessungsamt RLP, Koblenz.
- PEARCE, A. J., STEWART, M.K., SKLASH, M.G. (1986): Storm runoff generation in humid headwater catchments. Wat. Resour. Res. **22**, S.1263-1273.
- PECK, A., MAYER, H (1996): Einfluß von Bestandsparametern auf die Verdunstung von Wäldern. - Forstwissenschaftliches Centralblatt **115**, S. 1-9.
- PENMAN, H. L. (1948): Natural evaporation from water, bar soils and grass. - Proc. Royal Meteorological Society, London **193** (A), S.125-145.
- PESCHKE, G., ETZENBERG, C., MÜLLER, G., TÖPFER, J., ZIMMERMANN, S. (Hrsg.) (1999): Das wissensbasierte System FLAB - ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflußbildung. IHI-Schriften **10**, Zittau.
- PLATE, E. J. (1992): Weiherbach-Projekt: "Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet. Schlussbericht zur 1. Phase des BMBF-Verbundprojekts. - Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, IHW, **41** Universität Karlsruhe (TH).
- RABE, C.. (1999): Hydrogeologische Diplomkartierung auf Blatt TK 6712 Merzalben – Gebiet III. 44 S., Bericht zur Diplomkartierung unveröffentl., *Geologie*. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.
- RAPPE, B. (1995): Erfassung und Integration von Geo-Daten aus unterschiedlichen Quellen. - GIS in Forschung und Praxis (Verwaltung Landesvermessungsamt RLP), S. 123-140.

- RAWLS, W. J., BARKENSIEK, D.L. (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. – In: MOREL-SEYTOUX, H. J. (1989): *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling*. Nato SAI Series C. **275**, 531 S., Dordrecht, Boston, London.
- REHFUESS, K. E. (1990): Waldböden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. - 2. Aufl., 294 S., Parey-Verlag, Hamburg.
- RENGER, M. (1971): Die Ermittlung der Porengrößenverteilung aus der Körnung, dem Gehalt an organischer Substanz und der Lagerungsdichte. - Zeitschrift Pflanzenernährung und Bodenkunde **130**, S. 53-67.
- RHEINLAND-PFALZ (1962): Erläuterungsbericht zur Forstlichen Standortaufnahme, Forstamt Neupfalz.
- RHEINLAND-PFALZ (1998): Erläuterungsbericht zum Forsteinrichtungswerk, Forstamt Merzalben.
- RHEINLAND-PFALZ (1997): Landtagsdrucksache 13/314/1012. Mainz.
- RICHARDS, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. - Physics **1**, S. 318-333.
- SAMBALE, C. (1998): Experimentelle und modellgestützte Wasserhaushaltsuntersuchungen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. – 119 S., Dissertation, IHI-Zittau, Zittau.
- SCHACK-KIRCHNER, H., HILDEBRAND, E.E., VON WILPERT, K. (1993): Bodensauerstoffhaushalt unter Fahrspuren. - Allgemeine Forst Zeitschrift **48**(3), S.118-121.
- SCHIEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. – 15.Aufl., 593 S., Spektrum, Akad. Verlag, Heidelberg.
- SCHEINOBST, A. C., SINOWSKI, W., AUERSWALD, K. (1997): Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Develoding a new pedotransfer function. - Geoderma **78**: 129-143.
- SCHNEIDER, R. (1997): Die Beeinflussung bodenphysikalischer Standortbedingungen und mechanische Belastbarkeit von Waldböden durch den Einsatz moderner Waldbodenrenaturationstechniken an Beispielen aus Eifel und Schwarzwald. - Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft **85**(3), S. 1347-1350.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flußgebieten zur Abschätzung von Folgen von Klimaveränderungen. 161 S., Dissertation, ETH-Zürich, Zürich.
- SCHULLA, J., JASPER, K. (1998): Modellbeschreibung WaSiM-ETH. – 148 S., ETH-Zürich, Zürich.
- SCHUMANN, A. H. (1993): Development of conceptual semi-distributed hydrological models and estimation of their parameters with the aid of GIS. - Hydrological Sciences Journal **38** (6), S.519-528.
- SCHUMANN, A. H., SCHULTZ, G.A. (1995): Wasserhaushaltsmodellierung unter Verwendung von Fernerkundung, digitalem Höhenmodell und geographischen Informationssystem. - Wasserwirtschaft **85**(12), S. 596-601.
- SCHÜLER, G., BOTT, W., SCHENK, D. (2002): Hochwasservorsorge durch Waldbewirtschaftung. - Forst und Holz **57**(1/2), S. 3-9.
- SCHUWIRTH, N.. (2001): Hydrogeologische Diplomkartierung auf Blatt TK 6011 Simmern – Einzugsgebiet des Gräfenbaches. 34 S., Bericht zur Diplomkartierung unveröffentl., *Geologie*. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.
- SCHWARZ, O. (1985). Direktabfluss, Versickerung und Bodenabtrag in Waldbeständen in Baden-Württemberg. In: DVWK Schriften 71 (1985): *Beiträge zu Oberflächenabfluss und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen*. DVWK, Hamburg/Berlin.
- SEMMELE, A. (1968): Studien über den Verlauf jungpleistozäner Forschung in Hessen. - Frankfurter Geogr. Hefte. **45**, 135 S.
- ŠIMŮNEK, J., ANGULO-JARAMILLO, R., SCHAAP, M.G., VANDERVAERE, J.P., VAN GENUCHTEN, M.T. (1998): Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension-disc infiltrometer data. - Geoderma **86**, S. 61-81.
- SINGH, V. P. (1995): Computer Models of Watershed Hydrology. - Water Resource Publications Highlands Ranch, Colorado, USA.
- SINOWSKI, W., SCHEINOBST, A.C., AUERSWALD, K. (1997): Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, II. Comparison of regionalization procedures using a pedotransfer function. - Geoderma **78**, S.145-159.
- SPIES, E.-D. (1986): Soil development from Tertiary to Holocene and hydrothermal decomposition of rocks in the eastern Hunsrück area. - Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. **47**, S. 76-99.

- SPUHLER, L. (1957): Einführung in die Geologie der Pfalz. - Veröffentlichung der Pfälzer Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften. **34**.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1996): Forstliche Standortaufnahme - Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. - 5. Aufl., Arbeitskreis Forsteinrichtung, 352 S., IHW-Verlag, Eiching bei München.
- STÖDTER, A. (1994): GIS-gestützte Ermittlung von Abflußkonzentrationsparametern für ein konzeptionelles Hochwassermmodell. - Dissertation, *Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen*, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- TANAKA, A., YASUHARA, M., SAKAI, H., MARUI, A. (1988): The Hachioji experimental basin study - Storm runoff processes and the mechanism of its generation. - *Journal of Hydrology* **102**, S. 139-164.
- TEMPEL, M. (2000): Untersuchungen zum Wasserhaushalt und Abflussverhalten kleiner Waldeinzugsgebiete am Beispiel eines Modellhangs im Soonwald (Hunsrück). - 200 S., Diplomarbeit unveröffentl., *Geographie*, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.
- TESCH, J. (2002): Uranin-Tracer-Versuche in der ungesättigten Zone zur Quantifizierung des Interflows. - Diplomarbeit unveröffentl., *Geologie*. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.
- TIETJE, O., TAPENHINRICHS, M. (1993): Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **57**, S. 1088-1095.
- TIETJE, O., HENNINGS, V. (1995): Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. - *Geoderma* **69**, S. 71-84.
- UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, CH. (1997): Abflußbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen. - *Wasser & Boden* **49(9)**, S.13-21.
- UHLENBROOK, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflußbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. - *Freiburger Schriften zur Hydrologie* **Bd 10**, 201 S.
- UHLING, J. (1998): Materialiensammlung zu den "Richtlinien für den Ländlichen Wegebau (RLW 1999)". - Schriftenreihe des Landesamtes für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg **10**, 40 S..
- VERECKEN, H., MAES, J., FEYEN, J., DARIUS, P. (1989): Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. - *Soil Science* **148(6)**, S. 389-403.
- VIEUX, B. E., FARAJALLA, N.S., GAUR, N. (1996). Integrated GIS and Distributed Storm Water Runoff Modeling. In: GOODCHILD, M.F., STEYAERT, L.T., BRADLEY, O.P. (Hrsg.) (1996): *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. S. 199-201, Fort Collins.
- VOHLAND, M., TREIS, A., KREIN, A., UDELHOVEN, T., HILL, J. (2000): Landnutzungsbezogene Modellierung hochwassergenetisch relevanter Abflusskomponenten im Ruwer-Einzugsgebiet. - *Hydrologie und Wasserwirtschaft* **4/2000**, S. 190-200.
- WANG, Q. J., DOOGE, J.C.I. (1994): Limiting cases of water fluxes at the land surface. - *Journal of Hydrology* **155(3-4)**, S. 429-440.
- WEIHE, J. (1976): Benetzung und Interzeption in Buchen- und Fichtenbeständen in Nordrhein-Westfalen; III Die Regenmessung im Wald. - *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **147(12)**, S. 235-240.
- WEILER, M. (2001): Mechanisms controlling macropore flow during infiltration - Dye tracer experiments and simulation. - Dissertation No. 14237, ETH-Zürich, Zürich.
- WEIMER, R. (2001): Messstation meldet neuen Regenrekord. - *Öffentlicher Anzeiger*. Bad Kreuznach.
- WEIXLER, H. (1994): Bodenschäden durch Befahren von Waldböden? - *Allgemeine Forst Zeitschrift* **49(13)**, S. 725-726.
- Werner, H. H. (1950): Geologie des südlichen Hunsrücks zwischen Hahnenbach und Guldenbach. - Dissertation, Universität Bonn, Bonn.
- Werner, H. H. (1952): Geologie der Winterbacher Mulde im südöstlichen Hunsrück. - *Geol. Jb.* **66**, S.627-660.
- Werner, C.-D. (1995). ATKIS Daten in ARC/INFO und Arc View - neue Lösungen für neue Märkte. - ATKIS Symposium der AdV am 27./28. Juni 1995, Hannover.
- WICKE, W., BERNHOFER, C. (1995): Energy balance comparison of the Hartheim forest and an adjacent grassland site during the HartX experiment. - *Theor. Appl. Climatol.* **53**, S. 49-58.



- WILDBERGER, J. (1992): Zur tektonischen Entwicklung des südwestlichen Hunsrücks. *Mitteilungen der Pollichia* **79**, S. 5-119.
- WILKE, T. (1995): Qualitätsaspekte bei der Nutzung von Geo-Informationssystemen. - GIS in Forschung und Praxis (Verwaltung Landesvermessungsamt RLP), S. 141-154.
- WILLIAMS, R. D., AHUJA, L.R., NANEY, J.W. (1993): Comparison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture, bulk density, and limited data. - *Soil Science* **153**, S. 172-184.
- WILSON, G. V., JARDINE, P.M., LUXMOORE, R.J., JONES, J.R. (1990): Hydrology of a forested hillslope during storm events. - *Geoderma* **46**, S.119-138.
- WOODS, R. A., SIVAPALAN, M., DUNCAN, M. (1995). Investigating the representative elementary area concept: An approach on field data. In: KALMA, J.B., SIVAPALN, M.: *Scale issues in hydrological modelling*. S. 49-70, John Wiley & Sons, Chichester.
- WÖSTEN, J. H. M., VAN GENUCHTEN, M.T. (1988): Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. - *Soil Science Society of America Journal* **52**, S. 1762-1770.
- ZEHE, E. (1999): Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone auf verschiedenen Skalen. - *Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, IHW*, **64** Universität Karlsruhe (TH).
- ZEHE, E., MAURER, T. (2000): User Guide CATFLOW. - Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- ZIMMERMANN, L., FEGER, K.-H. (1997): Der Bodenwasserhaushalt an einem Fichtenstandort im Hochschwarzwald - Messung und Modellierung zur Deutung der montanen Nadelvergilbung. - *Z. Pflanzenernährung u. Bodenkunde* **160**, S. 141-149.
- ZUIDEMA, P. K. (1985): Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen. - Dissertation, ETH-Zürich, Zürich.

## 9 Register

### 9.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Schematische Darstellung der Wassertransportprozesse an einem Hang (nach BRONSTERT, 1994)	3
Abb. 2.2:	Die Verteilung von Matrix-, Gravitations- und Gesamtpotenzial im Boden unter trockenen Bedingungen bei Verdunstung (verändert nach DYCK & PESCHKE, 1995)	5
Abb. 2.3:	Die Verteilung von Matrix-, Gravitations- und Gesamtpotenzial im Boden bei Niederschlag unter Infiltrationsbedingungen (verändert nach DYCK & PESCHKE, 1995)	5
Abb. 2.4:	Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt bei einem Sandboden, einem Schluffboden und einem Tonboden; mit FK = Feldkapazität, PWP = Permanenter Welkepunkt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002)	6
Abb. 2.5:	Hysteresis bei der Be- und Entwässerung eines Sand- und eines Lössbodens (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002)	7
Abb. 2.6:	Schematische Darstellung der Fließwege im Porensystem an einem Hang (aus BRONSTERT 1994, nach ZUIDEMA 1985)	8
Abb. 2.7:	Schematische Darstellung der Abflussprozesse und Abflusskomponenten (verändert nach BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996)	9
Abb. 2.8:	Bildung von Landoberflächenabfluss a) infolge Infiltrationsüberschusses, b) infolge Sättigungsüberschusses (verändert nach KÖLLA, 1987)	10
Abb. 2.9:	Raumskalen der Abflussbildung (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT, 1997)	17
Abb. 2.10:	Zeitschrittsteuerung und Prozesskopplung der Programm-Module von CATFLOW (aus MAURER, 1997)	18
Abb. 2.11:	Darstellung eines Berechnungshanges mit Hangsegmenten und Hangfalllinie	19
Abb. 2.12:	Diskretisierung eines Hanges entlang der Hangfalllinie	19
Abb. 2.13:	Hierarchie der Eingabedateien im Modellsystem CATFLOW (nach MAURER, 1997)	21
Abb. 3.1:	Übersichtskarte von Rheinland-Pfalz mit der Lage der beiden Untersuchungsgebiete und den zugehörigen geologischen Einheiten	23
Abb. 3.2:	Hangprofil Testgebiet Soonwald, Hölzerkopf – Gräfenbach	26
Abb. 3.3:	Hangprofil Testgebiet Pfälzerwald, Mühlenberg - Floßbach – Kieneck	27
Abb. 4.1:	Eindringwiderstände in Bereich der Höhenlagen im Untersuchungsgebiet Pfälzerwald	29
Abb. 4.2:	Infiltrationskapazität des Waldbodens und der verschiedenen Forstwegetypen	30
Abb. 4.3:	Kleinregner auf befestigtem Fahrweg (aus GIEK, 2001)	31
Abb. 4.4:	Beregnete Fläche des Kleinregners während einer Beregnung (Foto, GIEK)	31
Abb. 4.5:	Abfluss von verschiedenen Wegetypen bei künstlicher Beregnung	32
Abb. 4.6:	Gesättigte Wasserleitfähigkeit unverdichteter Böden im Testgebiet Soonwald	33
Abb. 4.7:	Gesättigte Leitfähigkeiten im Bereich Pfälzerwald für ungestörten Waldboden, Rückegassen und Erdwege	33
Abb. 4.8:	Luftbild des Modellhanges Soonwald mit Grabensystem (TEMPEL, 2000)	34
Abb. 4.9:	Darstellung des Modellhanges mit Grabensystem und Abflussmesswehren (TEMPEL, 2000)	34
Abb. 4.10:	Abflussganglinie des Gesamtabflusses aus dem Untersuchungsgebiet Soonwald, berechnet als Summenwert aus den 15-minütigen Pegeldaten der Gebietsabläufe	35
Abb. 4.11:	Abflusswerte und Niederschlagshöhen im März/April 2001 am oberen Gräfenbach	36
Abb. 4.12:	Abflussganglinie Gräfenbach bei Argenschwang und Niederschlagsmengen der Station Wahlbach aus Tagesmittelwerten für den Zeitraum Nov. 1989 bis Dez. 1996	36
Abb. 4.13:	Abflussganglinie Gräfenbach bei Argenschwang und Niederschlagsmengen der Station Wahlbach aus Tagesmittelwerten für das hydrologische Jahr 1994	37

Abb. 4.14:	Entwässerungsnetz am oberen Gräfenbach: a) ganzjährig wasserführendes Entwässerungsnetz und b) Entwässerungsnetz zu Zeiten starker Niederschläge (verändert nach SCHUWIRTH, 2001)	38
Abb. 4.15:	Korrelation Quellschüttung [l/s] der Floßbachquellen mit dem Niederschlag für den Zeitraum Jan. 1988 bis Dez. 1996. Die Quellschüttungsdaten sind monatliche Stichtagsmessungen, die Niederschlagsdaten sind Tageswerte	39
Abb. 4.16:	Korrelation Quellschüttung [l/s] der Floßbachquellen mit dem Niederschlag für den Zeitraum Mai 89 bis Mai 90. Die Quellschüttungsdaten sind 14-tägig aufgenommen, die Niederschlagsdaten sind Tageswerte	40
Abb. 4.17:	Abflussganglinie Schwarzbach bei Thaleischweiler und Niederschlagsmengen der Station Leimen aus Tagesmittelwerten für den Zeitraum Nov. 1989 bis Dez. 1996	41
Abb. 4.18:	Abflussganglinie Schwarzbach bei Thaleischweiler und Niederschlagsmengen der Station Leimen aus Tagesmittelwerten für das hydrologische Jahr 1994	41
Abb. 5.1:	Lage der Klimastationen Simmern-Wahlbach, Ellern und des Testgebietes Soonwald (aus TEMPEL, (2000)	42
Abb. 5.2:	Kf-Werte Testgebiet Soonwald	43
Abb. 5.3:	Kf-Werte Testgebiet Pfälzerwald	43
Abb. 5.4:	Schematische Darstellung der Flussrandbedingungen an einem Hangsegment in CATFLOW (verändert nach CASPER, 2002)	44
Abb. 5.5:	Ergebnisse der Simulationen zur Einstellung der Anfangsbedingungen am Modellhang ausgehend von unterschiedlichen Bodenfeuchteverteilungen zu Beginn des einmonatigen Initialisierungszeitraums (nähere Erklärung siehe Text nächste Seite)	45
Abb. 6.1:	System kontrollierende Einflussfaktoren des Wassertransports unter bewaldeten Gebieten und ihre Interaktionen: weiß = natürliche Faktoren, grau = anthropogene Faktoren, grau/weiß = Faktoren, die sowohl natürlich als auch anthropogen beeinflusst werden	47
Abb. 6.2:	Einfluss unterschiedlicher Bodentypen auf das Abflussverhalten	48
Abb. 6.3:	Ermittelte Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von der Hangneigung und vom Substrat	49
Abb. 6.4:	Niederschlagsverteilungen an der Station Ellern im Juni 1997 und im Oktober 1998	50
Abb. 6.5:	Simulation Pfälzerwald: $K_f = 1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s, Bodenfeuchte $Q = 28,7$ %	51
Abb. 6.6:	Simulation Soonwald: $K_f = 5,0 \cdot 10^{-7}$ m/s, Bodenfeuchte $Q = 30,1$ %	51
Abb. 6.7:	Bearbeitung von trockenen Böden mit Lockerungseffekten (links) und von nassen Böden mit Zerstörung des Porengefüges (rechts), aus SCHÜLER et al. (2002)	53
Abb. 6.8:	Simulation Starkregen Testgebiet Pfälzerwald bei gesättigtem Boden	54
Abb. 6.9:	Simulation Starkregen Testgebiet Soonwald bei gesättigtem Boden	54
Abb. 6.10:	Simulation Starkregen Testgebiet Pfälzerwald bei trockenem Boden	55
Abb. 6.11:	Simulation Starkregen Testgebiet Soonwald bei trockenem Boden	55
Abb. 6.12:	Simulation Landregen Testgebiet Pfälzerwald bei gesättigtem Boden	57
Abb. 6.13:	Simulation Landregen Testgebiet Soonwald bei gesättigtem Boden	57
Abb. 6.14:	Simulation Landregen Testgebiet Pfälzerwald bei trockenem Boden	58
Abb. 6.15:	Simulation Landregen Testgebiet Soonwald bei trockenem Boden	58
Abb. 6.16:	Ergebnisse Sensitivitätsanalyse der Bestockungs-Parameter	60
Abb. 6.17:	Simulation unterschiedlicher Vegetationstypen am Modellhang Soonwald	62
Abb. 6.18:	Simulation Walderschließungsformen: Starkregen Pfälzerwald	65
Abb. 6.19:	Simulation Walderschließungsformen: Starkregen Soonwald flacher Unterhang	65
Abb. 6.20:	Simulation Walderschließungsformen: Starkregen Soonwald steiler Ober- und Mittelhang	66
Abb. 6.21:	Simulation Walderschließungsformen: Landregen Pfälzerwald	66
Abb. 6.22:	Simulation Walderschließungsformen: Landregen Soonwald flacher Unterhang	67
Abb. 6.23:	Simulation Walderschließungsformen: Landregen Soonwald steiler Ober- und Mittelhang	67
Abb. 6.24:	Forwarder im Einsatz, Arbeiten auf und neben der Rückegasse (Fotos, SCHÜLER)	69

## 9.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Porenraumgliederung (aus DISSE, 1995 nach KUNTZE et al., 1994, verändert)	6
Tab. 2.2:	Eingabeparameter in CATFLOW	21
Tab. 6.1:	Variationen der simulierten Walderschließungsformen	65

## **10 Anhang**

## 10.1 Ergebnisse der Bodenuntersuchung

Tab. A1: Korngrößenverteilung Testgelände Soonwald

Soonwald											
Proben-Nr.:	Profil-Nr.:	Horizont	Entnahmetiefe	Probe gesamt				Probe kleiner 2 mm			
				Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Kies [%]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	C (org) [%]
SW 2-1	2	Ah	3 - 10 cm	5,1	50,5	43,7	0,7	34,8	23,8	41,4	19,7
SW 2-2	2	Ae	10 - 25 cm	8,9	33,0	51,2	7,0	34,7	13,2	52,1	4,4
SW 2-3	2	Bt / CII	25 - 60 cm	18,3	52,3	28,0	1,4	54,8	25,5	19,7	1,4
SW 2-4	2	CII	60 - 110 cm	21,6	53,1	22,6	2,7	61,8	18,4	19,8	1,1
SW 3-1	3	Ah	10 - 15 cm	6,5	51,9	34,8	6,7	45,6	21,7	32,7	3,82
SW 3-2	3	Ae	15 - 25 cm	12,5	38,3	40,4	8,8	44	14,6	41,4	1,13
SW 3-2c	3	Ae	25 - 40 cm	9,7	59,0	26,0	5,3	55,4	20,2	24,4	
SW 3-3	3	Bt / CII	40 - 60 cm	8,3	49,7	30,4	11,6	48,8	19,3	31,9	0,55
SW 3-4	3	CII	60 - 90 cm	16,0	50,5	18,0	15,4	58,9	24,5	16,6	0,42
SW 4-1	4	Ah	5 - 15 cm	4,7	56,1	29,3	10,0	46,9	26,3	26,8	3,88
SW 4-2	4	Ae	15 - 45 cm	11,7	38,5	28,8	21,0	49,1	19,9	31	1,54
SW 4-3	4	Bt / CII	45 - 90 cm	12,5	41,1	20,5	25,9	56	22,6	21,4	0,8
SW 5-1	5	Ah	5 - 10 cm	3,1	37,1	45,3	14,4	27,5	24	48,5	21,23
SW 5-2	5	Bv	10 - 60 cm	5,6	29,6	29,3	35,5	40,7	16,6	42,7	3,77
SW 5-3	5	CII	60 - 100 cm	11,2	33,0	22,0	33,9	50,5	21	28,5	1,51
SW 6-1b	6	Ah	5 - 10 cm	3,2	15,1	46,0	35,7	23,0	6,8	70,2	10,15
SW 6-2	6	Bv	10 - 80 cm	3,4	22,6	20,8	53,2	35,7	22,9	41,4	3,83
SW 6-3	6	CII	80 - 100 cm	3,7	26,1	18,7	51,5	44,9	20,1	35	3,25
SW 7-1	7	Ah	5 - 10 cm	1,2	24,5	39,9	34,4	23	19	58	12,35
SW 7-2	7	Ah / Bv	10 - 30 cm	3,5	22,2	34,4	39,9	24,4	26	49,6	6,32
SW 7-3	7	Bv	30 - 60 cm	4,7	33,1	27,0	35,1	40,7	26	33,3	4,35
SW 7-4	7		60 - 100 cm	21,5	11,5	17,8	49,1	42,3	22,7	35	1,39

Tab. A2: Korngrößenverteilung Testgelände Pfälzerwald

Pfälzerwald											
Proben-Nr.:	Profil-Nr.:	Horizont	Entnahmetiefe	Probe gesamt				Probe kleiner 2 mm			
				Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Kies [%]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	C (org) [%]
S1 - S1	7	Ah	5 - 10 cm	2,4	8,9	87,5	1,2	2,6	11,2	86,2	8,5
S1 - S2	7	Bv	10 - 70 cm	1,7	13,0	77,7	7,6	1,9	22,3	75,8	9,0
S1 - S3	7	C	70 - 130 cm	1,1	4,4	73,0	21,5	1,6	8,3	90,1	k.A.
S2 - 2S	5	Aeh	5 - 10 cm	5,8	18,8	73,2	2,2	6,6	23	70,4	8,9
S2 - 3S	5	Bh	10 - 30 cm	1,2	10,1	81,7	7,0	1,6	13,6	84,8	8,7
S2 - 4S	5	Bv	30 - 60 cm	0,5	3,4	55,8	40,3	0,9	8	91,1	k.A.
S2 - 5S	5	C	60 - 110 cm								
S3 - S1	4a	Ah	3 - 10 cm	1,2	9,7	80,9	8,2	1,3	14,1	84,6	8,9
S3 - S2	4a	Bv	10 - 60 cm	0,4	5,4	89,9	4,3	0,9	5,7	93,4	9,0
S3 - S3	4a	C	60 - 160 cm	0,3	2,7	72,7	24,3	0,5	7	92,5	k.A.
S3 - S5	4a			0,3	2,8	51,8	45,1	0,5	7,2	92,3	k.A.
S4 - S1	6	Ah	5 - 20 cm	0,7	8,9	89,9	0,5	1,0	11,6	87,4	8,8
S4 - S2	6	Bv	20 - 60 cm	1,5	4,1	87,4	7,0	1,8	6	92,2	8,8
S4 - S3	6	C	60 - 100 cm	1,1	3,7	76,5	18,7	1,3	5,7	93	k.A.
S5 - 1	2	Ah	5 - 10 cm	2,2	15,5	77,0	5,3	4,1	17,1	78,8	9,2
S5 - 2	2	Bv	10 - 90 cm	1,9	7,1	78,2	12,8	2,6	9,7	87,7	9,2
S5 - 3	2	C	90 - 150 cm	0,4	3,4	45,8	50,4	0,9	10,2	88,9	k.A.
S 6 - S1	1	Ah	3 - 8 cm	1,8	14,2	79,7	4,3	2,9	17,3	79,8	10,0
S 6 - S2	1	Bv	8 - 80 cm	1,6	8,2	44,8	45,4	2,9	19,2	77,9	9,9
S 6 - S3	1	C	80 - 160 cm	1,1	20,3	62,6	16,0	1,3	30,9	67,8	k.A.
S7 - 1S	3	Ah	3 - 8 cm	0,5	12,8	77,0	9,7	0,9	15,8	83,3	9,8
S7 - 2S	3	Bv	8 - 90 cm	2,0	9,8	63,9	24,3	3,2	16,1	80,7	9,0
S7 - 3S	3	C	90 - 150 cm	0,6	3,1	93,5	2,8	0,8	5,9	93,3	k.A.

Tab. A3: Mittelwert ( $\mu$ ) und Standardabweichung ( $\sigma$ ) der van Genuchten Parameter für 12 Bodenklassen der US-Soil-Taxonomy nach CARSEL & PARRISH (1988).

		Sand Schluff Ton			$\theta_r$		$\theta_s$		$K_s$		$\alpha$		$n$	
		[%]	[%]	[%]	$\mu$ [Vol-%]	$\sigma$	$\mu$ [Vol-%]	$\sigma$	$\mu$ [m/s]	$\sigma$	$\mu$ [1/m]	$\sigma$	$\mu$ [-]	$\sigma$
1 C	clay	15	30	55	6,8	3,4	38	9	5,56E-07	1,17E-06	0,8	1,2	1,09	0,09
2 CL	clay loam	30	37	33	9,5	1,0	41	9	7,17E-07	1,94E-06	1,9	1,5	1,31	0,09
3 SIC	silty clay	6	48	46	4,5	2,3	36	7	5,83E-08	3,00E-07	0,5	2,9	1,09	0,06
4 SICL	silty clay loam	8	59	33	10,0	0,6	43	7	1,97E-07	5,33E-07	1,0	1,7	1,23	0,06
5 SC	sandy clay	48	11	41	6,7	1,3	38	5	3,36E-07	7,75E-07	2,7	1,2	1,23	0,10
6 SCL	sandy clay loam	54	19	27	7,0	0,6	39	7	3,63E-06	7,61E-06	5,9	0,5	1,48	0,13
7 SI	silt	6	85	9	8,9	1,0	46	11	6,95E-07	9,14E-07	1,6	0,6	1,37	0,05
8 SIL	silt loam	17	65	18	10,0	1,5	45	8	1,25E-06	3,41E-06	2,0	3,8	1,41	0,12
9 L	loam	40	40	20	7,8	1,3	43	10	2,89E-06	5,06E-06	3,6	2,1	1,56	0,11
10 SL	sandy loam	63	26	11	6,5	1,7	41	9	1,23E-05	1,56E-05	7,5	3,7	1,89	0,17
11 LS	loamy sand	81	13	6	5,7	1,5	43	9	4,05E-05	3,16E-05	12,4	4,3	2,28	0,27
12 S	sandy loam	93	4	3	3,4	1,0	43	6	8,25E-05	4,33E-05	14,5	0,7	2,68	0,29

Tab. A4: Eingliederung in das Modell nach CARSEL & PARRISH (1988)

Soonwald				Probe kleiner 2 mm			Pedotransfer						
Proben-Nr.:	Profil	Horizont	Entnahmetiefe	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Carsel & Parrish			AG Boden / DVWK			
							$\alpha$	$n$		$\alpha$	$n$		
SW 2-1	2	Ah	3 - 10 cm	7,3	51,6	41,1	SIL / L	8 / 9	0,020 / 0,036	1,41 / 1,56	Uls	0,013	1,21
SW 2-2	2	Ae	10 - 25 cm	13,3	38,3	48,4	L	9	0,036	1,56	Si4	0,043	1,18
SW 2-3	2	Bt / CII	25 - 60 cm	24,7	55,8	19,5	SIL	8	0,02	1,41	Lu	0,013	1,13
SW 2-4	2	CII	60 - 110 cm	25,2	55,5	19,3	SIL	8	0,02	1,41	Lu	0,013	1,13
SW 3-1	3	Ah	10 - 15 cm	9,7	58,9	31,4	SI / SIL	7 / 8	0,016 / 0,020	1,37 / 1,41	Uls	0,013	1,21
SW 3-2	3	Ae	15 - 25 cm	12,7	48,4	38,9	L / SIL	9 / 8	0,036 / 0,020	1,56 / 1,41	Si4	0,018	1,23
SW 3-2c	3	Ae	25 - 40 cm	14,6	72,2	13,2	SI / SIL	7 / 8	0,016 / 0,020	1,37 / 1,41	Ut3	0,009	1,23
SW 3-3	3	Bt / CII	40 - 60 cm	14	69,3	16,7	SIL	8	0,02	1,41	Ut3	0,009	1,23
SW 3-4	3	CII	60 - 90 cm	22,3	70,7	7	SIL / SICL	8 / 4	0,020 / 0,010	1,41 / 1,23	Ut4	0,009	1,17
SW 4-1	4	Ah	5 - 15 cm	7,9	78,7	13,4	SIL	8	0,02	1,41	Ut2	0,008	1,25
SW 4-2	4	Ae	15 - 45 cm	21,9	57,7	20,4	SIL	8	0,02	1,41	Lu	0,013	1,13
SW 4-3	4	Bt / CII	45 - 90 cm	25,3	66,7	8	SIL / SICL	8 / 4	0,020 / 0,010	1,41 / 1,23	Tu4	0,02	1,11
SW 5-1	5	Ah	5 - 10 cm	4,8	58,8	36,4	L / SIL	9 / 8	0,036 / 0,020	1,56 / 1,41	Uls	0,009	1,25
SW 5-2	5	Bv	10 - 60 cm	13,6	53,3	33,1	L / SIL	9 / 8	0,036 / 0,020	1,56 / 1,41	Uls	0,013	1,21
SW 5-3	5	CII	60 - 100 cm	20,7	61,6	17,7	SIL	8	0,02	1,41	Lu	0,013	1,13
SW 6-1b	6	Ah	5 - 10 cm	7,2	29,6	63,2	SL	10	0,075	1,89	Su3	0,026	1,28
SW 6-2	6	Bv	10 - 80 cm	10,3	51,2	38,5	L / SL	9 / 10	0,036 / 0,075	1,56 / 1,89	Uls	0,013	1,21
SW 6-3	6	CII	80 - 100 cm	10,8	59,8	29,4	SIL / L	8 / 9	0,020 / 0,036	1,41 / 1,56	Uls	0,013	1,21
SW 7-1	7	Ah	5 - 10 cm	3,4	56,8	39,8	L / SL	9 / 10	0,036 / 0,075	1,56 / 1,89	Uls	0,009	1,25
SW 7-2	7	Ah / Bv	10 - 30 cm	9,2	58,2	32,6	L / SL	9 / 10	0,036 / 0,075	1,56 / 1,89	Uls	0,013	1,21
SW 7-3	7	Bv	30 - 60 cm	10,9	70,5	18,6	SIL	8	0,02	1,41	Ut2	0,008	1,25
SW 7-4	7		60 - 100 cm	24,1	49	26,9	L	9	0,036	1,56	Ls2	0,031	1,13
Pfälzerwald													
Proben-Nr.:	Profil-Nr.:	Horizont	Entnahmetiefe	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Carsel & Parrish			AG Boden / DVWK			
							$\alpha$	$n$		$\alpha$	$n$		
S1 - S1	7	Ah	5 - 10 cm	2,6	11,2	86,2	LS	11	0,124	2,28	Su2	0,068	1,44
S1 - S2	7	Bv	10 - 70 cm	1,9	22,3	75,8	LS / SL	11 / 10	0,124 / 0,075	2,28 / 1,89	Su2	0,068	1,44
S1 - S3	7	C	70 - 130 cm	1,6	8,3	90,1	S	12	0,145	2,68	Ss	0,087	1,58
S2 - 2S	5	Aeh	5 - 10 cm	6,6	23	70,4	SL	10	0,075	1,89	Si2	0,079	1,26
S2 - 3S	5	Bh	10 - 30 cm	1,6	13,6	84,8	LS	11	0,124	2,28	Su2	0,068	1,44
S2 - 4S	5	Bv	30 - 60 cm	0,9	8	91,1	S	12	0,145	2,68	Ss	0,087	1,58
S2 - 5S	5	C	60 - 110 cm										
S3 - S1	4a	Ah	3 - 10 cm	1,3	14,1	84,6	LS	11	0,124	2,28	Su2	0,068	1,44
S3 - S2	4a	Bv	10 - 60 cm	0,9	5,7	93,4	S	12	0,145	2,68	Ss	0,087	1,58
S3 - S3	4a	C	60 - 160 cm	0,5	7	92,5	S	12	0,145	2,68	Ss	0,087	1,58
S3 - S5	4a			0,5	7,2	92,3	S	12	0,145	2,68	Ss	0,087	1,58
S4 - S1	6	Ah	5 - 20 cm	1,0	11,6	87,4	LS	11	0,124	2,28	Su2	0,068	1,44
S4 - S2	6	Bv	20 - 60 cm	1,8	6	92,2	S	12	0,145	2,68	Ss	0,087	1,58
S4 - S3	6	C	60 - 100 cm	1,3	5,7	93	S	12	0,145	2,68	Ss	0,087	1,58
S5 - 1	2	Ah	5 - 10 cm	4,1	17,1	78,8	LS	11	0,124	2,28	Su2	0,068	1,44
S5 - 2	2	Bv	10 - 90 cm	2,6	9,7	87,7	LS / S	11 / 12	0,124 / 0,145	2,28 / 2,68	Ss	0,087	1,58
S5 - 3	2	C	90 - 150 cm	0,9	10,2	88,9	LS / S	11 / 12	0,124 / 0,145	2,28 / 2,68	Su2	0,068	1,44
S6 - S1	1	Ah	3 - 8 cm	2,9	17,3	79,8	LS	11	0,124	2,28	Su2	0,068	1,44
S6 - S2	1	Bv	8 - 80 cm	2,9	19,2	77,9	LS	11	0,124	2,28	Su2	0,068	1,44
S6 - S3	1	C	80 - 160 cm	1,3	30,9	67,8	SL	10	0,075	1,89	Su3	0,026	1,21
S7 - 1S	3	Ah	3 - 8 cm	0,9	15,8	83,3	LS	11	0,124	2,28	Su2	0,068	1,44
S7 - 2S	3	Bv	8 - 90 cm	3,2	16,1	80,7	LS	11	0,124	2,28	Su2	0,068	1,44
S7 - 3S	3	C	90 - 150 cm	0,8	5,9	93,3	S	12	0,145	2,68	Ss	0,087	1,58

Tab. A5: Bestimmung der Bodenhydraulik Pfälzerwald, Teil 1

Pfälzerwald		Pykn.	Wägung Stechzylinder					Tara		Roh-dichte	Porenvolumen								
lfd. Nr.	Anzahl der Proben pro Standort		1,80	1,80	2,50	4,20	Trockengew.	Stechzyl.	Gummi+ Filter		pF 1,8	pF 2,5	pF 4,2 PWP	nFK (pF2,5-pF4,2)	GPV	FP (< 0,2 µm)	MP (0,2-10 µm)	enge GP (10-50 µm)	
	Probennr.	Vol. %	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]			
S1-1a	Ah Horizont	173	26,50	271,91	263,98	250,82	239,45	117,75	2,69	1,22	32,46	24,53	11,37	13,16	58,96	11,37	13,16	7,93	
S1-1b		174	30,00	261,13	252,86	241,04	229,67	117,12	2,63	1,13	31,46	23,19	11,37	11,82	61,46	11,37	11,82	8,27	
S1-1c		175	36,00	246,98	238,38	228,58	217,21	117,40	2,97	1,00	29,77	21,17	11,37	9,80	65,77	11,37	9,80	8,60	
S1-1d		176	27,00	265,07	258,21	244,53	233,16	117,11	2,18	1,16	31,91	25,05	11,37	13,68	58,91	11,37	13,68	6,86	
S1-1e		177	31,50	254,04	248,23	231,94	220,57	120,59	2,50	1,00	33,47	27,66	11,37	16,29	64,97	11,37	16,29	5,81	
S1-1f		178	27,50	268,46	262,47	248,52	237,15	117,49	2,61	1,20	31,31	25,32	11,37	13,95	58,81	11,37	13,95	5,99	
S1-1g		179	27,00	272,55	265,97	252,08	240,71	118,33	2,75	1,22	31,84	25,26	11,37	13,89	58,84	11,37	13,89	6,58	
S1-1h		180	33,00	249,75	243,78	227,19	215,82	117,83	2,41	0,98	33,93	27,96	11,37	16,59	66,93	11,37	16,59	5,97	
S1-1i		181	37,00	234,33	229,33	211,47	200,10	117,77	2,30	0,82	34,23	29,23	11,37	17,86	71,23	11,37	17,86	5,00	
Mittelwert				30,61	258,25	251,47	237,35	225,98	117,93	2,56	1,08	32,26	25,49	11,37	14,12	62,88	11,37	14,12	6,78
S1-2a		Bv Horizont	182	26,00	266,12	256,51	245,04	239,30	117,37	4,06	1,22	26,82	17,21	5,74	11,47	52,82	5,74	11,47	9,61
S1-2b	183		38,00	259,14	249,94	241,16	235,42	117,86	3,76	1,18	23,72	14,52	5,74	8,78	61,72	5,74	8,78	9,20	
S1-2c	184		31,50	274,90	265,66	254,20	248,46	117,68	4,70	1,31	26,44	17,20	5,74	11,46	57,94	5,74	11,46	9,24	
S1-2d	185		29,50	275,40	264,30	253,88	248,14	116,87	4,83	1,31	27,26	16,16	5,74	10,42	56,76	5,74	10,42	11,10	
S1-2e	186		26,50	279,27	266,94	254,62	248,88	117,98	4,00	1,31	30,39	18,06	5,74	12,32	56,89	5,74	12,32	12,33	
S1-2f	187		38,00	257,56	250,12	239,04	233,30	116,15	5,13	1,17	24,26	16,82	5,74	11,08	62,26	5,74	11,08	7,44	
S1-2g	188		36,50	258,23	250,08	238,37	232,63	117,92	4,15	1,15	26,60	17,45	5,74	11,71	62,10	5,74	11,71	8,15	
S1-2h	189		30,50	271,82	259,63	248,62	242,88	118,09	3,73	1,25	28,94	16,75	5,74	11,01	59,44	5,74	11,01	12,19	
S1-2i	190		32,00	272,71	264,21	249,74	244,00	117,48	3,44	1,27	28,71	20,21	5,74	14,47	60,71	5,74	14,47	8,50	
Mittelwert				32,06	268,35	258,60	247,19	241,45	117,49	4,30	1,24	26,90	17,15	5,74	11,41	58,96	5,74	11,41	9,75
S1-3a	C Horizont		191	21,00	307,37	301,21	290,36	284,37	118,09	3,44	1,66	23,00	16,84	5,99	10,85	44,00	5,99	10,85	6,16
S1-3b		192	18,50	314,02	307,19	296,97	290,98	117,34	3,82	1,74	23,04	16,21	5,99	10,22	41,54	5,99	10,22	6,83	
S1-3c		193	19,50	310,70	302,34	292,61	286,62	117,77	3,82	1,69	24,08	15,72	5,99	9,73	43,58	5,99	9,73	8,36	
S1-3d		194	32,00	292,12	285,87	276,91	270,92	117,94	4,19	1,53	21,20	14,95	5,99	8,96	53,20	5,99	8,96	6,25	
S1-3e		195	21,50	307,12	298,52	288,37	282,38	116,99	3,44	1,65	24,74	16,14	5,99	10,15	46,24	5,99	10,15	8,60	
S1-3f		196	21,50	306,95	299,11	288,45	282,46	118,31	3,77	1,64	24,49	16,65	5,99	10,66	45,99	5,99	10,66	7,84	
S1-3g		197	24,50	300,73	290,20	282,82	276,83	117,69	4,07	1,59	23,90	13,37	5,99	7,38	48,40	5,99	7,38	10,53	
S1-3h		198	22,00	295,38	286,55	275,26	269,27	108,46	3,15	1,61	26,11	17,28	5,99	11,29	48,11	5,99	11,29	8,83	
S1-3i		199	21,50	305,23	299,45	288,66	282,67	117,34	3,43	1,65	22,56	16,78	5,99	10,79	44,06	5,99	10,79	5,78	
Mittelwert				22,44	304,40	296,72	286,71	280,72	116,66	3,68	1,64	23,68	15,99	5,99	10,00	46,12	5,99	10,00	7,69
S2-1a		?	109	30,50	220,04	216,87	?	168,91	117,34	2,40	0,52	51,13	47,96	?	#WERT!	81,63	11,37	#WERT!	3,17
S2-1b	110		23,00	230,52	221,04	?	171,78	117,48	2,44	0,54	58,74	49,26	?	#WERT!	81,74	12,37	#WERT!	9,48	
S2-1c	111		36,00	216,61	209,66	?	170,96	117,85	2,44	0,53	45,65	38,70	?	#WERT!	81,65	13,37	#WERT!	6,95	
Mittelwert			29,83	222,39	215,86		170,55	117,56	2,43	0,53	51,84	45,31		#WERT!	81,67	12,37	#WERT!	6,53	
S2-2a	Aeh Horizont	200	36,00	250,75	244,67	233,24	222,63	117,40	3,22	1,05	28,12	22,04	10,61	11,43	64,12	10,61	11,43	6,08	
S2-2b		201	34,50	250,34	241,48	231,29	220,68	117,33	3,07	1,03	29,66	20,80	10,61	10,19	64,16	10,61	10,19	8,86	
S2-2c		202	36,00	254,95	246,77	239,64	229,03	117,69	2,66	1,11	25,92	17,74	10,61	7,13	61,92	10,61	7,13	8,18	
S2-2d		112	35,50	248,51	239,36	228,10	217,49	117,93	2,83	1,00	31,02	21,87	10,61	11,26	66,52	10,61	11,26	9,15	
S2-2e		113	29,50	229,55	223,72	192,47	181,86	117,68	2,38	0,64	47,69	41,86	10,61	31,25	67,19	10,61	31,25	5,83	
S2-2f		114	28,00	242,02	232,56	209,41	198,80	117,62	2,36	0,81	43,22	33,76	10,61	23,15	71,22	10,61	23,15	9,46	
S2-2g		115	29,50	231,19	226,02	195,07	184,46	117,46	2,33	0,67	46,73	41,56	10,61	30,95	76,23	10,61	30,95	5,17	
S2-2h		116	36,50	233,93	225,81	209,55	198,94	117,19	2,03	0,82	34,99	26,87	10,61	16,26	71,49	10,61	16,26	8,12	
S2-2i		117	25,00	250,70	241,41	216,77	206,16	118,17	2,32	0,88	44,54	35,25	10,61	24,64	69,54	10,61	24,64	9,29	
Mittelwert				32,28	243,55	235,76	217,28	206,67	117,61	2,58	0,89	36,88	29,08	10,61	18,47	69,15	10,61	18,47	7,79
S2-3a		Bh Horizont	118	39,50	247,46	239,77	226,69	219,79	118,33	4,19	1,01	27,67	19,98	6,90	13,08	67,17	6,90	13,08	7,69
S2-3b	119		37,50	248,63	240,52	226,82	219,92	117,97	3,52	1,02	28,71	20,60	6,90	13,70	66,21	6,90	13,70	8,11	
S2-3c	120		41,50	241,29	233,98	222,04	215,14	118,59	3,44	0,97	26,15	18,84	6,90	11,94	67,65	6,90	11,94	7,31	
S2-3d	121		35,00	259,13	250,27	237,99	231,09	117,67	3,13	1,13	28,04	19,18	6,90	12,28	63,04	6,90	12,28	8,86	
S2-3e	122		38,00	248,74	241,57	229,68	222,78	117,71	3,07	1,05	25,96	18,79	6,90	11,89	63,96	6,90	11,89	7,17	
S2-3f	123		37,50	249,65	240,05	224,96	218,06	118,98	3,54	0,99	31,59	21,99	6,90	15,09	69,09	6,90	15,09	9,60	
S2-3g	124		37,00	245,95	238,74	224,18	217,28	117,67	2,66	1,00	28,67	21,46	6,90	14,56	65,67	6,90	14,56	7,21	
S2-3h	125		44,50	243,97	239,43	227,87	220,97	118,14	3,12	1,03	23,00	18,46	6,90	11,56	67,50	6,90	11,56	4,54	
S2-3i	126		40,50	247,54	242,44	230,12	223,22	118,02	2,78	1,05	24,32	19,22	6,90	12,32	64,82	6,90	12,32	5,10	
Mittelwert				39,00	248,04	240,75	227,82	220,92	118,12	3,27	1,03	27,12	19,84	6,90	12,94	66,12	6,90	12,94	7,29
S2-4a	Bv Horizont		127	31,50	280,23	274,11	265,85	260,54	117,59	2,90	1,43	19,69	13,57	5,31	8,26	51,19	5,31	8,26	6,12
S2-4b		128	34,00	272,02	264,91	255,94	250,63	118,09	3,57	1,33	21,39	14,28	5,31	8,97	55,39	5,31	8,97	7,11	
S2-4c		129	35,50	268,76	262,30	253,85	248,54	118,09	3,59	1,30	20,22	13,76	5,31	8,45	55,72	5,31	8,45	6,46	
S2-4d		130	44,50	248,13	243,00	232,10	226,79	119,03	3,70	1,08	21,34	16,21	5,31	10,90	65,84	5,31	10,90	5,13	



Tab. A5: Bestimmung der Bodenhydraulik Pfälzerwald, Teil 2

Pfälzerwald		Pykn.	Wägung Stechzylinder					Tara		Roh-dichte	pF 1,8	pF 2,5	Porenvolumen						
lfd. Nr.	Anzahl der Proben pro Standort		Probennr.	1,80	1,80	2,50	4,20	Trocken-gew.	Stech-zyl.				Gummi+Filter	pF 4,2	nFK (pF2,5-pF4,2)	GPV	FP (< 0,2 µm)	MP (0,2-10 µm)	enge GP (10-50 µm)
				Vol. %	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]				Gew. [g]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
S3-1a	Ah Horizont	9	82	39,50	246,42	239,39	229,72	219,66	116,91	2,77	1,03	26,76	19,73	10,06	9,67	66,26	10,06	9,67	7,03
S3-1b		83	36,50	248,65	242,64	227,85	217,79	117,98	2,41	1,00	30,86	24,85	10,06	14,79	67,36	10,06	14,79	6,01	
S3-1c		84	33,50	253,13	246,28	232,82	222,76	117,51	2,68	1,05	30,37	23,52	10,06	13,46	63,87	10,06	13,46	6,85	
S3-1d		85	42,50	238,55	230,51	221,00	210,94	112,69	4,78	0,98	27,61	19,57	10,06	9,51	70,11	10,06	9,51	8,04	
S3-1e		86	40,50	245,91	236,10	227,48	217,42	117,66	4,79	1,00	28,49	18,68	10,06	8,62	68,99	10,06	8,62	9,81	
S3-1f		87	38,50	246,83	237,80	228,40	218,34	117,69	2,81	1,01	28,49	19,46	10,06	9,40	66,99	10,06	9,40	9,03	
S3-1g		88	38,50	250,50	241,09	230,11	220,05	117,86	3,04	1,02	30,45	21,04	10,06	10,98	68,95	10,06	10,98	9,41	
S3-1h		89	45,50	235,46	228,64	219,84	209,78	118,12	3,25	0,92	25,68	18,86	10,06	8,80	71,18	10,06	8,80	6,82	
S3-1i		90	40,00	238,41	231,60	217,24	207,18	117,84	4,81	0,89	31,23	24,42	10,06	14,36	71,23	10,06	14,36	6,81	
Mittelwert				39,44	244,87	237,12	226,05	215,99	117,14	3,48	0,99	28,88	21,13	10,06	11,07	68,33	10,06	11,07	7,76
S3-2a	Bv Horizont	9	91	45,50	243,68	238,40	228,63	221,65	117,37	4,41	1,04	22,03	16,75	6,98	9,77	67,53	6,98	9,77	5,28
S3-2b		92	32,00	270,22	262,29	250,65	243,67	117,39	4,34	1,26	26,55	18,62	6,98	11,64	58,55	6,98	11,64	7,93	
S3-2c		93	32,50	274,68	267,09	258,02	251,04	118,67	4,42	1,32	23,64	16,05	6,98	9,07	56,14	6,98	9,07	7,59	
S3-2d		94	39,50	257,42	251,00	242,95	235,97	119,00	3,70	1,17	21,45	15,03	6,98	8,05	60,95	6,98	8,05	6,42	
S3-2e		95	40,50	257,46	250,62	244,16	237,18	117,21	4,64	1,20	20,28	13,44	6,98	6,46	60,78	6,98	6,46	6,84	
S3-2f		96	33,00	280,93	273,79	269,68	262,70	117,97	3,84	1,45	18,23	11,09	6,98	4,11	51,23	6,98	4,11	7,14	
S3-2g		97	38,50	259,94	254,65	244,28	237,30	117,53	3,88	1,20	22,64	17,35	6,98	10,37	61,14	6,98	10,37	5,29	
S3-2h		98	33,50	270,62	264,16	253,94	246,96	117,65	3,47	1,29	23,66	17,20	6,98	10,22	57,16	6,98	10,22	6,46	
S3-2i		99	50,00	232,46	226,56	220,04	213,06	117,66	4,64	0,95	19,40	13,50	6,98	6,52	69,40	6,98	6,52	5,90	
Mittelwert				38,33	260,82	254,28	245,82	238,84	117,83	4,15	1,21	21,99	15,45	6,98	8,47	60,32	6,98	8,47	6,54
S3-3a	C Horizont	9	100	33,50	282,27	274,90	267,23	264,66	117,30	3,73	1,47	17,61	10,24	2,57	7,67	51,11	2,57	7,67	7,37
S3-3b		101	34,50	282,63	277,28	269,88	267,31	118,01	3,55	1,49	15,32	9,97	2,57	7,40	49,82	2,57	7,40	5,35	
S3-3c		102	37,00	277,04	270,66	264,79	262,22	117,56	3,82	1,45	14,82	8,44	2,57	5,87	51,82	2,57	5,87	6,38	
S3-3d		103	36,50	275,08	266,60	261,78	259,21	118,54	2,96	1,41	15,87	7,39	2,57	4,82	52,37	2,57	4,82	8,48	
S3-3e		104	32,50	276,30	262,38	257,62	255,05	117,75	2,78	1,37	21,25	7,33	2,57	4,76	53,75	2,57	4,76	13,92	
S3-3f		105	42,50	265,33	254,44	249,69	247,12	117,94	2,84	1,29	18,21	7,32	2,57	4,75	60,71	2,57	4,75	10,89	
S3-3g		106	35,00	279,75	271,52	265,03	262,46	117,87	3,01	1,45	17,29	9,06	2,57	6,49	52,29	2,57	6,49	8,23	
S3-3h		107	35,00	273,76	267,10	258,97	256,40	113,42	3,74	1,43	17,36	10,70	2,57	8,13	52,36	2,57	8,13	6,66	
S3-3i		108	33,00	278,72	263,78	257,97	255,40	117,59	4,84	1,38	23,32	8,38	2,57	5,81	56,32	2,57	5,81	14,94	
Mittelwert				35,50	276,76	267,63	261,44	258,87	117,33	3,47	1,42	17,89	8,76	2,57	6,19	53,39	2,57	6,19	9,14
S4-1a	Ah Horizont	9	146	36,00	241,62	232,82	217,26	208,26	117,31	2,39	0,91	33,36	24,56	9,00	15,56	69,36	9,00	15,56	8,80
S4-1b		147	36,50	238,38	228,19	211,09	202,09	117,87	3,37	0,84	36,29	26,10	9,00	17,10	72,79	9,00	17,10	10,19	
S4-1c		148	38,50	232,45	224,59	205,39	196,39	117,31	3,89	0,79	36,06	28,20	9,00	19,20	74,56	9,00	19,20	7,86	
S4-1d		149	41,00	235,65	226,80	212,05	203,05	118,35	3,83	0,85	32,60	23,75	9,00	14,75	73,60	9,00	14,75	8,85	
S4-1e		150	47,50	224,76	217,45	203,88	194,88	118,08	3,87	0,77	29,88	22,57	9,00	13,57	77,38	9,00	13,57	7,31	
S4-1f		151	41,00	235,34	227,78	215,23	206,23	117,44	2,92	0,89	29,11	21,55	9,00	12,55	70,11	9,00	12,55	7,56	
S4-1g		152	46,50	226,88	220,39	207,13	198,13	118,31	3,56	0,80	28,75	22,26	9,00	13,26	75,25	9,00	13,26	6,49	
S4-1h		153	29,00	258,68	246,71	226,41	217,41	118,28	2,50	0,99	41,27	29,30	9,00	20,30	70,27	9,00	20,30	11,97	
S4-1i		154	34,50	245,94	238,32	222,29	213,29	117,94	2,16	0,95	32,65	25,03	9,00	16,03	67,15	9,00	16,03	7,62	
Mittelwert				38,94	237,74	229,23	213,41	204,41	117,88	3,17	0,87	33,33	24,81	9,00	15,81	72,27	9,00	15,81	8,52
S4-2a	Bv Horizont	9	155	39,50	257,14	248,83	242,01	232,53	118,38	3,61	1,14	24,61	16,30	9,48	6,82	64,11	9,48	6,82	8,31
S4-2b		156	38,00	252,92	245,56	235,76	226,28	117,85	3,54	1,08	26,64	19,28	9,48	9,80	64,64	9,48	9,80	7,36	
S4-2c		157	37,50	253,10	246,30	234,17	224,69	117,97	3,67	1,07	28,41	21,61	9,48	12,13	65,91	9,48	12,13	6,80	
S4-2d		158	31,50	273,03	263,23	255,29	245,81	118,35	3,38	1,27	27,22	17,42	9,48	7,94	58,72	9,48	7,94	9,80	
S4-2e		159	34,50	262,32	255,30	243,63	234,15	117,93	3,86	1,16	28,17	21,15	9,48	11,67	62,67	9,48	11,67	7,02	
S4-2f		160	35,50	255,39	246,16	234,69	225,21	114,38	3,24	1,11	30,18	20,95	9,48	11,47	65,68	9,48	11,47	9,23	
S4-2g		161	36,00	265,20	256,72	244,63	235,15	117,79	2,80	1,17	30,05	21,57	9,48	12,09	66,05	9,48	12,09	8,48	
S4-2h		162	32,50	260,12	250,12	240,14	230,66	110,66	3,04	1,20	29,46	19,46	9,48	9,98	61,96	9,48	9,98	10,00	
S4-2i		163	25,00	281,27	271,76	256,68	247,20	118,60	3,95	1,29	34,07	24,56	9,48	15,08	59,07	9,48	15,08	9,51	
Mittelwert				34,44	262,28	253,78	243,00	233,52	116,88	3,45	1,17	28,76	20,26	9,48	10,78	63,20	9,48	10,78	8,50
S4-3a	C Horizont	9	164	38,50	273,46	267,63	262,93	258,10	117,49	2,81	1,41	15,36	9,53	4,83	4,70	53,86	4,83	4,70	5,83
S4-3b		165	34,50	283,14	275,20	271,87	267,04	117,49	3,25	1,50	16,10	8,16	4,83	3,33	50,60	4,83	3,33	7,94	
S4-3c		166	34,00	282,18	274,90	268,89	264,06	117,66	3,72	1,46	18,12	10,84	4,83	6,01	52,12	4,83	6,01	7,28	
S4-3d		167	29,00	284,27	270,51	264,40	259,57	117,88	3,64	1,42	24,70	10,94	4,83	6,11	53,70	4,83	6,11	13,76	
S4-3e		168	33,00	284,19	276,04	270,64	265,81	116,94	3,00	1,49	18,38	10,23	4,83	5,40	51,38	4,83	5,40	8,15	
S4-3f		169	43,00	259,24	251,12	246,85	242,02	117,69	3,64	1,24	17,22	9,10	4,83	4,27	60,22	4,83	4,27	8,12	
S4-3g		170	33,50	282,55	274,90	267,26	262,43	116,83	3,64	1,46	20,12	12,47	4,83	7,64	53,62	4,83	7,64	7,65	
S4-3h		171	29,50	282,90	272,52	264,24	259,41	117,60	3,23	1,42	23,49	13,11	4,83	8,28	52,99	4,83	8,28	10	

Tab. A5: Bestimmung der Bodenhydraulik Pfälzerwald, Teil 3

Pfälzerwald		Pykn.	Wägung Stechzylinder					Tara		Roh-dichte	pF 1,8	pF 2,5	Porenvolumen					
lfd. Nr.	Anzahl der Proben pro Standort		1,80	1,80	2,50	4,20	Trocken-gew.	Stech-zyl.	Gummi+ Filter				pF 4,2 PWP	nFK (pF2,5-pF4,2)	GPV	FP (< 0,2 µm)	MP (0,2-10 µm)	enge GP (10-50 µm)
	Probennr.	Vol. %	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	Gew. [g]	[g/cm³]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]		
S5-3 C Horizont fehlt																		
S6-1a	9	1	35,50	249,61	242,33	228,77	219,67	119,25	2,61	1,00	29,94	22,66	9,10	13,56	65,44	9,10	13,56	7,28
S6-1b		2	44,00	246,04	239,95	220,44	211,34	117,49	3,78	0,94	34,70	28,61	9,10	19,51	78,70	9,10	19,51	6,09
S6-1c	Ah Horizont	3	35,00	253,19	243,87	231,15	222,05	113,20	3,13	1,09	31,14	21,82	9,10	12,72	66,14	9,10	12,72	9,32
S6-1d		4	41,50	231,74	223,22	206,54	197,44	117,20	3,16	0,80	34,30	25,78	9,10	16,68	75,80	9,10	16,68	8,52
S6-1e		5	34,00	243,53	234,23	214,32	205,22	117,67	3,93	0,88	38,31	29,01	9,10	19,91	72,31	9,10	19,91	9,30
S6-1f		6	37,00	246,81	237,89	220,10	211,00	118,35	2,81	0,93	35,81	26,89	9,10	17,79	72,81	9,10	17,79	8,92
S6-1g		7	36,50	246,84	239,11	224,16	215,06	118,49	3,00	0,97	31,78	24,05	9,10	14,95	68,28	9,10	14,95	7,73
S6-1h		8	35,50	246,47	236,89	222,02	212,92	118,16	2,38	0,95	33,55	23,97	9,10	14,87	69,05	9,10	14,87	9,58
S6-1i		9	32,50	255,19	247,84	234,02	224,92	118,16	2,83	1,07	30,27	22,92	9,10	13,82	62,77	9,10	13,82	7,35
Mittelwert			36,83	246,60	238,37	222,39	213,29	117,55	3,07	0,96	33,31	25,08	9,10	15,98	70,14	9,10	15,98	8,23
S6-2a	8	10	37,50	257,48	250,14	241,96	233,92	116,56	3,93	1,17	23,56	16,22	8,04	8,18	61,06	8,04	8,18	7,34
S6-2b		11	36,00	261,20	253,23	243,27	235,23	117,43	5,69	1,18	25,97	18,00	8,04	9,96	61,97	8,04	9,96	7,97
S6-2c	Bv Horizont	12	41,00	251,39	245,93	237,91	229,87	117,84	3,43	1,12	21,52	16,06	8,04	8,02	62,52	8,04	8,02	5,46
S6-2d		13	38,00	259,48	252,36	244,69	236,65	117,77	3,92	1,19	22,83	15,71	8,04	7,67	60,83	8,04	7,67	7,12
S6-2e		14	44,00	242,47	237,46	229,79	221,75	117,43	3,58	1,04	20,72	15,71	8,04	7,67	64,72	8,04	7,67	5,01
S6-2f		15	32,50	270,34	263,77	253,20	245,16	117,76	3,45	1,27	25,18	18,61	8,04	10,57	57,68	8,04	10,57	6,57
S6-2g		16	38,00	259,35	253,85	244,18	236,14	117,17	4,03	1,19	23,21	17,71	8,04	9,67	61,21	8,04	9,67	5,20
S6-2h		17	29,00	280,52	274,17	262,67	254,63	118,06	3,80	1,37	25,89	19,54	8,04	11,50	54,89	8,04	11,50	6,35
S6-2i		18																
Mittelwert			37,00	260,28	253,86	244,71	236,67	117,50	3,98	1,19	23,61	17,20	8,04	9,16	60,61	8,04	9,16	6,42
S6-3a	9	19	29,50	288,64	281,59	273,76	269,39	117,39	3,66	1,52	19,25	12,20	4,37	7,83	48,75	4,37	7,83	7,05
S6-3b		20	34,50	278,63	273,92	264,93	260,56	117,68	4,18	1,43	18,07	13,36	4,37	8,99	52,57	4,37	8,99	4,71
S6-3c	C Horizont	21	26,00	300,81	295,45	288,03	283,66	117,91	3,45	1,66	17,15	11,79	4,37	7,42	43,15	4,37	7,42	5,36
S6-3d		22	27,00	295,10	288,59	278,75	274,38	118,43	3,10	1,56	20,72	14,21	4,37	9,84	47,72	4,37	9,84	6,51
S6-3e		23	25,00	299,13	292,42	282,86	278,49	118,43	3,23	1,60	20,64	13,93	4,37	9,56	45,64	4,37	9,56	6,71
S6-3f		24	33,50	284,81	280,37	273,34	268,97	118,01	3,88	1,51	15,84	11,40	4,37	7,03	49,34	4,37	7,03	4,44
S6-3g		25	26,50	292,14	286,80	276,48	272,11	111,05	3,52	1,61	20,03	14,69	4,37	10,32	46,53	4,37	10,32	5,34
S6-3h		26	39,00	269,26	265,15	258,34	253,97	117,33	4,78	1,37	15,29	11,18	4,37	6,81	54,79	4,37	6,81	4,11
S6-3i		27	33,50	279,69	273,31	265,44	261,07	117,50	4,06	1,44	18,62	12,24	4,37	7,87	52,12	4,37	7,87	6,38
Mittelwert			30,56	287,58	281,96	273,55	269,18	117,08	3,76	1,52	18,40	12,78	4,37	8,41	48,96	4,37	8,41	5,62
S7-1a	9	55	43,50	230,64	223,08	217,82	202,24	118,01	3,69	0,84	28,40	20,84	15,58	5,26	71,90	15,58	5,26	7,56
S7-1b		56	41,50	236,90	229,17	224,07	208,49	118,41	4,56	0,90	28,41	20,68	15,58	5,10	69,91	15,58	5,10	7,73
S7-1c	Ah Horizont	57	44,50	227,22	218,76	212,60	197,02	116,80	2,88	0,80	30,20	21,74	15,58	6,16	74,70	15,58	6,16	8,46
S7-1d		58	47,50	230,23	224,07	220,72	205,14	118,52	3,66	0,87	25,09	18,93	15,58	3,35	72,59	15,58	3,35	6,16
S7-1e		59	45,00	218,52	212,18	202,56	186,98	118,00	2,90	0,69	31,54	25,20	15,58	9,62	76,54	15,58	9,62	6,34
S7-1f		60	41,00	232,95	224,38	217,51	201,93	119,34	4,19	0,83	31,02	22,45	15,58	6,87	72,02	15,58	6,87	8,57
S7-1g		61	38,50	232,71	223,68	213,53	197,95	116,98	2,88	0,81	34,76	25,73	15,58	10,15	73,26	15,58	10,15	9,03
S7-1h		62	36,50	238,44	225,72	219,74	204,16	118,02	2,76	0,86	34,28	21,56	15,58	5,98	70,78	15,58	5,98	12,72
S7-1i		63	43,50	226,37	219,17	213,12	197,54	116,87	2,86	0,81	28,83	21,63	15,58	6,05	72,33	15,58	6,05	7,20
Mittelwert			42,39	230,44	222,25	215,74	200,16	117,88	3,38	0,82	30,28	22,08	15,58	6,50	72,67	15,58	6,50	8,20
S7-2a	9	64	36,00	276,32	270,40	271,65	258,93	117,36	4,27	1,42	17,39	11,47	12,72	-1,25	53,39	12,72	-1,25	5,92
S7-2b		65	46,50	233,20	227,82	223,95	211,23	112,38	3,73	0,99	21,97	16,59	12,72	3,87	68,47	12,72	3,87	5,38
S7-2c	Bv Horizont	66	36,50	259,72	251,84	246,31	233,59	117,65	5,07	1,16	26,13	18,25	12,72	5,53	62,63	12,72	5,53	7,88
S7-2d		67	41,00	250,50	243,86	239,12	226,40	117,97	4,89	1,08	24,10	17,46	12,72	4,74	65,10	12,72	4,74	6,64
S7-2e		68	32,50	268,76	261,80	254,81	242,09	117,88	3,60	1,24	26,67	19,71	12,72	6,99	59,17	12,72	6,99	6,96
S7-2f		69	45,50	240,54	234,98	232,86	220,14	116,13	4,74	1,04	20,40	14,84	12,72	2,12	65,90	12,72	2,12	5,56
S7-2g		70	45,00	241,24	235,24	232,46	219,74	117,33	4,00	1,02	21,50	15,50	12,72	2,78	66,50	12,72	2,78	6,00
S7-2h		71	45,50	232,46	226,08	219,01	206,29	117,69	3,83	0,89	26,17	19,79	12,72	7,07	71,67	12,72	7,07	6,38
S7-2i		72	47,00	237,48	231,66	228,91	216,19	117,67	4,97	0,99	21,29	15,47	12,72	2,75	68,29	12,72	2,75	5,82
Mittelwert			41,72	248,91	242,63	238,79	226,07	116,90	4,34	1,09	22,85	16,56	12,72	3,84	64,57	12,72	3,84	6,28
S7-3a	9	73	37,00	273,35	265,85	264,05	257,78	117,63	3,09	1,40	15,57	8,07	6,27	1,80	52,57	6,27	1,80	7,50
S7-3b		74	33,00	280,40	274,21	266,51	260,24	117,25	3,71	1,43	20,16	13,97	6,27	7,70	53,16	6,27	7,70	6,19
S7-3c	C Horizont	75	35,00	277,62	271,89	268,55	262,28	117,34	3,19	1,45	15,34	9,61	6,27	3,34	50,34	6,27	3,34	5,73
S7-3d		76	40,00	271,63	265,72	242,71	236,44	117,52	3,21	1,19	35,19	29,28	6,27	23,01	75,19	6,27	23,01	5,91
S7-3e		77	28,50	290,16	287,16	275,08	268,81	117,29	3,51	1,52	21,35	18,35	6,27	12,08	49,85	6,27	12,08	3,00
S7-3f		78	37,00	267,63	262,04	259,84	253,57	106,09	3,27	1,47	14,06	8,47	6,27	2,20	51,06	6,27	2,20	5,59
S7-3g		79	21,50	303,42	299,72	286,53	280,26	117,22	3,61	1,63	23,16	19,46	6,27	13,19	44,66	6,27	13,19	3,70
S7-3h		80	21,50	304,52	301,90	289,00	282,73	118,26	2,89	1,64								

Tab. A6: Bestimmung der Bodenhydraulik Soonwald, Teil 1

Soonwald		Pykn.	Wägung Stechzylinder					Tara		Roh-dichte	pF 1,8	pF 2,5	Porenvolumen					
Ild. Nr.	Anzahl der Proben pro Standort		1,80	1,80	2,50	4,20	Trocken-gew.	Stech-zyl.	Gummi+ Filter				pF 4,2 PWP	nFK (pF2,5-pF4,2)	GPV	FP (< 0,2 µm)	MP (0,2-10 µm)	enge GP (10-50 µm)
Sw2-1a	7	90	35,50	209,39	196,45	183,52	156,10	117,70	2,53	0,38	53,29	40,35	27,42	12,93	12,94	27,42	12,93	12,94
Sw2-1b		91	52,50	185,80	179,33	173,38	145,96	117,14	2,70	0,29	39,84	33,37	27,42	5,95	6,47	27,42	5,95	6,47
Sw2-1c		92	42,50	206,50	199,95	192,16	164,74	112,92	3,10	0,52	41,76	35,21	27,42	7,79	6,55	27,42	7,79	6,55
Sw2-1d		93	29,00	232,60	225,80	211,32	183,90	106,37	3,10	0,78	48,70	41,90	27,42	14,48	6,80	27,42	14,48	6,80
Sw2-1e		94	28,00	232,62	223,67	206,19	178,77	117,43	3,23	0,61	53,85	44,90	27,42	17,48	8,95	27,42	17,48	8,95
Sw2-1f		95	39,50	215,10	210,98	198,64	171,22	118,47	2,60	0,53	43,88	39,76	27,42	12,34	4,12	27,42	12,34	4,12
Sw2-1g		96	46,00	194,00	186,79	177,76	150,34	113,69	2,90	0,37	43,66	36,45	27,42	9,03	7,21	27,42	9,03	7,21
			39,00	210,86	203,28	191,85	164,43	114,82	2,88	0,50	46,43	38,85	27,42	11,43	7,58	27,42	11,43	7,58
Sw2-2a	7	97	17,00	286,90	282,46	273,03	244,59	117,74	2,50	1,27	42,31	37,87	28,44	9,43	4,44	28,44	9,43	4,44
Sw2-2b		98	24,00	259,97	254,34	242,56	214,12	111,23	4,22	1,03	45,85	40,22	28,44	11,78	5,63	28,44	11,78	5,63
Sw2-2c		99	19,00	280,23	275,71	265,25	236,81	118,18	3,32	1,19	43,42	38,90	28,44	10,46	4,52	28,44	10,46	4,52
Sw2-2d	100	26,00	265,40	262,55	255,15	226,71	114,97	2,70	1,12	38,69	35,84	28,44	7,40	2,85	28,44	7,40	2,85	
Sw2-2e	101	18,50	272,80	268,05	252,68	224,24	118,37	3,80	1,06	48,56	43,81	28,44	15,37	4,75	28,44	15,37	4,75	
Sw2-2f	102	18,00	263,40	258,81	243,60	215,16	107,29	2,70	1,08	48,24	43,65	28,44	15,21	4,59	28,44	15,21	4,59	
Sw2-2g	103	21,50	284,80	282,37	276,23	247,79	118,28	2,90	1,30	37,01	34,58	28,44	6,14	2,43	28,44	6,14	2,43	
			20,57	273,36	269,18	258,36	229,92	115,15	3,16	1,15	43,44	39,27	28,44	10,83	4,17	28,44	10,83	4,17
Sw2-3a	7	104	15,00	303,85	301,39	290,13	264,49	117,66	3,11	1,47	39,36	36,90	25,64	11,26	2,46	25,64	11,26	2,46
Sw2-3b	105	14,50	302,69	301,05	288,70	263,06	118,66	3,03	1,44	39,63	37,99	25,64	12,35	1,64	25,64	12,35	1,64	
Sw2-3c	106	10,00	307,44	304,44	289,14	263,50	118,30	3,49	1,45	43,94	40,94	25,64	15,30	3,00	25,64	15,30	3,00	
Sw2-3d	107	17,00	299,14	297,47	285,93	260,29	117,96	3,88	1,42	38,85	37,18	25,64	11,54	1,67	25,64	11,54	1,67	
Sw2-3e	108	13,50	305,17	303,20	291,15	265,51	117,57	3,15	1,48	39,66	37,69	25,64	12,05	1,97	25,64	12,05	1,97	
Sw2-3f	109	9,50	312,36	310,40	296,06	270,42	117,83	2,84	1,53	41,94	39,98	25,64	14,34	1,96	25,64	14,34	1,96	
Sw2-3g	110	13,00	304,35	302,34	289,36	263,72	117,33	3,37	1,46	40,63	38,62	25,64	12,98	2,01	25,64	12,98	2,01	
			13,21	305,00	302,90	290,07	264,43	117,90	3,27	1,47	40,57	38,47	25,64	12,83	2,10	25,64	12,83	2,10
Sw2-4a	7	111	11,00	316,33	314,61	301,02	278,05	118,31	3,01	1,60	38,28	36,56	22,97	13,59	1,72	22,97	13,59	1,72
Sw2-4b	112	13,00	318,61	317,05	304,51	281,54	118,09	2,73	1,63	37,07	35,51	22,97	12,54	1,56	22,97	12,54	1,56	
Sw2-4c	113	9,50	314,66	313,13	297,72	274,75	117,89	2,94	1,57	39,91	38,38	22,97	15,41	1,53	22,97	15,41	1,53	
Sw2-4d	114	9,50	317,50	315,87	301,35	278,38	118,59	3,19	1,60	39,12	37,49	22,97	14,52	1,63	22,97	14,52	1,63	
Sw2-4e	115	13,00	310,05	308,79	294,78	271,81	117,75	3,22	1,54	38,24	36,98	22,97	14,01	1,26	22,97	14,01	1,26	
Sw2-4f	116	14,00	306,42	304,95	291,66	268,69	117,15	3,48	1,52	37,73	36,26	22,97	13,29	1,47	22,97	13,29	1,47	
Sw2-4g	117	12,00	310,39	308,48	293,01	270,04	117,77	3,77	1,52	40,35	38,44	22,97	15,47	1,91	22,97	15,47	1,91	
			11,71	313,42	311,84	297,72	274,75	117,94	3,19	1,57	38,67	37,09	22,97	14,12	1,58	22,97	14,12	1,58
Sw3-1a	7	62	59,50	180,13	178,42	165,49	148,48	118,26	3,08	0,30	31,65	29,94	17,01	12,93	1,71	17,01	12,93	1,71
Sw3-1b	63	34,50	227,98	223,73	200,14	183,13	118,24	2,94	0,65	44,85	40,60	17,01	23,59	4,25	17,01	23,59	4,25	
Sw3-1c	64	28,50	240,26	236,71	209,80	192,79	117,86	2,89	0,75	47,47	43,92	17,01	26,91	3,55	17,01	26,91	3,55	
Sw3-1d	65	26,00	255,81	250,05	227,49	210,48	117,87	4,01	0,93	45,33	39,57	17,01	22,56	5,76	17,01	22,56	5,76	
Sw3-1e	66	55,50	179,80	177,25	160,05	143,04	118,06	3,14	0,25	36,76	34,21	17,01	17,20	2,55	17,01	17,20	2,55	
Sw3-1f	67	28,00	241,80	238,72	212,33	195,32	118,61	2,80	0,77	46,48	43,40	17,01	26,39	3,08	17,01	26,39	3,08	
Sw3-1g	68	25,00	237,48	231,62	199,45	182,44	118,07	3,16	0,64	55,04	49,18	17,01	32,17	5,86	17,01	32,17	5,86	
			36,71	223,32	219,50	196,39	179,38	118,14	3,15	0,61	43,94	40,12	17,01	23,11	3,82	17,01	23,11	3,82
Sw3-2a	7	69	24,00	264,02	260,01	249,30	222,79	117,89	3,14	1,05	41,23	37,22	26,51	10,71	4,01	26,51	10,71	4,01
Sw3-2b	70	7,00	296,92	293,11	271,18	244,67	117,18	3,95	1,27	52,25	48,44	26,51	21,93	3,81	26,51	21,93	3,81	
Sw3-2c	71	13,00	293,71	291,32	276,34	249,83	118,22	3,91	1,32	43,88	41,49	26,51	14,98	2,39	26,51	14,98	2,39	
Sw3-2d	72	18,50	276,70	274,44	260,41	233,90	118,05	3,20	1,16	42,80	40,54	26,51	14,03	2,26	26,51	14,03	2,26	
Sw3-2e	73	15,00	289,90	287,80	272,93	246,42	118,31	3,80	1,28	43,48	41,38	26,51	14,87	2,10	26,51	14,87	2,10	
Sw3-2f	74	15,50	279,66	276,79	258,87	232,36	118,49	3,02	1,14	47,30	44,43	26,51	17,92	2,87	26,51	17,92	2,87	
Sw3-2g	75	18,50	281,75	279,69	266,97	240,46	118,57	3,52	1,22	41,29	39,23	26,51	12,72	2,06	26,51	12,72	2,06	
			15,93	283,24	280,45	265,14	238,63	118,10	3,51	1,21	44,60	41,82	26,51	15,31	2,79	26,51	15,31	2,79
Sw3-3a	6	77	23,00	288,19	285,46	276,73	253,08	117,66	4,94	1,35	35,11	32,38	23,65	8,73	2,73	23,65	8,73	2,73
Sw3-3b	78	17,00	311,30	309,44	305,80	282,15	118,17	3,90	1,64	29,15	27,29	23,65	3,64	1,86	23,65	3,64	1,86	
Sw3-3c	79	13,50	310,58	308,58	298,67	275,02	118,28	4,03	1,57	35,56	33,56	23,65	9,91	2,00	23,65	9,91	2,00	
Sw3-3d	80	16,50	309,40	307,52	300,65	277,00	118,18	4,40	1,59	32,40	30,52	23,65	6,87	1,88	23,65	6,87	1,88	
Sw3-3e	81	22,50	298,07	295,74	293,31	269,66	115,44	6,49	1,54	28,41	26,08	23,65	2,43	2,33	23,65	2,43	2,33	
Sw3-3f	82	20,50	301,00	298,82	293,32	269,67	118,20	5,30	1,51	31,33	29,15	23,65	5,50	2,18	23,65	5,50	2,18	
Sw3-3g			18,83	303,09	300,93	294,75	271,10	117,66	4,84	1,53	31,99	29,83	23,65	6,18	2,16	23,65	6,18	2,16
Sw3-4a	7	83	20,50	292,90	291,20	279,33	258,03	117,58	2,80	1,40	34,87	33,17	21,30	11,87	1,70	21,30	11,87	1,70
Sw3-4b	84	17,50	300,08	298,51	286,34	265,04	117,81	2,80	1,47	35,04	33,47	21,30	12,17	1,57	21,30	12,17	1,57	
Sw3-4c	85	14,00	305,40	304,02	288,63	267,												

Tab. A6: Bestimmung der Bodenhydraulik Soonwald, Teil 2

Soonwald		Pykn.	Wägung Stechzylinder					Tara		Roh-dichte	pF 1,8	pF 2,5	Porenvolumen					
Ild. Nr.	Anzahl der Proben pro Standort		1,80	1,80	2,50	4,20	Trocken-gew.	Stech-zyl.	Gummi+Filter				pF 4,2 PWP	nFK (pF2,5-pF4,2)	GPV	FP (< 0,2 µm)	MP (0,2-10 µm)	enge GP (10-50 µm)
Sw5-1a	6	36	26,50	241,55	229,91	206,12	193,07	118,38	3,01	0,75	48,48	36,84	13,05	23,79	11,64	13,05	23,79	11,64
Sw5-1b		37	34,50	232,34	226,84	203,85	190,80	116,61	2,64	0,74	41,54	36,04	13,05	22,99	5,50	13,05	22,99	5,50
Sw5-1d		39	29,00	248,00	240,21	217,98	204,93	117,82	3,43	0,87	43,07	35,28	13,05	22,23	7,79	13,05	22,23	7,79
Sw5-1e		40	46,50	205,55	201,84	185,98	172,93	117,17	2,93	0,56	32,62	28,91	13,05	15,86	3,71	13,05	15,86	3,71
Sw5-1f		41	35,00	231,27	219,00	202,45	189,40	117,85	3,73	0,72	41,87	29,60	13,05	16,55	12,27	13,05	16,55	12,27
Sw5-1g		42	48,50	197,18	183,28	169,49	156,44	117,74	3,79	0,39	40,74	26,84	13,05	13,79	13,90	13,05	13,79	13,90
			36,67	225,98	216,85	197,65	184,60	117,60	3,26	0,67	41,39	32,25	13,05	19,20	9,14	13,05	19,20	9,14
Sw5-2a	6	43	28,50	268,00	263,79	246,61	231,97	117,63	3,20	1,14	36,03	31,82	14,64	17,18	4,21	14,64	17,18	4,21
Sw5-2b		44	16,50	290,80	287,07	265,39	250,75	117,71	2,90	1,33	40,05	36,32	14,64	21,68	3,73	14,64	21,68	3,73
Sw5-2c		45	36,50	254,80	251,55	237,44	222,80	118,07	5,26	1,05	32,00	28,75	14,64	14,11	3,25	14,64	14,11	3,25
Sw5-2d		46	21,50	281,48	278,15	259,57	244,93	118,29	2,94	1,27	36,55	33,22	14,64	18,58	3,33	14,64	18,58	3,33
Sw5-2e		47	30,50	259,19	253,06	237,39	222,75	117,95	3,23	1,05	36,44	30,31	14,64	15,67	6,13	14,64	15,67	6,13
Sw5-2f		48	26,50	267,40	264,24	245,57	230,93	118,38	2,60	1,13	36,47	33,31	14,64	18,67	3,16	14,64	18,67	3,16
			26,67	270,28	266,31	248,66	234,02	118,01	3,36	1,16	36,26	32,29	14,64	17,65	3,97	14,64	17,65	3,97
Sw6-1a	7	22	31,50	236,50	224,74	199,92	190,29	117,98	2,92	0,72	46,21	34,45	9,63	24,82	11,76	9,63	24,82	11,76
Sw6-1b		23	32,50	236,39	227,04	201,92	192,29	117,85	2,79	0,74	44,10	34,75	9,63	25,12	9,35	9,63	25,12	9,35
Sw6-1c		24	45,00	202,01	200,13	168,91	159,28	117,49	3,02	0,42	42,73	40,85	9,63	31,22	1,88	9,63	31,22	1,88
Sw6-1d		25	29,00	240,61	231,09	203,48	193,85	117,87	2,63	0,76	46,76	37,24	9,63	27,61	9,52	9,63	27,61	9,52
Sw6-1e		26	46,00	208,06	200,96	178,38	168,75	117,75	2,85	0,51	39,31	32,21	9,63	22,58	7,10	9,63	22,58	7,10
Sw6-1f		27	43,50	222,93	215,02	198,27	188,64	117,41	2,53	0,71	34,29	26,38	9,63	16,75	7,91	9,63	16,75	7,91
Sw6-1g	28	42,50	217,09	209,98	187,33	177,70	118,51	2,66	0,59	39,39	32,28	9,63	22,65	7,11	9,63	22,65	7,11	
			38,57	223,37	215,57	191,17	181,54	117,84	2,77	0,64	41,83	34,02	9,63	24,40	7,80	9,63	24,40	7,80
Sw6-2a	5	29	36,50	246,30	241,79	218,75	209,23	117,66	4,09	0,92	37,07	32,56	9,52	23,04	4,51	9,52	23,04	4,51
Sw6-2b		30	35,50	246,08	240,63	218,58	209,06	118,80	5,08	0,90	37,02	31,57	9,52	22,05	5,45	9,52	22,05	5,45
Sw6-2c		31	31,50	254,53	248,06	223,84	214,32	117,87	4,33	0,96	40,21	33,74	9,52	24,22	6,47	9,52	24,22	6,47
Sw6-2e		33	39,00	230,35	223,63	200,38	190,86	112,87	4,49	0,78	39,49	32,77	9,52	23,25	6,72	9,52	23,25	6,72
Sw6-2f		34	39,00	238,96	231,76	210,98	201,46	117,53	5,05	0,84	37,50	30,30	9,52	20,78	7,20	9,52	20,78	7,20
				36,30	243,24	237,17	214,51	204,99	116,95	4,61	0,88	38,26	32,19	9,52	22,67	6,07	9,52	22,67
Sw7-1a	6	1	35,50	228,19	220,13	196,38	185,60	118,21	2,95	0,67	42,59	34,53	10,78	23,75	8,06	10,78	23,75	8,06
Sw7-1b		2	25,50	238,71	233,64	198,01	187,23	116,68	2,71	0,71	51,48	46,41	10,78	35,63	5,07	10,78	35,63	5,07
Sw7-1c		3	41,50	206,76	200,54	173,77	162,99	117,05	2,58	0,46	43,77	37,55	10,78	26,77	6,22	10,78	26,77	6,22
Sw7-1d		4	44,00	206,48	202,27	173,21	162,43	117,72	2,62	0,45	44,05	39,84	10,78	29,06	4,21	10,78	29,06	4,21
Sw7-1f		6	36,50	227,01	219,94	194,31	183,53	117,40	2,99	0,66	43,48	36,41	10,78	25,63	7,07	10,78	25,63	7,07
Sw7-1g		7	24,50	235,14	228,88	190,71	179,93	117,12	2,91	0,63	55,21	48,95	10,78	38,17	6,26	10,78	38,17	6,26
			34,58	223,72	217,57	187,73	176,95	117,36	2,79	0,60	46,76	40,62	10,78	29,84	6,15	10,78	29,84	6,15
Sw7-2a	6	8	32,00	250,48	243,82	224,77	209,32	118,29	4,90	0,91	41,16	34,50	15,45	19,05	6,66	15,45	19,05	6,66
Sw7-2b		9	37,50	244,00	239,40	224,95	209,50	117,30	5,19	0,92	34,50	29,90	15,45	14,45	4,60	15,45	14,45	4,60
Sw7-2d		11	39,50	242,62	236,97	224,76	209,31	117,78	4,35	0,92	33,31	27,66	15,45	12,21	5,65	15,45	12,21	5,65
Sw7-2e		12	42,00	235,05	228,20	214,91	199,46	118,82	5,15	0,81	35,59	28,74	15,45	13,29	6,85	15,45	13,29	6,85
Sw7-2f		13	34,00	240,54	229,22	214,30	198,85	117,27	3,60	0,82	41,69	30,37	15,45	14,92	11,32	15,45	14,92	11,32
Sw7-2g		14	36,00	244,10	233,92	222,82	207,37	117,67	3,60	0,90	36,73	26,55	15,45	11,10	10,18	15,45	11,10	10,18
			36,83	242,80	235,26	221,09	205,64	117,86	4,47	0,88	37,16	29,62	15,45	14,17	7,54	15,45	14,17	7,54
Sw7-3a	7	15	29,50	250,13	243,57	221,06	209,40	110,35	4,41	0,99	40,73	34,17	11,66	22,51	6,56	11,66	22,51	6,56
Sw7-3b		16	33,50	266,00	262,37	248,66	237,00	117,63	3,63	1,19	29,00	25,37	11,66	13,71	3,63	11,66	13,71	3,63
Sw7-3c		17	31,50	275,44	270,64	261,08	249,42	117,95	4,12	1,31	26,02	21,22	11,66	9,56	4,80	11,66	9,56	4,80
Sw7-3d		18	27,50	253,37	244,52	220,46	208,80	119,20	3,30	0,90	44,57	35,72	11,66	24,06	8,85	11,66	24,06	8,85
Sw7-3e		19	40,00	231,42	222,30	205,88	194,22	117,11	4,29	0,77	37,20	28,08	11,66	16,42	9,12	11,66	16,42	9,12
Sw7-3f		20	33,50	242,22	234,83	211,92	200,26	117,28	4,23	0,83	41,96	34,57	11,66	22,91	7,39	11,66	22,91	7,39
Sw7-3g	21	28,50	252,65	243,59	220,60	208,94	118,63	3,94	0,90	43,71	34,65	11,66	22,99	9,06	11,66	22,99	9,06	
			32,00	253,03	245,97	227,09	215,43	116,88	3,99	0,99	37,60	30,54	11,66	18,88	7,06	11,66	18,88	7,06
Sw7-1a	6	1	35,50	228,19	220,13	196,38	185,60	118,21	2,95	0,67	42,59	34,53	10,78	23,75	8,06	10,78	23,75	8,06
Sw7-1b		2	25,50	238,71	233,64	198,01	187,23	116,68	2,71	0,71	51,48	46,41	10,78	35,63	5,07	10,78	35,63	5,07
Sw7-1c		3	41,50	206,76	200,54	173,77	162,99	117,05	2,58	0,46	43,77	37,55	10,78	26,77	6,22	10,78	26,77	6,22
Sw7-1d		4	44,00	206,48	202,27	173,21	162,43	117,72	2,62	0,45	44,05	39,84	10,78	29,06	4,21	10,78	29,06	4,21
Sw7-1f		6	36,50	227,01	219,94	194,31	183,53	117,40	2,99	0,66	43,48	36,41	10,78	25,63	7,07	10,78	25,63	7,07
Sw7-1g		7	24,50	235,14	228,88	190,71	179,93	117,12	2,91	0,63	55,21	48,95	10,78	38,17	6,26	10,78	38,17	6,26
			34,58	223,72	217,57	187,73	176,95	117,36	2,79	0,60	46,76	40,62	10,78	29,84	6,15	10,78	29,84	6,15
Sw7-2a	6	8	32,00	250,48	243,82	224,77	209,32	118,29	4,90	0,91								

## 10.2 Ergebnisse der Abflussmessung

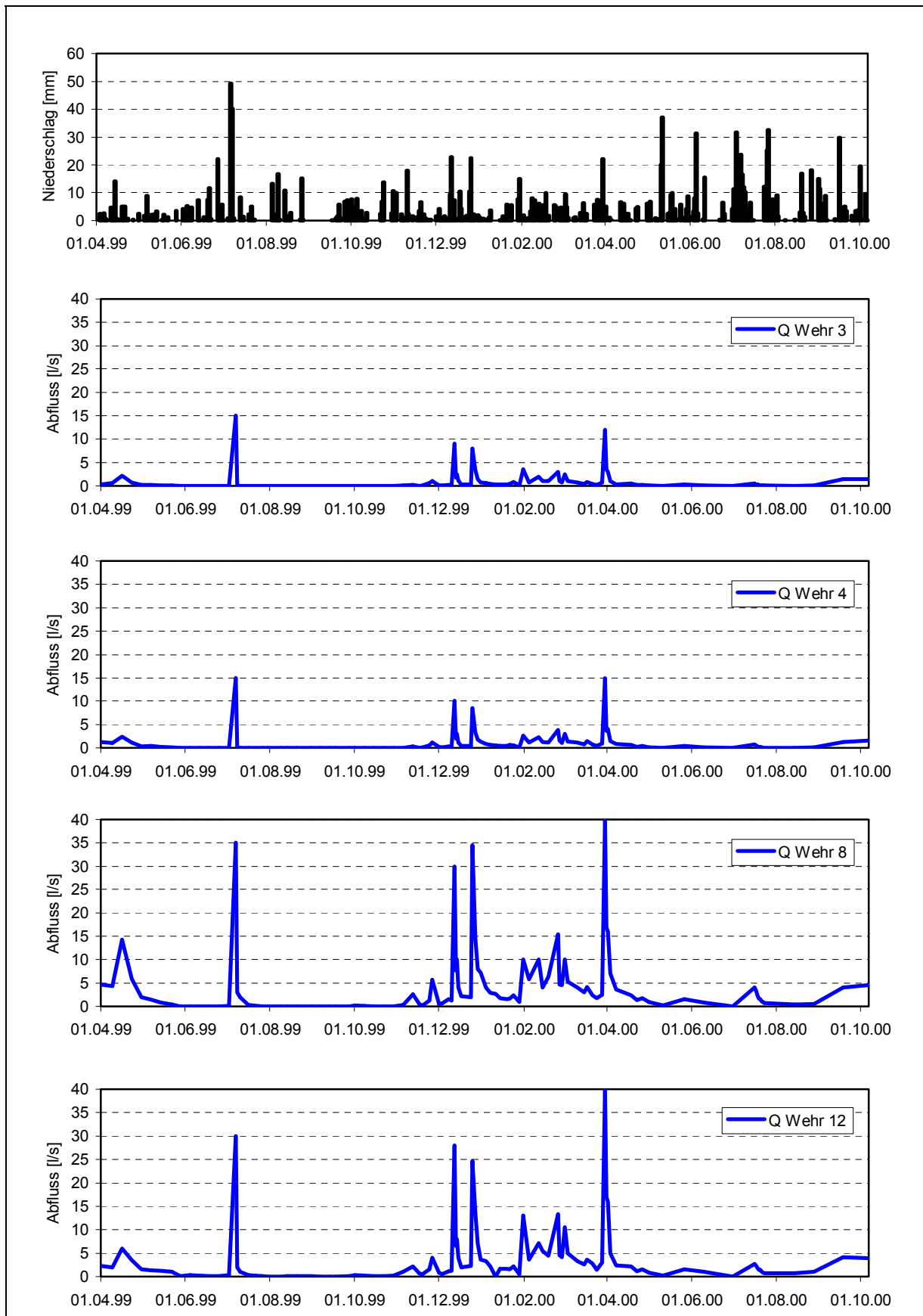


Abb. A1: Ergebnisse der manuellen Abflussmessung im Testgebiet Soonwald

Tab. A7: Ergebnisse der manuellen Abflussmessung im Testgebiet Soonwald, Teil 1

Wehr \ Datum	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	
W 2	0,3	0,4	1,1	0,4	0,1	0,1	0,1	+	0	0	0	0	0	0	8
W 3	0,3	0,6	2,2	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	15
W 4	1,2	1	2,4	1,1	0,3	0,4	0,2	0,1	0	+	+	+	0	0	15
W 5	0,7	1,6	1,9	0,9	0,2	0,4	0,1	+	0	0	0	0	0	0	10
W 6	2,3	2,3	6,5	1,6	0,4	1	0,4	0,2	0	+	+	0	+	+	20
W 7	1,7	1,6	6,5	1,6	0,4	0,5	0,2	0,1	0	+	+	0	0	+	15
W 8	4,7	4,3	14,3	5,9	2	1,4	0,8	0,4	0	+	+	+	+	0,1	35
W 9	0,1	0,1	0,8	0,1	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	+	9,5
W 10	0,1	+	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
W 11	1,3	1,7	5	2,1	0,8	0,8	0,7	0,5	+	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	15
W 12	2,3	2	6	3,5	1,6	1,3	1,2	1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,3	30
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
W 15	+	0,6	0,4	0,1	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	
W 17	1,8	1,8	3,6	2	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1	0	0,1	0,1	+	0,1	14
W 20	1,6	1,3	3,1	1,7	0,7	0,5	0,3	0,2	+	0,1	0,1	+	+	+	9
W 21	0,1	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	+	0	+	+	+	+	4
W 22	1,6	1,7	3	1,8	0,9	0,9	0,6	0,7	0,1	+	0,1	0,1	0,1	0,2	11
W 23	0,7	0,4	1,5	0,8	0,1	+	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	0,1	0,1	0	0	0	
W 24a				3,1	1,2	0,7	0,2	0,1	0	0,1	0,1	0	0	0	
W 34	1,3	1,1	1,2		0,5	0,3	0,1	+	+	0	0	0	0	0	5
W 35	0,1	+	0,4		+	+	0	+	0	0,3	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	3
W 38	0	0	0,1		0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	1
W 39	0,1	0,1	0,3	0,1	+	0,1	+	+	0	+	0	0	0	+	
W I	4,5	8,3	17	5,5	1,4	1,4	1	0,3	0	0	0	0	+	+	50
W II	3,3	6,2	9,7	4,5	1,4	1,3	0,9	0,3	0	0	0	0	0	0,1	40
W III	0	+	0,2	+	0	0	0	+	0	0	0	0	0	+	
W IV	4,6	5,3	14	4,7	0,7	0,8	0,4	0,3	0	0	0	0	0	+	35
W V	3,2	4	8,8	3,8	1,2	1	0,7	0,2	0	0	0	0	0	0	
W VI	1,9	2	5,2	2,6	0,9	0,7	0,5	0,2	0	0	0	0	0	0	

+ =  $Q < 0,1$  l/s     
  = Missing -Wert     
 = Hauptabfluss

Tab. A7: Ergebnisse der manuellen Abflussmessung im Testgebiet Soonwald, Teil 2

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
W 2			+	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W 3	2	0,1	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W 4	2	0,1	+	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
W 6	4,5	1,6	0,6	0,2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W 7	2	0,7	0,1	+		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2
W 8	7	3	2	0,3	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2
W 9	1	0,1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W 9a	2	0,7	0,3	+		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
W 11	2	1	0,3	0,1		0	0	+	+	+	0	0	0	0	0,2
W 12	5	2	1	0,3	0,1	+	+	0,1	0,1	0,1	+	+	+	0,1	0,3
W 13	3	1	0,4	0,1		0	+	+	+	+	+	+	+	+	0,3
W 15									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	1	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	1	0,4	0,1		+	0,2	0,1	0,1	+	+	+	0	0,1	+
W 23			+	+		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
W 24a			0,7	0,1		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
W 35	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	+
W 37b	0,4	0,2	0,1	+		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
W 39			+	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W I	12	5	2,8	0,4	0	0	0	+	+	+	0	0	0	0	0,1
W II	11	4,7	2,6	0,4		0	0	+	+	0	0	0	0	0	0,2
W III			0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W IV	10	4,5	2,4	0,4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
W V			2	0,5		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

+ =  $Q < 0,1$  l/s     
  = Missing -Wert     
 = Hauptabfluss

Tab. A7: Ergebnisse der manuellen Abflussmessung im Testgebiet Soonwald, Teil 3

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	+	+	0,1	+	+	+	+	3
W 2	0	0	0	0	+	0,1	0	+	0,2	0,4	0,1	+	0,1	0,1	5
W 3	0	0	0	0	0,1	0,2	+	0,1	0,6	1	0,1	0,1	0,2	0,2	9
W 4	0	0	0	0	+	0,3	+	0,1	0,5	1,1	0,2	0,1	0,3	0,2	10
W 5	0	0	0	0	0	0,1	+	+	0,1	0,6	0,1	0,1	0,3	0,2	10
W 6	0	0	0	+	0,1	0,4	0,2	0,1	0,7	2,7	0,2	0,2	0,8	0,2	15
W 7	+	0	0	+	0,1	0,8	0,2	0,1	0,5	3	0,3	0,3	0,6	0,5	15
W 8	0,1	+	0	+	0,3	2,6	0,4	0,2	1,2	5,7	0,5	0,6	1,5	1,2	30
W 9	0	0	0	0	0	0,1		+		0,5	0,1	+	0,1	0,1	6
W 9a	+	+	0	+	0,2	0,9	0,2	0,1	0,6	2	0,2	0,2	0,4	0,2	10
W 10	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	20
W 12	0,2	0,1	0,1	0,2	1	2,2	0,6	0,5	1,5	4	0,8	0,5	1,1	1,2	28
W 13	+	0,1	0,1	0,1	0,2	1	0,3	0,2	0,9	1,6	0,3	0,3	0,4	0,5	10
W 15	0	0	0	0	+	0,1	+	+	0,1	0,3	0,1	+	+	+	2
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
W 20	+	+	+	+	0,1	0,2	0,5	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	4
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
W 23	0	0	0	0	0	+		0		0,1		+		+	
W 24	0	0	0	0	0	0		0		0		0		0	
W 24a	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0,1	0	0	+	0	
W 34	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	
W 37	+	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,1
W 37b	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	0,3
W 39	0	0	0	0	+	+	+	+	0,1	0,3	0,1	+	0,1	0,1	2
W I	+	+	0	0,1	0,5	2,4	0,5	0,6	4	4,5	1,2	1	1,7	1,8	50
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	+		+	+	+	
W IV	+	+	0	0,1	0,2	1,2	0,3	0,2	2	2,7	0,5	0,3	0,8	0,9	25
W V	0	0	0	0	+	0,6		0,2		1,7		0,3		0,7	
W VI	0	0	0	0	+	0,4		0,2		1		0,3		0,4	

+ =  $Q < 0,1$  l/s     
  = Missing -Wert     
 = Hauptabfluss



Tab. A7: Ergebnisse der manuellen Abflussmessung im Testgebiet Soonwald, Teil 4

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	0,4	0,4	0,2		0,1		0,1		0,1
W 2	1	1,5	0,6	0,2	0,2	4	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	3,4	1,4	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4
W 4	2	3	1,1	0,4	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	1,6		0,2	0,3	4,9	2,6	2	1	0,7	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4
W 6	3,2	4,5	1,8	1	0,8	16,2	7,4	7	5	2,4	2	2,1	1,2	1,1	1,2
W 7	4	5	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	4	2,2	2	34,5	14,7	8	7,2	4	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	1,1	0,4	0,2	10,6	3,25	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	1,7	1,5	1,1	1,4	0,9	1	1
W 12	6,5	8	4	2	2,3	24,7	13,7	7	3,6	3,3	2,2	2,5	1,7	1,7	1,6
W 13	2,5	4	2	1,4	1,2	7,5	6,2	4,5	2,7	2,3	1,5	1,3	1,1	1	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	2	1	0,9	7,5	6,0	4	2,5	2,4	1,4	1,2	1	0,9	0,9
W 20	1	2	2	0,9	0,5	5,4	5,0	3,5	2,3	1,9	1,3	1	0,8	0,7	0,7
W 21	0,5	0,8	0,3	0,1	0,2	1,7	1	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	1,2	1,1	0,9	0,9	0,7	0,9	1,2
W 23				0,1		1,2	1,4		1		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	0,7	0,5	0,3	4,4	3,7	6	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	2,4	2,5	2	1,7	1	0,5	0,6	0,4	0,4
W 35	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	0,7	0,3	0,3	0,2	0,1
W 38	0	0,1	0,1	+	0	0,8	0,7	0,5	+	0,1	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	17	11	6,7	3,5	50	25,5	12	7	5	4,3	3,5	2,8	2,5	2,9
W II				5	0,9	38,6	13,3		5,8		3,5		2,5		2,7
W III		0,1	+	+		0,2	0,3		+		0	0	+	+	+
W IV	8	12	5,5	4,8	3	22,5	17,3	11	7	4,5	3,7	3	2,2	2,2	2,6
W V				3,6		20	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     
  = Missing -Wert     
  = Hauptabfluss

Tab. A7: Ergebnisse der manuellen Abflussmessung im Testgebiet Soonwald, Teil 5

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	0,6	0,5	1,5		0,4		0,6	0,4		0,6
W 3	0,8	0,1	3,5	0,7	2	1	1	3	1	0,7	2,5	1	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	3	1,3	1,1	0,7	1,4
W 5	0,3	+	2	0,7	1,8	0,7	0,7	2,8	1,3	0,5	2,5	1	1	0,5	1,1
W 6	1,6	0,5	6	3,6	5	3,2	3,5	9,5	3,6	3,5	7	3,8	3	2,6	2,9
W 7	0,5	0,1	3,7	0,8	2,2	1	1,3	3,3	1	0,7	3	1,2	0,7	0,4	1
W 8	2,4	0,9	10	5,8	10	4	6,3	15,4	4,7	4,5	10	5,3	4	3	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	3	2,7	7,5	2,3	1,8	7	2,5	1,8	1,3	2,2
W 12	2,2	0,5	13	3,6	7,1	5,5	4,4	13,3	4,5	4,1	10,5	5	3,3	2,6	3,6
W 13	1	0,5	6	2,2	3	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	2,1	3,3	2,5	2,3	4	2	1,8	5	2,5	1,6	1,2	1,9
W 20	0,7	0,4	3	1,8	2,3	2	1,8	3	1,8	1,4	3,7	1,8	1,4	1,2	1,2
W 21	0,2	0,1	1	0,2	0,5	0,4	0,3	0,7	0,3	0,3	1	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	1,9	1,4	1,1	1,5
W 23		0,1		1,2	0,8		0,9	1,4				1	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	1,7
W 34	0,3	0,2	1,2	1,36	0,8	0,9	1	1,4	1,3	1,1	1,8	1,2	1	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	0,9	1,3	0,8	0,6	0,4	0,3
W 38	0	0	0,3	0	0	0	0	+	0,1	0	0,1	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		25	6,5	13,3	6,5	7,5	20	10	6	18	7,3	4,8	2,6	
W II				5	10		6		9,2	5,5	16,5	5,7	4	2,4	
W III				+	0,1		+	0,2				0,1	+		
W IV	2,8		22	4,8	7,8	5,5	5	11,8	8,5	5	15	5	3,2	2,1	
W V				4,3								4,7	3		
W VI				3								3	2,2		

+ =  $Q < 0,1$  l/s     
  = Missing -Wert     
 = Hauptabfluss

Tab. A7: Ergebnisse der manuellen Abflussmessung im Testgebiet Soonwald, Teil 6

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	3,5	3	1	0,3	0,5	0,2	0,2	0,1	+	0,3	0,1
W 4	0,7	0,4	0,9	15	3,6	4	1,4	0,8	0,6	0,2	0,4	0,1	+	0,4	0,1
W 5		0,4	0,5	10	3	3	1	0,7	0,5	0,2	0,3	0,1	0	0,3	0,1
W 6	1,8	1,3	1,7	20	10	10	6	3	1,8	0,9	1,6	0,7	0,1	1,2	0,6
W 7	0,5	0,2	0,7	18	4	5	1	0,2	0,5	0,1	0,2	+	+	0,2	0,1
W 8	2,4	1,8	2,5	40	16,7	16	7	3,6	2,4	1,3	1,8	0,9	0,2	1,5	0,8
W 9	0,1	+	0,1	4	1,1	1,2	0,2	+	0,1	+	0,1	+	0	+	+
W 9a	0,2	0,1	0,3	10	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
W 11	1,4	0,8	1,5	22	9	9	2,3	1,1	1,4	0,5	0,8	0,4	+	0,7	0,5
W 12	2,8	1,4	3	40	17	16	5	2,4	2,2	1,1	1,5	0,8	0,2	1,6	1
W 13	1,3	0,9	1,5	21	10	8	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	0,8	1,1	0,1	+	0,1	+	0,1	0	0	+	+
W 17	1,2	0,8	1,3	15	5,3	5,5	2,7	1,6	1	0,5	0,7	0,4	0,1	0,64	0,5
W 20	0,8	0,6	1	10	4	4	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	1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	+	+	0,1	+
W 22	1	0,7	0,9	10	3,8	5	1,9	0,9		0,5	0,7	0,4	0,1	0,6	
W 23		0,3			1,7			1		0,3		0,2	0,1	0,2	0,1
W 24		0,4			1			0,9		0,2		0,1	0	0,2	0,2
W 24a	1	1	1	7	4	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	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	+	+
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	0,7	0,2	0,2	0,2	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	+	+
W I	2,8	1,6	4	55		22	10	3	3,2	1	1,9	0,6	+	1,8	
W II	2,5	1,6	3,5	50		20	9,5	2,6		0,9	1,4	0,5		1,6	
W III		+						+	+	+		0			
W IV	2,1	1,3	3	40		17	9	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     
  = Missing -Wert     
  = Hauptabfluss

Tab. A7: Ergebnisse der manuellen Abflussmessung im Testgebiet Soonwald, Teil 7

Datum Wehr	Abfluss [l/s]														
	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		+	+				
W 2	0	0,3	0,2	0,1	0,1	+	+	+	+	+	+	0,5	0,7		
W 3	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	0,7	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	+	+	+	0,2	1,2	1,5		
W 5	0	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	+	+	0,0	0,1	0,8	1,3		
W 6	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	0,3	0,3	0,1	0,1	+	+	+	+	0,0	+	1,4	1,3		
W 8	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	0,3	0,2		
W 9a	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				
W 11	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		0,1		
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	0,8	0,7	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	+	0,1	0,4		
W 24	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	+	+		
W 35	+	0,1			0,1	0,1	0,1	+	+	0,1	+	+	+		
W 37	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		
W 38	0	+	+		0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	+	0,1	0,1		
W 39	0							0,0		+	+				
W I	0										0,6				
W II	0					0,6	0,5	0,5	0,4						
W III	0														
W IV	0														
W V	0														
W VI	0														

+ =  $Q < 0,1$  l/s     
  = Missing -Wert     
 = Hauptabfluss

### 10.3 Wasserspannungskurven aus Modellsimulationen

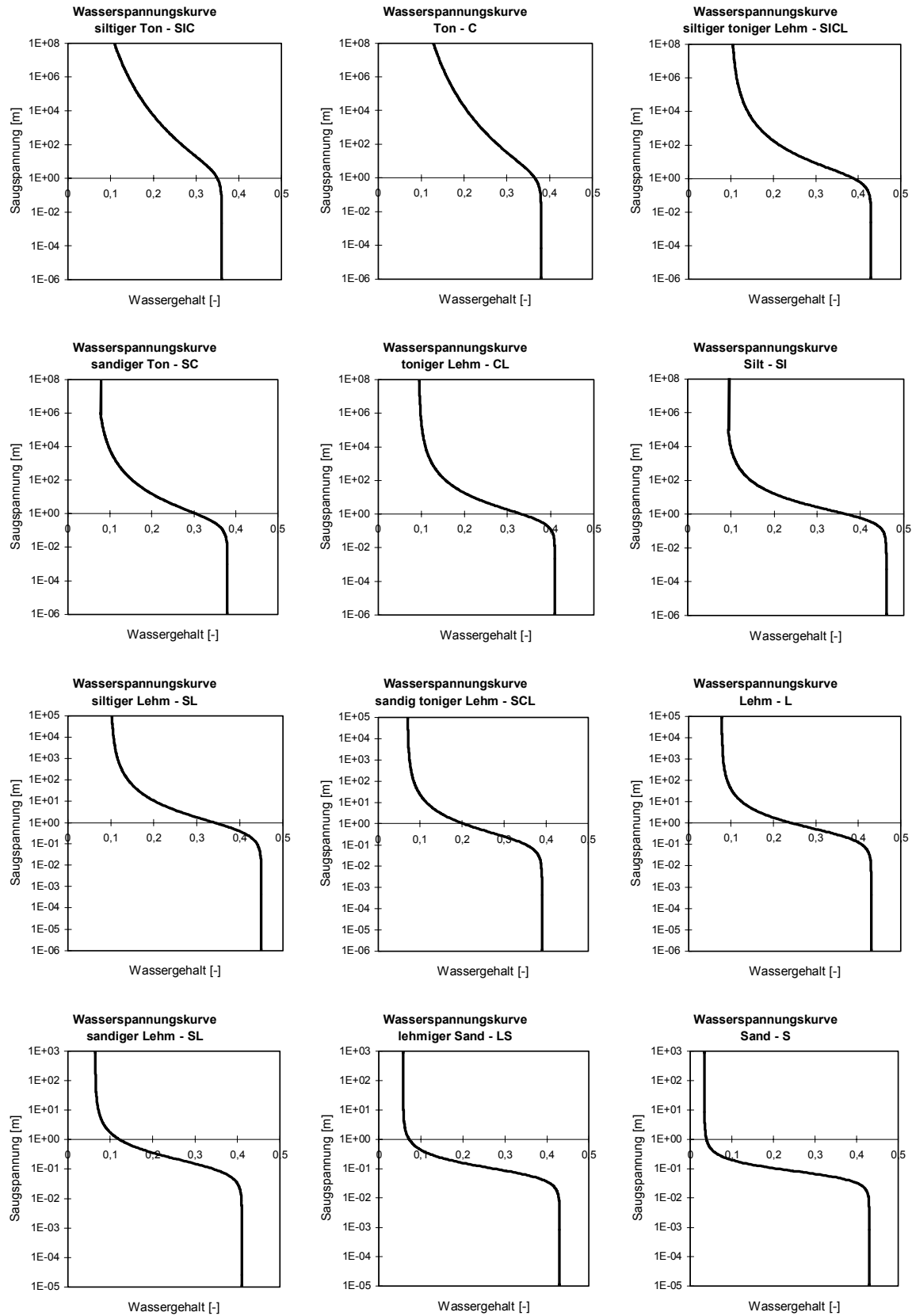


Abb. A2: Wasserspannungskurven für die 12 Bodenklassen der US-Soil-Taxonomy, über Simulationsläufe mit CATFLOW ermittelt.

## 10.4 Einfluss der Bestockung -Ergänzungen

Tab. A8: Datentabelle zur Sensitivitätsanalyse der Landnutzungsparameter

Name Input-File	BFI [-]	BBG [-]	PFH [m]	TWU [m]	Interzeption [mm]	Interzeptions- verdunstung [mm]	Transpiration [mm]	Evaporation [mm]	Evapo- transpiration [mm]
l-tst-101	1	0,8	10	0,6	6,7	25,3	4,6	0,9	30,8
l-tst-103	3	0,8	10	0,6	21,1	25,4	4,5	0,7	30,6
l-tst-105	5	0,8	10	0,6	35,5	25,3	4,3	0,6	30,2
l-tst-110	10	0,8	10	0,6	71,5	25,3	4,3	0,6	30,2
l-tst-115	15	0,8	10	0,6	107,6	25,3	4,3	0,6	30,2
l-tst-120	20	0,8	10	0,6	143,6	25,2	4,4	0,6	30,2
l-tst-125	25	0,8	10	0,6	179,1	25,4	4,4	0,6	30,4
l-tst-131	50	0,8	10	0,6	355,4	25,5	4,3	0,6	30,4
l-tst-132	100	0,8	10	0,6	694,7	25,6	4,4	0,4	30,4
l-tst-133	300	0,8	10	0,6	1872,8	25,6	5,4	-0,1	30,9
l-tst-134	500	0,8	10	0,6	2764,2	25,6	7,1	-0,5	32,2
l-tst-135	1000	0,8	10	0,6	3650,6	25,4	10,6	-0,8	35,2
l-tst-201	15	0,8	0,1	0,6	107,4	38,4	5,3	-0,8	42,9
l-tst-202	15	0,8	0,3	0,6	107,2	46,9	5,8	-0,3	52,4
l-tst-203	15	0,8	0,5	0,6	107,1	51,5	6,2	-0,1	57,6
l-tst-204	15	0,8	0,8	0,6	107,0	55,6	6,4	0,1	62,1
l-tst-205	15	0,8	1	0,6	107,0	57,3	6,4	0,1	63,8
l-tst-206	15	0,8	2	0,6	107,1	47,2	6,0	0,3	53,5
l-tst-207	15	0,8	3	0,6	107,3	40,2	5,6	0,3	46,1
l-tst-208	15	0,8	5	0,6	107,5	32,0	5,0	0,4	37,4
l-tst-209	15	0,8	10	0,6	107,6	25,3	4,3	0,6	30,2
l-tst-301	15	0	10	0,6	0,0	0,0	49,8	1,4	51,2
l-tst-302	15	0,1	10	0,6	101,8	49,0	9,3	1,4	59,7
l-tst-303	15	0,2	10	0,6	105,3	46,7	8,6	1,3	56,6
l-tst-304	15	0,3	10	0,6	106,6	43,7	8,0	1,3	53,0
l-tst-305	15	0,4	10	0,6	106,8	40,7	7,4	1,2	49,3
l-tst-306	15	0,5	10	0,6	107,0	37,6	6,7	1,2	45,5
l-tst-307	15	0,6	10	0,6	107,3	33,7	5,9	1,0	40,6
l-tst-308	15	0,7	10	0,6	107,5	29,6	5,2	0,9	35,7
l-tst-309	15	0,8	10	0,6	107,6	25,3	4,3	0,6	30,2
l-tst-310	15	0,9	10	0,6	107,6	20,8	3,6	0,1	24,5
l-tst-311	15	1	10	0,6	107,7	17,1	2,9	-0,4	19,6

Simulationszeitraum: 3 Tage  
Niederschlag künstlich mit 0,03 mm/min = 1,8 mm/h = 43,2 mm/d = 129.6 mm gesamt

## 10.5 Landnutzungsparameter

Die Parameterdateien der Landnutzung enthalten die unten aufgeführten Parameter, die in ihrem jahreszeitlichen Gang vorgegeben werden können. Die Jeweils erste Zeile einer Datei beinhaltet das Parameterkürzel, während die zweite Zeile einen Faktor enthält, mit dem alle nachfolgenden Werte in der Spalte multipliziert werden. Die erste Spalte enthält die Nummern des jeweiligen Jahrestages, an dem die rechts davon stehenden Werte gelten (vgl. MAURER, 1997).

Tab. A9: Parameterlisten der Landnutzungen Grasland, Laubwald und Nadelwald

### Landnutzungsparameter für Grasland

	KST	MAK	BFI	BBG	TWU	PFH	PALB	RSTMIN	WP_BFW	F_BFW
	3.	1.	4.0	1.0	0.2	0.4	1.	1.	1.	1.
1.	4.	1.	0.5	1.0	1.0	0.33	0.2	200.	0.05	30.
75.	4.	1.	0.5	1.0	1.0	0.42	0.2	200.	0.05	30.
105.	3.	1.	0.78	1.0	1.0	0.66	0.2	200.	0.05	30.
135.	3.	1.	0.85	1.0	1.0	0.83	0.2	200.	0.05	30.
160.	3.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	200.	0.05	30.
195.	2.	1.	0.95	1.0	1.0	1.0	0.2	200.	0.05	30.
225.	2.	1.	0.88	1.0	1.0	1.0	0.2	200.	0.05	30.
255.	3.	1.	0.8	1.0	1.0	0.66	0.2	200.	0.05	30.
285.	3.	1.	0.75	1.0	1.0	0.5	0.2	200.	0.05	30.
315.	4.	1.	0.5	1.0	1.0	0.33	0.2	200.	0.05	30.
366.	4.	1.	0.5	1.0	1.0	0.33	0.2	200.	0.05	30.

### Landnutzungsparameter für Laubwald

	KST	MAK	BFI	BBG	TWU	PFH	PALB	RSTMIN	WP_BFW	F_BFW
	3.	1.	15.0	0.8	0.6	10.0	1.	1.	1.	1.
1.	2.	1.	0.2	0.75	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
75.	2.	1.	0.2	0.75	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
105.	2.	1.	0.4	0.75	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
135.	2.	1.	0.8	0.81	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
160.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
195.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
225.	2.	1.	0.95	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
255.	2.	1.	0.78	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
285.	2.	1.	0.36	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
315.	2.	1.	0.2	0.94	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
366.	2.	1.	0.2	0.75	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.

### Landnutzungsparameter für Nadelwald

	KST	MAK	BFI	BBG	TWU	PFH	PALB	RSTMIN	WP_BFW	F_BFW
	3.	1.	20.0	0.8	0.6	10.0	1.	1.	1.	1.
1.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
75.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
105.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
135.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
165.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
195.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
225.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
255.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
285.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
315.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.
366.	2.	1.	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	100.	0.05	30.

mit:

KST = Rauheitswert nach Strickler; MAK = Makroporositätsfaktor; BFI = Blattflächenindex, BBG = Bodenbedeckungsgrad; TWU = wirksame Wurzeltiefe; PFH = Pflanzen- bzw. Baumhöhe; PALB = Albedo der Landnutzung; RSTMIN = minimaler Stomatawiderstand der Pflanzen; WP\_BFW, F\_BFW = Parameter zur Erfassung der Bodenfeuchteabhängigkeit des Stomatawiderstandes (nach KOLLE, 1997).

## 10.6 Bildteil



Foto1: Hochwasser im Testgebiet Soonwald, Frühjahr 2001



Foto2: Hochwasser im Testgebiet Soonwald, Frühjahr 2001



Foto3: Hochwasser im Testgebiet Soonwald, Frühjahr 2001





Foto 4: gesättigter Waldboden im Testgebiet Soonwald



Fotos 5 und 6: Hochwasserabfluss vom Hauptwegenetz im Testgebiet Soonwald, Frühjahr 2001



Fotos 7 und 8: Wegeabfluss im Testgebiet Soonwald



Fotos 9 und 10: Wegeabfluss im Testgebiet Soonwald



Foto 11: Fahrspur, Testgebiet Soonwald



Foto 12: Fahrspur auf Windwurffläche,  
Testgebiet Soonwald



Foto 13: Rückegasse mit Ast- und Reisigarmierung, Testgebiet Pfälzerwald



Fotos 14 und 15: Alte Rückegasse in 40-jährigem Fichtenbestand, Testgebiet Soonwald



Foto 16: Moderne Forstmaschine (Forwarder)



Foto 17: Moderne Forstmaschine (Harvester)



Foto 18: Moderne Forstmaschine (Schlepper)



Fotos 19 und 20: Seillinienstrecke zur Holzbringung