

**Räumliche Verbreitung geogener Schwermetallgehalte
in Böden des Taunus:
Einfluss von periglazialer Deckschichtengenesse**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

„Doktor der Naturwissenschaften“

im Promotionsfach Geowissenschaften

am Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften

der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

von

Stefan Stückrad

geb. in Wiesbaden

Mainz, August 2008

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Verwendete Abkürzungen	VIII
Kurzfassung	IX
Abstract	X
<u>1 Einleitung und Zielsetzung</u>	1
1.1 Einleitung	1
1.1.1 Periglaziale Deckschichten	2
1.1.2 Periglaziale Deckschichten als Substratgemische	8
1.1.3 Bestimmung der Transportweiten periglazialer Deckschichten mittels Spurenelement-Tracer und Isotopenanalyse	9
1.2 Ziele	12
<u>2 Material und Methoden</u>	13
2.1 Untersuchungsstandorte	13
2.1.1 Regionalgeographische und stratigraphische Einordnung	15
2.1.2 Relief und Böden	21
2.2 Geländemethoden	22
2.2.1 Untersuchungsgebiet 1	22
2.2.2 Untersuchungsgebiet 2	23
2.3 Labormethoden	25
2.3.1 Probenvorbereitung	25
2.3.2 Physikalische Methoden	26
2.3.3 Geochemische Methoden	27
2.4 Datenverarbeitung und Visualisierung (GIS)	32
2.5 Mischungsmodelle und Statistische Datenanalyse	39
2.6 Qualitätskontrolle	42

<u>3</u>	<u>Ergebnisse</u>	47
3.1	Ergebnisse der Reliefauswertung	47
3.1.1	Untersuchungsgebiet 1	47
3.2.2	Untersuchungsgebiet 2	57
3.2	Ergebnisse der bodenkundlichen Geländeaufnahme	70
3.2.1	Untersuchungsgebiet 1	70
3.2.2	Untersuchungsgebiet 2	75
3.3	Substratmischung in periglazialen Lagen	79
3.3.1	Spurenelementgehalte	79
3.3.2	Quellen der Spurenelemente in den B-Horizonten	81
3.3.3	Tiefenverteilung der Spurenelementgehalte	83
3.3.4	Beiträge der einzelnen Substrate zu den Deckschichten	90
3.4	Periglaziale Transportweite von Pb aus kleinräumigen Erzgängen	97
3.4.1	Räumliche Verteilung von Pb entlang der Transekte	97
3.4.2	Transportweite des Pb-Erzes	103
3.4.3	Steuernde Faktoren der Transportweite	105
<u>4</u>	<u>Zusammenfassende Diskussion</u>	108
<u>5</u>	<u>Schlussfolgerungen</u>	113
	<u>Literaturverzeichnis</u>	114
	<u>Anhang</u>	134

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Gelisolifluktion = langsames, hangabwärtiges Kriechen der 40–70 cm mächtigen, wassergesättigten Auftauzone über tieferen, ständig gefrorenen Schichten im Periglazialraum (Press & Siever 1995)	3
Abb. 2: Schuttdeckenabfolge an einem Hang im Deckgebirge 1: feinkörniges Gestein; 2: grobkörniges Gestein; 3: Basislage (lössfrei); 4: Mittellage (stark lösshaltig); 5: Hauptlage (schwach lösshaltig). (Semmel 1991, verändert)	4
Abb. 3: Lössverteilung in Europa. Löss dargestellt als graues Punktraster (Fink et al. 1977)	6
Abb. 4: (a) Räumliche Verteilung und (b) Isopachen-Darstellung (Linien gleicher Sedimentmächtigkeit) der Laacher-See-Tephra-Sedimentkegel in Mitteleuropa. Quelle: Schmincke 1999	7
Abb. 5: Lage der Untersuchungsgebiete im Taunus (südöstlicher Teil des Rheinischen Schiefergebirges)	14
Abb. 6: Die postvariszischen Gänge des östlichen Taunus (Leveque & Jakobus 1994, verändert)	17
Abb. 7: Ausschnitt aus der geologischen Karte Blatt 5716 Oberreifenberg Bereich Heftrich	18
Abb. 8: Ausschnitt aus der geologischen Blatt 5617 Usingen/Pfaffenwiesbach (Usinger Quarzgang) Transekt E	19
Abb. 9: Ausschnitt aus der geologischen Blatt 5617 Usingen (Gangzug Hubertus) Transekt F	20
Abb. 10: Lage der Transekte A-D auf Standort 1 (Heftrich) mit den Hauptvererzungszonen. Die Pürckhauer-Beprobungsstellen sind mit runden, grünen Symbolen markiert, die angelegten Leitprofil-Gruben mit eckigen, grünen Symbolen	23
Abb. 11: Lage des Transekts E auf Standort 2 (Pfaffenwiesbach) mit dem Usinger Quarzgang. Die Pürckhauer-Beprobungsstellen sind mit runden, grünen Symbolen markiert	24
Abb. 12: Lage des Transekts F auf Standort 2 (Ziegenberg) mit dem Gangzug Hubertus. Die Pürckhauer-Beprobungsstellen sind mit runden, grünen Symbolen markiert	24
Abb. 13: Vertikal-, Horizontal- und Querkrümmung, dargestellt an einer Halbkugel als Oberflächenform (aus Friedrich 1996)	36

Abb. 14: aggregierte Hangneigungsverteilung auf Standort 1 in Klassen nach AG Boden (2005); als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)	48
Abb. 15: Exposition auf Standort 1	49
Abb. 16: Häufigkeitsverteilung der Exposition auf Standort 1	49
Abb. 17: Vertikalkrümmung auf Standort 1	51
Abb. 18: Häufigkeitsverteilung der Vertikalkrümmung auf Standort 1	51
Abb. 19: Horizontalkrümmung auf Standort 1	52
Abb. 20: Häufigkeitsverteilung der Horizontalkrümmung auf Standort 1	53
Abb. 21: Querkrümmung auf Standort 1	54
Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der Horizontalkrümmung auf Standort 1	54
Abb. 23: Massenbilanz auf Standort 1	55
Abb. 24: Häufigkeitsverteilung der Massenbilanz auf Standort 1	56
Abb. 25: aggregierte Hangneigungsverteilung auf Standort 2 in Klassen nach AG Boden (2005)	57
Abb. 26: aggregierte Hangneigungsverteilung auf Standort 2 in Klassen nach AG Boden (2005)	58
Abb. 27: Exposition auf Standort 2 (Transekt E)	59
Abb. 28: Exposition auf Standort 2 (Transekt F)	60
Abb. 29: Häufigkeitsverteilung der Exposition auf Standort 2	60
Abb. 30: Vertikalkrümmung auf Standort 2 (Transekt E)	61
Abb. 31: Vertikalkrümmung auf Standort 2 (Transekt F)	62
Abb. 32: Häufigkeitsverteilung der Vertikalkrümmung auf Standort 2	62
Abb. 33: Horizontalkrümmung auf Standort 2 (Transekt E)	63
Abb. 34: Horizontalkrümmung auf Standort 2 (Transekt F)	64
Abb. 35: Häufigkeitsverteilung der Horizontalkrümmung auf Standort 2	64
Abb. 36: Querkrümmung auf Standort 2 (Transekt E)	65
Abb. 37: Querkrümmung auf Standort 2 (Transekt F)	66
Abb. 38: Häufigkeitsverteilung der Querkrümmung auf Standort 2	66
Abb. 39: Massenbilanz auf Standort 2 (Transekt E)	67
Abb. 40: Massenbilanz auf Standort 2 (Transekt F)	68

Abb. 41: Häufigkeitsverteilung der Massenbilanz auf Standort 2	68
Abb. 42: Bodenkarte des Standorts 1 (Heftrich, Transekt A-D)	72
Abb. 43: Bodenkarte des Standorts 2 (Pfaffenwiesbach, Transekt E)	76
Abb. 44: Bodenkarte des Untersuchungsgebiets Ziegenberg (Transekt F)	78
Abb. 45: Ladung der durchschnittlichen Spurenelement-Gehalte in 120 B-Horizontproben nach einer Hauptkomponentenanalyse mit Varimax-Rotation auf die Hauptkomponenten (PC) 1 und 3	82
Abb. 46: Tiefenverteilung der mittleren Gehalte von Cr, Zr, Nb und Pb die repräsentativ für die Substrate Tonschiefer, Löss, LST und Erz sind. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung L (n=6), O (n=10), A (n=11), B (n=120), Cv (n=7) und unverwitterter massiver Tonschiefer (mCn) (n=4) (Tab. A28)	84
Abb. 47: mittlere $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenverhältnisse von Of (n=7), Ah (n=4), B(gesamt) (n=46), B(erzbeeinflusst) (n=11), Cv (n=4) und Tonschiefer/mCn (n=3); die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an	85
Abb. 48: Zusammenhang zwischen dem Kehrwert der Pb-Gehalte und dem $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenverhältnis	87
Abb. 49: Zusammenhang zwischen dem Kehrwert der unabhängig bestimmten Schluff-Gehalte und den Zr/Cr-Verhältnissen für (a) Standort 1 (Transekt A-D) und (b) Standort 2 (Transekt E-F)	91
Abb. 50: Zusammenhang zwischen dem Zr/Cr-Verhältnis und dem Nb/Cr-Verhältnis für (a) Standort 1 (Transekt A-D) und (b) Standort 2 (Transekt E-F)	94
Abb. 51: Profildarstellungen der untersuchten Transekte auf Standort 1; die Probennahmepunkte sind auf der X-Achse fortlaufend nummeriert und im Graphen (Pb-Gehalte in mg Pb kg^{-1}) durch einen korrespondierenden Punkt dargestellt; außerdem nummeriert sind lokale Pb-Gehaltsmaxima; zu beachten sind zwei unterschiedliche Skalen sowohl auf der X-Achse (Probennahmepunkte und Länge des Transekts in m) als auch auf der Y-Achse (Pb-Gehalte und Höhe NN)	98
Abb. 52: Profildarstellungen der untersuchten Transekte auf Standort 2; die Probennahmepunkte sind auf der X-Achse fortlaufend nummeriert und im Graphen (Pb-Gehalte in mg Pb kg^{-1}) durch einen korrespondierenden Punkt dargestellt; außerdem nummeriert sind lokale Pb-Gehaltsmaxima; zu beachten sind zwei unterschiedliche Skalen sowohl auf der X-Achse (Probennahmepunkte und Länge des Transekts in m) als auch auf der Y-Achse (Pb-Gehalte und Höhe NN)	99
Abb. 53: Zusammenhang zwischen Schluff-Gehalte und Transportweite	107

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Primäre Reliefparameter (nach Speight 1974, verändert)	35
Tabelle 2: Überblick über die Nachweisgrenzen und Fehlerbetrachtung der Spurenelementkalibration für das RFA-Spektrometer, sowie für die Referenzprobe (A06 mCn)	44
Tabelle 3: Übersicht über die geomorphometrischen Reliefparameter im Bereich der jeweiligen Erzgänge entlang der Transekte	69
Tabelle 4: Spurenelementgehalte in den B-Horizonten beider Standorte (n = 120) sowie Vergleichswerte aus der Literatur	80
Tabelle 5: Pb-Gehalte, Pb-Isotopenverhältnisse und Anteil von anthropogenem, atmosphärischem Pb im Verhältnis zum Gesamt-Pb in den Bodenhorizonten berechnet mit einem Zwei-Komponenten-Mischungsmodell. Die ausgewählten B-Horizonte sind nicht von lokalen Erzgängen beeinflusst	89
Tabelle 6: Übersicht über bodenphysikalischen Eigenschaften im Bereich der Erzgänge entlang der Transekte	92
Tabelle 7: Statistische Parameter der Zr/Cr- und Nb/Cr-Verhältnisse der B-Horizonte (n=120), Mittelwerte der drei Hauptkomponenten des Substrats (Tonschiefer, Löss und Tephra, jeweils n=3) und die Beiträge dieser drei Substrate zur Gesamtmasse der B-Horizonte berechnet mit einem Drei-Komponenten-Mischungsmodell für Standort 1 (Transekt A-D) und Standort 2 (Transekt E-F)	95
Tabelle 8: Statistische Parameter der $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse und der Beiträge des Pb-Erzes zur Gesamtmasse des Substrats; berechnet mit einem Zwei-Komponenten-Mischungsmodell basierend auf dem $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnis des Erzes als einem Mischungsglied (1,1828) und einem entsprechend ihrer Massenbeiträge gewichteten Mittelwert der Mischung aus Tonschiefer, Löss und LST als zweitem Mischungsglied (Standort 1: 1,2289 und Standort 2: 1,2276). Der gemessene Pb-Gehalt im Erz beträgt 190 g kg^{-1} .	96
Tabelle 9: $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse aller B-Horizontproben mit erhöhtem Pb-Gehalt, die einem Erzgang zugeordnet werden konnten und der Beitrag des erzbürtigen Pb zu den Pb-Gesamtgehalten in den B-Horizonten; außerdem sind die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse der Substratquellen der Bodenbildung aufgeführt	101
Tabelle 10: Übersicht über die mittleren Transportweiten erzbürtigen Bleis im Bereich der jeweiligen Erzgänge entlang Transekte	104
Tabelle 11: Kreuztabelle der Verteilung der Transportweiten (gruppiert in zwei Klassen) gegen die Neigung (gruppiert in drei Klassen)	105
Tabelle 12: Kreuztabelle der Verteilung der Transportweiten (gruppiert in zwei Klassen) gegen die die drei Ausprägungen der Vertikalkrümmung	106

Verwendete Abkürzungen

a	Jahr
BP	before present
DHM	Digitales Höhenmodell
DGM	Digitales Geländemodell
EMMA	end-member mixing analyses
FIS	Fachinformationssystem
GIS	Geografisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
ICP-MS	induktiv gekoppeltes Plasma Massenspektrometer
ka	tausend Jahre
KA4	Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage (AG Boden 1994)
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage (AG Boden 2005)
LB	Basislage
LH	Hauptlage
LM	Mittellage
LO	Oberlage
LST	Laacher See-Tephra
MTV	Mesozoisch-Tertiäre Verwitterungszone
PC	Principal Component (Hauptkomponente)
PCA	Principal Component Analysis (Hauptkomponentenanalyse)
RFA	Röntgenfluoreszenz-Analyse
TS	Tonschiefer

Kurzfassung

Während der Glazialphasen kam es in den europäischen Mittelgebirgen bedingt durch extensive solifluidale Massenbewegungen zur Bildung von Deckschichten. Diese Deckschichten repräsentieren eine Mischung verschiedener Substrate, wie anstehendes Ausgangsgestein, äolische Depositionen und lokale Erzgänge. Die räumliche Ausdehnung der Metallkontaminationen verursacht durch kleinräumige Erzgänge wird durch die periglaziale Solifluktion verstärkt.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war

- a) den Zusammenhang zwischen den Reliefeigenschaften und den Ausprägungen der solifluidalen Deckschichten und Böden aufzuklären, sowie
- b) mittels Spurenelementgehalte und Blei-Isotopen-Verhältnisse als Eingangsdaten für Mischungsmodelle die Beiträge der einzelnen Substrate zum Ausgangsmaterial der Bodenbildung zu identifizieren und quantifizieren und
- c) die räumliche Verteilung von Blei (Pb) in Deckschichten, die über Bleierzgänge gewandert sind, untersucht, die Transportweite des erzbürtigen Bleis berechnet und die kontrollierenden Faktoren der Transportweite bestimmt werden.

Sechs Transekte im südöstlichen Rheinischen Schiefergebirge, einschließlich der durch periglaziale Solifluktion entwickelten Böden, wurden untersucht. Die bodenkundliche Geländeaufnahme erfolgte nach AG Boden (2005). O, A, B und C-Horizontproben wurden auf ihre Spurenelementgehalte und teilweise auf ihre $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenverhältnisse analysiert.

Die steuernden Faktoren der Verteilung und Eigenschaften periglazialer Deckschichten sind neben der Petrographie, Reliefeigenschaften wie Exposition, Hangneigung, Hangposition und Krümmung. Die Reliefanalyse zeigt geringmächtige Deckschichten in divergenten, konvexen Hangbereichen bei gleichzeitig hohem Skelettgehalt. In konvergent, konkaven Hangbereichen nimmt die Deckschichtenmächtigkeit deutlich zu, bei gleichzeitig zunehmendem Lösslehm- und abnehmendem Skelettgehalt. Abhängig von den Reliefeigenschaften und -positionen reichen die ausgeprägten Bodentypen von sauren Braunerden bis hin zu Pseudogley-Parabraunerden. Des Weiteren kommen holozäne Kolluvien in eher untypischen Reliefpositionen wie langgestreckten, kaum geneigten Hangbereichen oder Mittelhangbereichen vor.

Außer für Pb bewegen sich die Spurenelementgehalte im Rahmen niedriger Hintergrundgehalte. Die Pb-Gehalte liegen zwischen 20-135 mg kg⁻¹. Abnehmende Spurenelementgehalte und Isotopensignaturen ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenverhältnisse) von Pb zeigen, dass nahezu kein Pb aus atmosphärischen Depositionen in die B-Horizonte verlagert wurde. Eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) der Spurenelementgehalte hat vier Hauptsubstratquellen der untersuchten B-Horizonte identifiziert (Tonschiefer, Löss, Laacher-See-Tephra [LST] und lokale Pb-Erzgänge). Mittels 3-Komponenten-Mischungsmodell, das Tonschiefer, Löss und LST einschloss, konnten, bis auf 10 Ausreißer, die Spurenelementgehalte aller 120 B-Horizontproben erklärt werden. Der Massenbeitrag des Pb-Erzes zur Substratmischung liegt bei <0,1%.

Die räumliche Pb-Verteilung zeigt Bereiche lokaler Pb-Gehaltsmaxima hangaufwärtiger Pb-Erzgänge. Mittels eines $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenverhältnis-Mischungsmodells konnten 14 Bereiche erhöhter lokaler Pb-Gehaltsmaxima ausgewiesen werden, die 76-100% erzbürtigen Bleis enthalten. Mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems wurden die Transportweiten des erzbürtigen Bleis mit 30 bis 110 m bestimmt. Die steuernden Faktoren der Transportweite sind dabei die Schluffkonzentration und die Vertikalkrümmung.

Diese Untersuchung zeigt, dass Reliefeigenschaften und Reliefposition einen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung der Deckschichten und Böden im europäischen Mittelgebirgsbereich haben. Mischungsmodelle in Kombination mit Spurenelementanalysen und Isotopenverhältnissen stellen ein wichtiges Werkzeug zur Bestimmung der Beiträge der einzelnen Glieder in Bodensubstratmischungen dar. Außerdem können lokale Bleierzgänge die natürlichen Pb-Gehalte in Böden, entwickelt in periglazialen Deckschichten der letzten Vereisungsphase (Würm), bis über 100 m Entfernung erhöhen.

Abstract

During the periglacial period in central European middle mountains, extensive solifluctional mass movements induced the genesis of cover beds. These cover beds represent a mixture of different substrates including bedrock, aeolian deposits and local ores. The spatial extent of metal contamination caused by small-scale ore veins is increased by periglacial solifluction.

My study aimed at

- a) detecting the relationship between relief properties and properties of the solifluction layers and soils,
- b) identifying and quantifying the contribution of different substrates to the parent material for recent soil development using trace metal concentrations and Pb isotope ratios as input data for end-member mixing analyses (EMMA) and
- c) further to examine the spatial distribution of Pb in cover beds that migrated over Pb ore veins, to calculate the transport distance of ore-derived Pb, and to determine controls of the transport distance.

Six transects in the Rhenish Slate Mountains were examined comprising soils developed from periglacial drift. Soils were mapped according to the German soil classification. O, A, B and C horizons were analyzed for total trace metal concentrations and partly also $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ratios.

The main factors considered influencing the distribution and properties of the periglacial drift were the petrography, exposition, slope position, inclination and relief properties. Relief analysis show only thin cover beds at divergent, convex slope positions (with a high stone content) leading to increased cover bed thickness in convergent, concave slope positions (high content fraction <2mm and rich in loess loam). According to the relief properties and position the soil types range from acid Cambisols to stagnic Luvisols. Holocene colluviums occur at rather untypical positions like middle slopes and long stretched slopes without inclination.

Trace metal concentrations were in the low background range except for Pb. The Pb concentrations ranged from 20 to 135 mg kg⁻¹.

Decreasing metal concentrations and the isotopic signature ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ratio) of Pb indicated that almost no Pb deposited from the atmosphere had reached the B horizons. A principal component analysis (PCA) of the trace element concentrations identified four main sources of substrates of the studied B horizons (bedrock [slate], loess, Laacher-See Tephra [LST] and local Pb-ore veins). A three end-member mixing model including slate, loess and LST almost explained the trace metal composition of all 120 B horizons except for 10 outliers. The mass contribution of the Pb ore to the substrate mixture ranged around <0.1%.

The spatial Pb distribution shows local concentration maxima containing Pb from ore veins upslope. With an end-member-mixing model using the $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ratio 14 peaks containing 76-100% of ore-derived Pb were confirmed. By the use of a geographical information system, the transport distance of this Pb was determined to range between 30 and 110 m. Silt concentrations and the relief curvature were major controls of the transport distance.

My study demonstrates that relief properties and position have a decisive influence on the development of cover beds and soils in European middle mountains. End-member mixing analyses in combination with trace element analyses and isotope ratios provide a powerful tool for determining the contribution of different members in soil substrate mixture. Furthermore Pb ore veins can increase native soil Pb concentrations in soils derived from the periglacial drift of the last ice age (Wurm) up to a distance of more than 100 m.

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

1.1 Einleitung

Schwermetalle (Dichte $>4,5 \text{ g/cm}^3$) sind primär in zahlreichen Mineralen und Gesteinen in silikatischer, oxidischer, sulfidischer oder karbonatischer Bindung als Bestandteil der Erdkruste nahezu überall natürlich vorhanden. Eine Vielzahl von Schwermetallen, z. B. Kupfer, Zink und Mangan, sind als Spurenelemente für die Ernährung von Pflanze, Tier und Mensch essentiell. Andere, die keine ernährungsphysiologische Bedeutung haben, z. B. Blei (Pb), Cadmium und Quecksilber, sind jedoch ausschließlich als Schadstoffe anzusprechen.

Unter natürlichen Bedingungen kommen Schwermetalle meist in geringen Gehalten in Böden und Ausgangsgesteinen vor, wobei diese als geogen bezeichnete Schwermetallbelastung regional sehr unterschiedlich ausfallen kann. In lokal begrenzten Erzlagerstätten können extreme Schwermetallgehalte auftreten.

Im Zuge von Bodenbildungen sind diese extremen Schwermetallgehalte natürlicherweise aufgearbeitet worden. In den Mittelgebirgen wird das anstehende Gestein durch Lockergesteinsdecken unterschiedlicher Zusammensetzung und Mächtigkeit überlagert. Durch morphologische Dynamik im Einflussbereich der letzten Vereisungsphasen wurden diese meist verlagert. Üblicherweise werden die Deckschichten als „periglaziale Lagen“ bezeichnet. Sie bauen die Verwitterungsdecke im Mittelgebirgsraum auf und bilden daher das Ausgangsmaterial der Bodenbildung. Innerhalb dieser Lagen finden die meisten bodenchemischen und bodenphysikalischen Prozesse statt, wodurch maßgeblich die Grundwasser- und damit auch Trinkwasserneubildung im Mittelgebirgsraum beeinflusst wird. Als Folge der Aufnahme von Vererzungsmaterial in die periglazialen Lagen wurden z.T. größere Flächen mit stark belastetem Lockergestein überwandert. Bei der räumlichen Ausgrenzung solcher Areale sind die reliefabhängige Wanderstrecke, insbesondere die Hanglänge-, -richtung und -neigung zu beachten. Des Weiteren sind Verdünnungseffekte durch Löss und anstehendes Material zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind die periglazialen Lagen meist mehrgliedrig und Substratgemische. Mit zunehmender Entfernung

von einem Erzgang nimmt sein Anteil am Gesamtsubstrat ab. Andererseits kann unbelastetes Material auch über hangabwärtige Erzgänge wandern.

Seit Beginn der Industrialisierung ist ein zusätzlicher Schwermetalleintrag aus anthropogenen Quellen festzustellen. Zu deren Beurteilung in Böden ist die Kenntnis der natürlichen, d.h. lithogenen Gehalte der bodenbildenden Ausgangsgesteine von Bedeutung. Schon in den 60er Jahren wurden umfangreiche Untersuchungen zur Erhebung der mittleren natürlichen Gehalte von Schwermetallen für verschiedene Gesteinstypen durchgeführt.

Geologische Einheiten, Gesteine und Böden sind in Hessen mittlerweile flächendeckend in einem geographischen Informationssystem erfasst und dort mit den zugehörigen raumbezogenen Daten verknüpft. Aufgrund der Konzeption lassen sich weitere Zusatzinformationen wie reliefabhängige Parameter extrahieren und mit vorhandenen Daten verschneiden um daraus Aussagen über den Schwermetall-Transport ableiten zu können.

1.1.1 Periglaziale Deckschichten

Im zentraleuropäischen Mittelgebirgsrelief wird der oberflächennahe Untergrund im Allgemeinen durch periglaziale Deckschichten und holozäne Solumsedimente repräsentiert (Kleber 1997; Schaller et al. 2002). Deckschichten sind nicht nur beschränkt auf den europäischen Raum, sondern ein globales Phänomen im Einflussbereich der quartären Vereisungen. So vergleicht Kleber (1997) Deckschichten in gemäßigten Breiten mit Deckschichten in semiariden Regionen der Türkei und den südwestlichen USA. Veit (1994) beschreibt Böden im südlichen Zentral-Chile, deren Ausgangssubstrat während des letzten Glazial entwickelte Deckschichten sind. Auch im südwestlichen Australien sind quartäre Deckschichten verbreitet (Dodson & Macphail 2004).

Periglaziale Deckschichten sind mehrschichtige, polygenetische Gemenge aus in situ anstehenden Festgesteinen, äolisch eingetragenen Sedimenten, tertiärem Zersatzmaterial sowie älteren Bodenbildungen und Solifluktsdecken (Sauer & Felix-Henningsen 2006). Solifluktion wird meist als eine hangabwärts gerichtete Bewegung eines breiigen Substrats über einem Staukörper charakterisiert, der nicht mit einem periglazialen Milieu in Verbindung stehen muss (Harris 1996; Harris et al. 1997). Der Begriff 'Gelisolifluktion' ist dahingehend konkreter, als

dass er sich auf saisonale Auftauphasen mit gefrorenem Untergrund als Staukörper bezieht (Abb. 1), ähnlichen Verhältnissen, wie sie in der letzten Vereisungsphase vorherrschten (Matsuoka 2001). Als holozäne Sedimente sind zudem Kolluvien aus umgelagertem Bodenmaterial weit verbreitet (Selby 1993; Millar 2005).

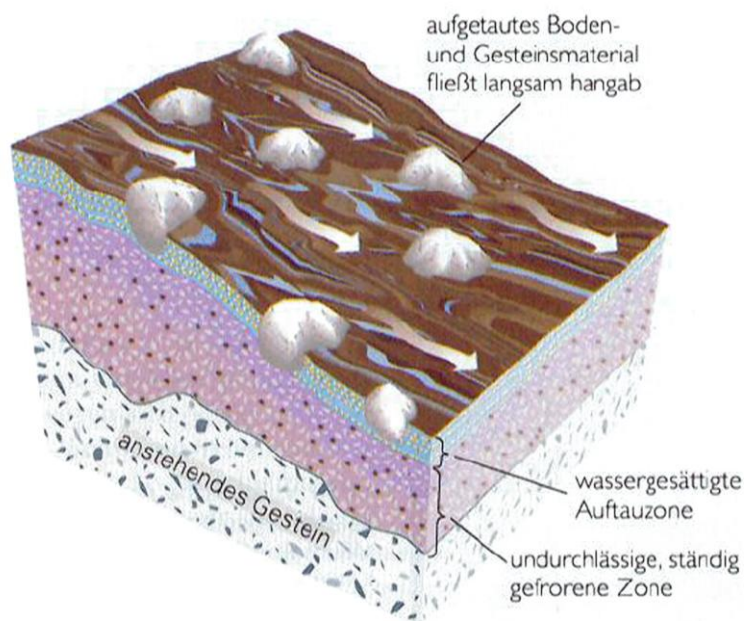


Abb. 1: Gellisolifluktion = langsames, hangabwärtiges Kriechen der 40–70 cm mächtigen, wassergesättigten Auftauzone über tieferen, ständig gefrorenen Schichten im Periglazialraum (Press & Siever 1995).

Bereits seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts wurden pleistozäne periglaziale Lockersedimentdecken in deutschen Mittelgebirgen untersucht (Zuwarek et al. 2005). Allerdings wurde deren Ausdehnung und Bedeutung für die Bodenbildung und Standorteigenschaften lange nicht erkannt. Erst die wegweisenden Arbeiten von Schilling & Wiefel (1962) und Semmel (1964, 1968) markierten den Beginn der systematischen Erforschung und Gliederung periglazialer Lagen in Deutschland. Beide Autoren können eine Zwei- bis Dreiteilung der pleistozänen Deckschichten anhand ihrer Farbe, Textur und Mächtigkeit feststellen, die sich klar vom darunter Liegenden abhebt. Sie kamen zum Schluss, dass es sich bei dem 4–7 dm mächtigen Deckschutt aufgrund der flächendeckenden Verbreitung um den Bereich der sommerlichen Auftauzone im Periglazialbereich handeln muss.

Der wiederholte morphodynamische Prozess des Bodenfließens und -vermischens führte zu einer mehrgliedrigen Schichtung der Solifluktsdecke (in Haupt-, Mittel- und Basislage) (AG Boden 1994, Tab. A1). Dieser Prozess dauerte bis in das jüngste Pleistozän an und fand seinen Abschluss erst im Übergang von der Jüngeren Tundrenzeit zum Präboreal (Völkel & Mahr 2001).

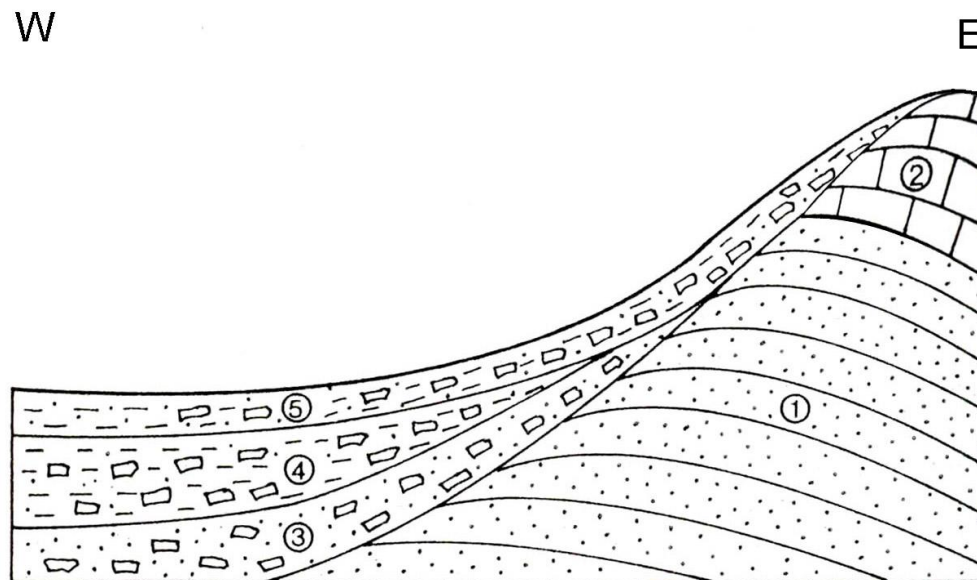


Abb. 2: Deckschichtenabfolge an einem Hang im Deckgebirge
 1: feinkörniges Gestein; 2: grobkörniges Gestein; 3: Basislage (lössfrei); 4: Mittellage (stark lösshaltig); 5: Hauptlage (schwach lösshaltig). (Semmel 1991, verändert)

Die Hauptlage (LH) ist mit Ausnahme von Standorten holozäner Sedimentüberdeckung und Felsdurchragungen ubiquitär verbreitet (Sauer & Felix-Henningsen 2006). Ihre weitgehende Erhaltung ist auf das zügige Einsetzen der holozänen Vegetationsausbreitung und der Wiederbewaldung zurückzuführen, wodurch die kaltzeitliche Morphodynamik zum Erliegen kam (Bork et al. 1998).

Die in Tab. A1 zusätzlich definierte Oberlage (LO) ist auf SW-exponierte Oberhängen in Hochlagen (>700-800 m NN) der Mittelgebirge beschränkt, ihre periglaziale Entstehung ist jedoch fraglich (Semmel 1999).

In den im einstigen Periglazialraum strukturell durch Kryoklastik, Kryoturbation und Gelisolifluktion veränderten oberflächennahen Untergrund wurde darüber hinaus z.T. äolisches Fremdmaterial, vornehmlich Löss, Sandlöss, Flugsand und Laacher-See-Tephra eingeweht und den Deckschichten beigemischt. Die mineralogische und geochemische Zusammensetzung kann daher lagenspezifisch variieren, was erhebliche Auswirkungen auf den Stoffhaushalt der Böden haben und

von der chemischen Zusammensetzung des Anstehenden deutlich abweichen kann (Sabel 2005).

Zur Entstehung der Basislagen (LB) waren eine kryoklastische Aufarbeitung des Gesteins und eine hangabwärts gerichtete Verlagerung durch Gravitation und Solifluktion notwendig (Harris 1996). In der Prozessabfolge zur Bildung der Mittellage (LM) ist eine Lössakkumulation erforderlich, die in kalt-ariden Phasen erfolgt sein muss (Schaller et al. 2002). In einer darauffolgenden, durch Gelisolifluktion geprägten Phase wurde der Löss zusammen mit Material aus der hangenden Basislage solifluidal hangabwärts verlagert und dabei vermischt. Dieser Prozess kann wohl als flächendeckend angesehen werden, auch in Hangbereichen, in denen heute keine LM mehr erhalten ist. Diese ursprünglich vorhandene LM wurde aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit vollständig erodiert oder von der LH aufgenommen (Sauer & Felix-Henningsen 2006).

Ohne die periglazialen Deckschichten als Substrate der holozänen Bodenbildung im Mittelgebirgsbereich wären auf Festgesteinen in der Regel nur flachgründige A/C-Böden entwickelt (Semmel 1996). Die Gründigkeit sowie weitere wichtige Standorteigenschaften, wie die Durchwurzelbarkeit, der Skelettgehalt, die Bodenart und die nutzbare Feldkapazität sind bestimmt durch die Mächtigkeit und die Substrateigenschaften der periglaziale Lagen und Kolluvien (Scholten et al. 1999). Des Weiteren haben sie einen bedeutenden Einfluss auf den geogenen Schwermetallgehalt (Schaller et al. 2002).

Bei der Unterscheidung der Haupt- und Mittellage von der Basislage sind Texturmerkmale, hervorgerufen durch die Beimengung von Löss, von entscheidender Bedeutung. Dieses kaltzeitliche Sediment mit einer Korngrößenverteilung im Grobschluffbereich (Smalley 1976) ist in Europa während der Glazialphasen lokal verweht worden. Abbildung 3 gibt einen Überblick über das Ausmaß der letzten Glazialphase und die Lössverteilung im Periglazialraum Mitteleuropas. Haase et al. (2007) geben für den Bereich des südöstlichen Rheinischen Schiefergebirges eine Lössmächtigkeit von 1-5 m an, was einen bedeutenden Massenbeitrag von Löss zu den periglazialen Deckschichten nahe legt. In der Basislage kommt Löss nicht vor.

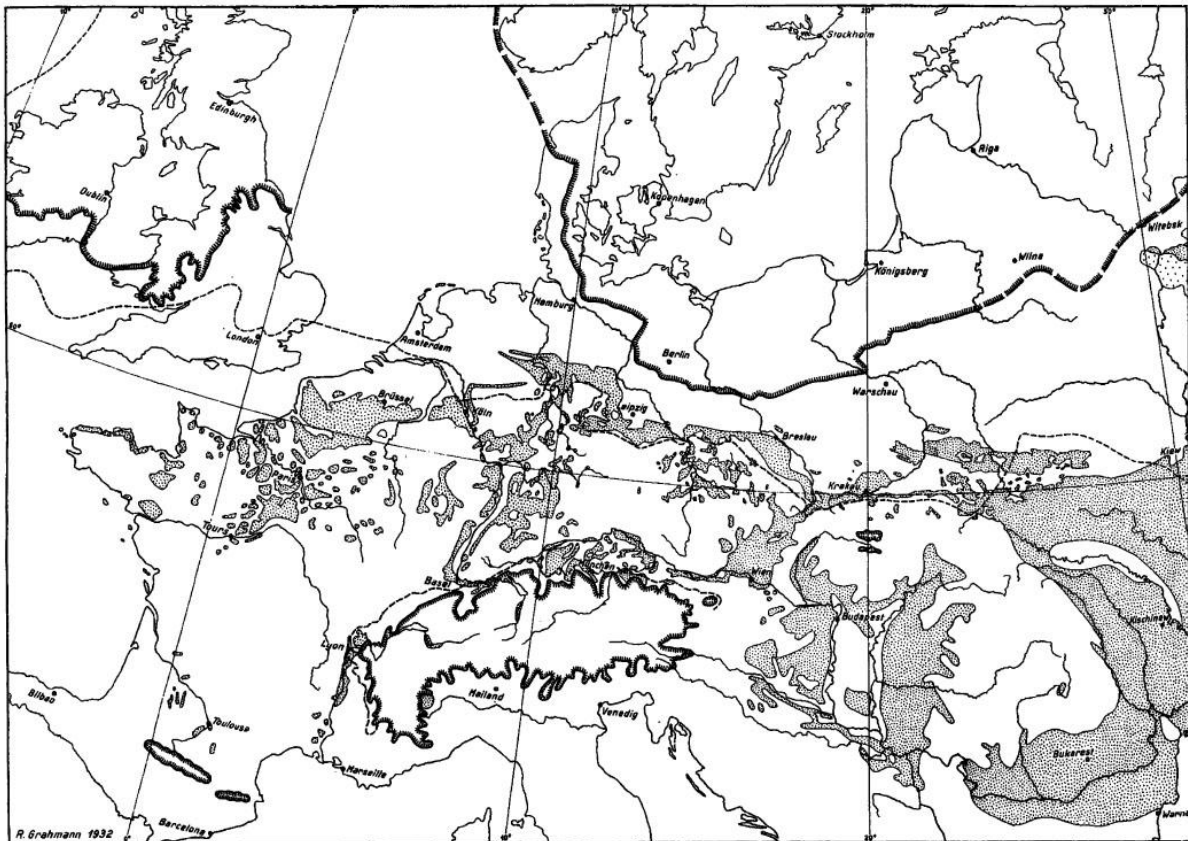


Abb. 3: Lössverteilung in Europa. Löss dargestellt als graues Punktraster (Fink et al. 1977).

Vor allem in den Flussgebieten wurde der Löss von Westwinden ausgeblasen und deutlich östlich davon wieder abgelagert. Mineralogisch besteht Löss zum größten Teil (50-80 %) aus Quarzkörnern mit 8-20 % kalkigen Bruchstücken. Beimengungen von Eisenhydroxiden färben Löss gelblich bis gelblich-rot (Sterckeman et al. 2006). Weiterhin greift die Verwitterung vor allem die oberen Bereiche des Lösses an. Dadurch wird der Kalk gelöst und Tonminerale gebildet. Es entsteht Lösslehm.

Eine Differenzierung der Hauptlage von der Mittellage gelingt zum einen durch den geringeren Anteil an Lösslehm in der Hauptlage und zum anderen mit den durch die Laacher-See-Tephra (LST) eingewehten Schwermineralen Augit und braune Hornblende. Ferner erlaubt die LST für die LH eine zeitliche Datierung in die jüngere Dryaszeit (Kleber 1992; Raab et al. 2007). Nach Bogaard & Schmincke (1985) beträgt die Mächtigkeit der im Bereich des südöstlichen Rheinischen Schiefergebirges eingewehten Laacher-See-Tephra um die 10 cm (Abb. 4). Als Massenbeitrag zu den periglazialen Deckschichten stellt diese Beimengung nur eine geringe Größe dar, der Schwermineral- und Spurenelementeintrag ist jedoch nachweisbar.

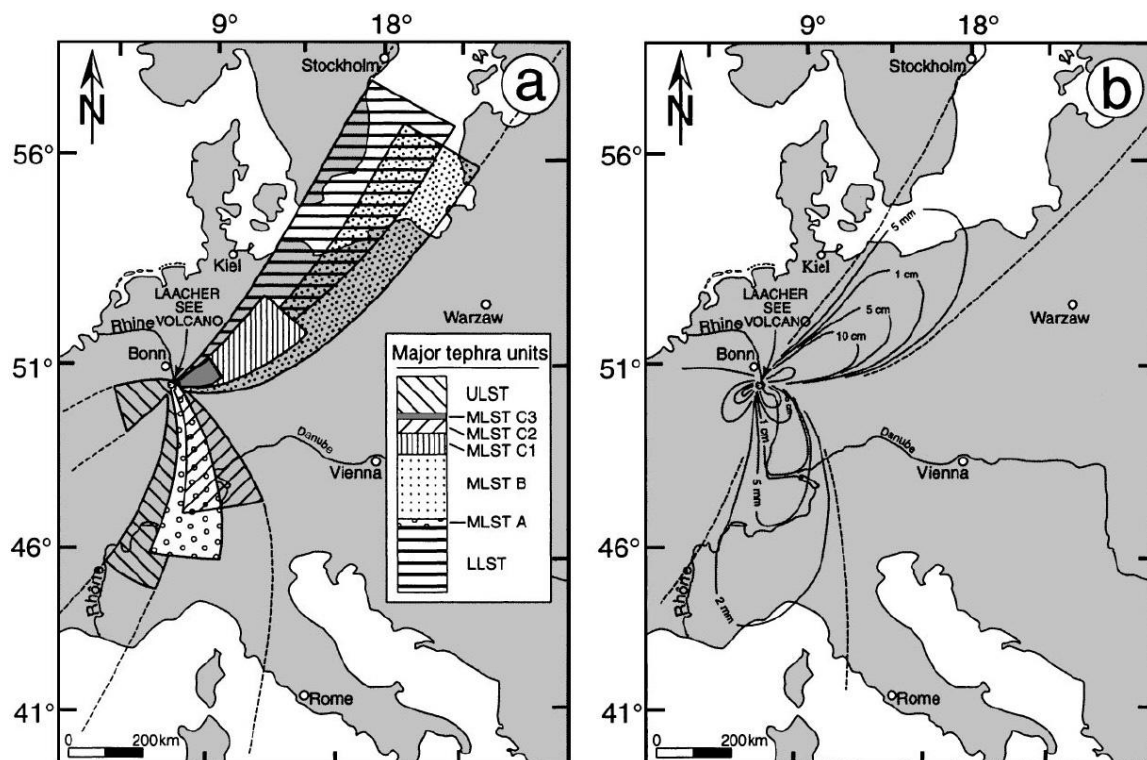


Abb. 4: (a) Räumliche Verteilung und (b) Isopachen-Darstellung (Linien gleicher Sedimentmächtigkeit) der Laacher-See-Tephra-Sedimentkegel in Mitteleuropa. Quelle: Schmincke 1999

Das Würm mit seinen Interstadial Phasen reichte von ca. 115 ka BP bis ca. 10 ka BP (Klostermann 1999; Sirocko et al. 2005). Morphodynamisch war das Würm eine sehr heterogene Periode, in der sich Phasen der Sedimentakkumulation und Bodenbildung mit Phasen der Gelisolifluktion abwechselten (Sycheva 1998; Corti et al. 2001). Während der Interstadiale kam es in Phasen geomorphodynamischer Stabilität immer wieder zu Bodenbildungen. Lössanwehungen unterbrachen allerdings immer wieder die Bodenbildungsphasen oder ließen nur schwache Bodenbildungen zu (Sauer & Felix-Henningsen 2006).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ausprägung und Verteilung der rezenten Bodentypen im Mittelgebirgsbereich maßgeblich an die Genese der pleistozänen, periglazialen und holozänen Deckschichten gebunden ist, die ihrerseits wiederum von reliefspezifischen Faktoren abhängen.

1.1.2 Periglaziale Deckschichten als Substratgemische

Unter natürlichen Bedingungen kommt Blei (Pb) in Böden und Gesteinen normalerweise in geringen Gehalten vor (Ewers & Schlipkötter 1991). Kenntnis der Beiträge der einzelnen Bestandteile zur Gesamtmasse der periglazialen Lagen und somit zum Ausgangssubstrat rezenter Böden ist notwendige Voraussetzung, um die Eigenschaften periglazialer Lagen ohne detaillierte Analyse vorhersagen zu können.

Um den Massenbeitrag der einzelnen Substrate zum gesamten Ausgangsmaterial der Bodenbildung zu quantifizieren, kann ein Endglieder-Mischungsmodell zur Anwendung kommen. Endglieder-Mischungsmodelle benötigen substratspezifische Signale wie Elementgehalte, Elementverhältnisse oder Isotopenverhältnisse. Der Einsatz von Mischungsmodellen basiert auf der Annahme, dass die gemessene Signatur der Bodenproben als eine Mischung der bekannten Ausgangsbestandteile der Bodenbildung erklärt werden kann. Weitere Quellen für die betrachtete Signatur werden daher ausgeschlossen. Die einzelnen Komponenten repräsentieren die Endglieder des Mischungsmodells. Das einfachste Modell ist ein Zwei-Komponenten-Mischungsmodell, bei dem sich ein Signal (z. B. Spurenelementgehalt oder Isotopenverhältnis) deutlich vom anderen unterscheidet. Ein Drei-Komponenten-Mischungsmodell hingegen benötigt zwei unabhängige Signale (Christophersen & Hooper 1992; Bonell 1998; Brown et al. 1999).

Endglieder-Mischungsmodelle sind in den Geowissenschaften häufig genutzte Methoden. In hydrochemischen Untersuchungen werden Mischungsmodelle verwendet, um unterschiedliche Quellen von Ionen im Grund- und Strömungswasser zu quantifizieren (z. B. Hooper 2003; Shand et al. 2005; McEachern 2006). Guieu et al. (2002) zeigten mit einem Mischungsmodell durch Quantifizierung der Beiträge einzelner Staubquellen, dass Saharastaub eine potentielle Nährstoffquelle (P, Fe) für das Mittelmeer darstellt. In einem aktuellen Beispiel für die geowissenschaftliche Anwendbarkeit von Mischungsmodellen nutzten King et al. (2007) Pb-Isotope als Tracer in Kombination mit Mischungsmodell-Analysen, um Recycling-Prozesse während der Subduktion zu untersuchen.

In der Bodenkunde besteht das klassische Einsatzgebiet von EMMA in der Berechnung von Umsatzraten organischen Materials in Böden, auf denen eine

Vegetation aus C_3 -Pflanzen durch C_4 -Pflanzen mit deren unterschiedlichem $\delta^{13}C$ -Signal ersetzt wurde. Bei C_3 -Pflanzen wird das CO_2 während der Photosynthese zu einem C_3 -Körper assimiliert, wohingegen C_4 -Pflanzen CO_2 in einem C_4 -Körper fixieren. Diese unterschiedliche Art der CO_2 -Fixierung wirkt sich auf das $\delta^{13}C$ -Signal im Boden aus. Mittels Zwei-Komponenten-Mischungsmodellen in einer echten oder „unechten“ Zeitreihe seit Substitution der C_3 -Vegetation (z. B. Weizen) durch die C_4 -Vegetation (z. B. Mais) können hier Umsatzzeiten des $\delta^{13}C$ -Signals im Boden berechnet werden (Veldkamp 1994; Balesdent & Mariotti 1996; Wilcke et al. 2004). Mischungsmodelle werden ebenso zur Trennung anthropogener und natürlicher Pb-Gehalte in Böden unter Verwendung stabiler Pb-Isotopenverhältnisse eingesetzt (Nowack et al. 2001; Wilcke et al. 2001; Freydier & Viers 2003). Ein aktuelles Beispiel der Anwendung eines Drei-Komponenten-Mischungsmodells in der Bodenkunde stellt die Arbeit von Oelmann et al. (2007) dar, in der die Beiträge verschiedener Nitratquellen in der Bodenlösung mit Hilfe von $\delta^{15}N$ - und $\delta^{18}O$ -Signalen in Nitraten quantifiziert wurden.

Der Einsatz von Spurenelementen als Tracer bestimmter Substrate wird durch die Deposition von Metallen aus der Atmosphäre erschwert (Kleber et al. 1998). Aufgrund der Retention der meisten Schwermetalle in den organischen Auflagehorizonten (Haack et al. 2003; Watmough & Hutchinson 2004) und der dadurch geringeren Mobilität in Böden (Brümmer et al. 1986) haben diese Depositionen jedoch nur geringen Einfluss auf die Spurenelementgehalte in den B-Horizonten.

1.1.3 Bestimmung der Transportweiten periglazialer Deckschichten mittels Spurenelement-Tracer und Isotopenanalyse

Periglaziale Lagen, als ein Gemisch aus dem Substrat des unterlagernden Gesteins, äolischen Beimengungen (Löss) und vulkanischer Sedimente (Tephra), können in den metamorphen und plutonischen Gesteinen des Variszikums stellenweise Material örtlich anstehender Erzgänge enthalten (Schmincke et al. 1999; Wagner & Schneider 2002; Frechen et al. 2003; Haase et al. 2007).

Geogene Kontaminationen, wie z. B. Erzgänge, können zu erhöhten natürlichen Gehalten von Pb in Böden führen. Sierra et al. (2007) fanden in Spanien erzbürtige Pb-Gehalte in Böden von bis zu 5 g kg^{-1} . Auch im metamorphen

Variszikum Europas, vor allem im Rheinischen Schiefergebirge, sind Erzgänge weit verbreitet (Wagner & Schneider 2002).

Während der Periglazialphasen kam es zu ausgedehnten gelisolifluidalen Massenbewegungen (Matsuoka 2001), was in einer Verteilung erzbürtiger Metalle resultierte, die weiträumiger ist als die Erzgänge selbst (Bourennane et al. 2003). Mit zunehmendem Abstand von der Quelle eines bestimmten Substrats nimmt dessen Beitrag an der Gesamtmasse der Deckschicht ab. Im Bereich eines Erzgangs, der von einer solifluidalen Lage überflossen wurde, führt dies zu einem Anstieg der Metallgehalte unterhalb des Ganges, während beispielsweise im Bereich oberhalb und unmittelbar über dem Erzgang die Gehalte deutlich geringer sein können.

Um erzbürtiges Pb von geogenem Pb des Ausgangssubstrats der Bodenbildung zu trennen, können Isotopenverhältnisse stabiler Pb-Isotope eingesetzt werden, vorausgesetzt die Isotopensignale sind unterschiedlich (Sturges & Barrie 1987).

Unter natürlichen Bedingungen existieren vier stabile Pb-Isotope (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb und ^{208}Pb), wobei nur ^{204}Pb nicht radiogen ist. ^{206}Pb , ^{207}Pb und ^{208}Pb sind Tochterprodukte des radioaktiven Zerfalls von ^{238}U , ^{235}U beziehungsweise ^{232}Th (Shima 1986). Aufgrund dieser Tatsache unterliegen Pb-Isotope in der Natur nur geringen Variationen, so zeigen Pb-Erze generell eine charakteristische Isotopensignatur, die sich auch nicht durch physikalische oder physikochemische Prozesse wie z. B. Schmelzen, Raffination und Weiterverarbeitung verändert (Townsend et al. 1998).

Blei ist eines der häufigsten anthropogenen Schadstoffe in unseren Ökosystemen. Die Kenntnis der Pb-Gehalte alleine reicht allerdings meist nicht als Indiz anthropogener Kontamination aus, da beträchtliche Mengen von Pb auch aus natürlichen Quellen stammen können (Hansmann & Köppel 2000). Pb-Isotopenverhältnisse können dagegen analytische Informationen über Quellen einer Pb-Kontamination liefern. Aufgrund dieser Tatsache werden Pb-Isotopenverhältnisse verbreitet in den Umwelt- (Koirtyohann 1994; Monna et al. 1997; Rosman et al. 1997; Nageote & Day 1998; Rosman et al. 1998) und Geowissenschaften (Faure 1977; Townsend et al. 1998) eingesetzt.

Blei, das in verbleiten Kraftstoffen Verwendung fand, stammte meist aus präkambrischen Lagerstätten in Australien oder Kanada. Typische $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenwerte für verbleites Benzin liegen zwischen 1,04 und 1,10. Der

europäische Mittelwert für Pb aus Bleierzlagerstätten liegt bei $1,20 \pm$ Standardabweichung: 0,15 (Moor et al. 1996). Die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopensignatur für Pb aus den bedeutenden deutschen Lagerstätten Meggen bzw. Ramsbeck werden mit 1,17 angegeben (Doe 1970; Wagner & Schneider 2002).

Die Nutzung stabiler Pb-Isotope ist eine bewährte Methode, um anthropogene Pb-Einträge von Hintergrundgehalten in Böden zu trennen (Bindler et al. 1999; Nowack et al. 2001; Wilcke et al. 2001; Wilson et al. 2006). Lévêque und Haack (1993) und Lévêque und Jakobus (1994) bestimmten Pb-Isotopensignale von hydrothermalen Pb-Erzgängen im Rheinischen Schiefergebirge. Dabei stellten sie fest, dass die Pb-Erze (Galenit) in diesem Bereich aus einer homogenen Quelle stammen und ihre Isotopenzusammensetzung deswegen nur geringfügig variiert. Unterscheidet sich diese homogene Isotopenzusammensetzung der Pb-Erze im Rheinischen Schiefergebirge deutlich von der des Ausgangssubstrats, lässt sich mit Pb-Isotopenverhältnissen der Anteil von erzbürtigem Pb bestimmen.

Schon Semmel (1968) hat die solifluidale Genese der LH durch ihre Transportweite belegt und dabei auf flachen Hängen bis zu 50 Meter, stellenweise sogar mehr als 120 m Transportweite beobachtet. In den letzten drei Jahrzehnten wurden umfangreiche Laborexperimente (Harris et al. 1997) und Feldstudien (Harris 1972; Matsuoka et al. 2000) zur Bestimmung von Solifluktrationsraten durchgeführt. Aktuelle Studien aus dem Himalaja belegen hangabwärts gerichtete Bodenbewegungsraten in Solifluktionsterrassen von 3 bis 4 mm a^{-1} (Naithani and Prasad, 1998). Langfristige Migrationsraten von Solifluktrationsloben in Norwegen, der Schweiz, den Rocky Mountains und der Antarktis zeigen Durchschnittswerte von 1-10 mm a^{-1} , mit Spitzenwerten von bis zu 30 mm a^{-1} (Matsuoka 2001). Aktuell berichten Harris et al. (2008) von in Norwegen zwischen 2002 und 2006 beobachteten Migrationsraten im Oberflächenbereich von Solifluktrationsloben zwischen 5 mm a^{-1} im hinteren Bereich und bis zu 16 mm a^{-1} in deren Frontbereich.

1.2 Ziele

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, die Reichweite des Einflusses von Vererzungen auf die Schwermetallgehalte des Bodens im Mittelgebirgsrelief anhand von Fallbeispielen aufzuklären und die Zusammensetzung der Ausgangssubstrate der Bodenbildung (periglaziale Lagen) zu ermitteln. Dazu mussten in einem ersten Schritt Untersuchungsgebiete im Bereich von Erzgängen ausfindig gemacht und mit feldbodenkundlichen Methoden kartiert werden.

Im Weiteren sollte

- (1) die Ausprägung der Deckschichten und die in den Deckschichten abgelaufene Pedogenese in Abhängigkeit von der Reliefsituation als Voraussetzung für die Interpretation der Schwermetallgehalte im Boden erfasst werden,
- (2) die Beiträge der einzelnen Bestandteile der Deckschichten (Anstehendes, äolische Beimengungen, Erzgänge) ermittelt und
- (3) das Ausmaß der Verbreitung erzbürtiger Schwermetalle über periglaziale Solifluktion quantifiziert werden.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungen wurden im Taunus, dem südöstlichen Teil des Rheinischen Schiefergebirges durchgeführt.

Nach umfangreichen Recherchen wurde eine Vielzahl von Untersuchungsgebieten ausgewählt und diese in einem ersten Schritt auf ihre bodenkundliche Eignung geprüft. Grundlegendes Kriterium für die Eignung war die flächige Dominanz anthropogen wenig überprägter Böden im Einzugsbereich von Erzgängen. So wird die Probennahme in dem anthropogen überprägten Mittelgebirgsbereich häufig durch Bergbauhalden, Phänomene der mittelalterlichen Entwaldung und des Ackerbaus, der damit einhergehenden Bodenerosion und Bildung von Kolluvien, sowie durch künstliche Verebnungen wie Köhlerplätze, erschwert. In einem ersten Schritt wurden die Böden daher im Umfeld von Erzgängen mittels Pürckhauerbohrung kartiert und beprobt. Im folgenden Schritt wurden die geeigneten Untersuchungsgebiete oberhalb und unterhalb der Erzgänge beprobt und mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) auf ihre Pb-Belastung untersucht. Nur solche Untersuchungsgebiete, die einen deutlichen Anstieg der Pb-Konzentration unterhalb des Erzgangs zeigten, kamen für die folgende Detailuntersuchung in Frage. Neben den zentralen Punkten der Aufgabenstellung waren weitere Anforderungen Faktoren wie die digitale Verfügbarkeit von geologischen Karten, Bodenkarten und Höhenmodellen (DHM). Gerade die digitale Verfügbarkeit ermöglicht nach Übernahme der Gelände-Ergebnisse in das geographische Informationssystem deren Verschneidung mit Geologie, Bodentypen und den aus dem digitalen Höhenmodell (DHM) abgeleiteten Reliefparametern. Diese Anforderungen treffen für die geologische und bodenkundliche Karte sowohl für das Blatt 5716 Oberreifenberg (HLUG 1977; HLUG 1978) wie auch für das Blatt 5617 Usingen (HLUG 1977) zu. Hier wurden sechs Transekte in zwei Untersuchungsgebieten ausgewählt (Abb. 5). Des Weiteren konnte auf die Ergebnisse von geochemisch-geophysikalischen Arbeiten im Bereich von Erzgängen im Taunus zurückgegriffen werden (Klein & Martin 1965; Müller 1990; Jakobus 1992).

Das erste Untersuchungsgebiet liegt im zentralen Taunus nahe Idstein-Heftrich (Abb. 5). Untersuchungen von Müller (1990) über die gangförmigen Buntmetallvererzungen im Raum der ehemaligen Pb-Erzgrube „Hannibal“ bei Heftrich geben einen Überblick über die Lage und das Ausmaß der hier vorherrschenden Vererzungen. Neben feldgeologischen kamen hier auch geophysikalische sowie geochemische Methoden zum Einsatz. Des Weiteren liefert die Dissertation von Friedrich (1996) viele blattspezifische Details zur Verteilung der Deckschichten und zur geomorphographischen Reliefgliederung in den Untersuchungsgebieten.

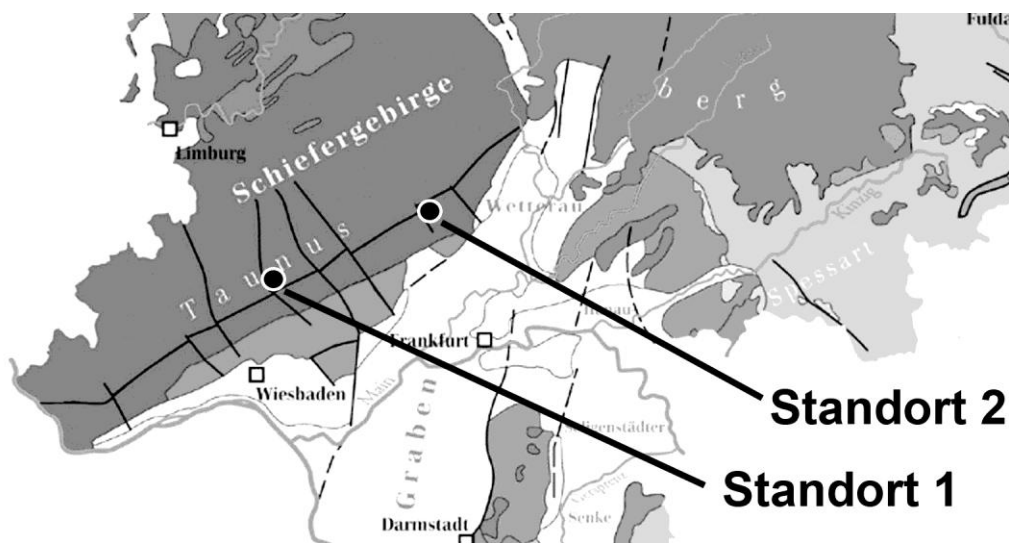


Abb. 5: Lage der Untersuchungsgebiete im Taunus (südöstlicher Teil des Rheinischen Schiefergebirges)

Das zweite Untersuchungsgebiet liegt im Osttaunus nahe Usingen (Abb. 5). Beide Untersuchungsgebiete sind Teil einer gebirgigen, teilweise von tiefen Tälern zerschnittenen Landschaft, die überwiegend bewaldet ist und nur in den Tälern landwirtschaftlich genutzt wird.

Die ausgewählten Untersuchungsgebiete liegen zwischen 280 und 430 m NN.

2.1.1 Regionalgeographische und stratigraphische Einordnung

Der Taunus als das südöstliche Teilgebirge des Rheinischen Schiefergebirges wird im Westen durch das obere Mittelrheintal begrenzt und hierdurch vom Hunsrück abgetrennt. Im Norden bildet das Tal der Lahn mit dem Limburger Becken eine scharfe landschaftliche Grenze. Im Osten grenzt die Wetterau als Teil der Hessischen Senke an das Schiefergebirge; im Süden bilden der Rheingau und das Main-Taunusvorland natürliche Grenzen (Abb. 5).

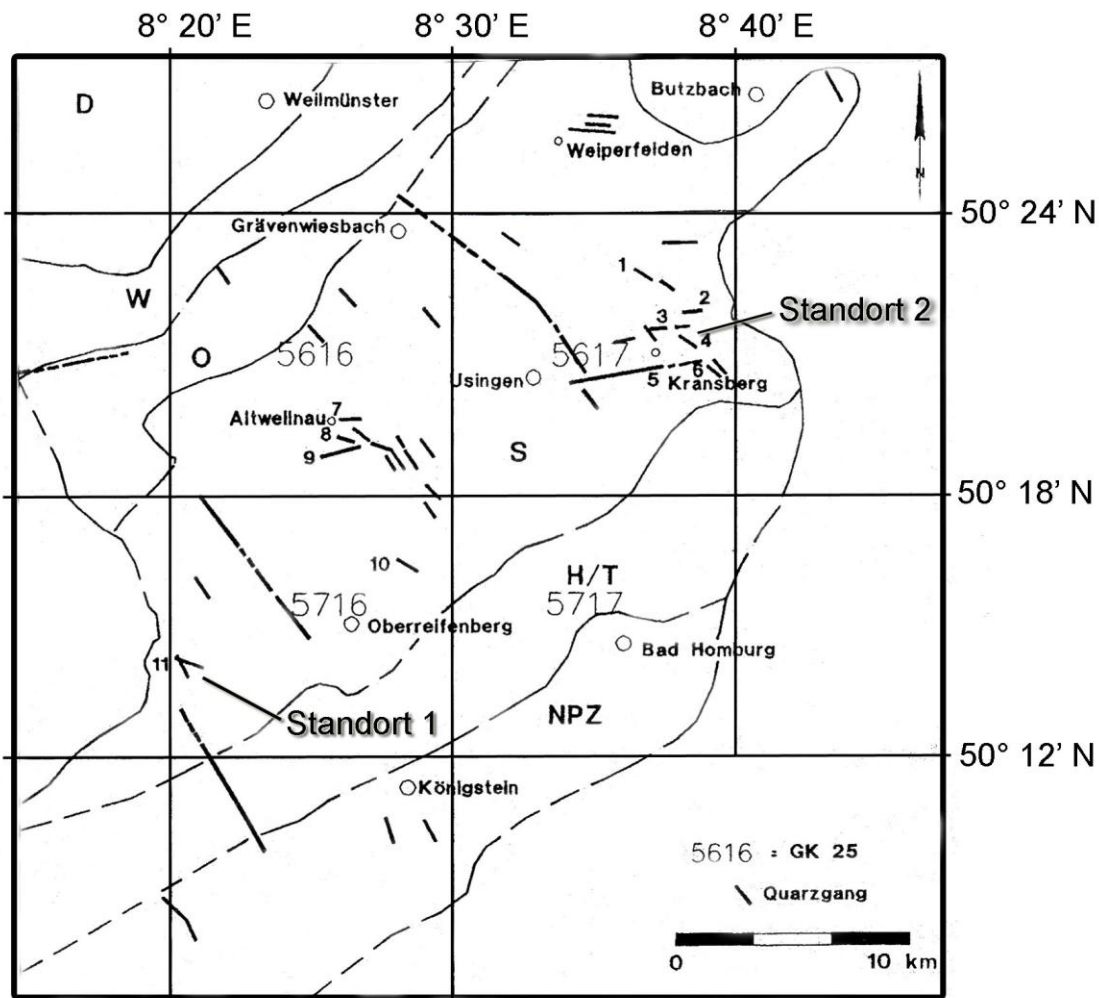
Die höchsten Erhebungen des Taunus sind der in Sichtweite des ersten Untersuchungsgebietes liegende große Feldberg (878 m).

Als Teil der Rheinischen Masse sind die Gesteine des Taunus überwiegend devonischen Alters und wurden im Rahmen der variszischen Gebirgsbildung aufgefaltet. Geologisch gesehen, lässt sich der Taunus in drei tektonisch-stratigraphische Großeinheiten gliedern (Anderle 1991). Die Hintertaunus-Einheit im Norden besteht überwiegend aus Sedimenten der Ems-Stufen des Unterdevons. Die meist schluffigen Tone sind Ablagerungen eines Flachmeeres. Stellenweise sind sogenannte Porphyroide aus rhyolithischem Material vermischt mit Schelfsedimenten eingeschaltet. Die mittlere Taunuskamm-Einheit mit ihren Bunten Schiefen, Hermeskeilschichten und dem Taunusquarzit setzt sich überwiegend aus Sedimenten des Unterdevon zusammen. Im Süden schließt die aus metamorphen Vulkaniten und metamorphen Sedimenten aufgebaute Vordertaunus-Einheit an (Kirnbauer 1998). Am Südrand von Taunus und Hunsrück treten prädevonische Ablagerungen in Form einer Phyllitzone zu Tage. Die Idsteiner Senke gliedert den Taunus regionalgeologisch in den West- und Osttaunus. Bedingt durch die Nähe zum nördlichen Oberrheingraben weist der Taunus eine starke bruchtektonische Zerlegung auf (Fuchs 1978).

Verbunden mit der postvariszischen Bruchtektonik bildeten sich im Rheinischen Schiefergebirge, vor allem im südlichen Taunus, zahlreiche hydrothermale Mineralisationen (Abb. 6). Diese mächtigen Pseudomorphosen- und Kappenquarzgänge lassen sich in ihrem Bezug zur variszischen Orogenese in prä-, syn- und postorogene Mineralisationen gliedern, bei deren Bildung das Nebengestein großräumig zersetzt worden ist (Kirnbauer et al. 1998). Bislang weitgehend ungelöst ist die Alterszuordnung der hydrothermalen Aktivität. Sicher datiert sind dagegen Gänge mit zonierten Quarzen ("Kappenquarze") und

Pseudomorphosen von Quarz nach Baryt im Taunus, welche ein Rotliegendalter besitzen (Kirnbauer et al. 1998). Die postvariszischen, erzführenden Quarzgänge beschränken sich weitgehend auf die Singhofenschichten der Ems-Stufe, die den gesamten Osttaunus nördlich des Taunushauptkamms aufbauen (Jakobus 1992). Die Erzparagenese enthält vorwiegend Galenit (PbS) and Chalcopyrite (CuFeS_2).

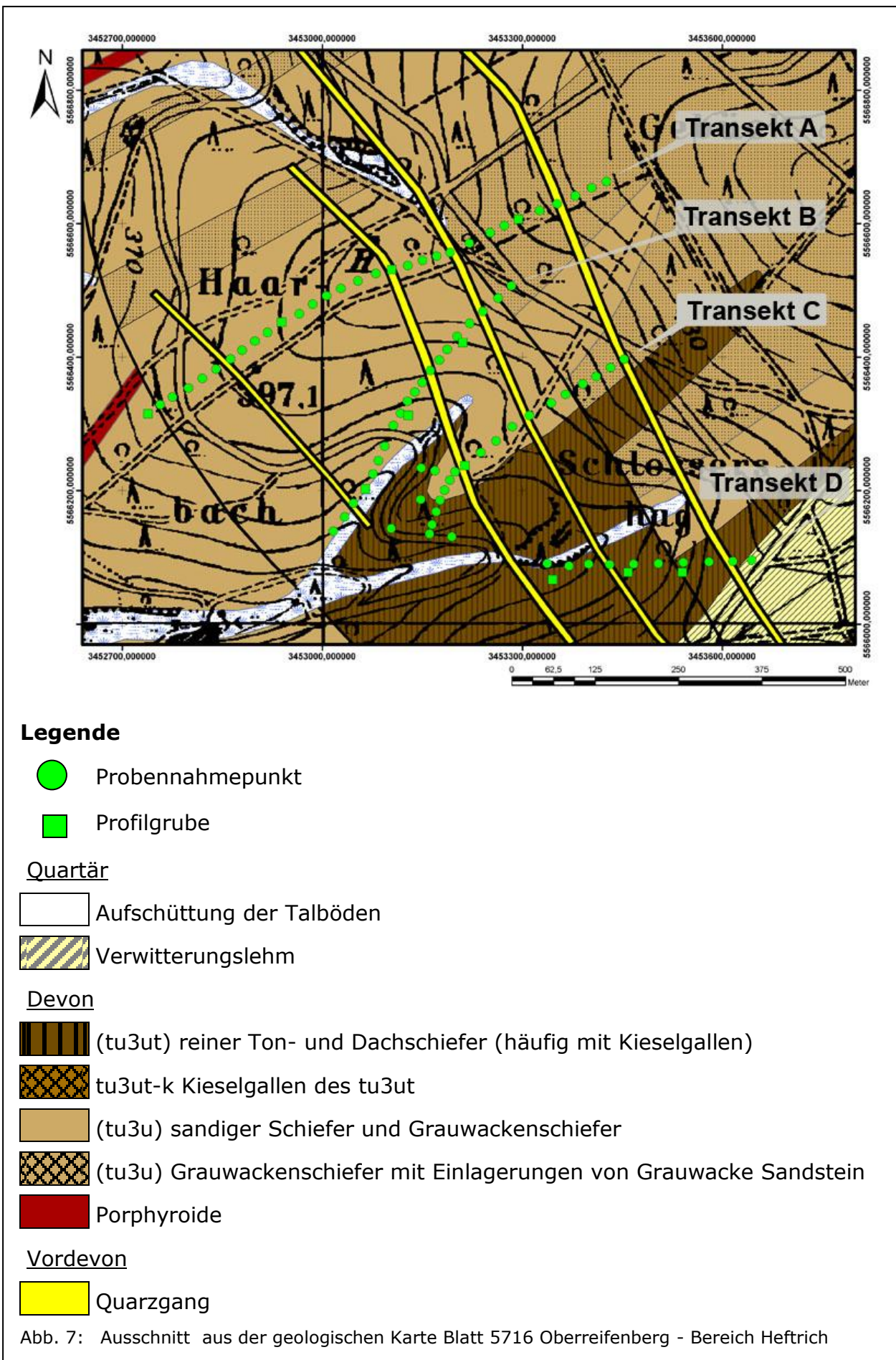
Geographisch gesehen liegt Untersuchungsgebiet 1 auf Blatt 5716 Oberreifenberg nördlich des Taunushauptkamms. Die Stratigraphie von Untersuchungsgebiet 1 weist dominant Ton- und Dachschiefer (tu3ut) sowie raue, sandige Schiefer und Grauwackenschiefer (tu3u) auf. Eingelagert in die marinen Sedimente sind Porphyroide und sowie Grauwacken und Sandstein. Diese beiden Einheiten zählen stratigraphisch zu den Singhofener Schichten der Unterems-Stufe des Unterdevons. Diese Sedimente sind relativ feinkörnig, das Korngrößenspektrum reicht von Ton bis Feinsand. Daneben treten an Störungen die schon erwähnten tertiären Quarzgänge auf. Die tektonische Überprägung bestimmt das heutige Erscheinungsbild der Sedimente, dabei treten Phänotypen von schluffigen Tonsteinen über tonige Schluffsteine bis hin zu glimmerreichen Feinsandsteinen auf. Allerdings weisen diese verschiedenen stratigraphischen Einheiten weder makroskopisch und mikroskopisch noch geochemisch signifikante Unterschiede auf (Rosenberg 1991). Nach Schulz-Dobrick & Wedepohl (1983) sind ihre relativ hohen Chrom- und Nickelgehalte typisch für das Rhenohercynikum. Im südöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes 1 sind außerdem holozäne Schuttbildungen (dal) zu finden (Abb. 7).



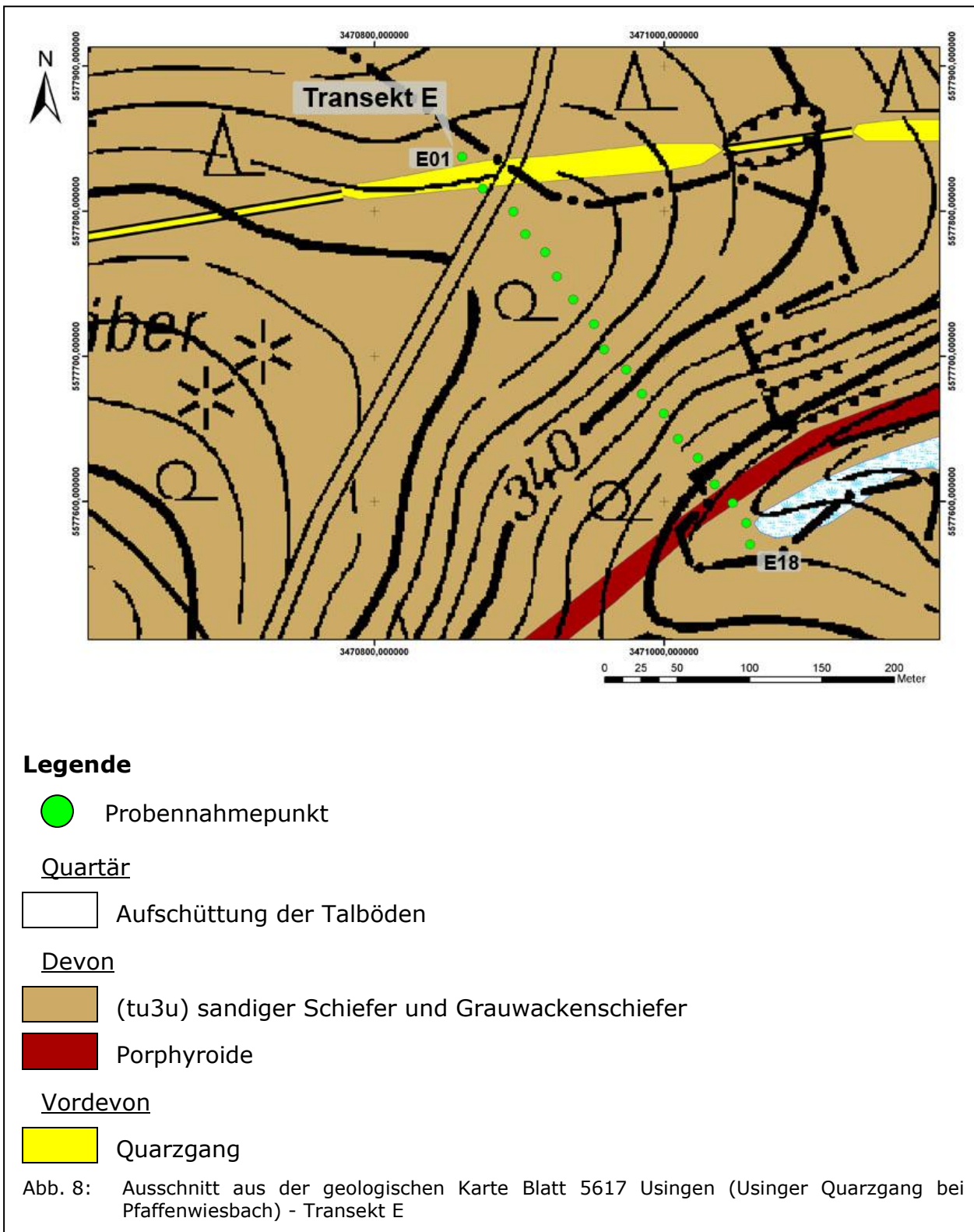
- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1) Grube „Auguste IV“ | 7) Grube „Bleizeche I“ |
| 2) Grube „Emmy“ | 8) Grube „Könisholz“ |
| 3) Grube „Hubertus“ | 9) Grube „Emilie II“ |
| 4) Grube „Wundersecke“ | 10) Grube „Faulenberg“ |
| 5) Grube „Jeanette“ | 11) Grube „Hannibal“ |
| 6) Grube „Heinrich“ | |

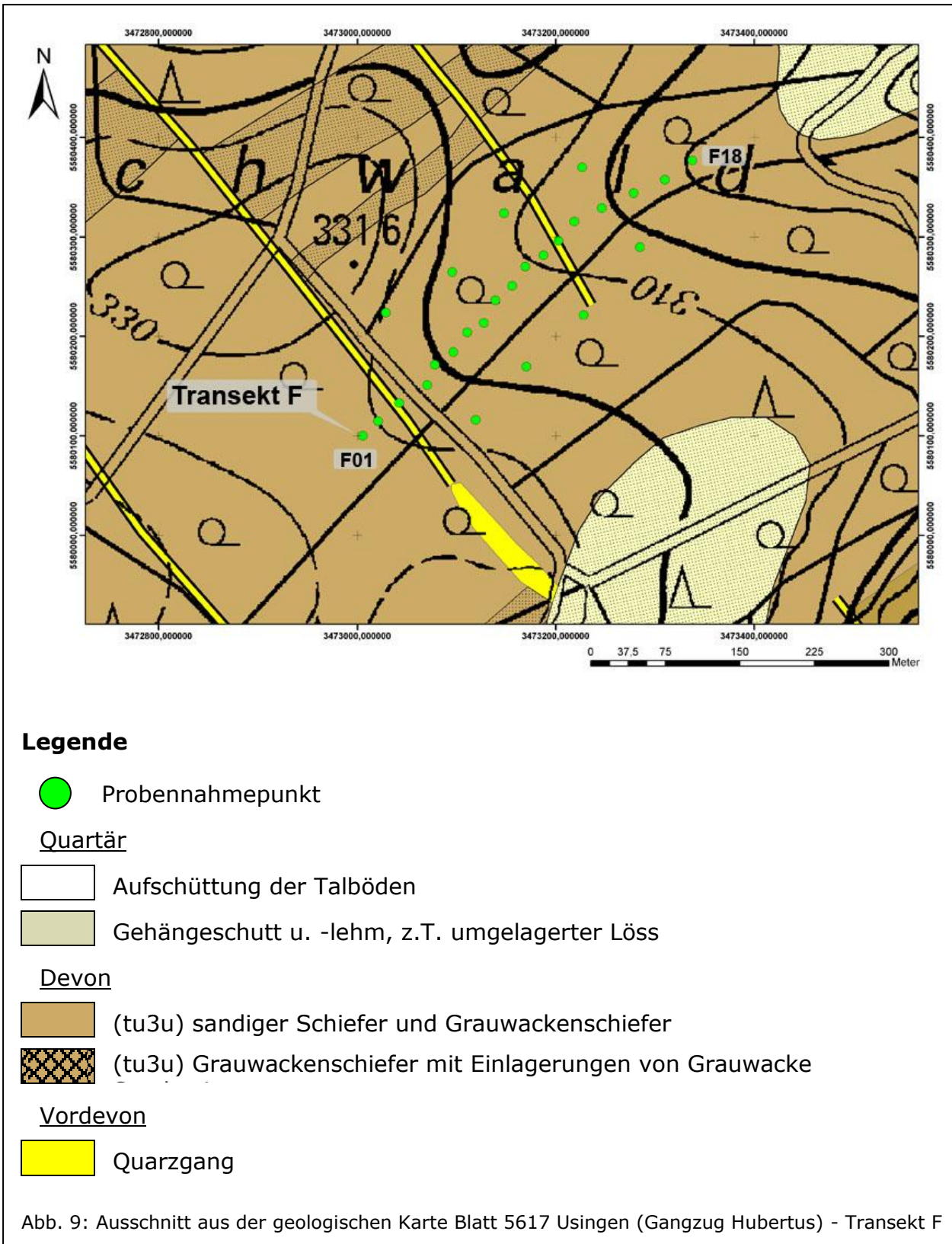
Abb. 6: Die postvariszischen Gänge des östlichen Taunus (Leveque & Jakobus 1994, verändert)

Die auf dem Blatt Oberreifenberg vorkommenden Nordwest-Südost streichenden Quarzgänge mit den Paragenesen Bleiglanz, Kupferkies, Zinkblende, Fahlerz und Pyrit wurden von Müller (1990) im Bereich der Grube „Hannibal“ untersucht. Zu Beginn des vorherigen Jahrhunderts wurden hier nicht unbeträchtliche Mengen an Pb, Zink und Silber gefördert. Die genaue Lage der Erzgänge wurde mit geophysikalischen Methoden bestätigt und deren Streichrichtung und Ausbreitung bestimmt.



Der geologische Aufbau von Untersuchungsgebiet 2 gestaltet sich im Bereich der Vererzungen „Usinger Quarzgang“ (Gangzug Jeanette) (Abb. 8) und Gangzug Hubertus (Abb. 9) ähnlich. Auch hier nehmen die Singhofener Schichten den größten Raum ein, vorwiegend die rauen, sandigen Schiefer und Grauwackenschiefer des tu3u.





2.1.2 Relief und Böden

Seit der variszischen Gebirgsbildung waren, tektonisch bedingt, vom Mesozoikum bis ins Alttertiär große Teile des Rheinischen Schiefergebirges Festland und wurden unter tropisch humidem Klima durch Einwirkung kohlensäurereicher Wässer tiefreichend verwittert und eingeebnet. Die Verwitterungstiefe reichte dabei einige zehner Meter tief. Das Relief der Arbeitsgebiete ist entscheidend geprägt durch den Gegensatz von tertiärer Verebnung und anschließender pleistozäner Taleinschneidung (Anderle 1991). In diesem stark zerschnittenen Relief sind z.T. Kerbtäler ausgebildet und die meist steilen, kurzen Hangabschnitte sind durch Dellen und Täler engräumig gegliedert (Friedrich 1996). Nördlich der Untersuchungsgebiete fällt das Relief mit Höhen von etwa 650 m NN bis auf etwa 400 m NN ab. Es verflacht dann plateauartig mit allmählich niedriger werdenden Höhen und Terrassen zum Lahntal hin. Eine Reihe von Quertälern durchzieht dieses dem Gebirge vorgelagerte Plateau.

Die Mesozoisch-Tertiäre-Verwitterungszone (MTV) bildete die Grundlage für die Bodengenese im Rheinischen Schiefergebirge. Allerdings ist die MTV durch die quartäre Solifluktion und Abspülung fast flächendeckend erodiert worden und nur an wenigen erosionsgeschützten Stellen erhalten geblieben (Felix-Henningsen 1990). Die rezent anzutreffenden periglazialen Deckschichten sind wahrscheinlich ein Produkt der letzten Kaltzeit (Rohdenburg 1965). Auch die während vorangegangener Warmzeiten gebildeten Böden sind durch Erosionsvorgänge zu Beginn der jeweils folgenden Kaltzeit ausgeräumt worden, so dass jeweils eine „frische“ Oberfläche kryoklastisch verwitterte. Deswegen kann man annehmen, dass die in den Untersuchungsgebieten anstehenden, resistenteren, hydrothermalen Erzgänge in den aktuellen Deckschichten aufgearbeitet wurden.

Obwohl der Untergrund der Untersuchungsgebiete relativ einheitlich ist, setzen sich die periglazialen Lagen jedoch nicht immer aus den kryoklastisch aufgearbeiteten frischen Ton- und Grauwackenschiefern zusammen, sondern enthalten vor allem in der Basislage häufig schluffig, toniges Zersatzmaterial (Friedrich 1996). Dieses „saprolitische“ Material ist allerdings nicht flächendeckend erhalten geblieben, sondern häufig in sehr unterschiedlichen Anteilen in den periglazialen Lagen aufgearbeitet worden. Seine Entstehung wird in das Jungmesozoikum und Alttertiär datiert (Bibus 1983; Semmel 1991).

2.2 Geländemethoden

Die Entnahme der Bodenproben innerhalb der sechs Transekte erfolgte mit Hilfe des Pürckhauer-Handbohrgerätes und aus angelegten Schürfgruben. Die Distanz zwischen den einzelnen Probennahmepunkten beträgt 10-15 m. Bei der Pürckhauer-Beprobung wurden ausschließlich B-Horizonte beprobt. Die Schürfgruben wurden parallel oder in Reihe zu den Pürckhauer-Entnahmestellen angelegt. Sie dienten gleichzeitig als Leitprofile. Gemäß AG Boden (2005) erfolgte eine vollständige Beprobung aller Horizonte. Bei der Horizontansprache und Bezeichnung der Bodentypen diente AG Boden (2005) ebenfalls als Grundlage, wie auch bei den Empfehlungen für die Verpackung, den Transport und die Lagerung der Proben.

Des Weiteren wurden Proben des anstehenden massiven Tonschiefers sowie Löss genommen. Bleiglanz (Galenit) der Grube Hannibal in Heftrich wurde freundlicherweise von Prof. Kirnbauer (Bochum) zur Verfügung gestellt. Der Galenit (PbS) enthält Beimengungen von Pyrit (FeS_2), Chalkopyrit (CuFeS_2), Fahlerz (Cu_3SbS_3 oder Cu_3AsS_2) und gediegenem Silber (Ag).

Die Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2 geben einen Überblick über die Lage der Transekte und Pürckhauer-Entnahmestellen. Die Tabellen A5 – A15 im Anhang geben einen Überblick über die Leitprofile.

2.2.1 Untersuchungsgebiet 1

Insgesamt vier leicht unterschiedlich exponierte (SW, W) Transekte innerhalb des Untersuchungsgebietes 1 (Heftrich) wurden beprobt. Sie weisen unterschiedliche Längen auf, von 300 m (Transekt D) bis 760 m (Transekt A) (Abb. 10). Die Anzahl der Probennahmepunkte liegt zwischen 10 (Transekt D) und 31 (Transekt A). In den nachfolgenden Abbildungen repräsentieren grüne Punkte die Pürckhauer-Probennahmepunkte und grüne Quadrate die angelegten Leitprofilgruben. Des Weiteren sind die hydrothermalen Erzgänge gelb markiert.

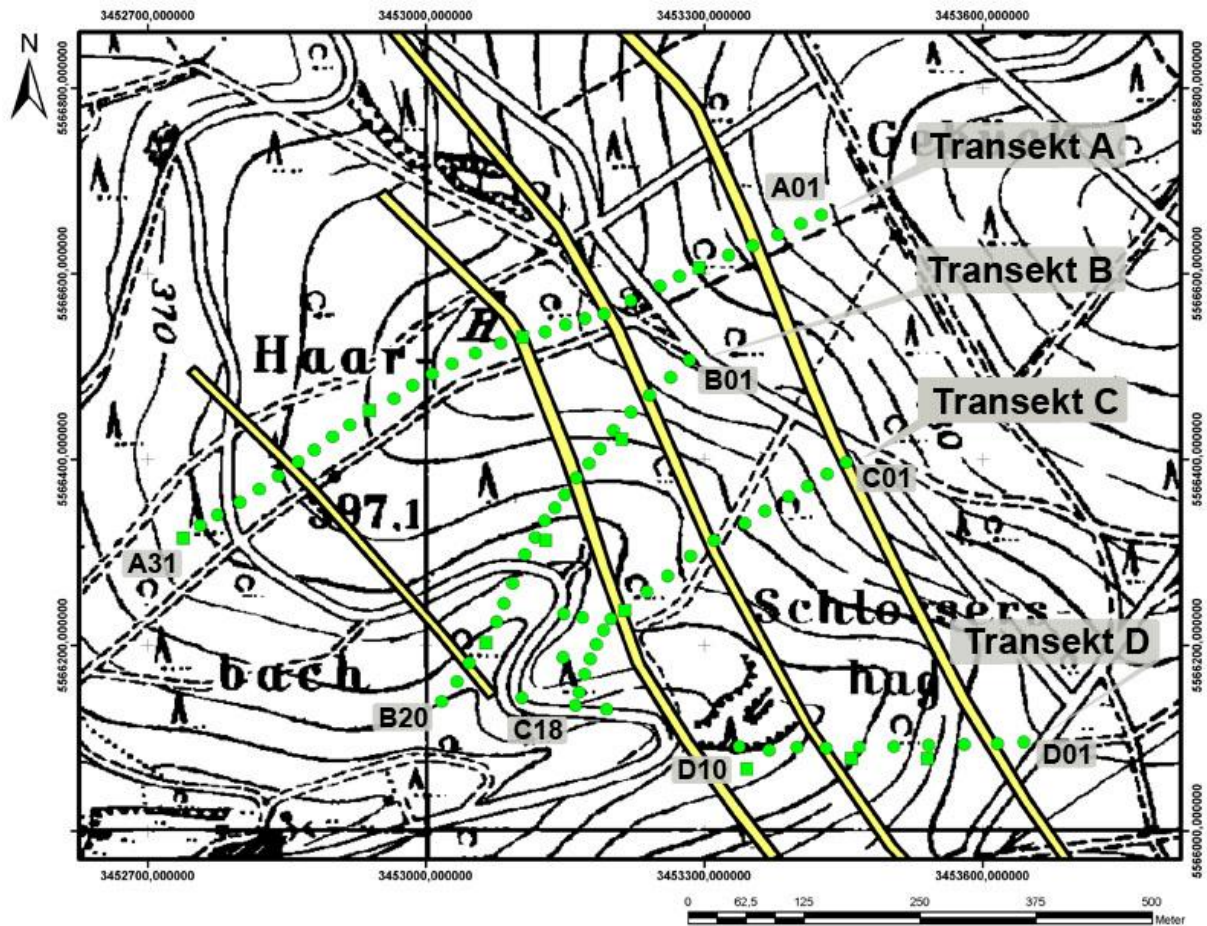


Abb. 10: Lage der Transekte A-D in Untersuchungsgebiet 1 (Heftrich) mit den Hauptvererzungszonen. Die Pürckhauer-Beprobungsstellen sind mit runden, grünen Symbolen markiert, die angelegten Leitprofil-Gruben mit eckigen, grünen Symbolen.

2.2.2 Untersuchungsgebiet 2

Im Osttaunus auf Blatt 5617 Usingen wurden die Transekte E und F angelegt. Transekt E befindet sich im Bereich des Userger Quarzgangs und ist SO-exponiert. Die Vererzung liegt im Bereich der ehemaligen Gruben „Heinrich“ und „Jeanette“ östlich Pfaffenwiesbach (Abb. 11). Transekt F kreuzt den Gangzug Hubertus bei Ziegenberg und ist NO-exponiert (Abb. 12).

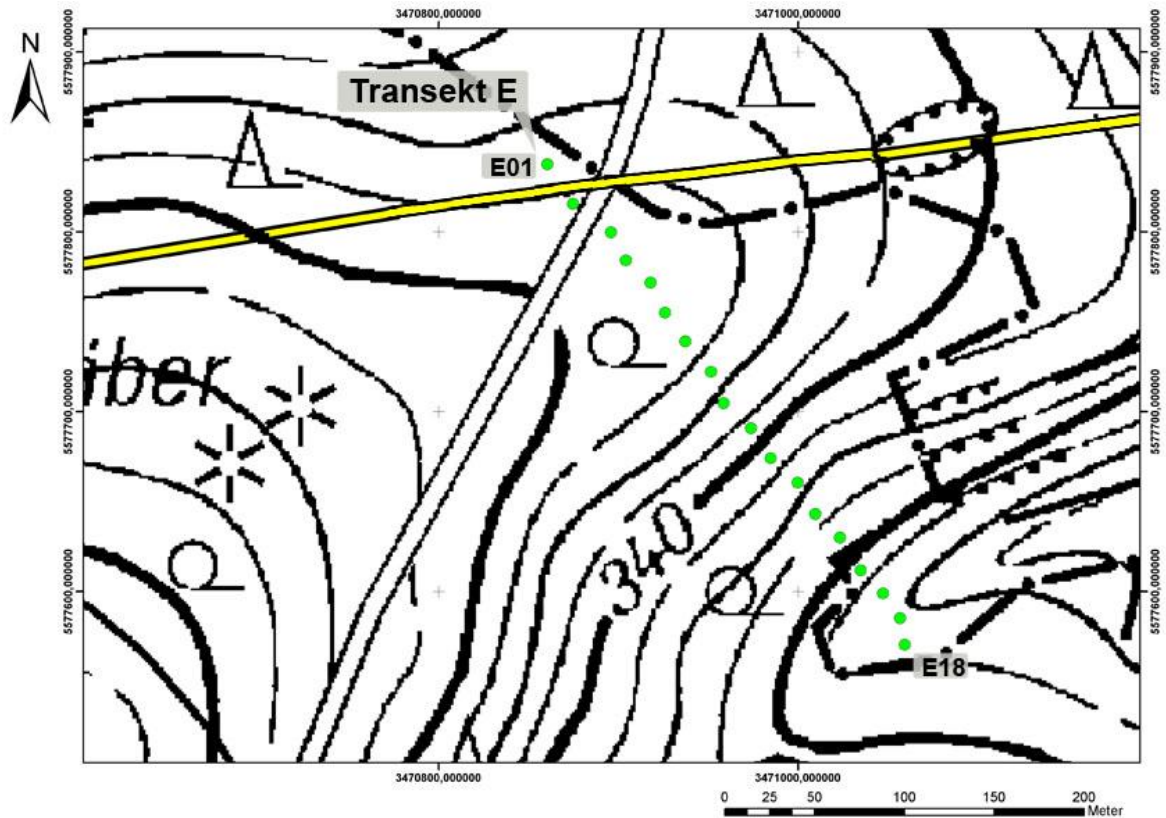


Abb. 11: Lage des Transekts E in Untersuchungsgebiet 2 (Pfaffenwiesbach) mit dem Useringer Quarzgang. Die Pürckhauer-Beprobungsstellen sind mit runden, grünen Symbolen markiert.

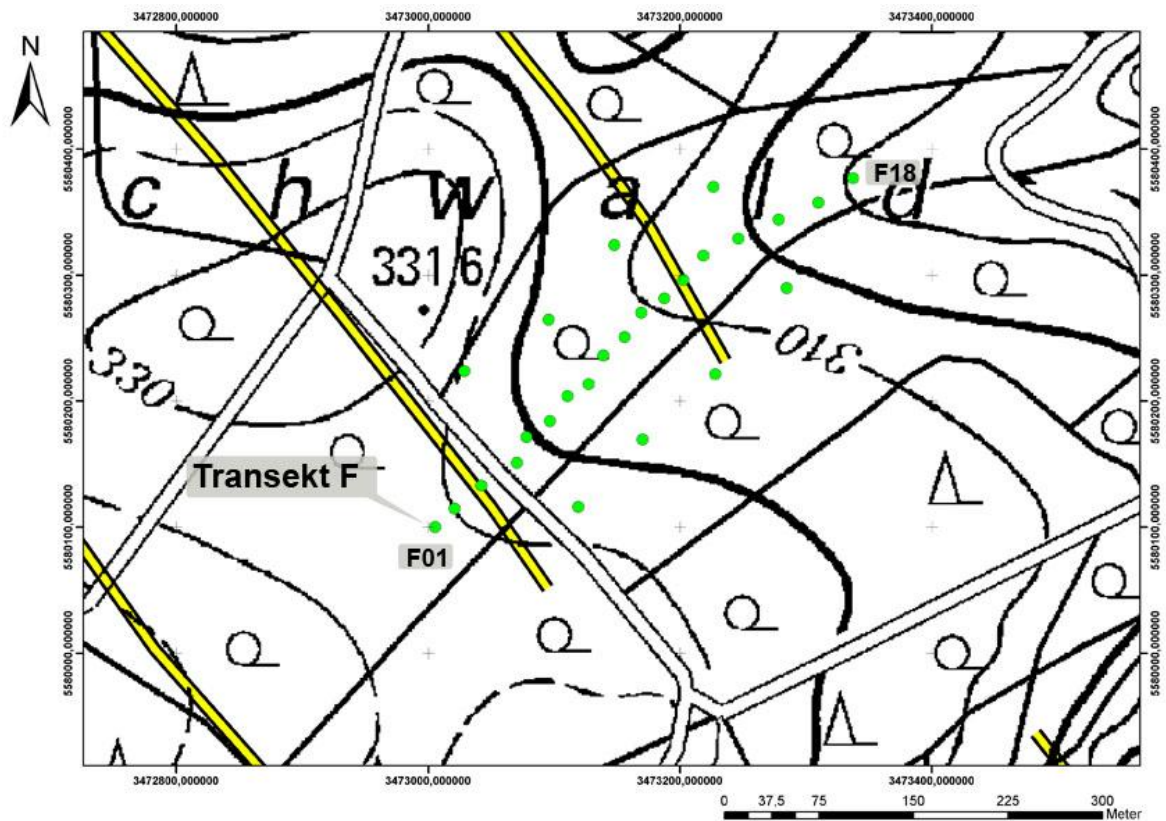


Abb. 12: Lage des Transekts F in Untersuchungsgebiet 2 (Ziegenberg) mit dem Gangzug Hubertus. Die Pürckhauer-Beprobungsstellen sind mit runden, grünen Symbolen markiert.

2.3 Labormethoden

2.3.1 Probenvorbereitung

Sowohl die durch Pürckhauer-Beprobung als auch die in den Profilen horizontweise entnommenen, gestörten Proben wurden entsprechend den Empfehlungen in Kuntze et al. (1991) und UBA (1995) aufbereitet:

1. Trocknen der Rohproben bis zur Gewichtskonstanz bei 40°C in einem Umlufttrockenschrank.
2. Vorsichtiges Desagglomerieren der Rohproben.
3. Absieben des Feinbodenanteils (<2 mm).
4. In der Steinfraktion (>2 mm) wurden eventuell vorhandene Bodenagglomerate vorsichtig zerstoßen (Reibschale) und die Probe erneut abgeseibt. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis in der Fraktion >2 mm nur noch Steine übrigblieben. Holz- und Wurzelreste wurden entfernt.
5. Wägen der Steinfraktion (>2 mm). Anschließendes abspülen mit Wasser, um eventuell auf den Steinen anhaftende Bodenpartikel- (Überzüge) zu entfernen.
6. Trocknen der Steinfraktion (>2 mm) bei 40°C und anschließend erneute Wägung. Gegenüber der ersten Wägung (vgl. Pkt. 5) auftretende Gewichtsunterschiede wurden der Feinbodenfraktion (<2 mm) zugeschlagen (vgl. Wägung Pkt. 7).
7. Bestimmen des Gewichtes der Feinbodenfraktion (<2 mm).
8. Mahlen eines Teils der Feinboden- und Steinfraktion analysenfein (<100 µm) in einer Kugelmühle (Retsch PM 200) unter Verwendung von Achatmahlgefäßen.
9. Aufbewahren der gemahlten Proben in Kunststoffdosen.

2.3.2 Physikalische Methoden

Trockensubstanz

In trockene, gewogene Porzellantiegel wurden auf der Analysenwaage etwa 5-10 g Boden eingewogen (abhängig von der zur Verfügung stehenden Probenmenge) und anschließend bei 105°C im Trockenschrank für 24 Stunden getrocknet (bis zur Gewichtskonstanz). Anschließend wurden die Tiegel im Exsikkator abgekühlt und erneut gewogen. Nach Abzug des Tiegelgewichtes ergeben sich die Nettogewichte (lutro [lufttrocken] und atro [absolut trocken]) der Bodenprobe. Aus dem Quotienten von atro zu lutro ergibt sich nach Multiplikation mit 100 der prozentuale Anteil der Trockensubstanz. Alle Einwaagen von lufttrockenen Böden wurden entsprechend dieses Wertes korrigiert.

Korngrößenbestimmung / Schlämmanalyse

Korngrößenanalysen liefern wichtige Hinweise auf eine Beimischung von Fremdmaterial in einer Schuttdecke. Insbesondere eine äolische Beeinflussung kann recht gut anhand eines gegenüber dem anstehenden Gestein erhöhten Mittel- und Grobschluffgehaltes identifiziert werden (Tahlheim 1994; Semmel 1998b).

Die Korngrößenanalysen wurden nach DIN 19683, Teil 2 (E DIN ISO 11277) (1998) durch Nasssiebung der Fraktionen 0,02 bis 2 mm und Pipettanalyse nach Köhn der Fraktionen <0,02 mm durchgeführt. Die Einwaage der zu untersuchenden Proben betrug in der Regel 10-15 g.

Zuvor wurde bei Proben mit erkennbaren Anteilen organischer Substanz (>1,5 %) eine Humuszerstörung durchgeführt. Hierzu wurden die Proben jeweils in ein Becherglas (1000 cm³) eingewogen und anschließend mit ca. 100 ml 15%ige Wasserstoffperoxid-Lösung (H₂O₂) versetzt, um die organische Substanz zu zerstören. Karbonate waren in keiner Probe enthalten.

Die Proben wurden über Nacht stehen gelassen und am nächsten Tag kurz aufgekocht. Bei stark humosen Böden (z. B. Ah-Horizonten) wurde diese Prozedur so lange wiederholt, bis der Boden hell erschien. Anschließend wurden den einzelnen, abgekühlten Proben jeweils 25 ml Dispergierungsmittel (0,4 N Na₄P₂O₇) hinzugefügt, das Ganze in Kunststoffflaschen (0,5 l) überführt, je 250

ml Aqua dest. zugegeben, verschlossen und danach 4-6 Stunden maschinell geschüttelt.

Daran anschließend wurde die vorbereitete Probe mit Trichter und Spritzflasche vollständig in das Sedimentationsgefäß (Schlammzylinder) überführt und mit Aqua dest. bis zur Markierung aufgefüllt. Danach wurde die Temperatur gemessen und die Sedimentationszeiten bestimmt. Die anschließende Sieb- und Pipettanalyse wurden gemäß den Vorgaben in Schlichting et al. (1995) durchgeführt.

2.3.3 Geochemische Methoden

pH-Wert

Der pH-Wert der Proben wurde nach DIN 19684, Teil 1 (1977) bestimmt. Hierbei wurden in den Plastikbecher 5 g Probensubstanz eingewogen und mit 12,5 ml Calciumchlorid-Lösung versetzt, auf dem Magnetrührer 5 min vermischt und anschließend eine halbe Stunde stehen gelassen. Unmittelbar vor der elektrometrischen Messung mit der pH-Elektrode wurde die Probe nochmals gründlich aufgerührt. Vor Beginn der Messungen wurde das pH-Messgerät mit zwei Eichlösungen (Pufferlösungen) im erwarteten Messbereich kalibriert.

Kohlenstoff und organische Substanz

Der Kohlenstoffgehalt und der Gehalt an organischer Substanz wurden aus zweierlei Gründen bestimmt. Zum einen war es für die nachfolgende Korngrößenbestimmung notwendig, Informationen über die organische Substanz bzw. den Humusgehalt zu erhalten, da dieser die Sedimentation beeinflusst. Liegt der Gehalt >1,5 %, sollte dieser durch Wasserstoffperoxid (H₂O₂) entfernt werden.

Die Bestimmung der organischen Substanz erfolgte über den Glühverlust. Dabei wurden etwa 5 g Feinerde (lufttrocken) in einem gewichtskonstanten, geglähten und gewogenen Porzellantiegel gefüllt, bei 105°C im Trockenschrank (über Nacht) bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und nach dem Abkühlen im Exsikkator gewogen. Dann glüht man die Probe ca. 4 Stunden bei ~450°C im

Muffelöfen bis zur Gewichtskonstanz. Hierbei verbrennt die organische Masse und in der Hauptsache entweicht CO_2 und H_2O . Nach dem Abkühlen im Exsikkator wird die Probe nochmals gewogen. Die organische Substanz entspricht dem beim Glühen erlittenen Gewichtsverlust.

Röntgenfluoreszenz-Analytik (RFA)

Totalgehalte von Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Pb, Th und U wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) an einem Spektrometer von Philips (PW1404) bestimmt.

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, englisch XRF für X-Ray Fluorescence Analysis) ist eine vergleichende Untersuchungsmethode. Um aus der gemessenen Intensität der Röntgenstrahlung auf den Gehalt des Elementes in der Probe schließen zu können, ist der Vergleich der Röntgenstrahlintensitäten von einer unbekannt Probe mit solcher von Standardproben bekannter Zusammensetzung notwendig. Eine Röntgenröhre erzeugt polychromatische Röntgenstrahlung, die auf die Probe trifft und sie zur Aussendung charakteristischer Eigenstrahlung, die für jedes Element in der Probe charakteristisch ist, anregt. Die RFA bietet die Möglichkeit zur schnellen quantitativen Bestimmung von Haupt-, Neben- und Spurenelementen.

Die Spurenelementbestimmung erfolgte an Pulverpresslingen. Dazu wurden 6g der Probe mit einigen Tropfen Harz und Härter (SCANDIA) versetzt, in einem Achatmörser homogenisiert und in einer Pressvorrichtung mit 7t Druck zu Tabletten gepresst und anschließend getrocknet

Pb-Isotopenmessung mittels ICP-MS

Die nachfolgende Beschreibung von Isotopenverhältnissen des Bleis ist in zwei Abschnitte unterteilt, den Aufschlussvorgang und die eigentliche Messung mit dem induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometer (ICP-MS) (VG Elemental Finnigan ELEMENT 2 High Performance High Resolution ICP-MS).

Die nachfolgend beschriebenen Gesamtaufschlüsse wurden mit Hilfe eines Mikrowellenaufschlussystems (CEM Mars 240/50) durchgeführt. Hierbei wurden organischen Auflagehorizonte nach Heinrichs et al. (1986) mit HNO_3 und die

Mineralbodenhorizonte mit konz. HNO_3 und konz. HF (Verhältnis 3:1) unter Druck aufgeschlossen. Neben den Bodenproben wurden unter gleichen Bedingungen Löss- und Tephra-Proben sowie Galenit und das Standard-Referenzmaterial NIST SRM 981 aufgeschlossen.

HNO_3 -Druckaufschluss für organische Auflagehorizonte

Der Salpetersäure-Extrakt ist ein oxidierender Extrakt, bei dem Nitrat zu nitrosen Gasen umgewandelt wird und der dabei abgespaltene Sauerstoff die Oxidation der aufzuschließenden Substanzen bewirkt. Organische Substanzen werden vollständig aufgeschlossen. Mineralische Substanzen werden je nach Art und Zusammensetzung teilweise ganz (z. B. leicht lösliche Oxide), teilweise jedoch unvollständig (z. B. Silikate) oder gar nicht (z. B. schwer lösliche Sulfide) gelöst. Daher ist der Extrakt nur geeignet für die Erfassung der Hauptelemente K, Na, Mg, Ca, Mn, Fe, Al, P, S sowie für die Schwermetalle im organischen Material der Probe.

Der Extrakt wurde in einem Druckgefäß mit Teflonbecher durchgeführt, wodurch mit der leicht flüchtigen Salpetersäure bei Temperaturen von 170 bis 190°C extrahiert werden konnte. Es wurden ca. 300 mg analysenfein gemahlene Probensubstanz eingewogen und mit 12 ml Salpetersäure (HNO_3) (Merck 65 % p.a., mehrfach destilliert) versetzt. Das Aufschluss-Programm führt 1600 W zu, um während einer Aufheizzeit von 15 Min. das Gemisch auf 200°C zu erhitzen. Diese Temperatur wurde 15 Min. gehalten, danach folgte eine 30 minütige Abkühlphase. Der Rückstand wurde mit einigen Tropfen Aqua dest. befeuchtet. Es wurde 1 ml HNO_3 und anschließend 10 ml Aqua dest. zugegeben. Die klaren Lösungen wurden nun mit Aqua dest. in einen 25 ml Messkolben überführt und schließlich der Extrakt auf etwaige Rückstände oder Färbung kontrolliert. Bei eventuell vorhandenen Rückständen oder Färbung wurde eine Filtration mit Blauband-Filter (Blue Ribbon) von Schleicher & Schuell (589³ ashless 100) durchgeführt. Dies war bei 4 Proben der Fall. Abschließend wurde die Lösung in VWR Schraubfläschchen Nalgene (Narrow-Mouth Bottle) 30 oder 60 ml (vorher in 10%- HNO_3 Säurebad gereinigt) abgefüllt und im Kühlschrank gelagert.

HF- HNO_3 -Druckaufschluss für Mineralbodenhorizonte

Der Salpetersäure/Flusssäure-Aufschluss verbindet die oxidierende Wirkung der Salpetersäure mit der silikatauflösenden Wirkung der Flusssäure. Dabei wird zum

einen das Nitrat zu nitrosen Gasen umgewandelt und der dabei abgespaltene Sauerstoff bewirkt die Oxidation der aufzuschließenden Substanzen. Gleichzeitig überführt die Flusssäure alle Silikate in Fluorokieselsäure, die beim anschließenden Abrauchvorgang in flüchtiges Siliziumtetrafluorid und Flusssäure zerfällt und so die Silikate aus dem System entfernt. Organische Substanzen werden in diesem Aufschluss vollständig aufgeschlossen. Zur Beschleunigung und Vervollständigung des Aufschlusses sowie zur Vermeidung von Kontaminationen wurde bei erhöhten Temperaturen (170-240°C) in verschlossenen Druckbehältern aus Kunststoff gearbeitet. Die Energiezufuhr erfolgte durch ein Mikrowellen-System.

Beim HF-HNO₃-Druckaufschluss für Mineralbodenhorizonte wurden ca. 200 mg analysenfein gemahlene Probensubstanz eingewogen und mit 9 ml Salpetersäure (HNO₃) (Merck 65 % p.a., mehrfach destilliert) versetzt. Im zweiten Schritt wurde unter einem flusssäuretauglichen Abzug weitere 3 ml Flusssäure (HF) (Merck 40 % p.a. suprapur) zugegeben. Das Aufschluss-Programm führte 1600 W zu, um während einer Aufheizzeit von 10 Min. das Gemisch auf 180°C zu erhitzen. Diese Temperatur wird 15 Min. gehalten, danach folgte eine Abkühlphase von 30 Min.

Nach dem Abkühlen und Belüften wurden die Deckel gewechselt und in die Abraucheinheit gestellt. Zum Abrauchen der Säuredämpfe wurde die verschraubte Einheit in der Mikrowelle mit Waschflaschen verbunden, die an eine Unterdruckpumpe angeschlossen sind. Die Säuredämpfe wurden im Waschsysteem nach Herstellerangaben mit gesättigter Borsäure und/oder Natronlauge neutralisiert.

Es folgte das Abrauchen der Probe bis zur Trockne. Das hierbei gewählte Temperaturprogramm sah eine Aufheizzeit von 10 Min. bei 800 W auf 100°C vor, dann wurde 5 Min. der Siedepunkt gesucht und danach eine Stunde gehalten. Die folgende Abkühlphase betrug 30 Min. Nach Kontrolle der Behälter wurde jeweils wiederum 1 ml HNO₃ hinzugegeben und der Abrauchvorgang wiederholt. Der Rückstand wurde mit einigen Tropfen Aqua dest. befeuchtet werden. Es wurde 1 ml HNO₃ und anschließend 10 ml Aqua dest. zugegeben. Die klaren Lösungen wurden nun mit Reinstwasser in einen 25 ml-Messkolben überführt. Schließlich wurde der Extrakt auf Rückstände oder Färbung kontrolliert. Bei insgesamt 17 Proben wurden vorhandene Rückstände oder Färbung durch eine Filtration mit Blauband-Filter (Blue Ribbon) von Schleicher & Schuell (589³

ashless 100) entfernt. Abschließend wurde die Lösung in VWR-Schraubfläschchen Nalgene (Narrow-Mouth Bottle) 30 oder 60 ml (vorher in 10%-HNO₃ Säurebad gereinigt) abgefüllt und im Kühlschrank gelagert.

Vor der ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Messung mit der ICP-MS erfolgte eine Verdünnung der aufgeschlossenen Lösungen mit 5% hochreiner HNO₃.

Isotopenmessung mittels ICP-MS

ICP-MS ist die Abkürzung für inductively-coupled-plasma mass-spectrometry (Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma). Diese Analysenmethode ermöglicht die Bestimmung einer Vielzahl von Elementen in relativ kurzer Zeit und ist aufgrund ihrer Nachweisstärke inzwischen eines der meist genutzten Verfahren der Spurenelementanalytik.

ICP-Massenspektrometrie beruht auf der Ionisierung des zu analysierenden Materials in einem Plasma bei etwa 5000-10000 °C. Zur Erzeugung des Plasmas wird ein hochfrequenter Strom in ionisiertes Argon induziert. Aus diesem Plasma werden die Ionen durch zwei Blenden (Sampler und Skimmer) in das Vakuum-System des Massenspektrometers überführt. Nach dem Fokussieren in der sogenannten Ionenoptik wird der Ionenstrahl im eigentlichen Massenspektrometer in Ionen unterschiedlicher Masse getrennt.

Weil jedes Element mindestens ein Isotop aufweist, dessen Masse bei keinem natürlichen Isotop eines anderen Elements auftritt, ist die Masse eine charakteristische Eigenschaft der Elemente. Dies wird sowohl zum qualitativen als auch (unter bestimmten Voraussetzungen) zum quantitativen Nachweis genutzt. Darüberhinaus ist die Bestimmung von Isotopenverhältnissen möglich.

Bei den heute üblichen ICP-MS-Geräten werden nach der Massentrennung einzelne Ionen detektiert, so dass sehr geringe Mengen eines Elements nachgewiesen werden können. Einschränkungen ergeben sich durch Gerätespezifisches Untergrundrauschen, polyatomare Interferenzen, Massendiskriminierung und Massenfraktionierung des Systems.

Genauigkeit und Präzision der Qualität sind im Messwesen zwei Kriterien zur Beurteilung einer Messung. Die Präzision wird auch als innere Genauigkeit einer Messung bezeichnet, veraltet auch Wiederholgenauigkeit genannt. Im Vergleich dazu bedeutet Genauigkeit eines Messgerätes nach DIN EN 60051 der „Grad der Übereinstimmung zwischen angezeigtem und richtigem Wert“.

2.4 Datenverarbeitung und Visualisierung (GIS)

Die im Gelände mit einem GPS (Leica GS20 Professional Data Mapper, Genauigkeit: <1m) erhobenen Felddaten wurden gemeinsam mit den standortbezogenen Labordaten im MS-Access-Datenbank basierten Programm BOFA 2.5 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) verwaltet. Die Version 2.5 des Programms BOFA-Extern ist ein Ausschnitt der zentralen Datenbankanwendung des Fachinformationssystems (FIS) Boden/Bodenschutz des HLUG und unterstützt die Erfassung und Verwaltung der Sachdaten von Kartiereinheiten bodenkundlicher Punkt- und Flächendaten (Bodengesellschaften) sowie von Flächen der Bodendauerbeobachtung. In Kombination mit Geographischen Informationssystemen können die Sachdaten mit Geometriedaten verknüpft werden.

Geografische Informationssysteme (GIS) finden heutzutage breite Anwendung. Sowohl in der raumbezogenen Wissenschaft als auch in der Stadt- und Landschaftsplanung, der öffentlichen Verwaltung, der Telekommunikation und der Logistik finden sich Einsatzmöglichkeiten (Bill, 1999). Mit einem GIS können räumliche Daten analysiert, dargestellt, verknüpft und verarbeitet werden (Barthelme 1995; Congalton & Green 1995). Daten werden hierzu auf der Grundlage eines einheitlichen räumlichen Bezugssystems (Koordinatensystem) erfasst (Augstern & Greve 1994). Die Ausprägungen eines Naturraums können durch Verschneidung verschiedener thematischer Karten (z. B. Nutzung, Fließgewässer, Topografie) und Datentypen als Informationsebenen, so genannte „Layer“, in einem GIS dargestellt und zueinander in Beziehung gesetzt werden. Jeder thematische Layer besteht aus zahlreichen Geoobjekten, die im GIS durch Punkte (z. B. Bäume), Linien (z. B. Isolinien) oder Flächen (z. B. Nutzungseinheiten) und den zugeordneten beschreibenden Eigenschaften, den Attributen (z. B. Flächengröße oder Länge) definiert sind (Uthe 1988).

Als Datengrundlage kommen vielfältige Quellformate zum Einsatz. Dies können Satellitendaten, gescannte Karten und Luftbilder, digitalisierte Karten im Vektor- oder Rasterformat, GPS-Daten, erhobene Felddaten oder Geoinformationen aus Datenbanken sein. Die grundlegende Stärke eines GIS ist seine Eigenschaft, räumliche Informationen eines Gebietes, die in Form von Karten in einzelnen thematischen Layern vorliegen, zu einer Gesamtaussage zusammenführen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Desktop-GIS ArcGIS 9.2 der Firma ESRI als Werkzeug eingesetzt.

Die zugrunde liegenden Daten werden in Raster- und Vektordaten unterteilt. Vektordaten liegen in ArcGIS im proprietären Shape-Format vor. Sie werden eingesetzt, um diskrete Objekte eines Gebietes in einer Karte als Polygone, Linien oder Punkte darzustellen (Bill & Fritsch 1991). Im Vektormodell wird jedes Objekt über x, y - Koordinaten definiert, diese Punkte werden im GIS zu Linien oder Flächen (Polygonen) verbunden. Die so entstandenen Geometrien, die beispielsweise geologische Einheiten oder Bodentypen darstellen können, bezeichnet man als Geoobjekte. Jedem Geoobjekt sind Attribut- oder Sachdaten zugeordnet, welche die Eigenschaften des Objektes beschreiben. Die Sachdaten werden in Tabellen oder Datenbanken abgelegt und sind mit dem Geoobjekt verknüpft. Das Rastermodell liegt in ArcGIS im Grid-Format vor, wobei Geoobjekte in einzelne Zellen bzw. Pixel aufgerastert sind. Als geometrisches Grundelement stellt die Rasterzelle eine Fläche von einheitlichem Informationsgehalt dar, wobei sie innerhalb einer Matrix durch eine bestimmte Position auf einer Zeile und einer Spalte definiert ist. Als Grundlage für die Ableitung von Reliefparametern nach reliefanalytischen, bzw. geomorphologischen Kriterien dient das digitale Geländemodell (DGM). Goodchild (1994) definiert ein DGM als numerisches Modell der Erdoberfläche. Dabei wird die Geländeoberfläche mittels einer Anzahl von Höhenangaben (z) und entsprechenden Koordinaten (x, y) repräsentiert. Mit Hilfe eines DGM können aus Punktdaten flächendeckend die Höhendaten eines Gebietes interpoliert werden. Oft wird auch der Begriff digitales Höhenmodell (DHM) benutzt. Dieses durch Interpolationsverfahren aus digitalen Höhendaten berechnete Datenmodell gibt die Höhe einer Oberfläche inklusive aller auf ihr vorhandenen Objekte (Vegetation und Bebauung) wieder. Für Hessen liegt das DHM in der Auflösung 20×20 m vor. Die Höhengenaugigkeit, hier unterschieden zwischen bewuchsfreien, weitgehend gleichförmigen Gebieten und Waldgebieten, variiert zwischen $\pm 0,5$ -2 m. Die Herstellung der Basishöhendaten für das von den Landesvermessungsämtern angebotene digitale Geländemodell erfolgt in Hessen durch photogrammetrische Messungen aus Luftbildern, sowie durch Abdigitalisierung von Höhenlinien.

Die Ermittlung von modellrelevanten Parametern ermöglicht es, die Verbreitung und Transportweite periglazialer Deckschichten steuernden Faktoren, zu spezifizieren.

Unter solchen Parametern werden reliefbedingte (Hangneigung, Exposition, etc.), geologische (Geologie, Tektonik, etc.) oder vegetative Faktoren (Landnutzung) verstanden.

Das Relief, als Grenzfläche zwischen Pedo-/Lithosphäre und Atmo-/Hydrosphäre, kann als Ergebnis von endogenen und exogenen geomorphodynamischen Prozessen betrachtet werden (Leser 1997). In Bezug auf Hang- und Massenbewegungen stellt das Relief einen wichtigen Faktor da, der gerade während der Pleistozäns Ausmaß und Bewegungsgeschwindigkeit der Solifluktion beeinflusst hat (Friedrich 1996). Wichtige Reliefparameter, die bei Massenbewegungen wie die periglazialen Solifluktionsdecken eine Rolle spielen, sind Hangneigung, Wölbung und Exposition (Tab. 1).

Voraussetzung für die digitale Reliefanalyse ist zunächst eine Parametrisierung des Reliefs. Hierbei wird ein beliebiger Punkt im Gelände (oder eine Rasterzelle im Modell) in Bezug zu seinen Nachbarn (Nachbarzellen) beschrieben. Die Geländeoberfläche wird dabei in kleinste Reliefeinheiten aufgeteilt, die bei der digitalen Reliefanalyse in der Regel der Rasterzelle als kleinste Flächeneinheit entspricht. Somit ist der Maßstab der lokalen Reliefbetrachtung von der Auflösung des DGM abhängig. Nach Speight (1974) werden Parameter, die das Relief in seiner Form (Reliefgeometrie) zu anderen Reliefeinheiten beschreiben, auch als primäre Parameter bezeichnet (Tab. 1). Diese sog. Reliefparameter können direkt aus den Höhenwerten eines DGM abgeleitet werden.

Die Reliefgeometrie einer Rasterzelle definiert sich folglich durch deren Neigung, Exposition und Krümmung (Wölbung). Von Speight (1974) wird der Begriff Wölbung genutzt, von mir im Folgenden allerdings der Begriff der Krümmung verwendet. Nach Friedrich (1996) beschreibt die Krümmung die Wölbung der Erdoberfläche im geomorphographischen Sinne. Obwohl zur Beschreibung der Krümmung eines Reliefformelements in vielen Arbeiten die Komponenten Horizontal- und Vertikalkrümmung genutzt werden, ist laut Friedrich (1996) die Horizontalkrümmung ungeeignet die Krümmung einer Oberfläche zu beschreiben. Friedrich (1996) empfiehlt daher die Verwendung der Querkrümmung.

Dahingehend ist in Tabelle 1 der Begriff Wölbung gegen Krümmung ausgetauscht und um die Querkrümmung und die Massenbilanz erweitert worden.

Tabelle 1: Primäre Reliefparameter (nach Speight 1974, verändert)

Reliefparameter	Definition	Bedeutung
Reliefgeometrie		
Hangneigung	Neigungswinkel in Richtung des stärksten Gefälles	Abflussrate, Fließgeschwindigkeit, Verdunstung, Vegetation, Bodenfeuchte
Exposition	Neigungsrichtung (Richtung des stärksten Gefälles)	Abflussrichtung, Sonneneinstrahlung, Evapotranspiration, Verteilung der Vegetation
Vertikalkrümmung	Wölbung in Richtung des stärksten Gefälles (erste Ableitung der Hangneigung)	Abflussbeschleunigung, Erosions- und Akkumulationsrate
Horizontalkrümmung	Wölbung entlang der Höhenlinien	Konvergenz/Divergenz des Abflusses, Bodenfeuchteverteilung
Querkrümmung		Charakterisierung der Relief-Deckschichten-Beziehung
zusammengesetzte geomorphometrische Parameter		
Divergenz/Konvergenz-Index (Massenbilanz-Index)	Zusammengesetzt aus Vertikal-, Querkrümmung und der Hangneigung	Eigenschaften periglazialer Lagen; Überblick über reliefbedingten Zufluss oder Abfluss

Hangneigung

Die Hangneigung wird definiert als die Neigung eines Hanges in Bezug zu einer horizontalen Ebene. Mathematisch betrachtet ist die Hangneigung die erste Ableitung der Geländeoberfläche.

Die Hangneigung steuert die gravitative Verlagerung von Wasser und Solummaterial und ist der wichtigste Parameter für die Modellierung von hydrologischen und geomorphologischen Prozessen (Behrens & Scholten 2002).

Exposition

Die Exposition eines Hanges bezeichnet die horizontale Lage der Hangneigung zur Himmelsrichtung (0-360°). Wie die Hangneigung stellt sie eine erste Ableitung der Geländeoberfläche dar (Burrough & McDonnell 1998).

In Verbindung mit der Hangneigung beeinflusst die Exposition die Strahlungsbilanz und Temperaturverteilung der Hangoberfläche, die Richtung des

Abflusses, die Evapotranspiration, und damit indirekt die Vegetation und den Bodenwasserhaushalt. Nach Friedrich (1996) hat die Hangexposition maßgeblich Einfluss auf die Verteilung pleistozäner Solifluktuationsprozesse in periglazialem Klima. Bedingt durch eine veränderte Strahlungsintensität nimmt die Bedeutung der Exposition für ökologische Fragestellungen allerdings mit sinkender Hangneigung ab (Kleefisch & Köthe 1993; Wilson & Gallant 2000). Expositionsunterschiede spielen außerdem für die lokale Lössmächtigkeit eine erhebliche Rolle.

Krümmung

Nach Friedrich (1996) beschreibt die Krümmung die Wölbung der Erdoberfläche im geomorphographischen Sinn (Abb. 13). Die Krümmung wird als zweite Ableitungen von Geländeoberflächen, die Hang- bzw. Oberflächenformen beschreiben, bezeichnet und stellt die Änderung der Neigung bzw. die Änderung der Exposition dar (Burrough & McDonnell 1998; Behrens & Scholten 2002). Zur Beschreibung der Oberflächenform, werden Begriffe wie divergent (konvex), gestreckt oder konvergent (konkav) gebraucht.

Für statistische Auswertungen ist es sinnvoller die Krümmung als Kehrwert des Wölbungsradius ($1/m$) anzugeben, da die Extrema (stark konkave und konvexe Formen mit kleinen Krümmungsradien) im Wertebereich dicht beieinander liegen (Friedrich 1996).

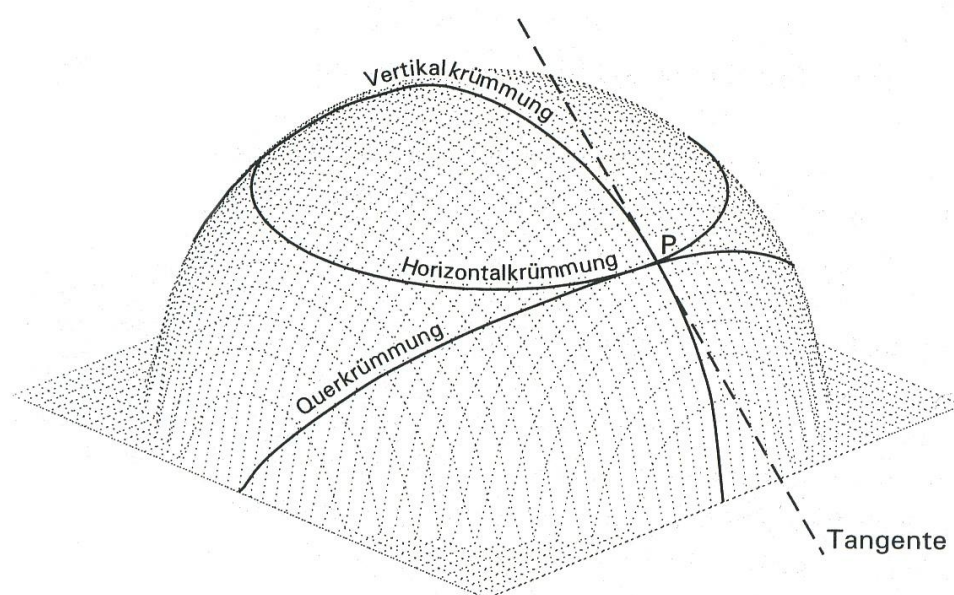


Abb. 13: Vertikal-, Horizontal- und Querkrümmung, dargestellt an einer Halbkugel als Oberflächenform (aus Friedrich 1996)

Vertikalkrümmung

Die Veränderung der Neigung wird als Vertikalkrümmung bezeichnet (Tab.1 und Abb. 13). Sie beschreibt die Krümmung in Richtung des stärksten Gefälles, bzw. die Winkeländerung der Hangneigung mit der Entfernung und kann als Maß für die Abflussbeschleunigung und damit auch für die Erosions- und Akkumulationsrate betrachtet werden (ESRI 2000).

Per Definition haben konvexe Hangabschnitte positive Vorzeichen und konkave negative (Young 1972), gestreckten Hangformen tendieren gegen 0. In vertikal konvexen Hangabschnitten kommt es zu beschleunigten Wasser- und Stoffflüssen, in vertikal konkaven zu verlangsamten.

Horizontalkrümmung

Die Horizontalkrümmung lässt sich als Veränderung der Exposition einer gewölbten Oberflächenformen bezeichnen und beschreibt im Stoffhaushalt den Prozess des Zusammen- bzw. des Auseinanderfließens. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf die Art des Abflusses (divergent oder konvergent) und die reliefbedingte, relative Verteilung des Wassers im Boden ziehen. Das heißt, in konkaven Hangbereichen (Hangmulden) ist ein potentiell höherer Bodenwasserzufluss und in konvexen Hangbereichen (Hangrücken) ein erhöhter potentieller Abfluss zu erwarten.

Divergenz ist hier mit einem positiven Vorzeichen versehen (+), Konvergenz mit einem negativen (-), gestreckte Hangformen tendieren wieder gegen 0.

Querkrümmung

Nach Friedrich (1996) ist die Querkrümmung eine wesentliche Größe zur Charakterisierung der Relief-Deckschichten-Beziehung. Die Querkrümmung leitet sich aus der Horizontalkrümmung im Sinne von Bauer et al. (1985) und der Steigung ab. Auch hier sind divergente Bereiche mit einem positiven Vorzeichen versehen (+), konvergente mit einem negativen (-) und gestreckte Hangformen um 0 angesiedelt.

Divergenz/Konvergenz-Index (Massenbilanz-Index)

Der Divergenz/Konvergenz-Index beschreibt einen zusammengesetzten geomorphometrischen Parameter, der sich aus zwei Krümmungen (Vertikal- und

Querkrümmung) und der Hangneigung berechnen lässt. Dieser Parameter wurde speziell entwickelt, um Eigenschaften periglazialer Lagen zu beschreiben Friedrich (1996). Ähnlich der Krümmung zeigt der Index die Oberflächenform auf und gibt einen Überblick über reliefbedingten Zufluss oder Abfluss.

2.5 Mischungsmodelle und Statistische Datenanalyse

Zur Berechnung des erzbürtigen Pb-Beitrags zum Pb-Gesamtgehalt in einer beliebigen Probe kam das in Gleichung 1 beschriebene Zwei-Komponenten-Mischungsmodell zum Einsatz.

$$a = \frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{ges}} - {}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{HG}})}{({}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{erz}} - {}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{HG}})} \quad (1)$$

Hierbei ist a der Beitrag des erzbürtigen Bleis (Pb_{erz}) zum Pb-Gesamtgehalt (Pb_{ges}). ${}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{ges}}$ repräsentiert das stabile Pb-Isotopenverhältnis des Gesamtleis in der untersuchten Probe, ${}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{HG}}$ den Pb-Hintergrundgehalt im Ausgangssubstrat (eine Mischung aus dem anstehenden Tonschiefer und Löss) und ${}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{erz}}$ das Pb-Isotopenverhältnis des erzbürtigen Pb.

Zur Bestimmung des Anteils von anthropogenem, atmosphärischem Pb im Verhältnis zum Gesamt-Pb in den Auflage- und Mineralbodenhorizonten kam ein weiteres Zwei-Komponenten-Mischungsmodell zum Einsatz (Gleichung 2).

$$a = \frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{ges}} - {}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{HG}})}{({}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{poll}} - {}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{HG}})} \quad (2)$$

In Gleichung 2 ist a der Beitrag des eingetragenen Bleis (Pb_{poll}) zum Pb-Gesamtgehalt (Pb_{ges}). Dies wird berechnet aus dem ${}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}$ -Verhältnis des eingetragenen Signals (${}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{poll}}$) (anthropogenes Pb), dem Pb-Hintergrundgehalt ${}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{HG}}$ des Ausgangssubstrats (repräsentiert durch eine Mischung aus anstehendem Tonschiefer und Löss) und dem Pb-Gesamtgehalt ${}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}_{\text{ges}}$ in der untersuchten Probe. Als anthropogenes ${}^{206}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}$ -Verhältnis wurde das leichteste O-Horizont Signal verwendet.

Zur Bestimmung des Beitrags des anstehenden Tonschiefers, des Löss und der Laacher-See-Tephra in Bezug auf die Gesamtgehalte einer untersuchten Probe kam ein Drei-Komponenten-Mischungsmodell zum Einsatz (Gleichung 3 und 4). Das Drei-Komponenten-Mischungsmodell nutzt hierbei die Massenbalance der Tracer A (Zr/Cr-Verhältnis) und B (Nb/Cr-Verhältnis). Angenommen a , b und c stellen die Beiträge des anstehenden Tonschiefers, des Lösses bzw. der Laacher-

See-Tephra dar, lassen sich die Gehalte x und y der beiden Tracer einer untersuchten Probe nach den Gleichungen 3a und b berechnen:

$$x = aA_{TS} + bA_{Löss} + cA_{LST} \quad (3a)$$

$$y = aB_{TS} + bB_{Löss} + cB_{LST} \quad (3b)$$

A_{xx} und B_{xx} mit $xx = \text{Tonschiefer (TS), Löss oder LST}$ repräsentieren das Verhältnis der Tracer-Gehalte einer Probe. Die Anteile der einzelnen Komponenten der Mischung einer untersuchten Probe lassen sich nach den Gleichungen 4a - c wie folgt berechnen:

$$a = \frac{- (X - A_{LST})(B_{Löss} - B_{LST}) + (y - B_{LST})(A_{Löss} - A_{LST})}{(A_{Löss} - A_{LST})(B_{TS} - B_{LST}) - (B_{Löss} - B_{LST})(A_{TS} - A_{LST})} \quad (4a)$$

$$b = \frac{(X - A_{LST})(B_{TS} - B_{LST}) - (y - B_{LST})(A_{Löss} - A_{LST})}{(A_{Löss} - A_{LST})(B_{TS} - B_{LST}) - (B_{Löss} - B_{LST})(A_{TS} - A_{LST})} \quad (4b)$$

$$c = 1 - a - b \quad (4c)$$

Für die statistische Datenanalyse wurde SPSS 14.0 (SPSS Inc. 2004) genutzt. Da die gewonnenen Daten unterschiedlichen Skalenniveaus besitzen, kamen verschiedene statistische Analysemethoden zum Einsatz.

In einem ersten Schritt wurden die Datensätze mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf ihre Normalverteilung getestet. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha < 0,05$ gesetzt. Alle Tests wurden einseitig durchgeführt. Korrelationsanalysen folgten der Methode der kleinsten Quadrate (least-squares method) (Hartung 2007). Liegen die Daten in unterschiedliche Skalenniveaus (hier metrische und nominale Daten) vor, wurden Zusammenhänge und Signifikanzen mittels Kontingenztafeln (Kreuztabellen) errechnet. Dieses Verfahren wurde eingesetzt um den Zusammenhang zwischen den morphologischen Eigenschaften und der periglazialen Transportweite zu betrachten. Das entscheidende Maß für die Signifikanz ist hierbei Cramer's V, der auf dem χ^2 test basiert und zwischen 0 und 1 liegt (Backhaus 2006). Ein Wert $\geq 0,6$ kann als relativ starker Zusammenhang interpretiert werden (Hartung 2007).

Um die Menge der untersuchten Variablen und Proben zu ordnieren und Zusammenhänge zwischen Variablen aufzuspüren, wurde eine Faktorenanalyse verwendet. Die Hauptkomponentenanalyse als ein Verfahren der multivariaten Statistik dient der Reduktion bzw. Bündelung von Variablen (Backhaus 2006) bei der Mischungsmodellberechnung. Für die Hauptkomponentenanalyse wurden die Elementgehalte durch Subtraktion des Mittelwertes normiert und durch Division durch die Standardabweichung standardisiert (z-Transformation). Es wurden nur Hauptkomponenten mit Eigenwerten >1 berücksichtigt. Zur orthogonalen Rotation der Vektoren wurde Kaisers Varimax-Methode verwendet. Hierbei wird iterativ ein neuer Satz Komponentenachsen bestimmt, so dass möglichst viele Werte-Projektionen maximal oder null werden (Hartung 2007). Im folgenden Schritt erfolgt die Interpretation der ermittelten Faktoren. Je höher die Faktorenladung einer Variablen ist, desto besser wird sie von dem Faktor beschrieben. Bei der Darstellung der Spurenelementgehalte im Faktorenkoordinatensystem können die Faktorenladungen genauso wie die Variablen interpretiert werden.

2.6 Qualitätskontrolle

Feldarbeiten

Die Aufnahme und Ansprache der Bodentypen erfolgte nach Standardwerken (Schlichting et al. 1995; AG Boden 2005), dennoch lassen sich einige mögliche Fehlerquellen identifizieren.

Die Bodenfarbe der Bodenproben wurde im feldfrischen Zustand beschrieben, was jedoch, aufgrund des individuell verschiedenen Wassergehaltes der jeweiligen Bodenprobe, unsicher ist. Das Gefüge war nur in Aufgrabungen sicher bestimmbar, nicht jedoch in den Bohrstockbeprobungen.

Die Probenahme selbst ist vermutlich die größte Fehlerquelle im Rahmen der Felduntersuchungen und wurde entsprechend mit größtmöglicher Sorgfalt durchgeführt. Trotzdem kann es z. B. bei Beprobung eines geringmächtigen Horizonts zur Vermischung mit Material des hangenden oder liegenden Horizonts gekommen sein. So weist die Probe (A08 B) einen anthropogenen Pb-Anteil von 31% auf, was auf eine etwaige Verunreinigung bei der Probennahme zurückgeführt werden kann.

Laboruntersuchungen

Org. Substanz

Der Gehalt an organischer Substanz wurde mittels Glühverlust bestimmt, was dem Verfahren der nassen Veraschung in der Genauigkeit allerdings unterlegen ist. Der Wassergehalt (Restwasser, Kristallwasser) der Bodenproben sowie die mögliche Verflüchtigung von Hg, As und Sb beim Glühen können in Fehlbestimmungen resultieren. Dadurch können u.U. zu hohe organische C-Gehalte bestimmt worden sein.

Texturbestimmung

Organische Substanz $>0,2$ % stört die Sedimentation sowie die Siebung und muss vorher zerstört werden. Wie in 2.3.2 beschrieben, wurde die organische Substanz mit Wasserstoffperoxid-Lösung zerstört.

Ein nicht zu korrigierender methodischer Fehler beruht in der Annahme, dass die Einzelkörner die Form idealer Kugeln besitzen und eine Dichte von $2,65 \text{ g/cm}^3$

aufweisen. Dieser Wert entspricht der mittleren Dichte von Quarz, dem quantitativ wichtigsten Mineral vieler Böden.

RFA

Die Genauigkeit der RFA-Messungen wurde durch Kalibration mit 54 zertifizierten Standard-Referenz-Materialien (nach Govindaraju 1989) gewährleistet (Tab. 2). Zur Überprüfung der Präzision diente eine der Tonschiefer-Proben (A06 mCn), die nach ca. jeder 40. Probe wiederholt gemessen wurde. Alle untersuchten Proben wiesen Gehalte oberhalb der Nachweisgrenze (LLD) der RFA auf (Tab. 2).

Tabelle 2: Überblick über die Nachweisgrenzen und Fehlerbetrachtung der Spurenelementkalibration für das RFA-Spektrometer, sowie für die Referenzprobe (A06 mCn)

Element	LLD ^{a)} (ppm)	mittl. Gehalt Standards ^{b)} (ppm)	mittl. Gehalt Referenz-Probe (A06 mCn) (ppm)	Stabw. Standards (ppm)	Stabw. Referenz- Probe ^{c)} (ppm)
Sc	2,7	32	11,75	1,6	2,50
V	6,1	317	115,75	8,1	9,95
Cr	5,3	289	157,00	6,8	27,99
Co	2,2	45	17,75	2,1	1,26
Ni	3,7	121	65,00	3,5	7,53
Cu	1,6	100	14,00	2,9	1,41
Zn	1,1	224	73,50	3,6	5,26
Ga	1	39	19,75	1	2,50
Rb	1,2	152	123,25	3,7	10,14
Sr	1,5	403	33,50	5,4	5,00
Y	1,3	184	31,75	1,6	5,91
Zr	0,9	780	282,75	11	41,96
Nb	1,1	110	20,00	1,3	3,65
Ba	10,5	800	379,00	22	27,24
Pb	2,7	39	16,75	2,2	2,22
Th	1,7	18,5	12,95	1,6	2,88
U	1,1	4,6	3,08	1,1	0,95

a) LLD = lower limit of detection:
$$LLD = \frac{n\sqrt{2}}{s} \times \sqrt{\frac{r_b}{t_b}}$$

b) Verwendete Standards:

BIR-1	W-2	RGM-1	MAG-1	STM-1	SCO-1	DNC-1
SY-2	QLO-1	SGR-1	G-2	W-1	BCR-1	GSN
GSS-3	SO-4	AGV-1	BR	GSP-1	DR-N	BE-N
BHVO-1	NIM-G	NIM-S	SDC-1	JG-2	JB-2	AN-G
GSS-2	GSS-4	GSR-1	GSR-6	GSD-02	GSD-08	GSD-09
GSD-12	GSS-5	GSS-6	GSS-1	GSR-4	BCR-32	NBS278
NBS688	BX-N	AC-E	BM	NIST2710	SGD-1a	SG-1a
LKSD-4	JR-2	GXR-6	JR-1	JB-3		

Gehalte aus: Govindaraju (1989)

c) vier Wiederholungsmessungen einer Tonschiefer-Probe (A06 mCn)

ICP-MS

Kontaminationsgefahren während der Aufschlussverfahren wurden durch Spülen der verwendeten Gefäße mit verdünnter 10%iger Salpetersäure nachhaltig zurückgedrängt. Als Aufschlussgefäße wurden speziell für diese Anwendung entwickelte Teflonbehälter verwendet, wodurch auch die Gefahr von Memory-Effekten erheblich gemindert wurde.

Da ein Massenspektrometer zwei Isotope des gleichen Elements nicht mit der gleichen Empfindlichkeit detektiert, kann bei ICP-Massenspektrometern eine Massendiskriminierung auftreten. Diese wird primär durch eine unterschiedliche Beweglichkeit der Ionen beim Eintritt in das Hochvakuumssystem hervorgerufen. Zusätzlich kann eine Massenfraktionierung, beeinflusst durch die Probenmatrix, verursacht werden. Auch für eine Massendiskriminierung bei ICP-MS sind Auswirkungen der Matrix beobachtet worden (Taylor & de Bièvre 1995; Rehkämper & Mezger 2000). Nach Cocherie & Robert (2007) hat die Probenmatrix allerdings keinen signifikanten Effekt auf die Analyse falls die absolute Ionenfracht des Analyts geringer als 400 mg l^{-1} ist. Dies war in diesem Fall gewährleistet. Deshalb wurden mögliche störende Alkali- und Erdalkalimetalle bei dieser Untersuchung nicht entfernt.

Der Pb-Gehalt in den Blindwertproben lag bei $1,36 \pm 0,15 \text{ g Pb kg}^{-1}$. Im Vergleich zu den Pb-Gehalten der Bodenproben ist der Blindwert vernachlässigbar, er wurde deshalb bei der Gehaltsberechnung der Proben nicht abgezogen.

Um höchstmögliche Genauigkeit zu gewährleisten, kam der zertifizierte Standard NIST SRM 981 (Common Lead Isotope Standard) zum Einsatz. Dieser hochreine Bleimetaldraht (99,9+% Reinheit) hat ein zertifiziertes $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenverhältnis von 1,0933 (NIST 1991). Das Referenzmaterial wurde auf die gleiche Weise wie die Bodenproben aufgeschlossen. Die Wiederfindung des Bleis betrug $94 \pm 2,4\%$ ($n=3$). Die Abweichung von 100% ist hauptsächlich auf Verdünnungsfehler, geringe Verluste bei der Pipettierung und beim Transfer in verschiedene Gefäße zurückzuführen. Diese Verdünnungsfehler und geringen Verluste führen jedoch zu keiner Fraktionierung des Isotopensignals.

Das Referenzmaterial diente gleichzeitig zur Korrektur der gerätebedingten Massendiskriminierung der ICP-MS. Der mittlere Rohwert des $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenverhältnisses betrug $1,0912 \pm 0,0014$ ($n=3$), was eine Korrektur um den Faktor 1,0019 notwendig machte. Der Erfolg dieser Korrektur wurde durch Anwendung auf ein zweites Referenzmaterial (Galenit) getestet. Das $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -

Isotopenverhältnis des Galenits, ermittelt in einer unabhängigen Studie, beträgt 1,1827 (Lévêque & Jakobus, 1994). Das korrigierte $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnis von $1,1828 \pm 0,00008$ ($n=3$) liegt sehr nahe an dem veröffentlichten Wert von Lévêque & Jakobus (1994), was die Richtigkeit der Messung belegt.

Zur Bestimmung der Präzision sind in der Messreihe acht ausgewählte Proben doppelt gemessen worden (zwei O-, eine A-, vier B und eine C-Horizontprobe) (Tab. A30). Der Standardfehler des $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisses dieser acht Proben lag zwischen 0,0019 - 0,0073.

Polyatomare Interferenzen bei ICP-MS Messungen können im Fall von Pb durch störende Platin- und Iridiumoxide hervorgerufen werden (May & Wiedmeyer 1998). In der Kontinentalen Kruste betragen die natürlichen Hintergrundgehalte für Platin (Pt) $0,4 \mu\text{g kg}^{-1}$ und für Iridium (Ir) $0,05 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Wedepohl 1995). In Böden bewegen sich die Gehaltsangaben zwischen $0,3\text{-}330 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Barefoot, 1997) mit Maximalwerten von bis zu $420 \mu\text{g kg}^{-1}$ verursacht durch anthropogene Aktivität (Whiteley & Murray 2003). Obwohl Oxidationsraten von Edelmetallen in Böden von 50% (Lustig et al. 1996) und in Massenspektrometern von weniger als 1% berichtet werden (Graham & Robert 1994), sind diese Effekte vernachlässigbar aufgrund der 1-3 Größenordnungen höheren Pb-Gehalte in den untersuchten Extrakten.

GIS-gestützte Auswertung

Das wichtigste Kriterium eines digitalen Geländemodells ist seine Genauigkeit. Ein Geländemodell kann keine höhere Genauigkeit erreichen, als es die Dichte und Güte der Ausgangsdaten zulässt, die von der Erfassungsmethode, der Rasterweite und dem für die Berechnung des Modells gewählten Interpolationsverfahren abhängig sind. Die zugrunde liegende Rasterweite von 20 m reicht in Kombination mit der Genauigkeit des GPS (<1 m) für die Bestimmung der Transportweiten vollkommen aus, allerdings zeigt sich in kleinräumig gegliederten Reliefbereichen die Genauigkeit der aus dem DGM abgeleiteten geomorphometrischen Reliefparameter nicht immer hinreichend. Dies machte die Verifizierung im Gelände unter Zuhilfenahme der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Boden 2005) notwendig.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Reliefauswertung

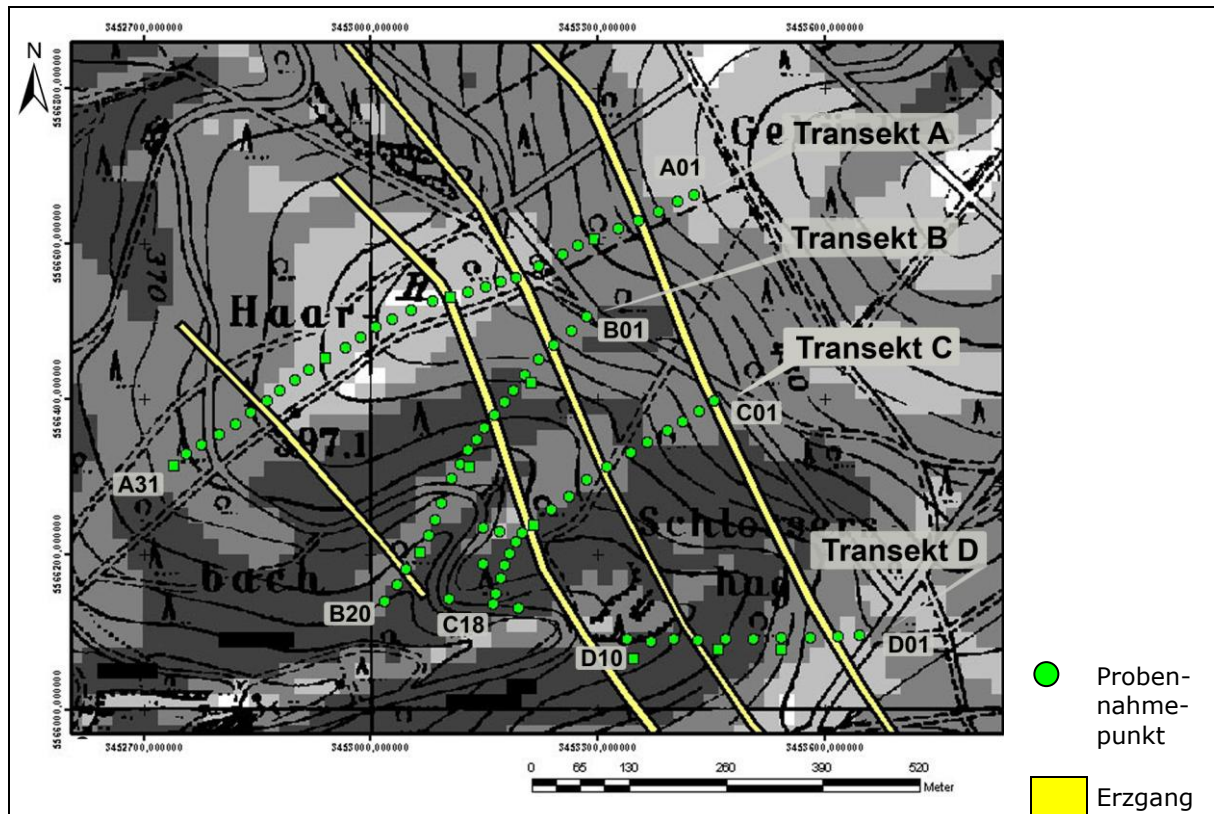
3.1.1 Untersuchungsgebiet 1

Hangneigung

Das hügelige Relief mit Höhen zwischen etwa 320 und 460 m ü. NN hat eine mittlere Hangneigung von $7^\circ \pm 4,9^\circ$. Die Hangneigungswinkel sind in Grad nach AG Boden (2005) klassifiziert. Für die nachfolgenden statistischen Verfahren ist es notwendig die Hangneigungswinkel in Klassen zu aggregieren. Die Aggregation erfolgt in fünf Klassen, wobei die Klassengrenzen von AG Boden (2005) Anwendung finden (Abb. 14).

Die Auswertung der Hangneigungsverteilung für das gesamte Untersuchungsgebiet 1 zeigt, dass die Hangneigungsklasse 2 und 3 mit 34% bzw. 40% den größten Teil ausmachen. Die Klasse 4 mit einer Häufigkeit von 18% tritt schon stark hinter den Klassen 2 und 3 zurück. Sie umfasst die Mittel- und Unterhänge, vor allem im Bereich von Erosionstälern. Hangneigungen der Klasse 1 und 5 kommen im Bereich der Transekte nicht vor oder nehmen nur einen sehr geringen Anteil ein. Deswegen werden sie in der weiteren statistischen Betrachtung nicht berücksichtigt.

Transekt A zeigt im oberen Bereich eine geringe Hangneigung, zwischen Probennahmepunkt A3 und A10 tritt eine deutliche Hangversteilung auf, die wiederum übergeht in einen langen gering geneigten Hangbereich, welcher zum Ende des Transekts wieder eine größere Neigung aufweist. Transekt B ist generell mittel geneigt, weist aber im Mittelhangbereich allerdings recht hohe Neigung auf. Transekt C ist im Oberhangbereich mittel geneigt, ab Probennahmepunkt C11 ist jedoch ein deutlicher Übergang zu einer durchweg hohen Hangneigung festzustellen. Auch Transekt D ist im Oberhangbereich nur gering bis mittel geneigt, die im Mittelhang einsetzende Versteilung lässt erst im Bereich von Probennahmepunkt D09 nach (Abb. 14).



	Hangneigungsklasse	Hangneigung [°]	Klassifikation	Anteil [%]
	Klasse 1	< 2°	nicht geneigt	7,21
	Klasse 2	2 - 5°	gering	33,76
	Klasse 3	5 - 10°	mittel	39,88
	Klasse 4	10 - 20°	hoch	17,79
	Klasse 5	> 20°	sehr hoch	1,36

Abb. 14: aggregierte Hangneigungsverteilung in Untersuchungsgebiet 1 in Klassen nach AG Boden (2005); als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Exposition

Die Exposition wurde in 8 Hauptrichtungs-Klassen unterteilt (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) (Abb. 15). Die Auswertung der Häufigkeitsverteilung der Exposition im DGM ergibt eine annähernd gleichmäßig absteigende Verteilung von Nord nach Westen (14,1-11,4%). Den größten Anteil mit fast 18% der Fläche besitzen die nordwestexponierten Hänge (Abb. 16).

Die genaue Betrachtung der Exposition der Transekte zeigt, dass Transekt A durchgängig südwestlich exponiert ist, Transekt B südlich, Transekt C süd-südwestlich und Transekt D westlich (Abb. 15).

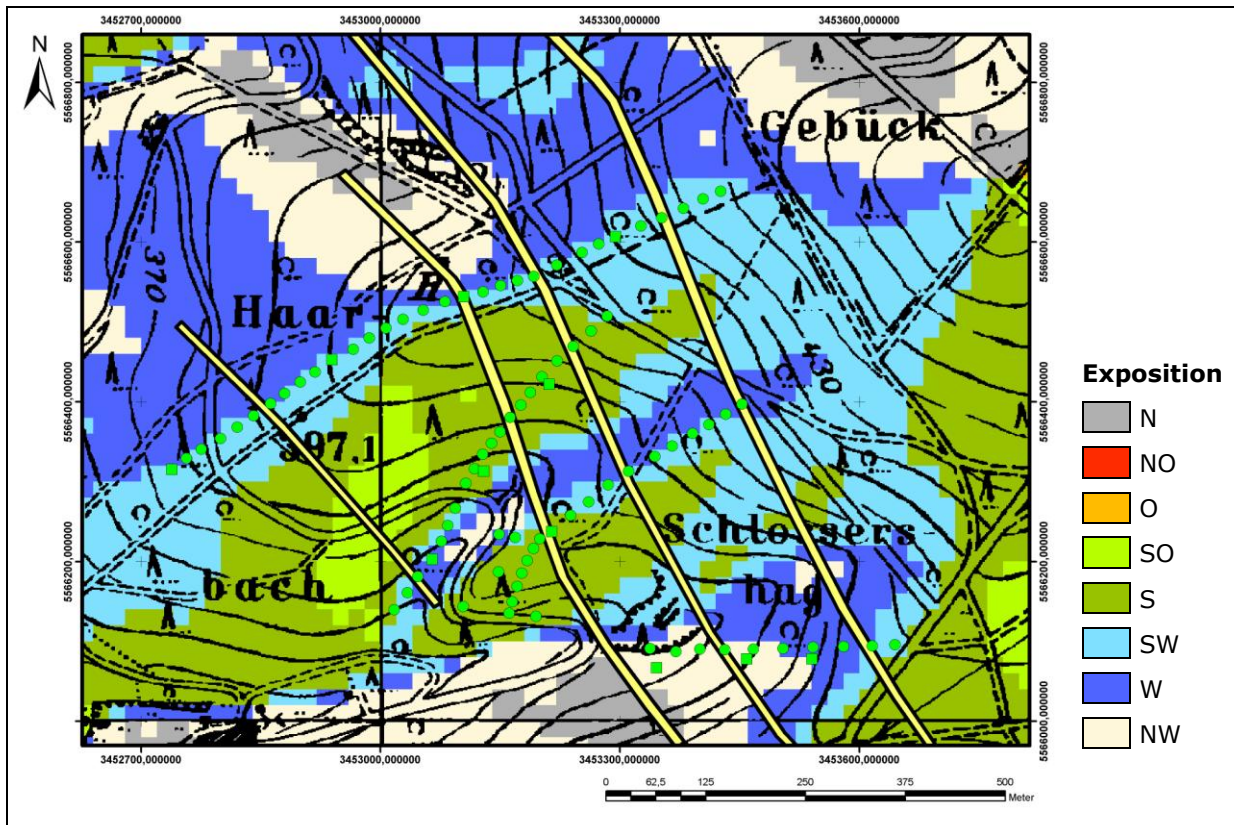


Abb. 15: Exposition in Untersuchungsgebiet 1

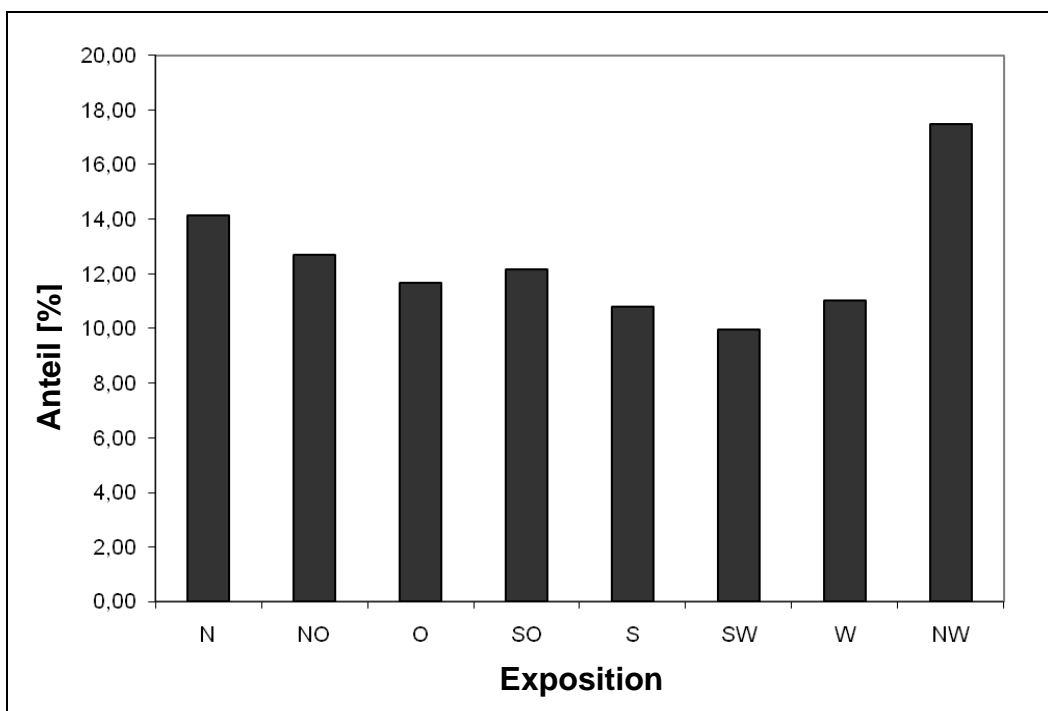


Abb. 16: Häufigkeitsverteilung der Exposition in Untersuchungsgebiet 1; als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Krümmung

Vertikalkrümmung

Die statistische Auswertung der Vertikalkrümmung zeigt, dass mit 67% zum größten Teil gestreckte Hangformen in Untersuchungsgebiet 1 ausgeprägt sind. Im Gegensatz dazu treten konkave (20%) und konvexe (13%) Oberflächenformen zurück (Abb. 17 und 18). Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass gestreckte Hangbereiche nicht nur natürlichen Ursprungs sein können, sondern auch durch Bewirtschaftung oder Flurbereinigung entstanden sein können.

Die detaillierte Betrachtung der Vertikalkrümmung für die jeweiligen Transekte zeigt, dass Transekt A eine dominant gestreckte Vertikalkrümmung aufweist. Ausnahmen bilden kleinräumig konvexe Bereiche im oberen Bereich und konkave Bereiche um die Probennahmepunkte A08-A09. Transekt B zeigt das gesamte Spektrum der Vertikalkrümmung, hier sind im oberen Bereich gestreckte Reliefformen vorherrschend, die im Bereich der Hangversteilung in konvexe und im Unterhangbereich in konkave Formen übergehen. Transekt C weist ein etwas differenzierteres Bild auf, zwar sind hier auch alle Ausprägungen anzutreffen, allerdings wechseln diese kleinräumig. Transekt D zeigt eine vergleichbare Ausprägung wie Transekt B.

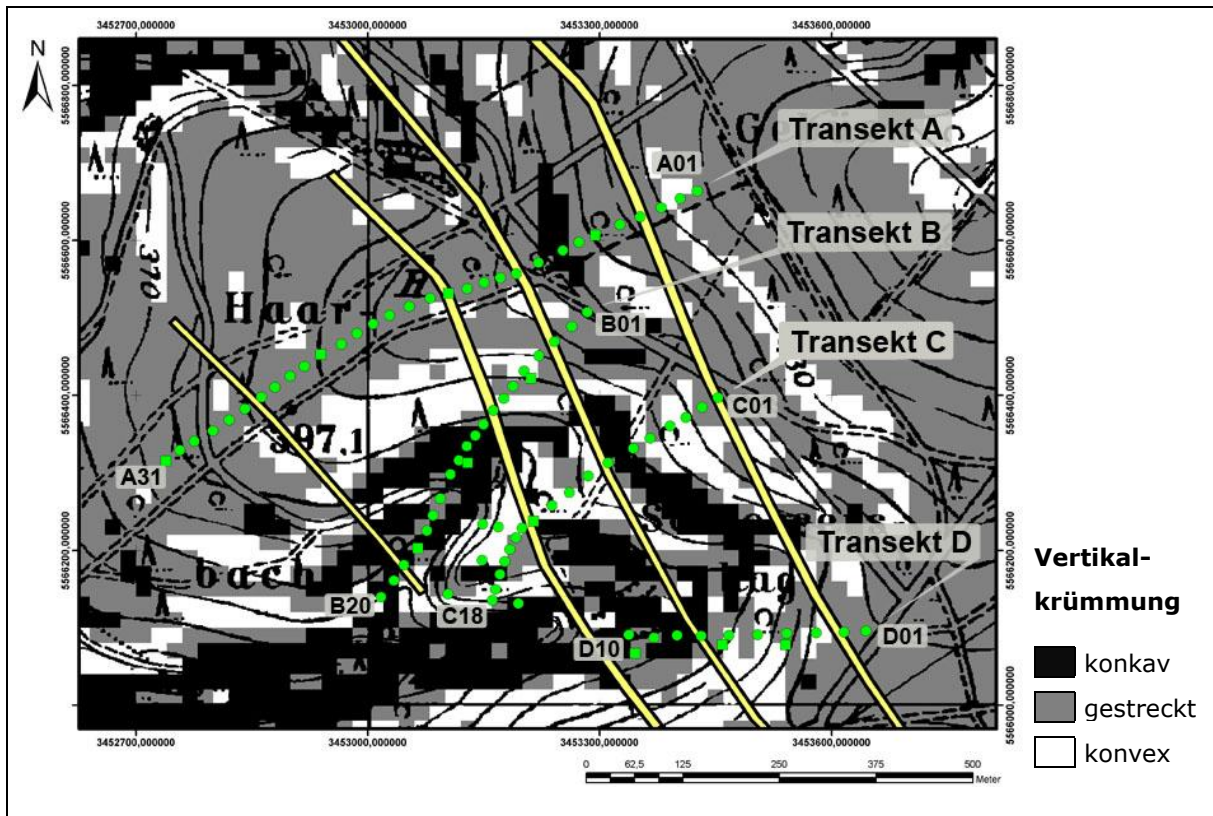


Abb. 17: Vertikalkrümmung in Untersuchungsgebiet 1

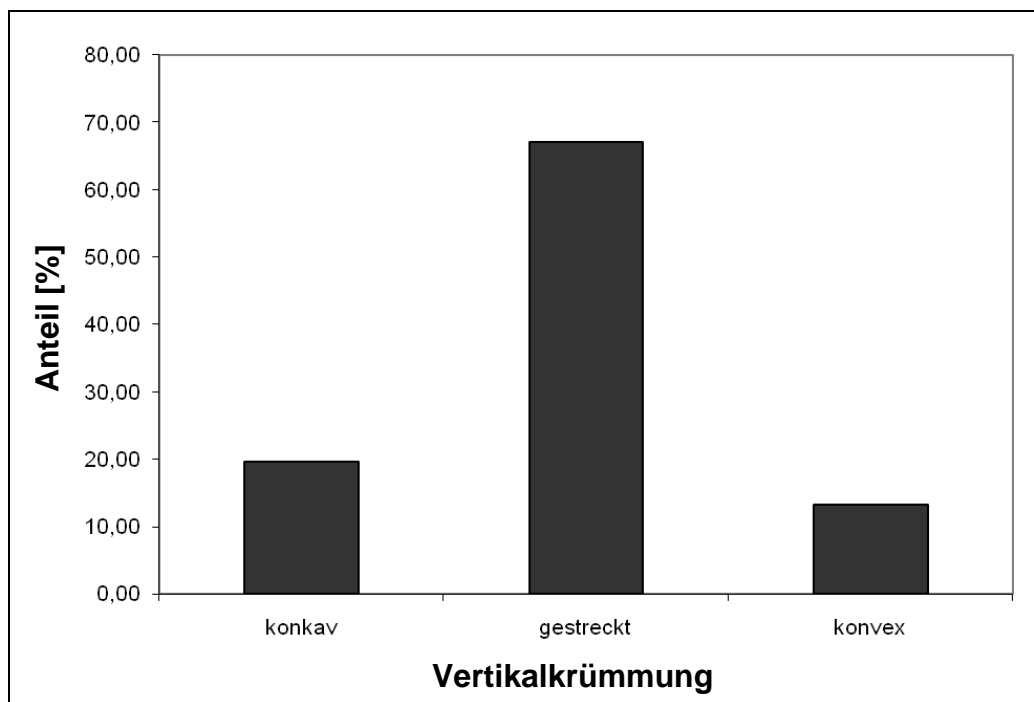


Abb. 18: Häufigkeitsverteilung der Vertikalkrümmung in Untersuchungsgebiet 1; als Datengrundlage dienen die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Horizontalkrümmung

Die statistische Auswertung für dieses Untersuchungsgebiet zeigt, dass die divergenten und gestreckten Hangbereiche mit jeweils ca. 45% stark überwiegen, wohingegen konvergente Formen (Abb. 20) mit etwa 10% deutlich weniger anzutreffen sind. Im unmittelbaren Bereich der Transekte ist allerdings ein etwas differenziertes Bild anzutreffen. So zeigt Transekt A eine meist, bis auf den oberen Bereich, divergente Ausprägung der Horizontalkrümmung. Transekt B ist überwiegend gestreckt, geht aber im Unterhangbereich in eine konvergente Form über. Transekt C ist bis Probennahmepunkt C11 vorwiegend divergent ausgeprägt, geht dann aber in eine gestreckte Horizontalkrümmung über. Transekt D weist sowohl divergente, wie auch konvergente und gestreckte Reliefformen auf (Abb. 19).

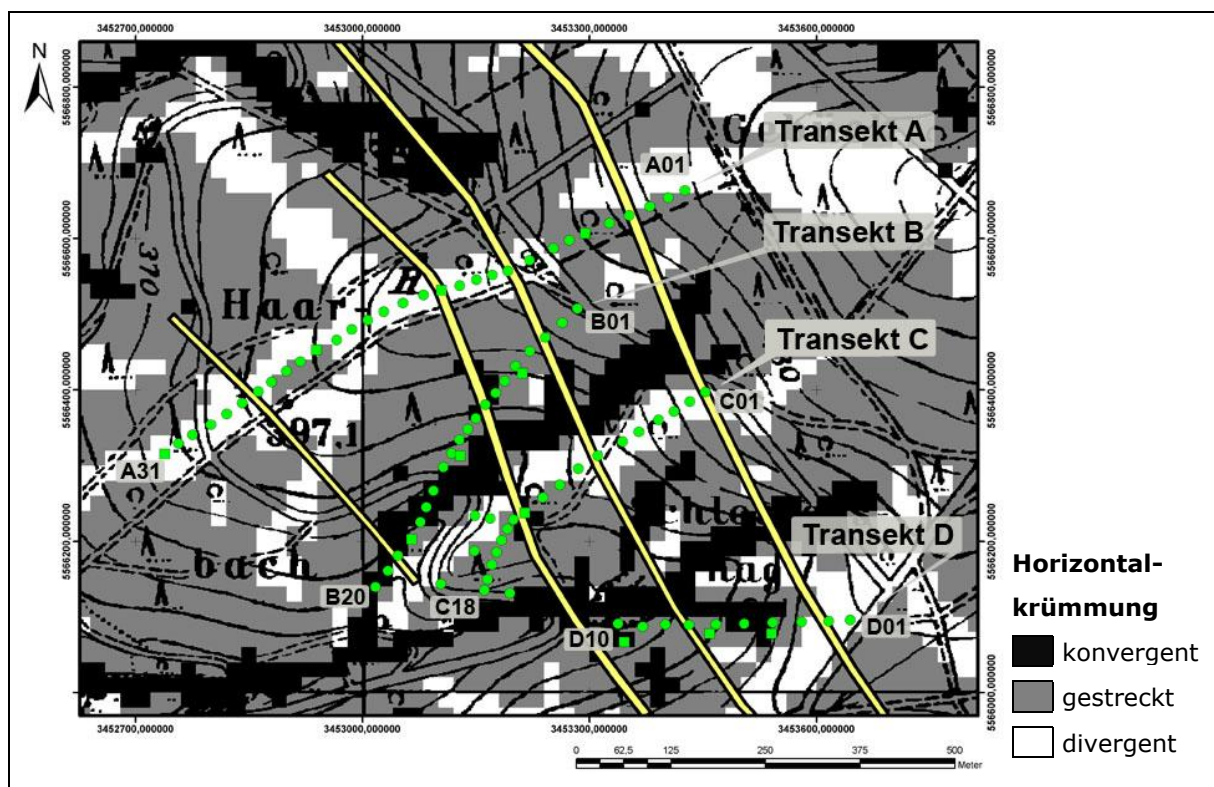


Abb. 19: Horizontalkrümmung in Untersuchungsgebiet 1

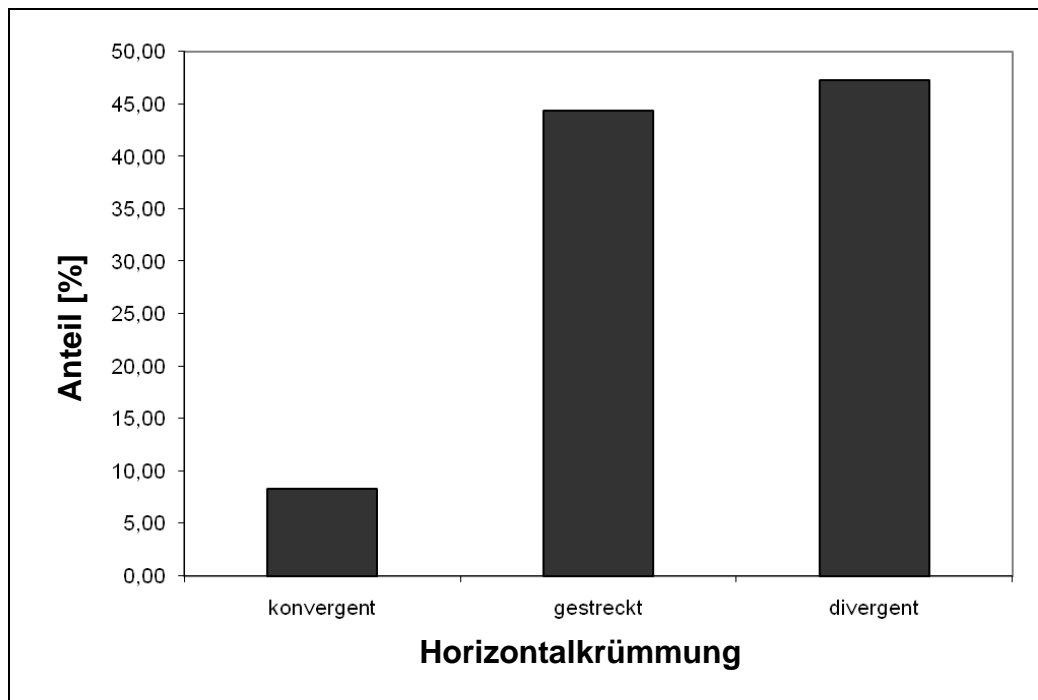


Abb. 20: Häufigkeitsverteilung der Horizontalkrümmung in Untersuchungsgebiet 1; als Datengrundlage dienen die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Querkrümmung

Ähnlich der Vertikalkrümmung zeigt auch die Querkrümmung ein dominantes Auftreten gestreckter Hangbereiche (Abb. 22).

Friedrich (1996) hat die Bedeutung von Vertikal- und Querkrümmung für die Verbreitung von Deckschichten untersucht und herausgestellt, dass der Wechsel von Deckschichteneinheiten häufig mit Hangdiskontinuitäten einhergeht.

Für die einzelnen Transekte in Untersuchungsgebiet 1 kann festgestellt, dass Transekt A ausschließlich gestreckte und divergente Querkrümmungen aufweist. Transekt B im oberen Bereich gestreckte Formen die vom Mittel- zum Unterhangbereich dominant konvergent werden. Transekt C zeigt wie auch bei der Horizontalkrümmung im Bereich bis Probennahmepunkt C11 divergente Reliefformen, die in gestreckte Ausprägungen übergehen. Transekt D weist dominant konvergente Querkrümmungen auf (Abb. 21).

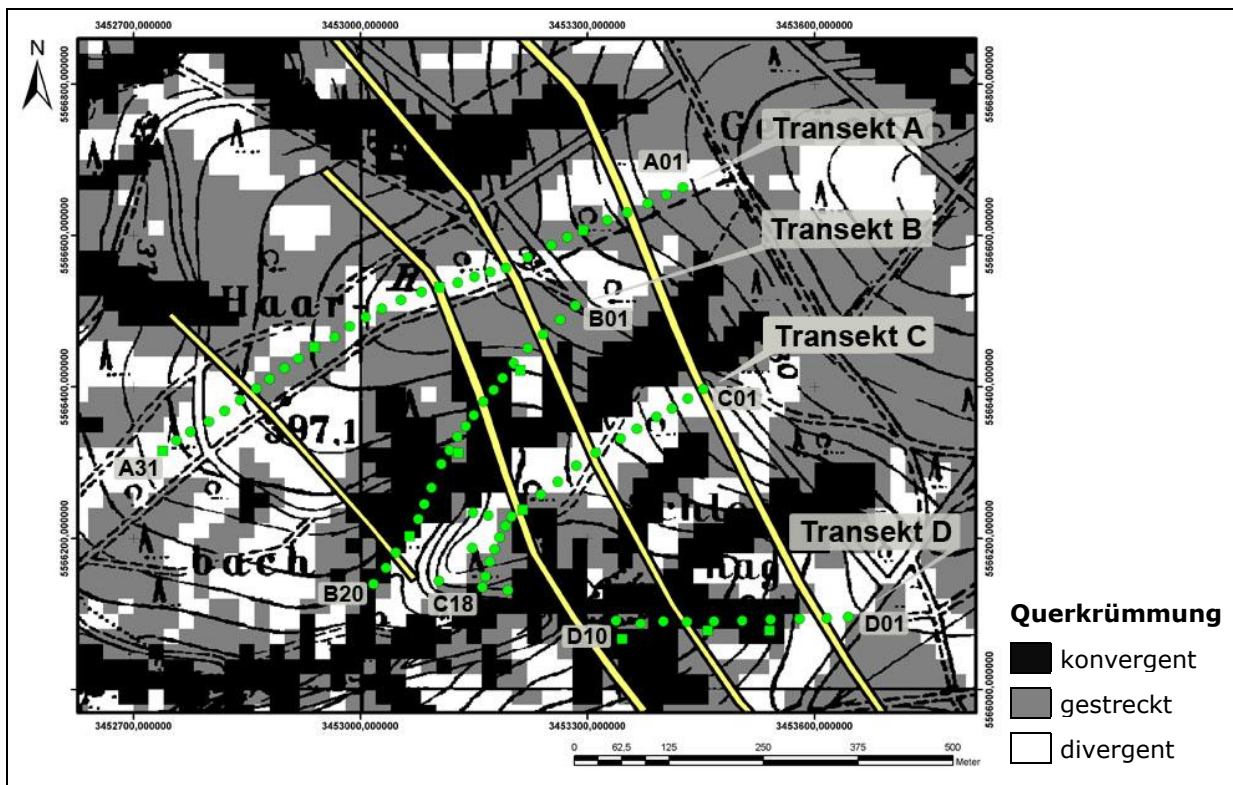


Abb. 21: Querkrümmung in Untersuchungsgebiet 1

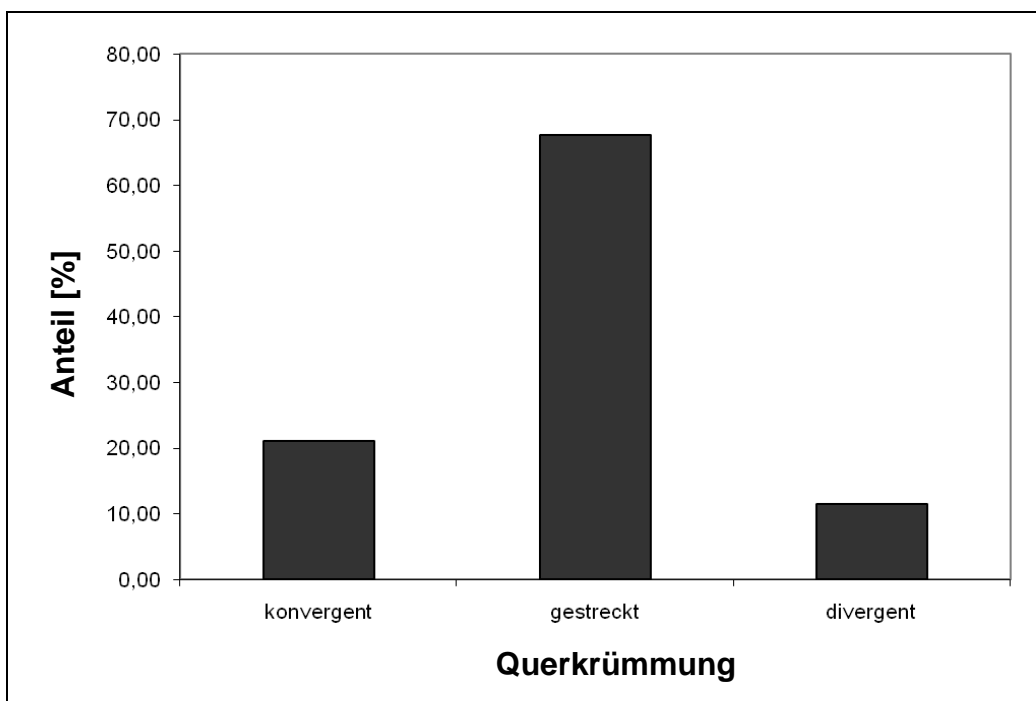


Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der Querkrümmung in Untersuchungsgebiet 1; als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Massenbilanz-Index

Als Basisgrößen des Massenbilanz-Index (MBI) dienen die Reliefparameter Vertikalkrümmung, Querkrümmung und Neigung. Praktisch bedeutet dies, dass z. B. mit steigender Neigung oder steigender Gesamtkrümmung auch der Index ansteigt, was in einer negativen Massenbilanz resultiert (Möller et al. 2008).

Der Massenbilanz-Index für den Kartenausschnitt weist für fast 75% der Flächen des Untersuchungsgebietes eine ausgeglichene Massenbilanz auf (Abb. 24). Im unmittelbaren Bereich der Transekte stellt sich die Situation allerdings deutlich differenzierter dar (Abb. 23).

So weist Transekt A eine großteils ausgeglichene Massenbilanz auf, bis auf den Bereich A26-A31, hier ist sie negativ. Transekt B weist ebenfalls einen ausgeglichenen MBI auf, der im unteren, konvergent konkaven Bereich deutlich positiv wird. Bei Transekt C dagegen ist die Massenbilanz fast durchgängig negativ. Die deutlich divergent-konvexe Reliefausprägung spiegelt sich hier wider. Transekt D besitzt eine recht ausgeglichene Massenbilanz, die nur im Oberhangbereich partiell negativ ausfällt (Abb. 23).

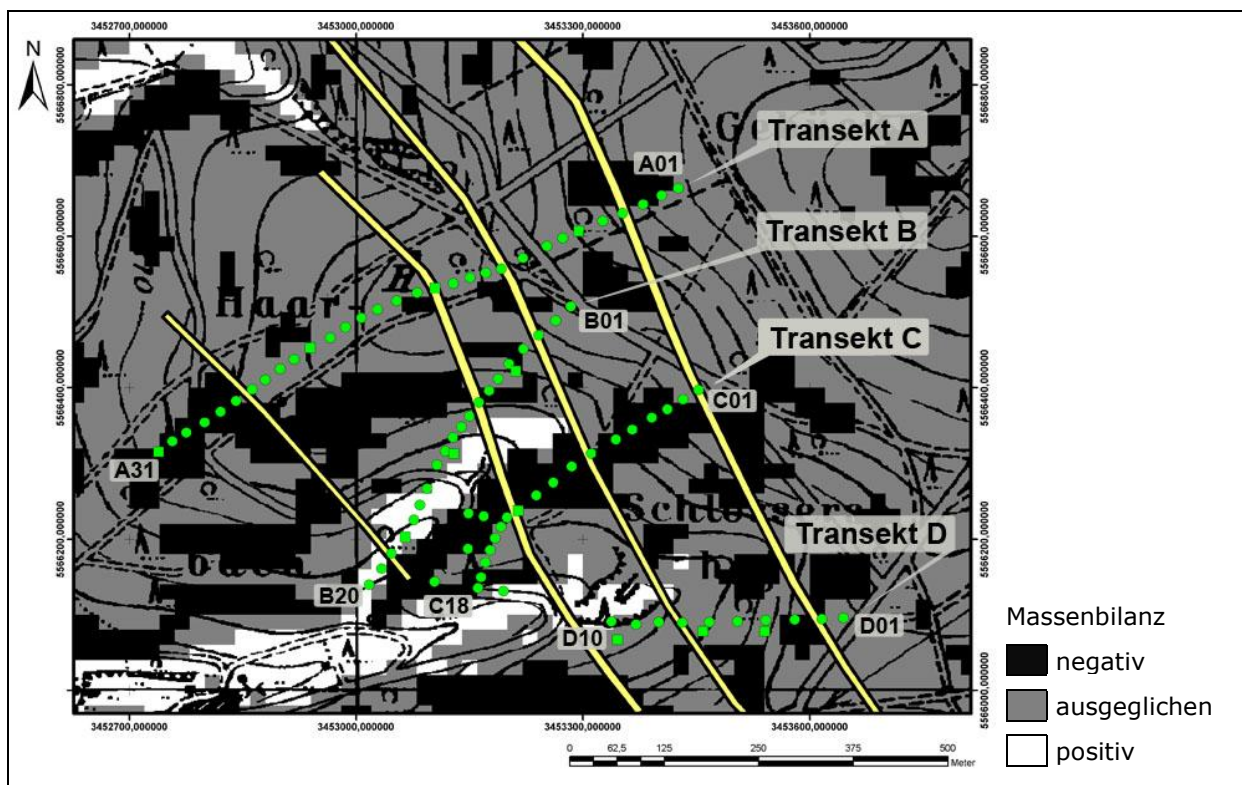


Abb. 23: Massenbilanz in Untersuchungsgebiet 1

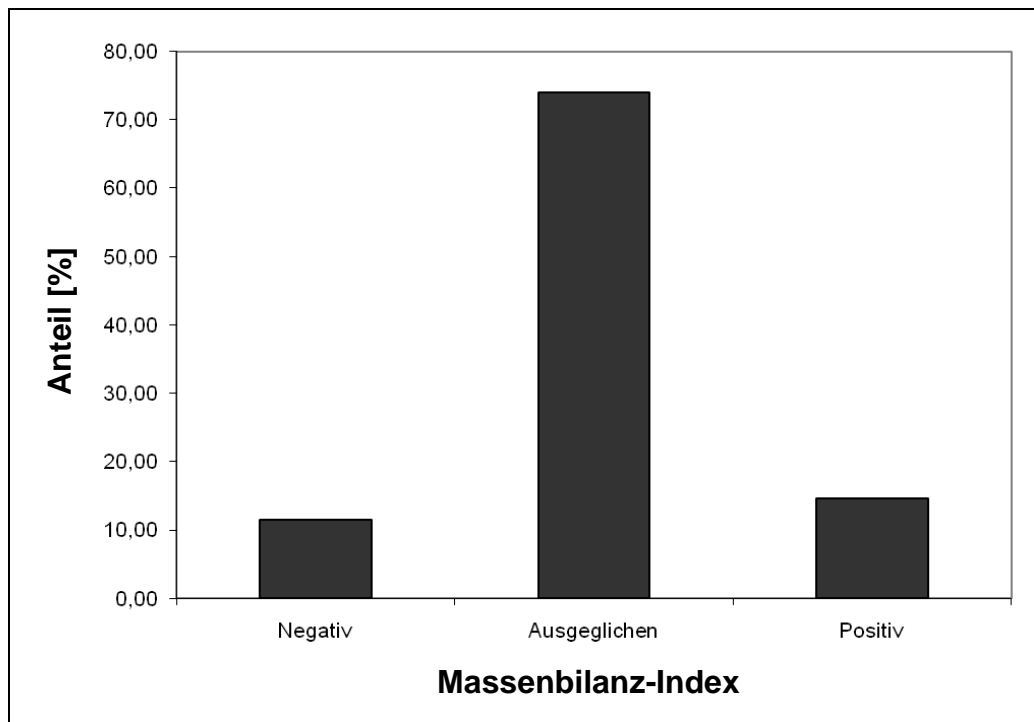


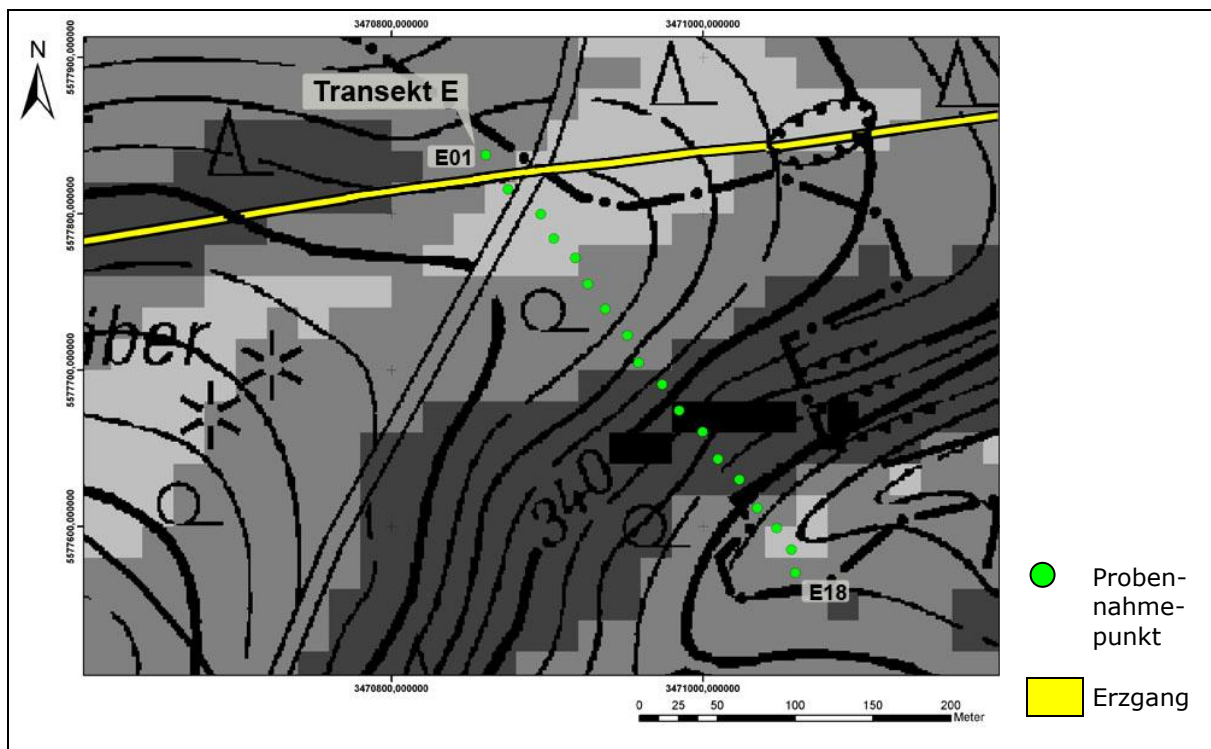
Abb. 24: Häufigkeitsverteilung der Massenbilanz in Untersuchungsgebiet 1; als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

3.1.2 Untersuchungsgebiet 2

Da die Transekte E und F des Untersuchungsgebietes 2 räumlich getrennt ca. 2 km auseinander liegen, sind im Folgenden die Reliefparameter getrennt dargestellt.

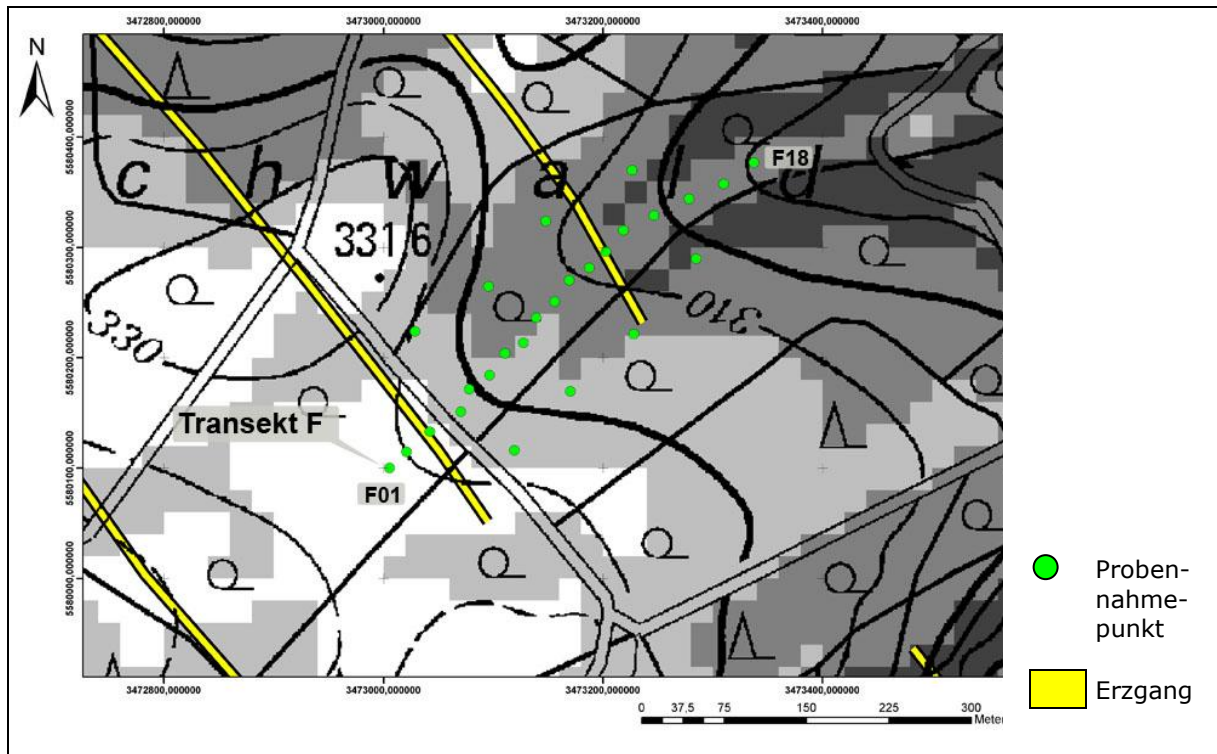
Hangneigung

Das Relief des Untersuchungsgebietes 2 ähnelt dem des Untersuchungsgebietes 1. Dies spiegelt sich auch in der mittleren Hangneigung von $7^\circ \pm 4,8^\circ$ wieder. Allerdings sind die beiden Transekte E und F nach Osten exponiert. Die Höhenlage beträgt zwischen 320 und 360 m NN. Die nach AG Boden (2005) aggregierte Hangneigung in Klassen ist in den Abb. 25 und 26 dargestellt.



	Hangneigungsklasse	Hangneigung [°]	Klassifikation	Anteil [%]
	Klasse 1	< 2°	nicht geneigt	7,55
	Klasse 2	2 - 5°	gering	35,14
	Klasse 3	5 - 10°	mittel	36,79
	Klasse 4	10 - 20°	hoch	17,91
	Klasse 5	> 20°	sehr hoch	2,61

Abb. 25: aggregierte Hangneigungsverteilung in Untersuchungsgebiet 2 in Klassen nach AG Boden (2005); als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM ($n \approx 75000$)



Hangneigungsklasse	Hangneigung [°]	Klassifikation	Anteil [%]
Klasse 1	< 2°	nicht geneigt	7,08
Klasse 2	2 - 5°	gering	31,04
Klasse 3	5 - 10°	mittel	39,53
Klasse 4	10 - 20°	hoch	18,96
Klasse 5	> 20°	sehr hoch	3,40

Abb. 26: aggregierte Hangneigungsverteilung in Untersuchungsgebiet 2 in Klassen nach AG Boden (2005); als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Die Auswertung der aggregierten Hangneigungsverteilung für das Untersuchungsgebiet 2 zeigt, dass die Hangneigungsklasse 3 mit 37-40% Anteil den größten Teil ausmacht. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Ost bis Nord exponierte Hangbereiche. Klasse 2 zeigt eine relative Häufigkeit von 31-35%, wobei hier meist Plateaulagen und gestreckte Mittelhangbereiche zusammengefasst sind. Klasse 4 tritt mit einer Häufigkeit von 19% stark hinter die Klassen 2 und 3 zurück. Bereiche mit Neigungswinkeln >20° finden sich, bis auf den Mittelhangbereich von Transekt E, in Untersuchungsgebiet 2 nicht. Klasse 1 und Klasse 5 nehmen entweder nur einen untergeordneten Anteil ein oder kommen im Bereich der Transekte nicht vor.

Transekt E zeigt im oberen Bereich eine geringe Hangneigung, ab Probennahmepunkt E09 tritt jedoch eine deutliche Hangversteilung auf, die im

Unterhangbereich wieder auf geringe Neigungswerte zurückgeht. Bei Transekt F sind im oberen Bereich geringe bis sehr geringe Neigungen zu beobachten, die hangabwärts langsam bis auf mittlere Hangneigungswerte ansteigen (Abb. 25 und 26).

Exposition

Die Häufigkeitsverteilung der Exposition in Untersuchungsgebiet 2 zeigt eine annähernd gleichmäßig absteigende Verteilung von Nord nach Nordwesten (20,5-11,2%) (Abb. 29). Transekt E ist südöstlich (Abb. 27), Transekt F nordöstlich exponiert (Abb. 28).

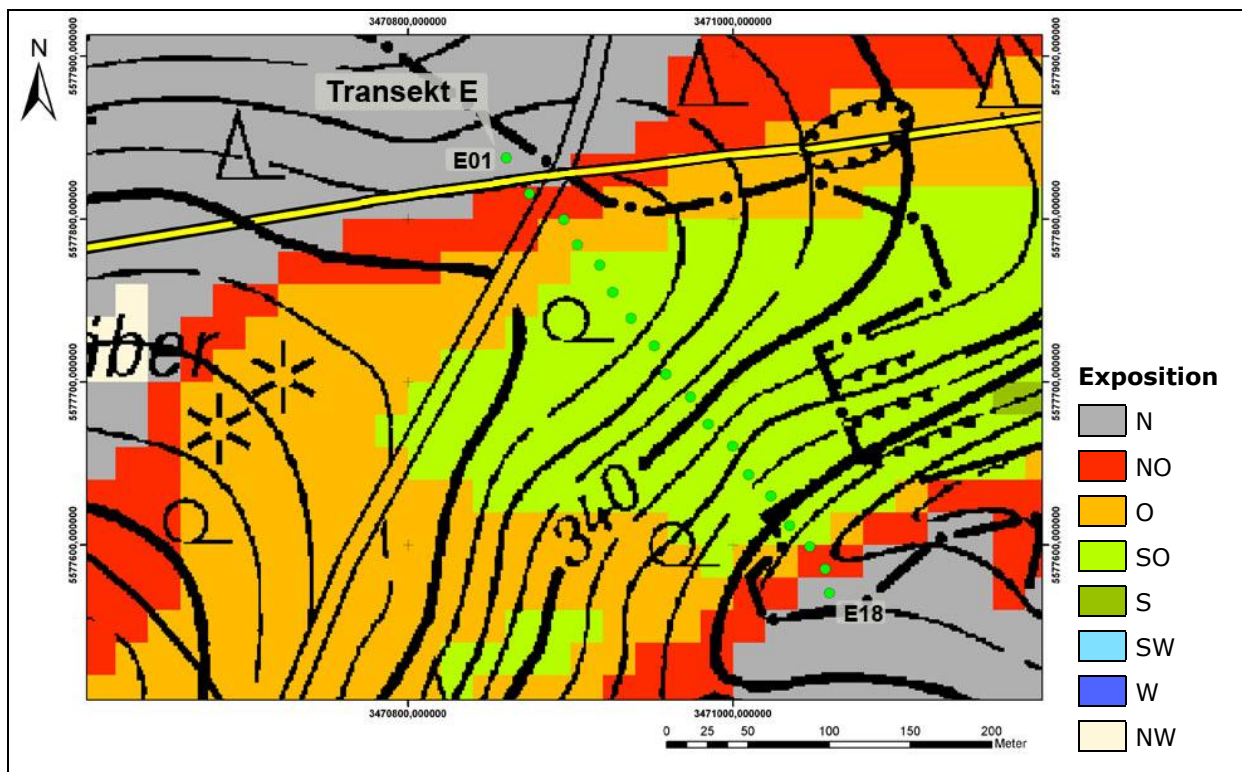


Abb. 27: Exposition in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E)

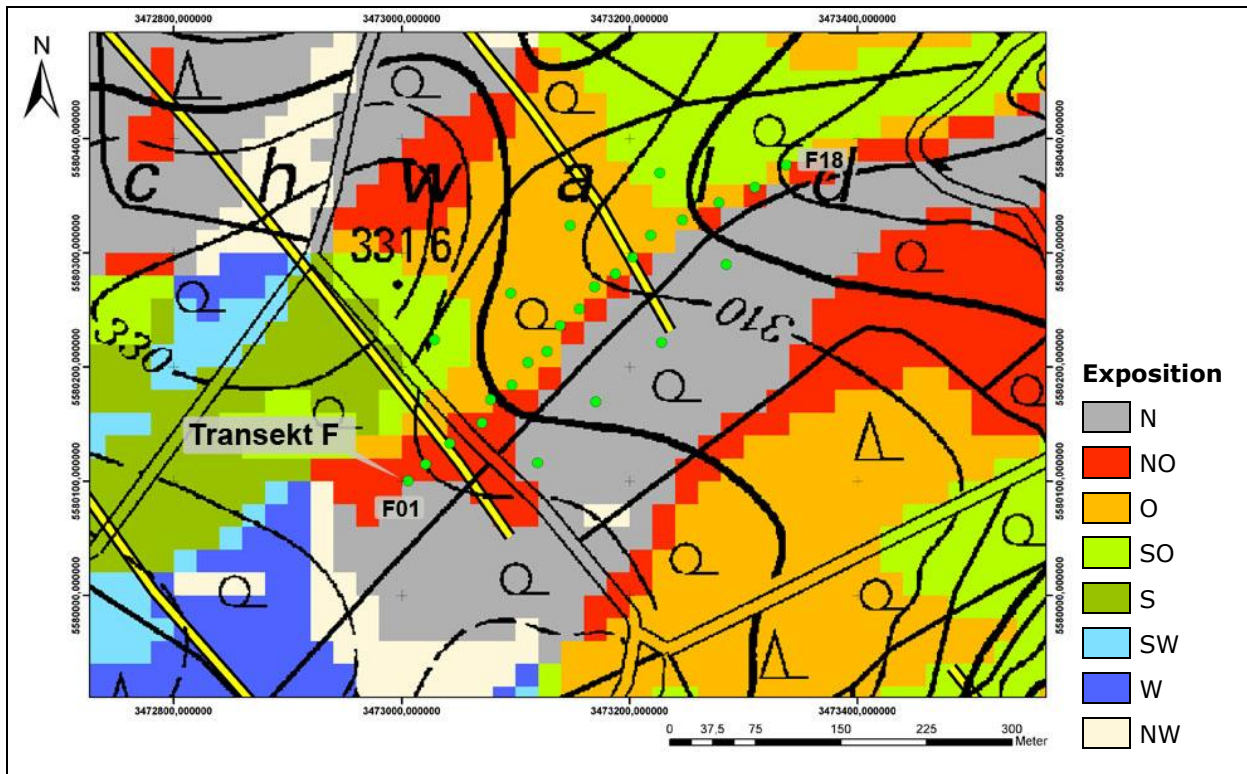


Abb. 28: Exposition in Untersuchungsgebiet 2 (Transect F)

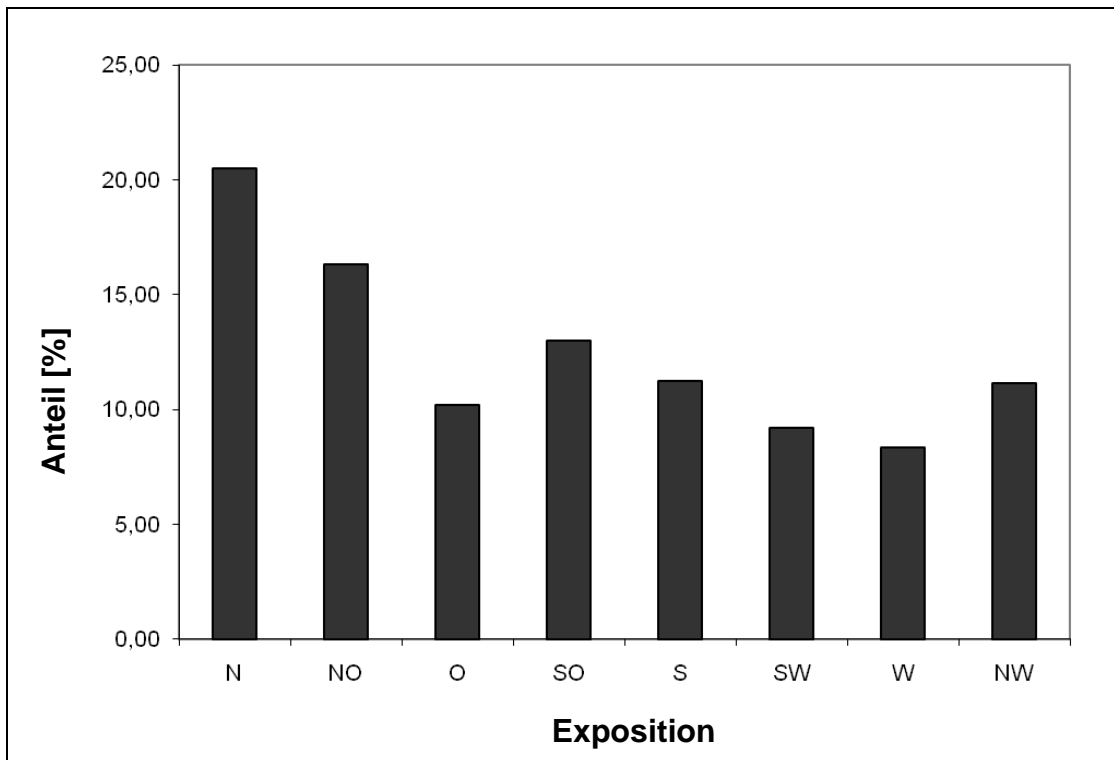


Abb. 29: Häufigkeitsverteilung der Exposition in Untersuchungsgebiet 2; als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Krümmung

Vertikalkrümmung

Die statistische Auswertung der Vertikalkrümmung (Abb. 32) zeigt, dass, wie in Untersuchungsgebiet 1, gestreckte Hangformen dominieren. Im unmittelbaren Bereich des Transekts E kommen allerdings alle drei Anteilsklassen zu ungefähr gleichen Anteilen vor (Abb. 30), bei Transekt F dominieren gestreckte Formen im Oberhangbereich, die in konkave Formen übergehen (Abb. 31).

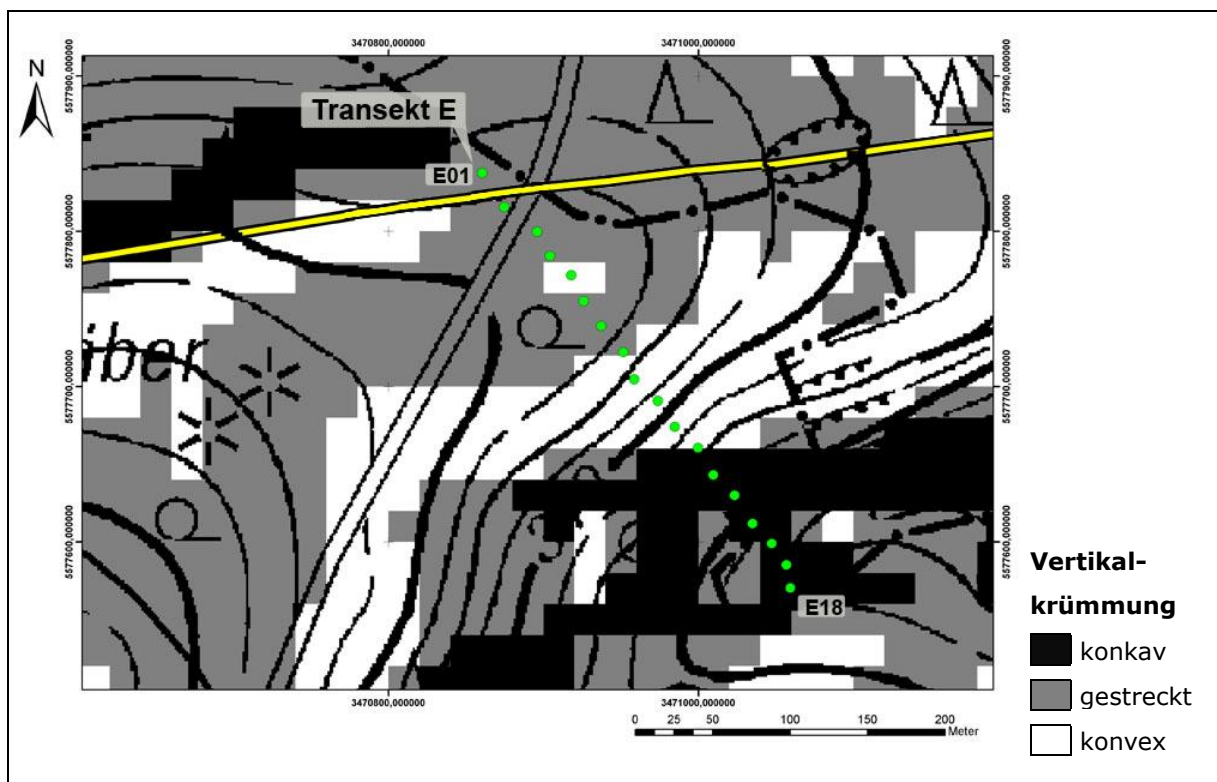


Abb. 30: Vertikalkrümmung in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E)

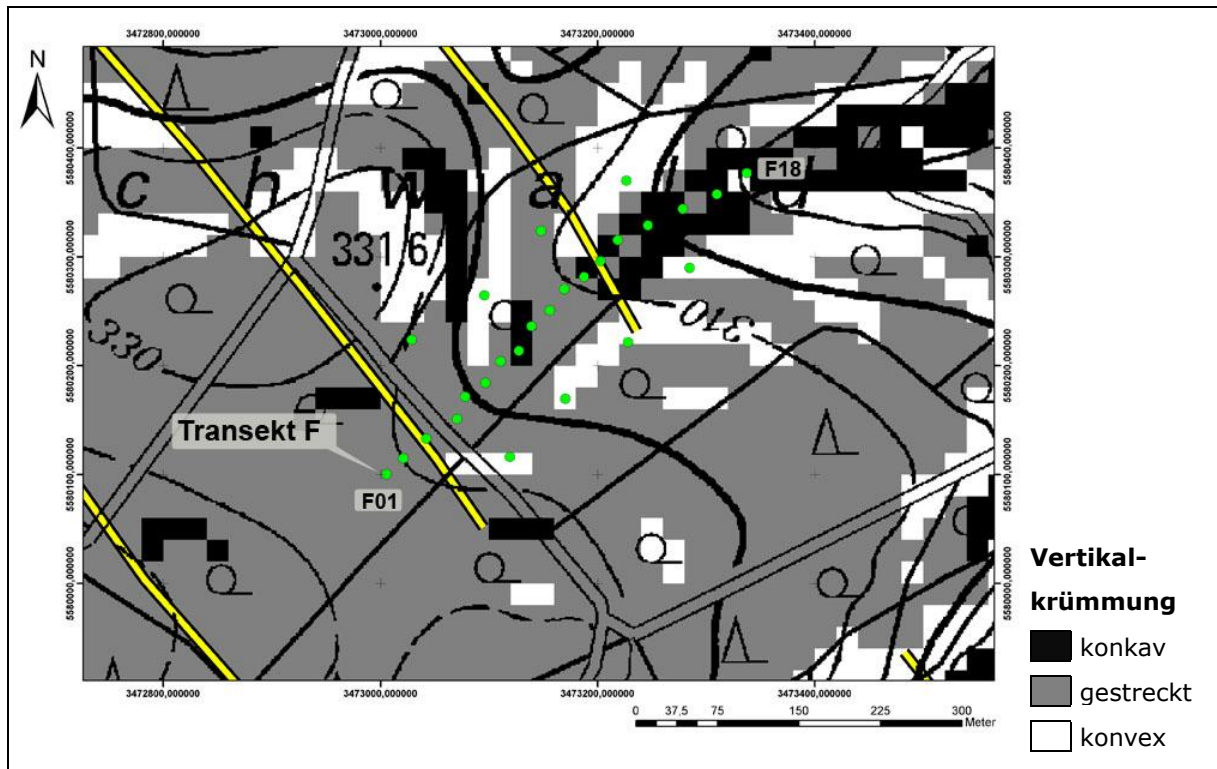


Abb. 31: Vertikalkrümmung in Untersuchungsgebiet 2 (Transect F)

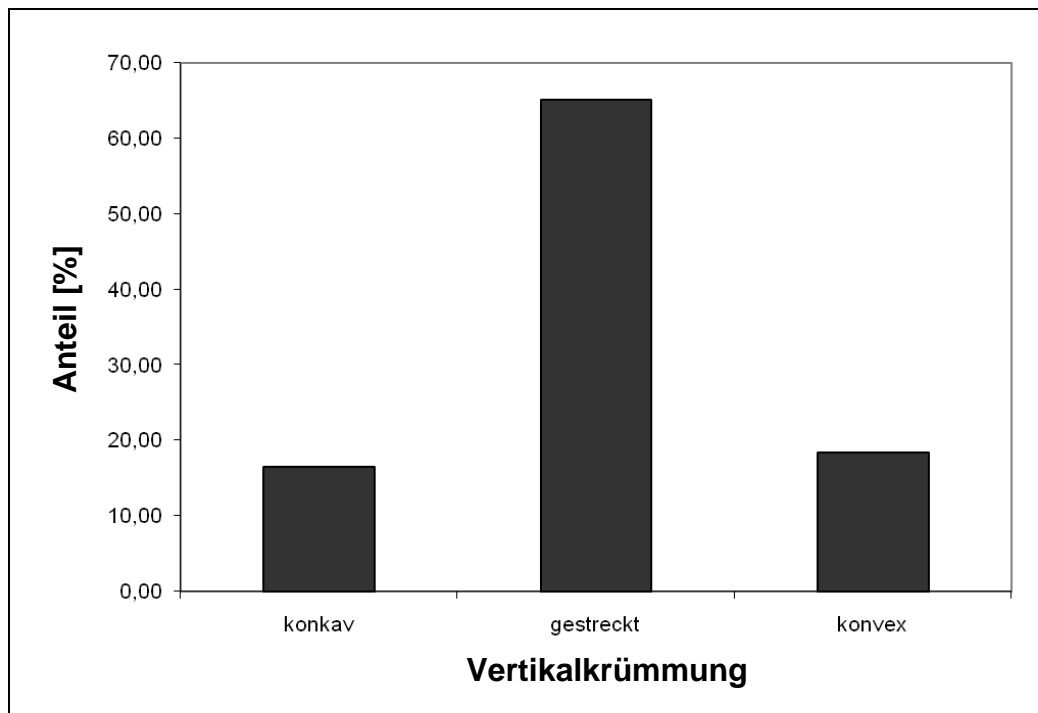


Abb. 32: Häufigkeitsverteilung der Vertikalkrümmung in Untersuchungsgebiet 2; als Datengrundlage dienen die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Horizontalkrümmung

Die statistische Auswertung der Horizontalkrümmung für das gesamte Untersuchungsgebiet zeigt auch wieder eine flächenmäßige Dominanz gestreckter Hangbereiche (Abb. 35). Im Bereich von Transekt E liegt allerdings eine gleichverteilte Häufigkeit vor (Abb. 33), wohingegen im Bereich von Transekt F ausschließlich konvergente Formen anzutreffen sind (Abb. 34).

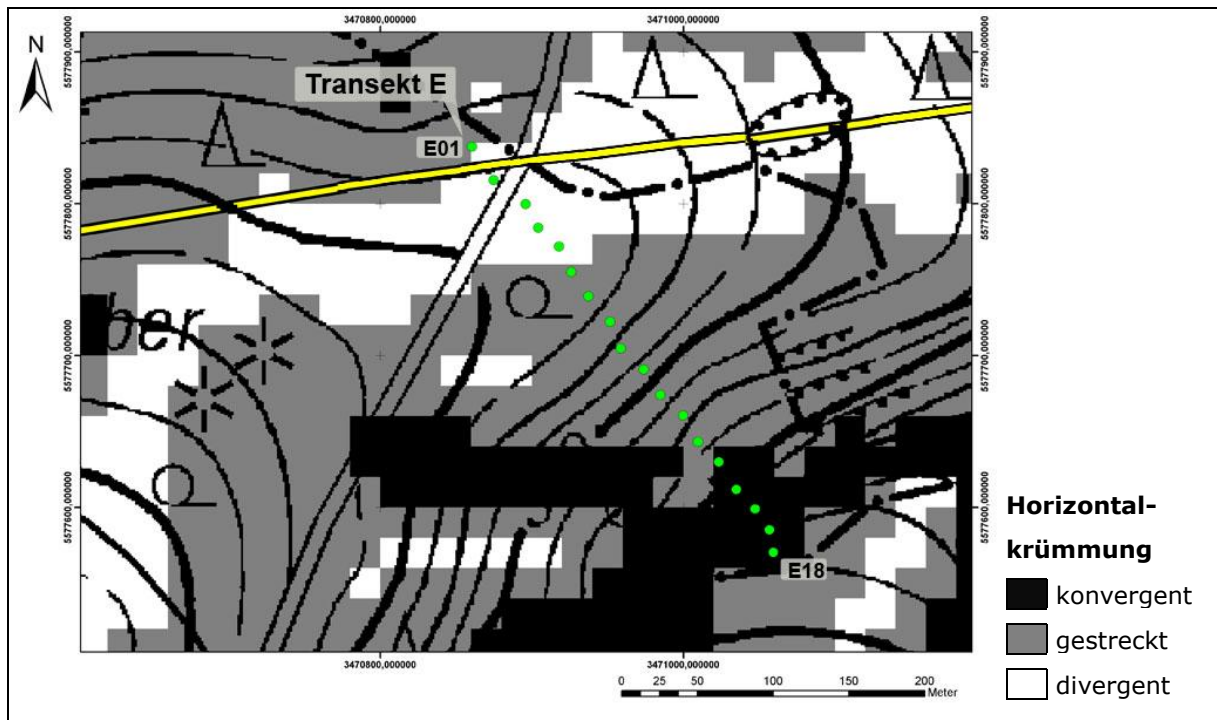


Abb. 33: Horizontalkrümmung in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E)

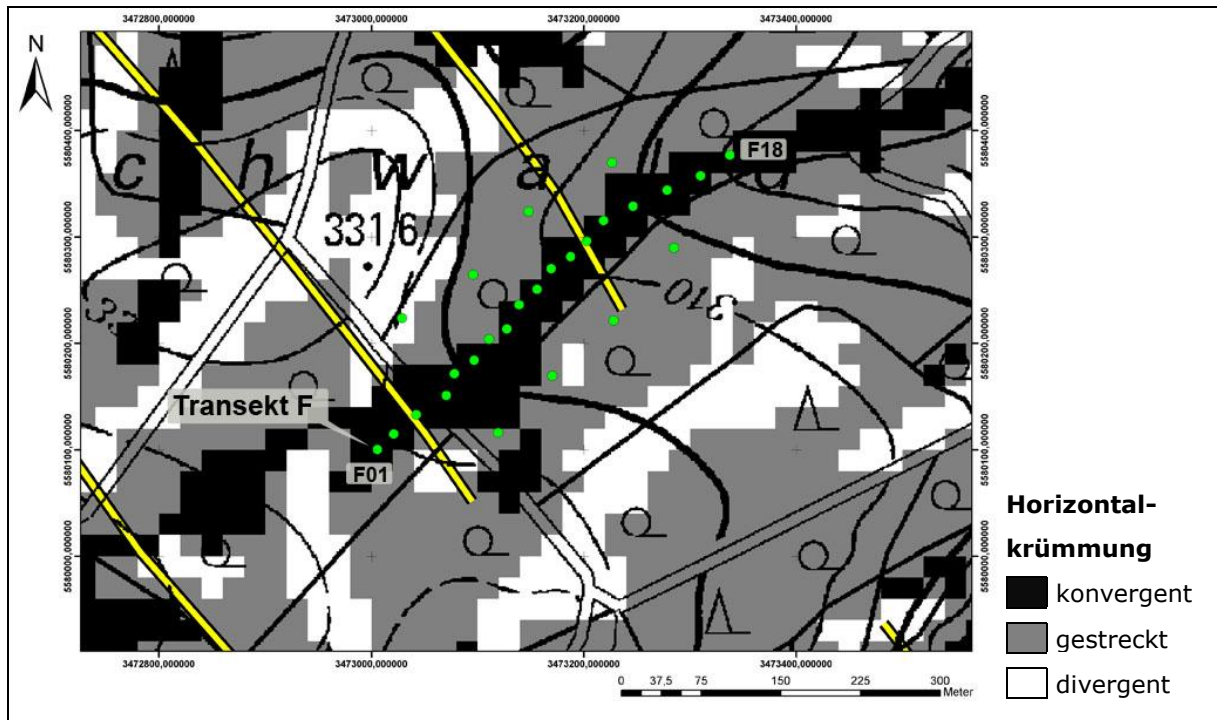


Abb. 34: Horizontalkrümmung in Untersuchungsgebiet 2 (Transect F)

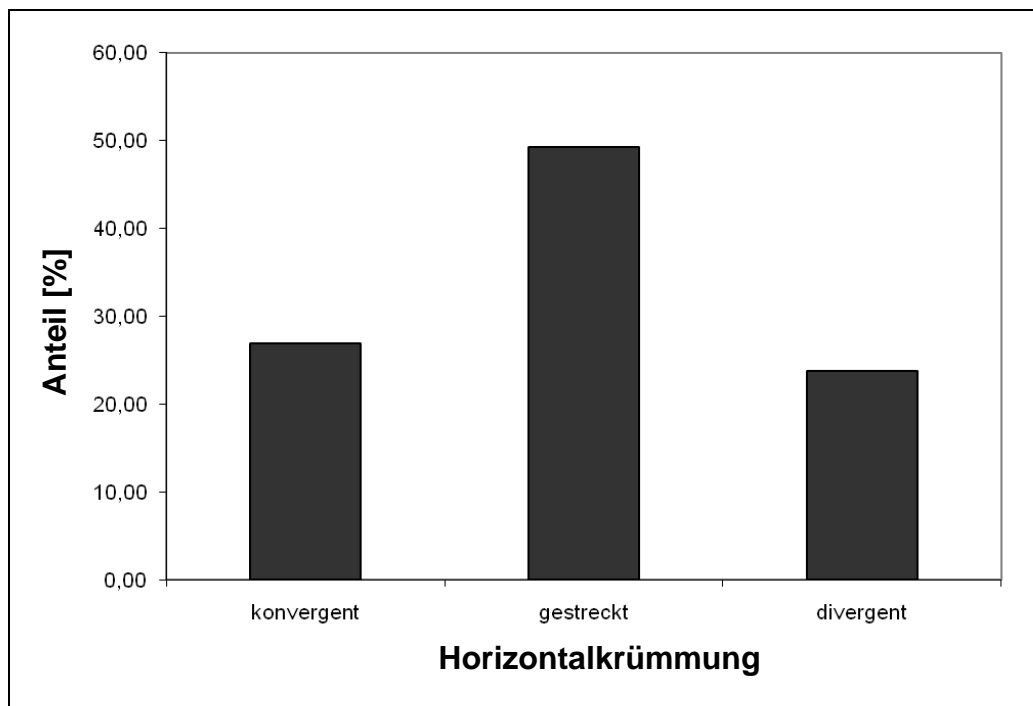


Abb. 35: Häufigkeitsverteilung der Horizontalkrümmung in Untersuchungsgebiet 2; als Datengrundlage dienen die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Querkrümmung

Die Häufigkeitsverteilung der Querkrümmung ist mit denen der Horizontalkrümmung vergleichbar, mehr als die Hälfte sind gestreckte Hangbereiche (Abb. 38).

Wie bei der Horizontalkrümmung zeigt Transekt E im Oberhangbereich vorrangig divergente, im Mittelhangbereich gestreckte und im Unterhangbereich konvergente Reliefformen (Abb. 36). Auch Transekt F weist ein dominant konvergentes Relief auf (Abb. 37).

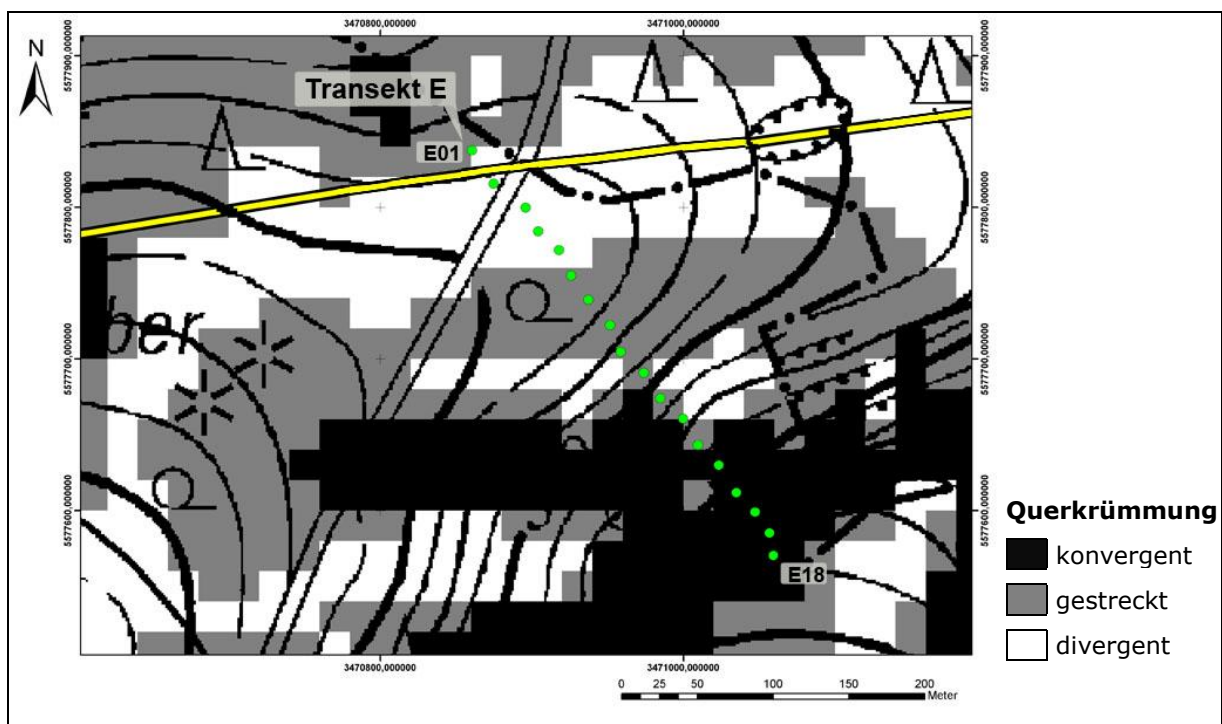


Abb. 36: Querkrümmung in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E)

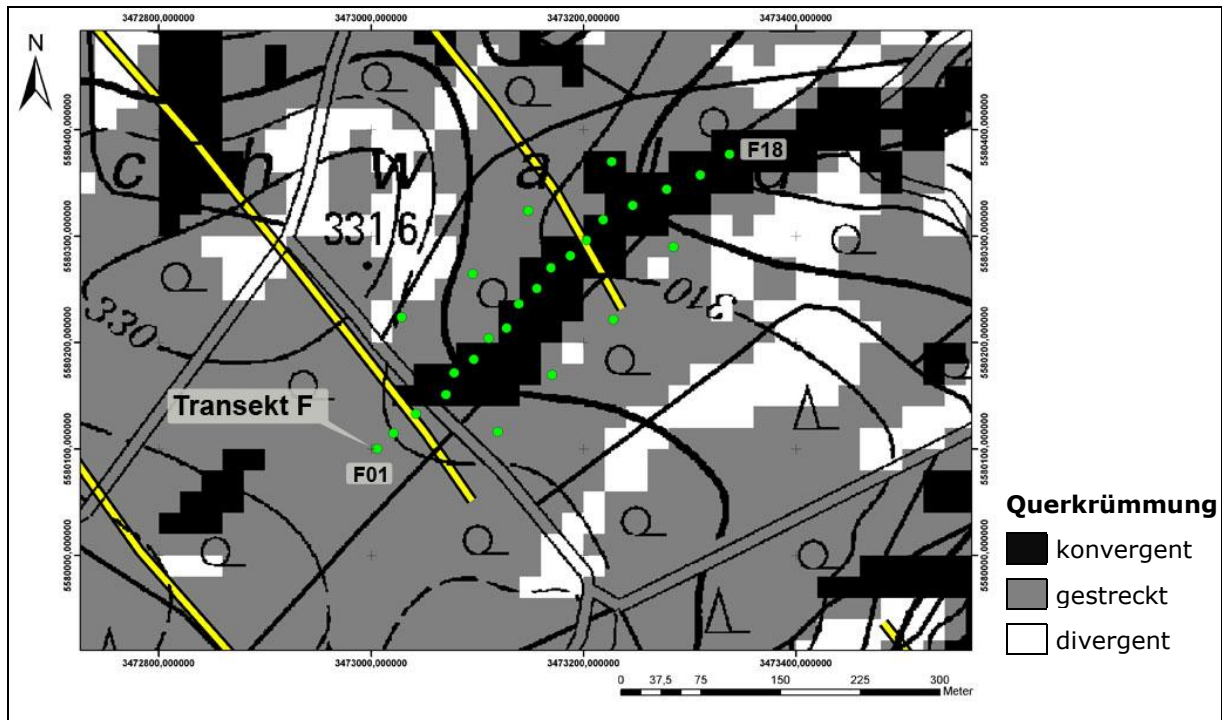


Abb. 37: Querkrümmung in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt F)

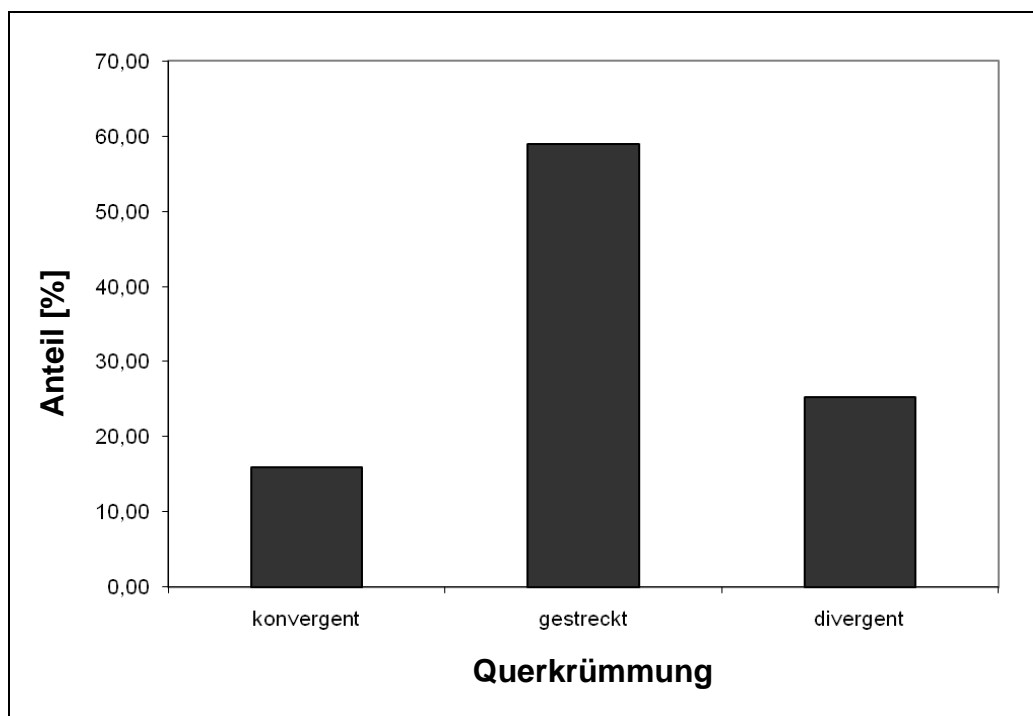


Abb. 38: Häufigkeitsverteilung der Querkrümmung in Untersuchungsgebiet 2; als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Massenbilanz-Index

Durch den Einfluss der Basisgrößen des Massenbilanz-Index weisen über 70% der Flächen des Untersuchungsgebietes eine ausgeglichene Massenbilanz auf (Abb. 41). Im unmittelbaren Bereich der Transekte E und F zeichnet sich analog zur Horizontal- und Querkrümmung ein differenzierteres Bild ab. So weist Transekt E im Oberhangbereich eine ausgeglichene Massenbilanz auf, die im Mittelhangbereich negativ wird und im Unterhangbereich deutlich positiv ausfällt (Abb. 39). Transekt F weist ebenfalls einen ausgeglichenen MBI auf, der aber schon im Mittelhangbereich positiv wird (Abb. 40).

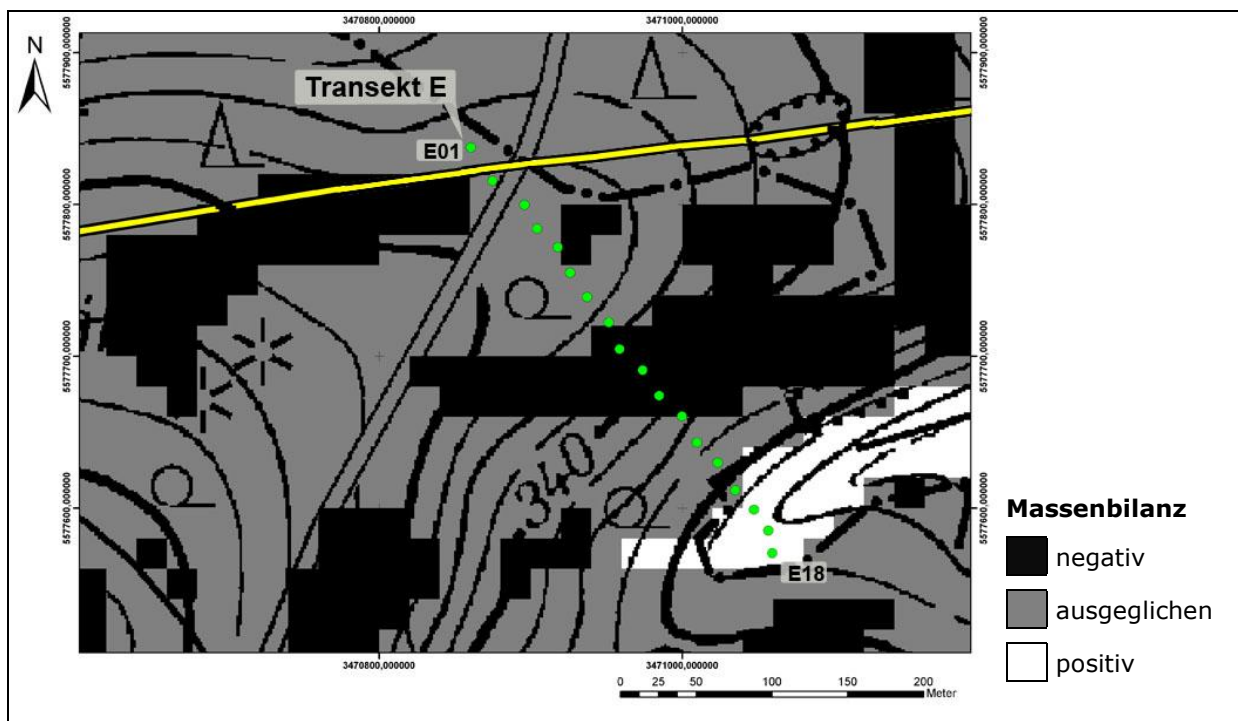


Abb. 39: Massenbilanz in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E)

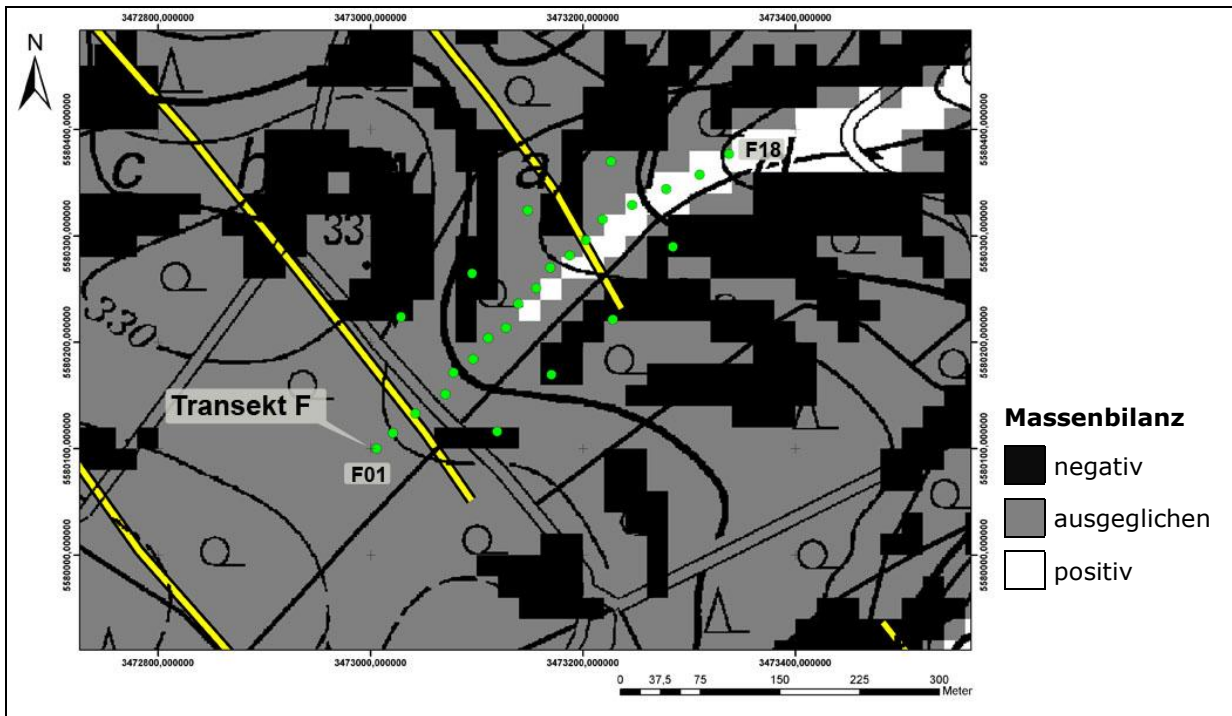


Abb. 40: Massenbilanz in Untersuchungsgebiet 2 (Transect F)

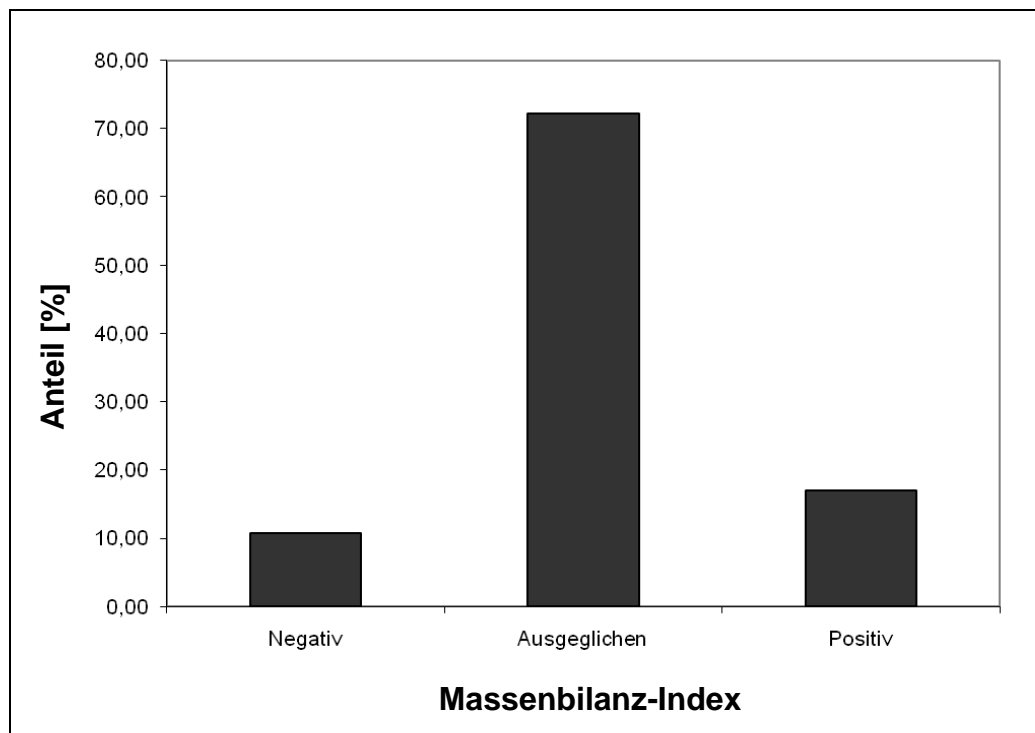


Abb. 41: Häufigkeitsverteilung der Massenbilanz in Untersuchungsgebiet 2; als Datengrundlage dienten die Rasterzellen des DGM (n=ca.75000)

Im Hinblick auf die nachfolgende Betrachtung des Zusammenhangs der Reliefeigenschaften und der solifluidalen Transportweite erzbürtigen Bleis sind in Tabelle 3 die Reliefausprägungen im Bereich der jeweiligen Erzgänge entlang der Transekte dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht über die geomorphometrischen Reliefparameter im Bereich der jeweiligen Erzgänge entlang der Transekte

Transekt/ Erzgang	Bereich [Transekt/ Proben Nr.]	Höhe über N.N. [m]	Hang- neigung [°]	Ex- position	<i>Relief-Formelemente (Dikau 1989)</i>		
					Vertikal- Krümmung	Horizontal- Krümmung	Quer- Krümmung
<u>Transekt A</u>							
Erzgang 5	A03/04 - A07	420-430	5-7	SW	konvex	gestreckt	gestreckt
Erzgang 4	A09 - A13	415-410	2-3	SW	konkav	divergent	divergent
Erzgang 3	A14 - A17	407,5-405	2-3	SW	gestreckt	divergent	divergent
Erzgang 2	A26 - A31	390-375	7-10	SW	gestreckt	divergent	divergent
<u>Transekt B</u>							
Erzgang 4	B03 - B05	410-400	7-10	S	gestreckt	gestreckt	konvergent
Erzgang 3	B09 - B12	390-380	10-15	S	konkav	gestreckt	gestreckt
Erzgang 2	B18 - B20	355-340	10-15	SW	gestreckt	konvergent	konvergent
<u>Transekt C</u>							
Erzgang 5	C02 - C05	415-405	7-10	SW	konvex	divergent	divergent
Erzgang 4	C06/07 - C11	400-380	7-10	SW	konvex	divergent	divergent
Erzgang 3	C12 - C16	380-360	10-15	S	konvex	divergent	divergent
<u>Transekt D</u>							
Erzgang 5	D03 - D06	400-380	10-15	W	konvex	konvergent	konvergent
<u>Transekt E</u>							
Erzgang E	E02 - E04	360	5-7	NE	gestreckt	divergent	divergent
<u>Transekt F</u>							
Erzgang F1	F03 - F06	325-315	3-5	NE	gestreckt	konvergent	konvergent
Erzgang F2	F12 - F17	310-300	10-15	NE	konkav	konvergent	konvergent

3.2 Ergebnisse der bodenkundlichen Geländeaufnahme

3.2.1 Untersuchungsgebiet 1

Die im Zuge der bodenkundlichen Geländeaufnahme erstellte Bodenkarte im Bereich des Untersuchungsgebietes 1 (Abb. 42) zeigt die vier Transekte, sowie die auskartierten Bodeneinheiten. In der Legende sind die vorkommenden Bodentypen nummeriert. Die korrespondierende Bodeneinheits-Nummer (BE-Nr.) bezieht sich auf die in der Bodenkarte des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG 1977) verwendete Nomenklatur und Nummerierung.

Der engen genetischen Beziehung Deckschichten/Bodentypen wird Rechnung getragen, indem zuerst die Ausprägung des Reliefs im Bereich der Transekte dargestellt wird und dann im Detail auf die anstehenden Bodentypen und deren Eigenschaften eingegangen wird.

Ein Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Ausprägung der periglazialen Lagen und damit einhergehend mit den ausgebildeten Bodentypen kann insofern festgestellt werden, als dass in Bereichen mit höherer Hangneigung meist geringmächtigere Böden ausgebildet sind. Dies ist deutlich bei Transekt C zu erkennen (Tab. A18).

Für die Exposition lässt sich kein signifikanter Zusammenhang mit der Ausprägung der periglazialen Lagen feststellen. Da die Exposition maßgeblich den Lösslehmgehalt beeinflusst (luv-seitig ist durch Erosion der Lösslehmgehalt geringer), zeigen die südwestlich bis westlich exponierten Transekte ein dominantes Auftreten von Braunerden (Abb. 42).

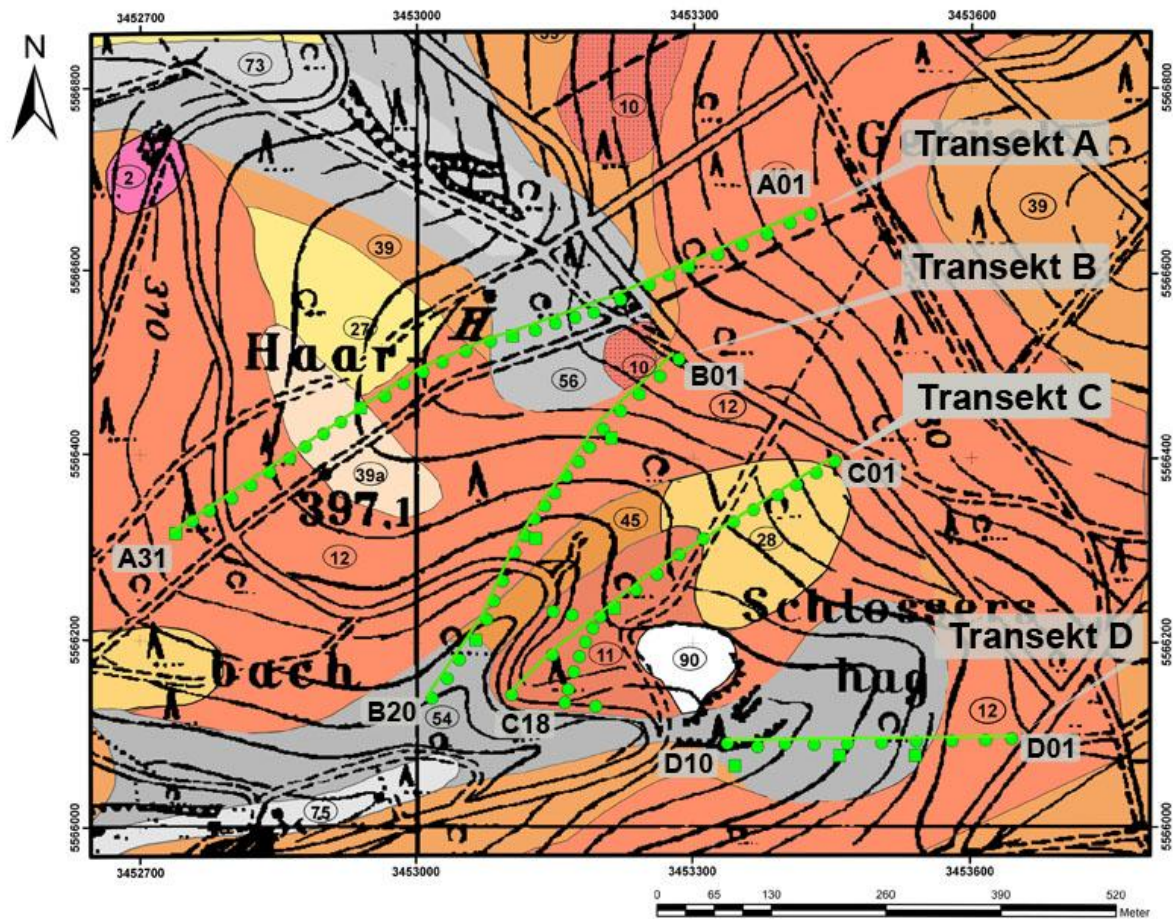
Die Betrachtung der Beziehung der Deckschichtenausprägung und Vertikalkrümmung zeigt in stark konvexen Hangbereichen eine durchgängig fehlende Mittellage und eine extrem ausdünnende, stellenweise sogar fehlende Basislage (Transekt C) (Tab. A18). Die Hauptlage hingegen ist flächendeckend verbreitet. Allerdings führt zunehmende Konvexität generell auch zu einer Zunahme der Skelettgehalte in der Hauptlage. So sind bei Transekt C skelettreiche, lösslehmarme Hauptlagen oder Basislagen über anstehendem Gestein in vertikal konvexen und divergenten Hangbereichen zu finden. Bei längeren Hängen mit mittlerer und hoher Neigung setzen in konkaven Bereichen

häufig Mittellagen an der Grenze vom Mittelhang zum Unterhang ein (Transekt A und D; Abb. 42; Tab. A5, A8 und A15).

Hinsichtlich der Horizontalkrümmung ist festzustellen, dass in stark divergenten Positionen die Hauptlagen deutlich geringmächtiger sind und einen höheren Skelettgehalt aufweisen, während lösslehmreiche Mittellagen vorwiegend auf konvergente Formen beschränkt sind. Aufgrund des homogenen geologischen Untergrundes kann bei horizontal gestreckten Hängen (Transekt A und B) im Gegensatz zu vertikal konvexen Hängen (Transekt C) eine differenziertere Deckschichtenausprägung festgestellt werden. So reicht die Bandbreite der anstehenden Bodentypen bei Transekt A und B von erodierte Braunerden über Braunerden variabler Mächtigkeit bis hin zu dreischichtigen Parabraunerden, während bei Transekt C vorwiegend nur geringmächtige Braunerden anzutreffen sind (Abb. 42).

Insgesamt zeigt die Querkrümmung einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Ausprägung der Bodentypen und damit einhergehend auf die Mächtigkeit der periglazialen Deckschichten als die Vertikalkrümmung. Von divergenten zu konvergenten Formen ist eine generelle Abnahme der Skelettgehalte festzustellen (Tab. A5 – A20). Dies gilt sowohl für die Hauptlage wie auch für die Basislage. Des Weiteren zeigt die Basislage in konvergenten Bereichen eine deutliche Mächtigkeitzunahme. Parabraunerden mit lösslehmreichen Mittellagen setzen bevorzugt in konvergenten Formen im Mittelhangbereich ein (Abb. 42 und Tab. A6, A14 und A15). In Basislagen aufgearbeitetes saprolithisches Material führt außerdem großflächig zu Staunässebildung (Abb. 42, Tab. A11 und A14). Im Bereich der Transekte B und D sind deshalb verbreitet Pseudogley-Parabraunerden und Pseudogleye anzutreffen (Abb. 42).

Transekt A ist das längste beprobte Transekt mit einer Gesamtlänge von 740 m und enthält 31 Probennahmepunkte von denen 27 mit dem Pürckhauer beprobt wurden. Die vier weiteren B-Horizontproben stammen aus den angelegten Profilgruben. D.h. Probennahmepunkt A06 ist gleichbedeutend mit Profilgrube A1, A14 mit Profilgrube A2, A21 mit Profilgrube A3, A31 mit Profilgrube A4 (siehe Tab. A5-A15).



Nr.	BE-Nr.	Bodentyp
1)	2	Ranker
2)	10	Braunerde [30-100 cm mächtig]
3)	11	Braunerde [30-60 cm mächtig]
4)	12	Braunerde [60-100 cm]
5)	27	Parabraunerde, stark erodiert [0-30 cm]
6)	28	Parabraunerde, erodiert [30 -60 cm]
7)	39	Parabraunerde [60-100 cm]
8)	39a	Parabraunerde/Braunerde, kolluvial überdeckt
9)	45	Parabraunerde, kolluvial überdeckt
10)	54	Pseudogley-Parabraunerde
11)	56	Pseudogley-Parabraunerde [60-100 cm]
12)	73	Pseudogley
13)	90	anthropogen verändertes Gelände z. B. Halden

Abb. 42: Bodenkarte des Untersuchungsgebietes 1 (Heftrich, Transekt A-D)

Die anstehenden Norm-Braunerden im Bereich von A01-A06 bestehen aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer oder Schieferzersatz und sind vereinzelt blockreich. Die Hauptlage besitzt hier eine Mächtigkeit von 45 cm, die Basislage ca. 30 cm. Darunter folgt der Tonschiefer der zum Teil aber bereits ab ca. 60 cm Tiefe als massives Gestein ansteht, das von vereinzelt Klüften durchzogen ist. Im Zuge der mesozoisch-tertiären Verwitterung entstanden hier wohl saprolitisierte, lehmige Verwitterungsbahnen.

Ab Probennahmepunkt A07 bis A14 nimmt die Gesamtmächtigkeit zu. Deutlich zeigt sich dies an der Hauptlage deren Mächtigkeit bei A14 (Tab. A6) auf 55 cm zunimmt, außerdem setzt hier eine Mittellage ein. Ab einer Profiltiefe von 75-80 cm fungiert der Tonschiefer-Saprolith als Staukörper. Aufgrund des tonreichen Unterbodens tendieren hier viele Parabraunerden zu Staunässebildung. Stellenweise ist südöstlich der Beprobungspunkte A09 und A10 ein reliktscher rAp-Horizont anstelle des Ah aufzufinden, was auf die hochmittelalterliche Ackerbauphase in den höheren Lagen des Mittelgebirges zurückzuführen sein kann. Solche Bereiche sind recht häufig anzutreffen, da vielerorts der ackerbaulichen und bergbaulichen Nutzung der Mittelgebirgsräume im Mittelalter Rodungsphasen vorausgingen (Born 1989; Köster 2000).

Im weiteren Verlauf des Transekts folgt ein gestreckter Hangbereich mit sehr geringer Neigung ($\sim 2^\circ$). Zwar ändert sich die Mächtigkeit der Böden nur geringfügig, jedoch lässt sich hier aber nicht mehr so zwingend die stark lösslehmhaltige Mittellage bestimmen. Bei A24 zeigt sich eine kolluviale Überprägung der anzutreffenden Braunerden. Die optischen Hinweise der kolluvialen Überprägung werden durch den geringen Skelettgehalt ($\sim 30\%$) (Tab. A16), wie auch die Spurenelement- und Isotopenanalyse bestätigt (Tab. A22 und A29). Von Probennahmepunkt A25 steigt die Neigung des Hanges auf 10° an, damit einhergehend nimmt die Mächtigkeit deutlich ab. Die Braunerde zeigt hier eine maximale Mächtigkeit von 50-70 cm.

Transekt B mit einer Länge von 460 m zeigt eine typische Reliefierung. Im schwach geneigten, langgestreckten Topbereich sind geringmächtige Braunerden entwickelt. Es folgt ein relativ abrupter Wechsel in einen steilen, konvex-konvergenten Mittelhang. Hier, wie auch bei den Probennahmepunkten B01 bis B12, handelt es sich fast durchgängig um 50-70 cm mächtigen schluffigen Lehm der in der Basislage sandiger wird (Tab. A17). Innerhalb des konkav-gestreckten Unterhangbereichs von B12 bis B17 nimmt die allgemeine Mächtigkeit zu. Die

Basislage der Braunerde ist mit über 70 cm sehr mächtig (Tab. A11). Im Bereich der Probennahmepunkte B18 bis B20 nimmt der Skelettgehalt ab, einhergehend mit deutlicher Staunässebildung. Zwar weist der recht hohe Gehalt an organischer Substanz auf kolluviale Überprägung hin, dagegen spricht jedoch der relativ hohe Skelettgehalt.

Transekt C besteht aus 18 Probennahmepunkten bei einer Länge von 420 m. Der obere Bereich des Transekts zeigt stellenweise ein konkav bis konvexes Relief bei durchgehend divergenter Querkrümmung und leichter bis mittlerer Hangneigung (5-10°). Während bei Probennahmepunkt C01 noch eine Braunerde ausgebildet ist, zeigen die folgenden Probennahmepunkte C02-C07 Reste einer stark erodierten Parabraunerde. Der rAp-Horizont hat eine Mächtigkeit von ca. 20 cm. Die bei Probennahmepunkt C11 (Tab. A12) anstehende Norm-Braunerde besteht aus blockreichem Schutt mit geringem Lösslehmgehalt über Schiefer oder Schieferzersatz. Dem Transekt C folgend wird das Relief konvexer, einhergehend mit deutlich stärkerer Hangneigung (15-20°). Die Hauptlagen der hier ausgebildeten Braunerden sind mit ca. 25 cm sehr geringmächtig. Auffällig sind Hartgesteinsdurchragungen des anstehenden Tonschiefers wodurch kleinräumig ein Übergang zum Syrosem zu beobachten ist.

Transekt D ist mit 320 m Länge und nur 10 Probennahmepunkten das kürzeste Transekt. Hier sind drei Leitprofile parallel zu den Probennahmepunkten angelegt und aufgrund der west-nordwestlichen Exposition sind die ausgeprägten Böden deutlich mächtiger. Der Skelettgehalt ist gering, der Schluffgehalt recht hoch. Das Leitprofil D1 (Tab. A13) zeigt eine Pseudogley-Parabraunerde. Die Hauptlage ist hier 50 cm mächtig, die Mittellage 65 cm. Das im Mittelhang angelegte Leitprofil D2 besitzt eine im Gegensatz zu Leitprofil D1 deutlich mächtigere Hauptlage (Tab. A14). Der entwickelte Bv-Horizont zeigt eine Zweiteilung, wobei der tonig-schluffige Bv I deutlich weniger Skelett aufweist und bei der Geländeansprache als kolluviale Überdeckung angesprochen werden kann. Der geringe Gehalt an organischem Kohlenstoff entkräftigt diese Vermutung jedoch.

Das durchgängig konvexe Relief ändert sich zum Unterhang hin in eine konkav-konvergente Form. Die im Leitprofil D3 anstehende Pseudogley-Parabraunerde weist die größte Mächtigkeit auf. Die Mächtigkeit der Mittellage beträgt hier mehr als 1 m (Tab. A15).

3.2.2 Untersuchungsgebiet 2

Die beiden Transekte liegen ungefähr 2 km voneinander entfernt, Transekt E befindet sich dabei westlich von Pfaffenwiesbach und Transekt F östlich davon.

Der in Untersuchungsgebiet 1 beobachtete Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Ausprägung der periglazialen Lagen bestätigt die Feststellung, dass in Bereichen mit größerer Hangneigung geringmächtigere Böden ausgebildet sind (Abb. 43 und Tab. A20).

Aufgrund der Ost-Exposition der Transekte E und F und den damit einhergehenden höheren Lösslehmgehalt, weisen die beiden Transekte teilweise deutlich tiefgründigere Böden auf. Bei Transekt E wird dieser Effekt im Mittelhangbereich allerdings durch die hohe Hangneigung stark reduziert (Abb. 43 und Tab. A20).

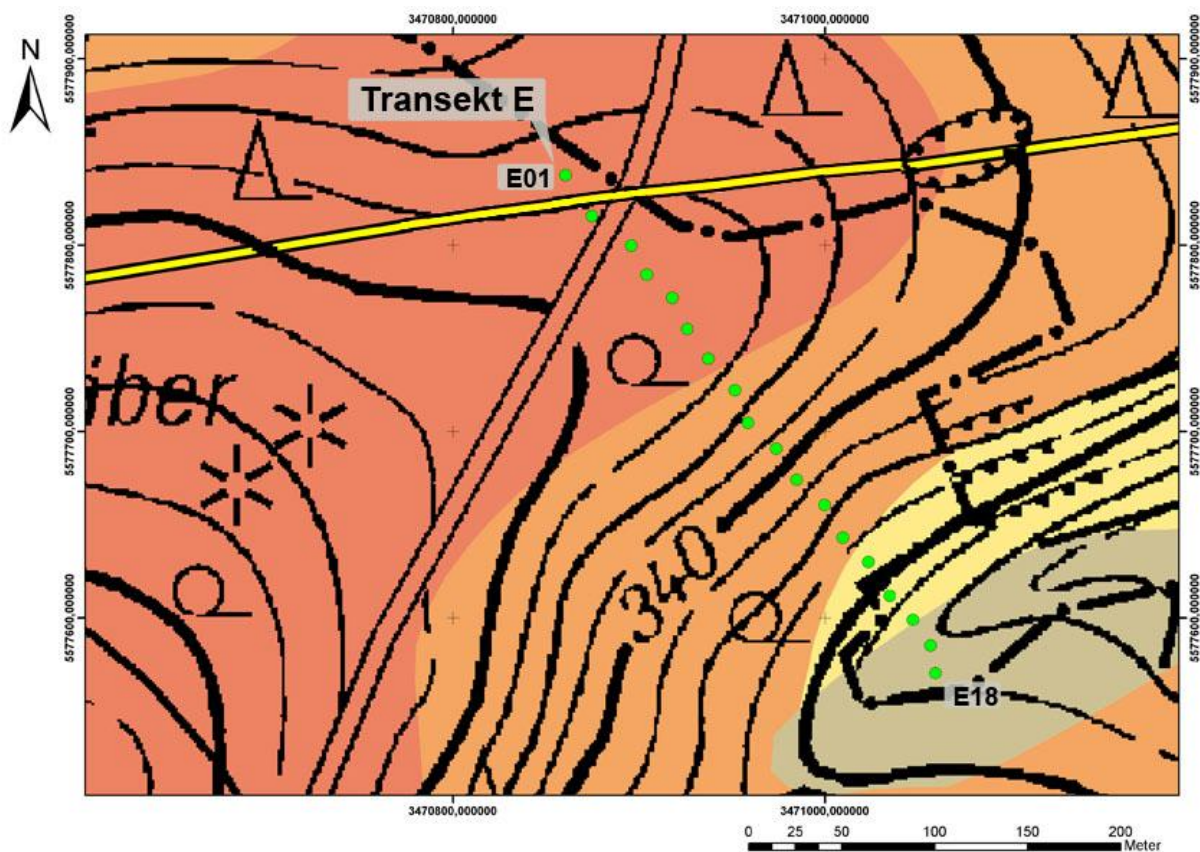
Auch in Untersuchungsgebiet 2 fehlt in stark konvexen Hangbereichen die Mittellage. Die Hauptlage ist auch hier flächendeckend verbreitet. Zunehmende Konvexität resultiert in einer Zunahme der Skelettgehalte in der Hauptlage (Abb. 43 und Tab. A20). Bei Transekt F ist im langgestreckten Hangbereich mit mittlerer Neigung das Einsetzen der Mittellage im konkaven Bereichen an der Grenze vom Mittelhang zum Unterhang erkennbar (Abb. 44 und Tab. A21).

Auch in Untersuchungsgebiet 2 sind die Hauptlagen in stark divergenten Positionen deutlich geringmächtiger und weisen einen höheren Skelettgehalt auf, während lösslehmreiche Mittellagen vorwiegend auf konvergente Formen beschränkt sind (Abb. 43 und 44, Tab. A20 und A21). Der homogene geologische Untergrund zeigt bei dem horizontal gestreckten Hang (Transekt F) wie auch bei dem vertikal konvexen Hang (Transekt E) eine differenzierte Deckschichtenausprägung. Die darin ausgebildeten Bodentypen reichen von erodierten Braunerden über Braunerden variabler Mächtigkeit bis hin zu dreischichtigen Parabraunerden (Abb. 43 und 44).

Der stärkere Einfluss der Querkrümmung auf die Ausprägung der periglazialen Deckschichten wird auch in Untersuchungsgebiet 2 bestätigt. So ist von divergenten zu konvergenten Formen eine Abnahme der Skelettgehalte festzustellen (Tab. A20 und A21). Dies gilt sowohl für die Hauptlage wie auch für die Basislage. Auch hier zeigt die Basislage in konvergenten Bereichen eine deutliche Mächtigkeitzunahme und lösslehmreiche Mittellagen setzen bevorzugt

in konvergenten Formen im Mittelhangbereich ein, großflächige Staunässebildung durch in Basislagen aufgearbeitetes saprolithisches Material ist ebenfalls zu beobachten (Abb. 43 und 44; Tab. A20 und A21).

Transekt E, ausgehend von der Vererzung „Usinger Quarzgang“ (ehemalige Gruben „Heinrich“ und „Jeanette“) ist 340 m lang, besteht aus 18 Probennahmepunkten und ist nach SE exponiert (Abb. 43). Im Oberhangbereich liefert der anstehende Grauwackenschiefer eine deutliche Sandkomponente. Hangabwärtig tritt die Sandführung zugunsten eines verstärkten Schluffgehaltes zurück. Im Bereich nordwestlich des Transekts ist die hier anstehende Braunerde stellenweise kolluvial überprägt, außerdem lassen sich Spuren mittelalterlicher Bodennutzung finden.

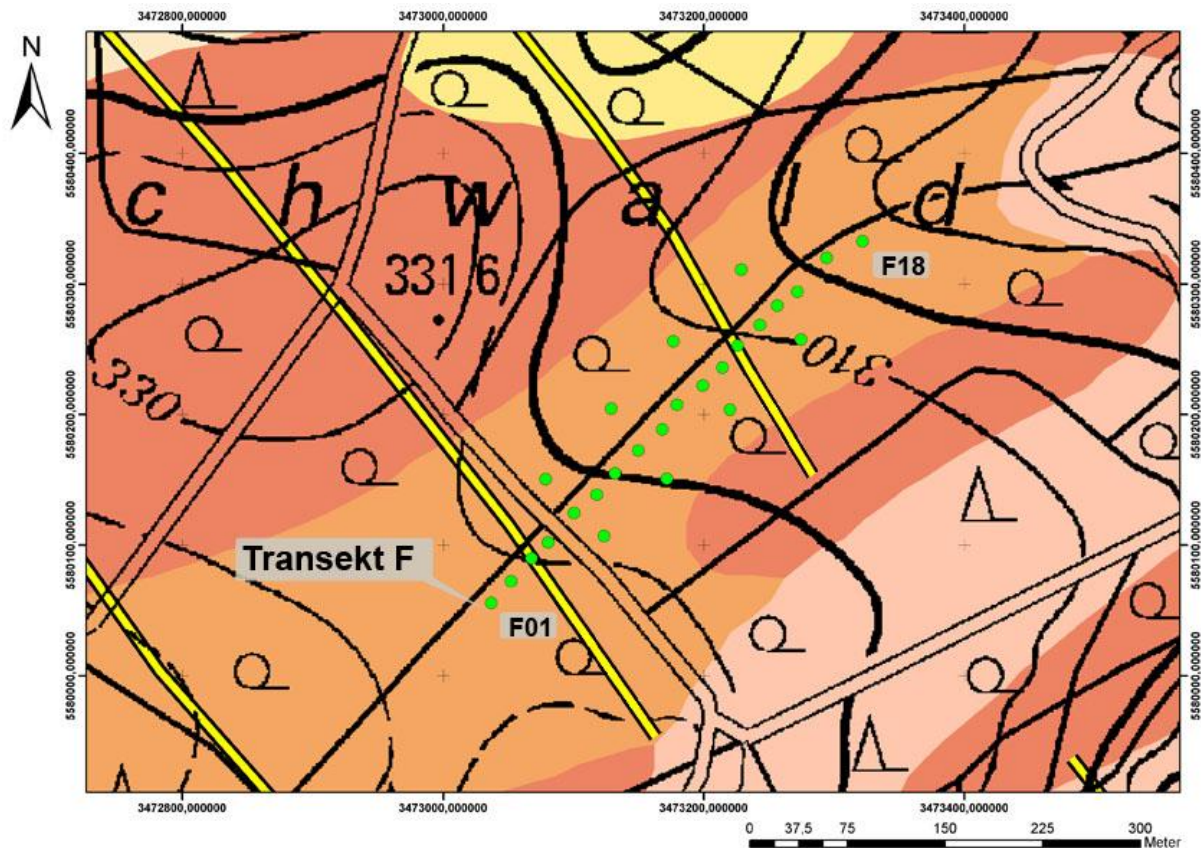


Nr.	BE-Nr.	Bodentyp
1)	10	Braunerde [30-100 cm mächtig]
2)	11	Braunerde [30-60 cm mächtig]
3)	53	Pseudogley-Parabraunerde, z. T. kolluvial überdeckt
4)	72	Pseudogley, örtl. kolluvial überdeckt

Abb. 43: Bodenkarte des Untersuchungsgebietes 2 (Pfaffenwiesbach, Transekt E)

Dem Transekt folgend, setzt ab Probennahmepunkt E09 wahrscheinlich eine geringmächtige Braunerde ein, die z.T. stark erodiert ist. Stellenweise beträgt die Profiltiefe nur 30 cm. Das Relief wird deutlich konvexer und die Hangneigung nimmt von 5-10° auf stellenweise über 20° zu. Im unteren Bereich der Hangversteilung wird die Braunerde wieder zunehmend lehmiger. Die Profilmächtigkeit nimmt zum Unterhangbereich zu und die einsetzende Mittellage weist mehlig Konsistenz auf. Im Bereich der Probennahmepunkte E17 und E18 nimmt die Staunässeführung deutlich zu. Die hier typische Marmorierung des Sw-Horizonts weist auf einen Pseudogley hin. Dieser scheint jedoch kolluvial überdeckt zu sein, weitere Hinweise, die diese Annahme stützen, sind der geringe Grobbodenanteil (30-40%) und der recht hohe Gehalt an C_{org} (Tab. A20).

Transekt F im Bereich des Gangzuges „Hubertus“ ist mit einer Länge von 410 m etwas länger als Transekt E und besteht aus ebenfalls 18 Probennahmepunkten. Die Exposition ist NE. Der fast nicht geneigte, langgestreckte Topbereich geht allmählich in einen gering geneigten, gestreckt-konvergenten Mittelhang über. Das Transekt kreuzt hier den ausgewiesenen Erzgang. Wie auch bei Transekt E gestaltet sich die Probennahme aufgrund der größeren Entwicklungstiefe der Böden wesentlich einfacher. Zudem sind die Böden bindiger, wodurch Verluste beim Ziehen des Bohrstocks geringer sind und dadurch wiederholte Bohrungen vermieden werden können.



Nr.	BE-Nr.	Bodentyp
1)	10	Braunerde [30-100 cm mächtig]
2)	11	Braunerde [30-60 cm mächtig]
3)	27	Parabraunerde, z.T. stark erodiert
4)	39a	Parabraunerde/Braunerde, kolluvial überdeckt

Abb. 44: Bodenkarte des Untersuchungsgebietes 2 (Ziegenberg, Transekt F)

Der Wechsel zwischen Braunerden und z.T. erodierten Parabraunerden ist recht fließend. Die Hauptlage besitzt eine Mächtigkeit von ca. 40 cm, über die Mächtigkeit der Basislage lässt sich keine Aussage machen, da hier keine Profilgruben angelegt wurden. Innerhalb des konkaven Unterhangbereichs nimmt die allgemeine Mächtigkeit nochmals zu. Der höhere Gehalt an organischer Substanz gibt Hinweise auf kolluviale Entstehung.

3.3 Substratmischung in periglazialen Lagen

3.3.1 Spurenelementgehalte

Die meisten Spurenelementgehalte der untersuchten B-Horizonte liegen in Gehaltsbereichen von nicht kontaminierten Böden (Tab. 4, Rosenberg 1991; Alloway 1995). Die Gehalte von Cu, Ni und V liegen sogar im unteren Bereich der publizierten Hintergrundgehalte, wohingegen die leicht erhöhten Gehalte von Nb und Zr durch lokale Überreste äolisch eingetragenen Materials (Löss und LST) erklärt werden können (Schmincke et al. 1999; Frechen et al. 2003; Haase et al. 2007). Hintergrundgehalte von Pb in anstehendem Gestein werden mit 10-20 mg kg⁻¹ angegeben (Ewers & Schlipkötter 1991). Bleigehalte in ungestörten Bodenprofilen reichen von <20 mg kg⁻¹ bis 32 mg kg⁻¹ (Alloway 1995; Kabata-Pendias & Pendias 2001). Basierend auf diesen Daten reichen die Bleigehalte der untersuchten B-Horizonte von niedrigen Hintergrundgehalten bis zu deutlich erhöhten Gehalten (Tab. 4). In fünf Proben sind sogar die Vorsorgewerte der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV, 1999) von 70 mg Pb kg⁻¹ für lehmige und schluffige Böden überschritten.

Tabelle 4: Spurenelementgehalte in den B-Horizonten beider Untersuchungsgebiete (n = 120) sowie Vergleichswerte aus der Literatur

	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb
	----- /mg kg ⁻¹ -----								
Mittelwert	12	96	122	15	44	11	77	16	126
Standardabweichung	2,8	19	19	4,4	12	4,2	16	3,2	23
Spanne	6 - 19	61 - 151	90 - 198	6 - 35	22 - 71	5 - 29	49 - 121	10 - 25	87 - 187
Variationskoeffizient	0,23	0,20	0,16	0,29	0,27	0,37	0,20	0,20	0,18
Alloway (Spanne)	-	3 - 500	5 - 1500	0,5 - 65	2 - 750	2 - 250	1 - 900	-	-
Alloway (Kritische Konzentration ¹)	-	50 - 100	75 - 100	25 - 50	100	60 - 125	70 - 400	-	-
Rosenberg ²	-	51 - 181	78 - 208	-	17 - 81	9 - 32	48 - 120	9 - 28	59 - 211
	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U	Pb-Hintergrundgeh. ³
	----- /mg kg ⁻¹ -----								
Mittelwert	86	33	402	26	454	39	13	3,0	19
Standardabweichung	29	2,6	71	4,4	59	17	1,2	0,66	4,4
Spanne	40 - 194	28 - 40	269 - 560	18 - 45	354 - 629	19 - 135	11 - 16	1,7 - 4,7	14 - 25
Variationskoeffizient	0,34	0,08	0,18	0,17	0,13	0,44	0,09	0,22	0,23
Alloway (Spanne)	-	-	-	-	-	2 - 300	-	0,7 - 9	-
Alloway (Kritische Konzentration ¹)	-	-	-	-	-	100 - 400	-	-	-
Rosenberg ²	31 - 218	26 - 45	268 - 589	15 - 25	274 - 540	19 - 114	9 - 21	< 3 - 4	23

¹ Kritischer Gehalt nach Alloway (1995)² Gehaltsangaben nach Rosenberg (1991) für anstehendes Gestein (Tonschiefer) und lössbeeinflusste Substrate³ Pb-Gehalte des anstehenden Gesteins (Tonschiefer) (n = 5)

3.3.2 Quellen der Spurenelemente in den B-Horizonten

Um gemeinsame Quellen der Spurenelemente in den untersuchten B-Horizonten zu identifizieren, wurde mit dem Datensatz eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) durchgeführt. Obwohl durch die RFA-Analyse die Gehalte von Th und U bestimmt wurden, wurden die beiden Elemente aufgrund ihrer niedrigen Gehalte im Bereich der Nachweisgrenze von der Hauptkomponentenanalyse ausgeschlossen. Die drei extrahierten Hauptkomponenten mit Eigenwerten >1 erklären 58, 17 bzw. 9% der Varianz des Datensatzes (Tab. A27). Aufgrund des verhältnismäßig kleinen Datensatzes wurde die Stabilität der Ergebnisse durch zufälliges Entfernen von 1-3 Proben und anschließender Neuberechnung überprüft. Dieser Vorgang veränderte nicht die Zuordnung der einzelnen Elemente zur jeweiligen Hauptkomponente.

In Abbildung 45 können fünf Gruppen von Spurenelementen mit gemeinsamen Quellen oder Verteilungsprozessen in Böden identifiziert werden. Barium, Co, Cr, Cu, Ga, Ni, Rb, Sc, V und Zn bilden die erste Gruppe. Sie laden auf die Hauptkomponente 1 hoch positiv. Gruppe 2 besteht nur aus Zr, das ebenfalls Hauptkomponente 1 hoch lädt, allerdings negativ (Tab. A27). Diese beiden Gruppen können zweifelsfrei den beiden Hauptbestandteilen der Böden in den Untersuchungsgebieten zugeordnet werden, dem unterlagernden Ausgangsgestein (Tonschiefer; Rosenberg 1991) und dem Löss (Zr; Stahr 1979). Die dritte Gruppe mit Nb und Sr lädt Hauptkomponente 2 hoch negativ. Hier weist speziell die Anwesenheit von Niob auf einen Beitrag der Laacher-See-Tephra hin (Woerner & Schmincke 1984). Yttrium lädt Hauptkomponente 3 hoch positiv und kann keiner speziellen Quelle zugeordnet werden. Es ist in nahezu konstantem Gehalt in allen Bodenproben vorhanden, was dadurch illustriert wird, dass Y von allen betrachteten Spurenelementen den geringsten Variationskoeffizienten aufweist (Tab. 4). Die fünfte Gruppe wird von erzbürtigem Pb gebildet.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Elemente mit der jeweils höchsten Ladung jeder Hauptkomponente als spezifischer Tracer für jedes identifizierte Substrat gewählt. Im Einzelnen ist dies Cr als Tracer des Tonschiefers, Zr als Tracer des Löss, Nb als Tracer der Laacher-See-Tephra und Pb als Tracer der Erzgänge. Vor der Anwendung eines Mischungsmodells muss jedoch sichergestellt sein, dass die Gehalte dieser Tracer-Elemente nicht signifikant von

atmosphärischer Deposition beeinflusst sind. Deswegen ist es erforderlich vorab die Tiefenverteilung dieser Elemente in ausgewählten Bodenprofilen der sechs Transekte zu untersuchen.

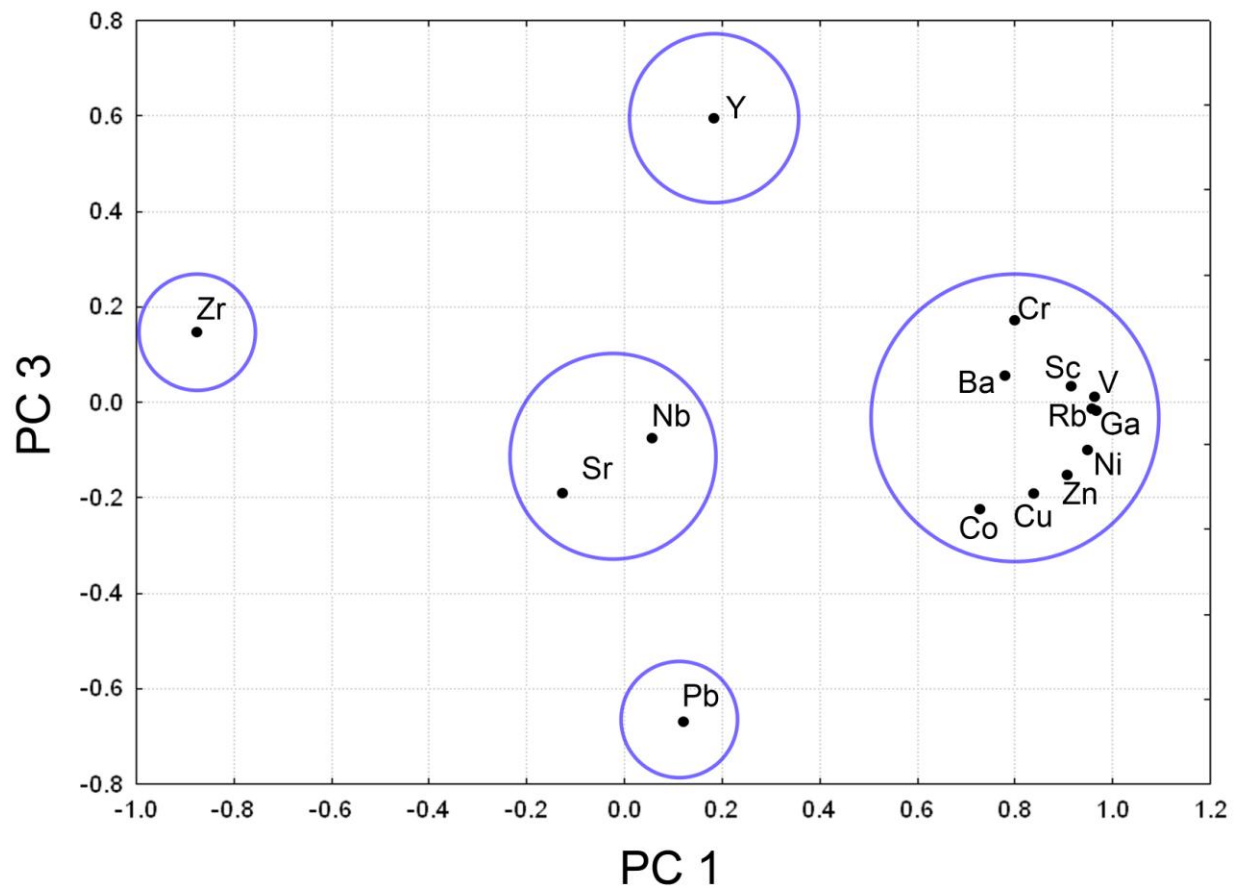


Abb. 45: Ladung der durchschnittlichen Spurenelement-Gehalte in 120 B-Horizontproben nach einer Hauptkomponentenanalyse mit Varimax-Rotation auf die Hauptkomponenten (PC) 1 und 3

3.3.3 Tiefenverteilung der Spurenelementgehalte

Die Cr-Gehalte steigen von den organischen Auflagehorizonten zur Basislage an, bzw. der untersten Lage der Deckschichtenabfolge und dem Ausgangsgestein, an (Abb. 46). Der mittlere Cr-Gehalt des anstehenden Tonschiefers beträgt 178 mg kg^{-1} . Die Cr-Gehalte der B-Horizonte liegen zwischen den niedrigen Werten der organischen Auflagehorizonte und den deutlich höheren Werten des anstehenden Tonschiefers. Dies legt die Vermutung nahe, dass Chrom in den B-Horizonten hauptsächlich aus dem Tonschiefer stammt, jedoch durch äolische Beimengungen verdünnt wurde.

Die höchsten Zr-Gehalte sind mit bis zu 400 mg kg^{-1} in den B-Horizonten zu finden. In der organischen Auflage wie auch im Tonschiefer sind die Gehalte deutlich geringer, was auf äolischen Ursprung der Zr-Gehalte in den B-Horizonten hinweist. Nb zeigt ein ähnliches Muster wie Zr, die Mittelwerte der Gehalte in den B-Horizonten liegen hier allerdings auf deutlich geringerem Niveau von 26 mg Nb kg^{-1} .

Anthropogene Verunreinigung von Böden durch Pb ist ein bekanntes Problem in den Umweltwissenschaften (Nriagu 1990). Erhöhte Pb-Gehalte in O- und A-Horizonten gegenüber dem Unterboden weisen grundsätzlich auf hohe atmosphärische Einträge während der letzten Jahrzehnte hin (Horn et al. 1993; Haack et al. 2003). Die anthropogenen Blei-Depositionen (1950-1989) werden auf 1 g Pb m^{-2} im Bundesdurchschnitt und auf $1,4 \text{ g Pb m}^{-2}$ für Waldstandorte geschätzt (Dörr et al. 1990; Haack et al. 2003). Wie von Emmanuel & Erel (2002) beschrieben, sind hohe Pb-Gehalte in den Auflagehorizonten das Ergebnis einer starken Pb-Retention in der organischen Substanz. Allerdings wird ebenso meist eine deutliche Abnahme mit der Tiefe beobachtet. Die höchsten anthropogenen Pb-Gehalte treten im unteren Bereich des Oberbodens (A-Horizonte) mit Mittelwerten von $144 \text{ mg Pb kg}^{-1}$ auf.

Tiefenprofile der Gehalte alleine können allerdings nicht eindeutig eine anthropogene Verunreinigung erklären, da Anreicherungen auch durch natürliche Prozesse erfolgt sein können. Pb-Isotopenanalysen haben gezeigt, dass anthropogene Verunreinigungen durch ihre Pb-Isotopensignaturen deutlich vom nicht verunreinigten Hintergrundsignal unterschieden werden können. Dies setzt allerdings voraus, dass sich die Pb-Isotopensignaturen des Ausgangsgesteins und der atmosphärischen Deposition signifikant unterscheiden (Hansmann & Köppel 2000).

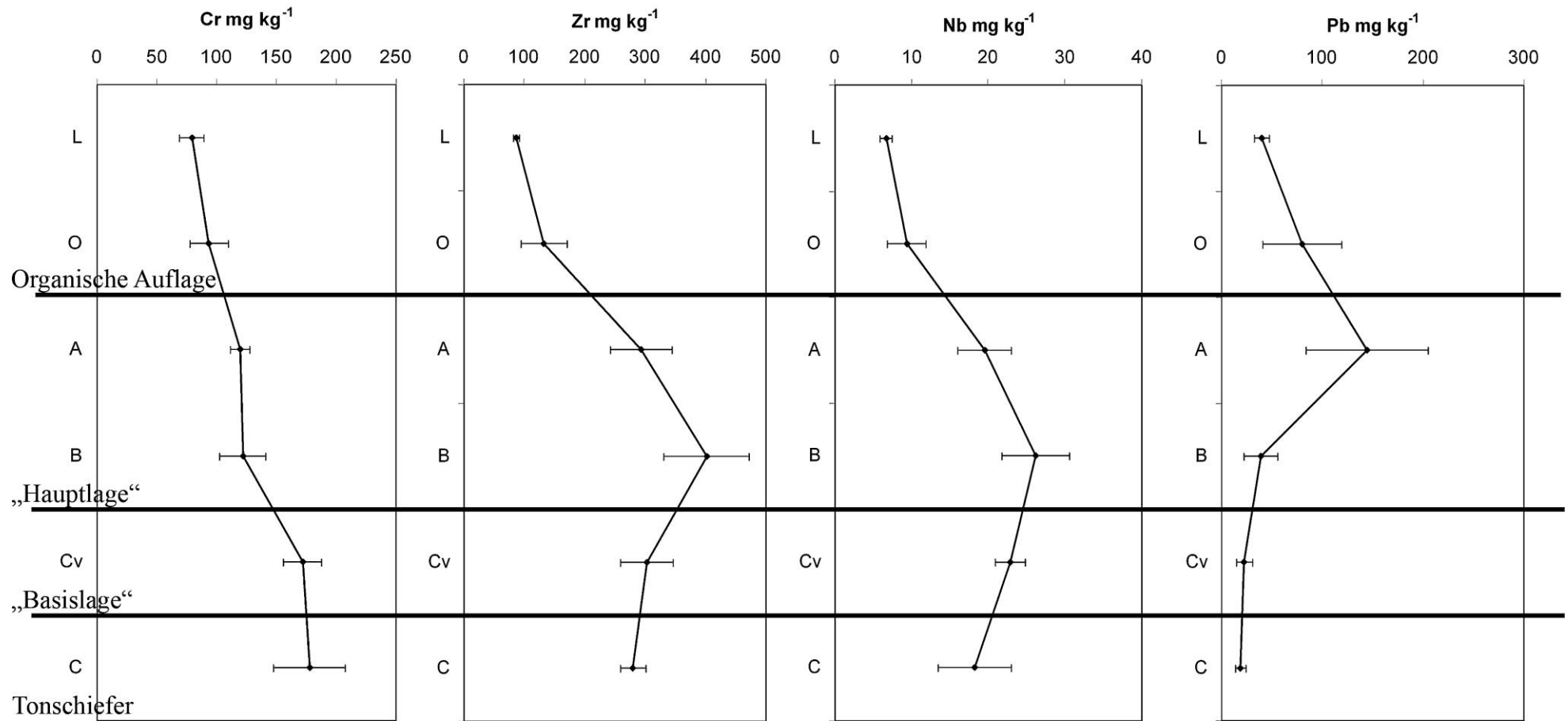


Abb. 46: Tiefenverteilung der mittleren Gehalte von Cr, Zr, Nb und Pb die repräsentativ für die Substrate Tonschiefer, Löss, LST und Erz sind. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung L (n=6), O (n=10), A (n=11), B (n=120), Cv (n=7) und unverwitterter massiver Tonschiefer (mCn) (n=4) (Tab. A28)

Um zu bestätigen, dass die beobachteten hohen Pb-Gehalte in den organischen Auflagehorizonten tatsächlich auf den Eintrag von anthropogenem Pb zurückzuführen sind, wurden die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse von 7 O, 4 A and 46 B Horizonten bestimmt (Tab. A29 und A34).

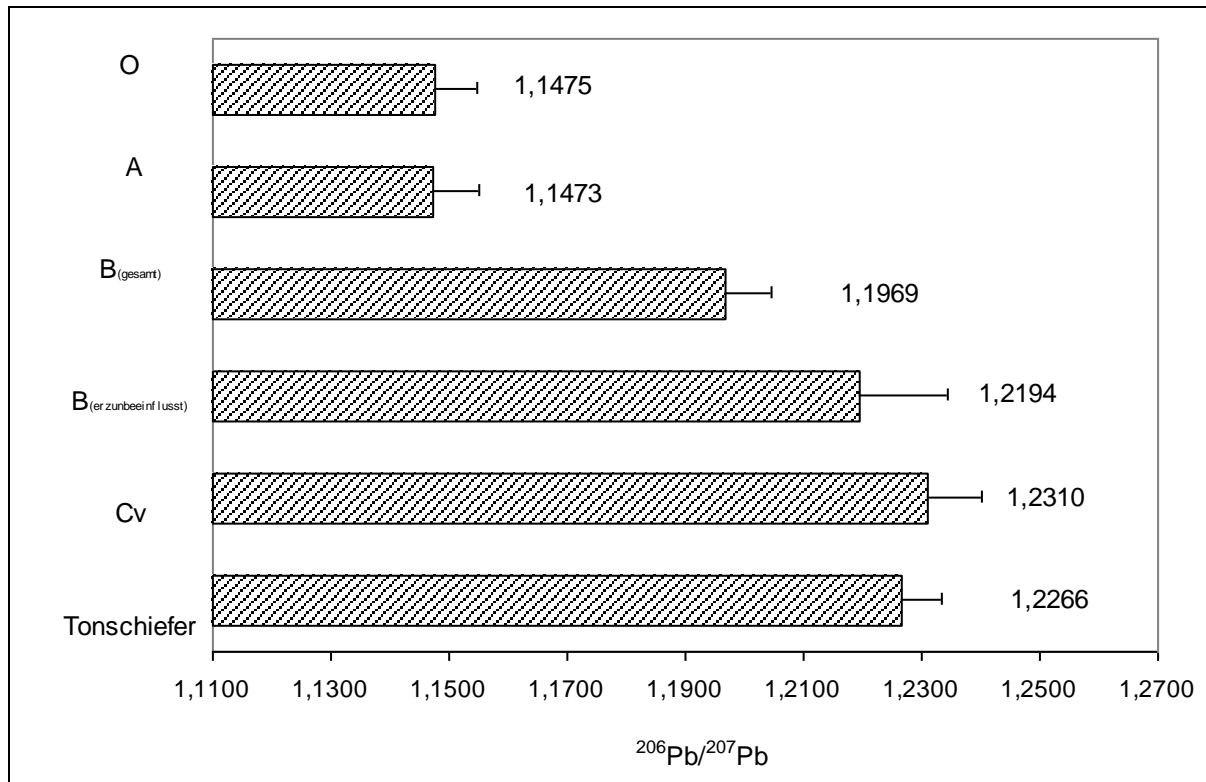


Abb. 47: Mittlere $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenverhältnisse von Of (n=7), Ah (n=4), B(gesamt) (n=46), B(erzunbeeinflusst) (n=11), Cv (n=4) und Tonschiefer/mCn (n=3); die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an

Der O-Horizont besitzt ein mittleres $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnis von $1,1475 \pm 0,0069$, der A Horizont von $1,1473 \pm 0,0093$ (Abb. 47). Nach Hopper et al. (1991) und Véron et al. (1999) lässt sich die Herkunft von Pb in Tetraethyl verbleitem Benzins nachweisen durch die Pb-Isotopensignaturen europäischer Aerosole. Das $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnis der European Standard Lead Pollution (ESLP) beträgt ca. 1,135 (Komarek et al. 2006).

Die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse aller 46 B-Horizonte liegen zwischen 1,1698 und 1,2308 (Mittelwert $1,1969 \pm 0,0150$) (Tab. A29). Diese Werte schließen allerdings sowohl die erzbeeinflussten als auch die nicht erzbeeinflussten Untersuchungsgebiete ein. Dies macht eine Trennung der B-Horizonte in zwei Gruppen notwendig. Dabei zeigen die erzbeeinflussten Untersuchungsgebiete einen Mittelwert von $1,1901 \pm 0,0086$ (Spanne 1,1698-1,2076) und die 11 nicht von Pb-Erzgängen beeinflussten B-Horizonte einen Mittelwert von

1,2194±0,0078 (Spanne 1,2037-1,2308). Die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse des Cv-Horizonts und des massiven Tonschiefers liegen bei 1,2310 bzw. 1,2266.

Abb. 47 zeigt, dass sich die anthropogene Pb-Signatur deutlich von der des Ausgangssubstrats der B-Horizonte unterscheidet. Außerdem nehmen die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse mit zunehmender Bodentiefe zu. Die gleiche Tiefenverteilung in Böden wurde auch von Haack et al. (2003), Bacon et al. (2006) und Zhang et al. (2007) beobachtet. Diese Tiefenverteilung weist darauf hin, dass die untersuchten Böden Pb aus atmosphärischem Eintrag mit einem niedrigeren $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnis erhalten haben als es das geogene Pb aufweist. Unter der Annahme, dass eine pflanzliche Aufnahme vernachlässigbar ist, spiegeln die Pb-Isotopen-Verhältnisse in den organischen Auflagehorizonten den anthropogenen Eintrag wider und belegen, dass diese Einträge nur geringen Einfluss auf die Metallgehalte in den B-Horizonten besitzen. Des Weiteren ist anzunehmen, dass die Pb-Gehalte in den untersuchten B-Horizonten als eine einfache Mischung der zwei Mischungsglieder Ausgangssubstrat (hauptsächlich eine Mischung aus anstehendem Tonschiefer und äolischem Löss) und anthropogenem Pb zu erklären ist. Um diese Annahme zu verifizieren, wurde in einer Regression die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse gegen den Kehrwert der Pb-Gehalte aufgetragen. Hier zeigte sich eine enge lineare Korrelation ($r=0,74$) (Abb. 48), die die Annahme eines Zwei-Komponenten-Mischungsmodells belegt (Kober et al. 1999; Cloquet et al. 2006).

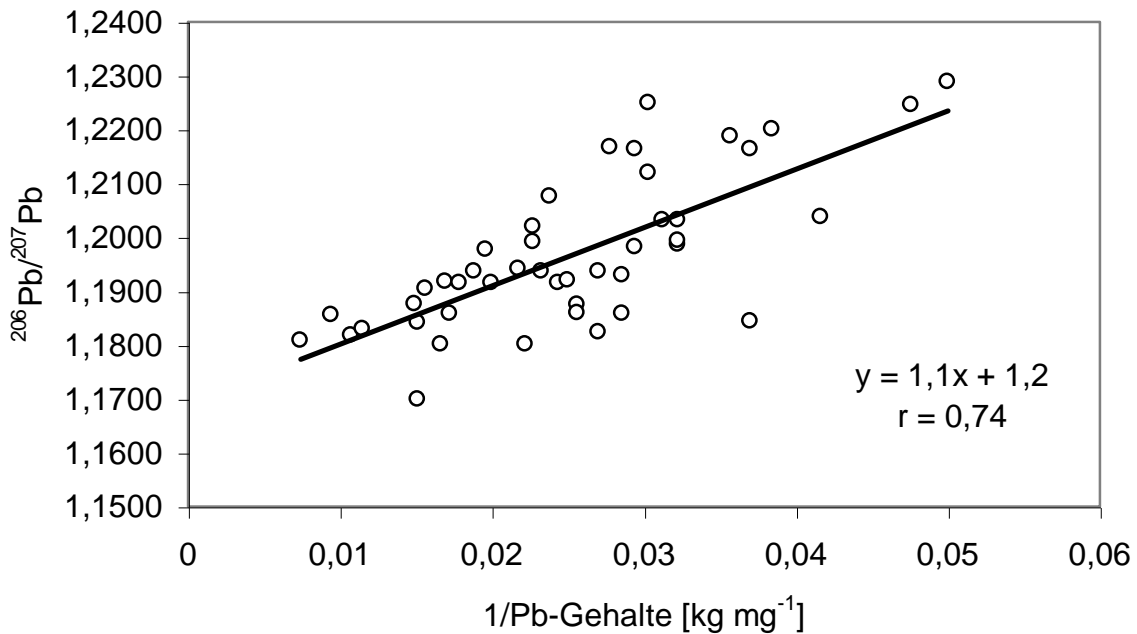


Abb. 48: Zusammenhang zwischen dem Kehrwert der Pb-Gehalte und dem ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Isotopenverhältnis

In einem nächsten Schritt ist es nun möglich den Beitrag von anthropogenem Pb zum Gesamt-Pb mit Gleichung 1 unter Verwendung der Signale der beiden Mischungsglieder zu berechnen. Das niedrigste ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Verhältnis (D01 O: 1,1355) wurde als anthropogenes Mischungsglied und der Mittelwert (1,2343) der höchsten ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Verhältnisse des Tonschiefers (1,2351) und des Löss (1,2335) als Signal des Ausgangssubstrats als zweites Mischungsglied verwendet. Die Auswahl dieser beiden Mischungsglieder des Mischungsmodells garantiert, dass die ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Verhältnisse aller untersuchten Bodenhorizontproben zwischen diesen Werten liegen. Die Richtigkeit der Wahl des Pb-Isotopensignals des anthropogenen Mischungsglieds wird vom publizierten ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Verhältnis von 1,135 (Komárek et al. 2006) der European Standard Lead Pollution (ESLP) untermauert.

Das gewählte Signal des Ausgangssubstrats liegt nahe am Mittelwert des ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Verhältnisses des Tonschiefers und des Löss ($1,2254 \pm 0,0072$). Der O-Horizont besitzt ein mittleres ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Verhältnis von $1,1475 \pm 0,0069$, der A-Horizont von $1,1473 \pm 0,0093$ und die 11 nicht von den Pb-Erzgängen beeinflussten B-Horizonte $1,2194 \pm 0,0078$. Der berechnete Anteil von anthropogenem Pb in der organischen Auflage liegt zwischen 78-100 %. Der Anteil nimmt zum B-Horizont (im nicht erzbeflußten Bereich) deutlich auf

Werte von 3,5-23 % ab (Tab. 5). Eine Probe (A08 B) weist einen anthropogenen Pb-Anteil von 31 % auf, was eventuell auf eine Verunreinigung bei der Probenahme zurückgeführt werden kann. Zusammenfassend kann aus den vorliegenden Daten geschlossen werden, dass anthropogenes Pb hauptsächlich in der organischen Auflage akkumuliert wird und nur einen kleinen Einfluss auf die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse in den B-Horizonten hat.

Tabelle 5: Pb-Gehalte, Pb-Isotopenverhältnisse und Anteil von anthropogenem, atmosphärischem Pb im Verhältnis zum Gesamt-Pb in den Bodenhorizonten berechnet mit einem Zwei-Komponenten-Mischungsmodell. Die ausgewählten B-Horizonte sind nicht von lokalen Erzgängen beeinflusst

Transekt/Profil-Nr./ Horizont	Pb-Gehalt /mg kg ⁻¹	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb- Verhältnis	Anteil von anthropogenem Pb [%]
O-Horizont			
A06 O	160	1,1448	91
A14 O	98	1,1524	83
A21 O	126	1,1426	93
A31 O	82	1,1548	80
C11 O	57	1,1524	83
D01 O	40	1,1355	100
D02 O	58	1,1501	85
A-Horizont			
A06 A	220	1,1575	78
A31 A	290	1,1356	100
C11 A	136	1,1453	90
D01 A	123	1,1508	84
B-Horizont			
A03 B	20	1,2288	5,6
A08 B	24	1,2037	31
A13 B	36	1,2167	18
B09 B	21	1,2246	10
D02 B	33	1,2120	23
F06 B	33	1,2249	9,5
F09 B	26	1,2200	15
F12 B	28	1,2187	16
F15 B	27	1,2163	18
G09 B	34	1,2164	18
G11 B	45	1,2308	3,5

3.3.4 Beiträge der einzelnen Substrate zu den Deckschichten

In einer ersten Näherung wird angenommen, dass die B-Horizonte als eine einfache Mischung aus den beiden Mischungsgliedern Ausgangsgestein (anstehender Tonschiefer) und Löss erklärt werden können. Um die Annahme zu überprüfen, dass das Zr/Cr-Verhältnis ein Signal darstellt, um den Schluffanteil des Ausgangsgesteins deutlich vom lössbürtigen Schluffanteil zu trennen, wurde hierzu das Zr/Cr-Verhältnis gegen den Kehrwert des unabhängig bestimmten Schluff-Gehalts aufgetragen. Das Zr/Cr-Verhältnis wurde gewählt, da Chrom im anstehenden Tonschiefer angereichert ist und Zr (vom äolischen Löss stammend) besonders resistent gegenüber Verwitterungs- und Auslaugungsprozessen im Boden ist (Rosenberg 1991). Während das Zr/Cr-Verhältnis des anstehenden Tonschiefers ($1,79 \pm 0,11$) überwiegend konstant in den Böden der Untersuchungsgebiete des Rheinischen Schiefergebirges ist, variiert das Zr/Cr-Verhältnis des Löss zwischen den beiden Untersuchungsgebieten signifikant (Untersuchungsgebiet 1: $5,88 \pm 0,26$; Untersuchungsgebiet 2: $6,61 \pm 0,31$). Wie aus Abbildung 49 zu entnehmen, zeigt sich eine lineare Korrelation, die als Indikator für eine Zwei-Komponenten-Mischung angenommen werden kann (Kober et al. 1999; Cloquet et al. 2006). Allerdings erklärt die Regression des Zr/Cr-Verhältnisses auf die Schluffgehalte nur 37% der Variation des Kehrwertes der Schluffgehalte in Untersuchungsgebiet 1 und sogar nur 6 % in Untersuchungsgebiet 2 (Abb. 49b). Dies deutet darauf hin, dass die Integration weiterer Mischungsglieder das Modell optimieren könnte.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die bodenphysikalischen Eigenschaften im Bereich der Erzgänge entlang der Transekte.

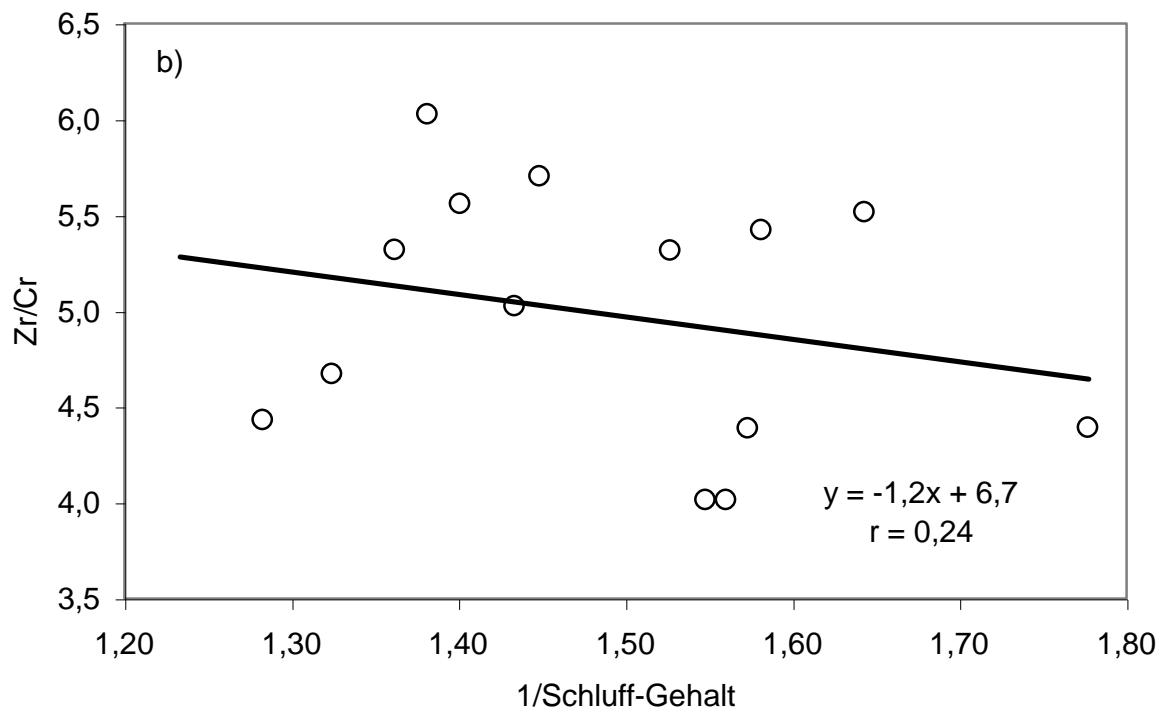
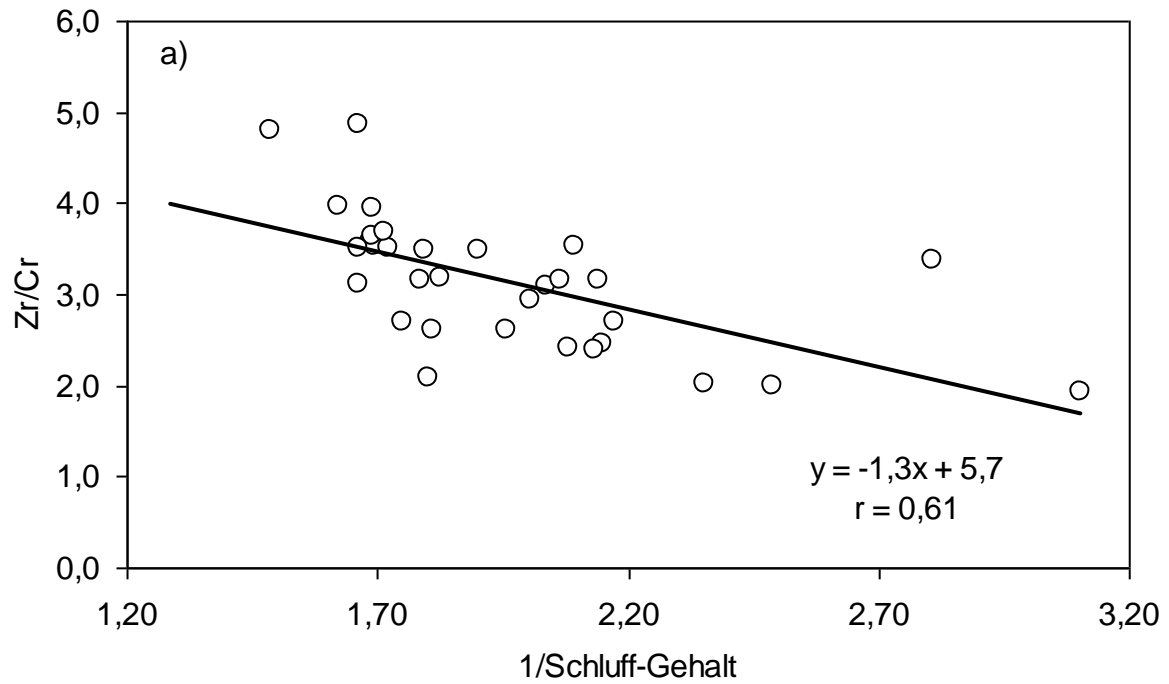


Abb. 49: Zusammenhang zwischen dem Kehrwert der unabhängig bestimmten Schluff-Gehalte und den Zr/Cr-Verhältnissen für (a) Untersuchungsgebiet 1 (Transekt A-D) und (b) Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E-F)

Tabelle 6: Übersicht über bodenphysikalische Eigenschaften im Bereich der Erzgänge entlang der Transekte

	Bereich [Transekt/ Proben Nr.]	pH	Grobboden Fraktion (> 2 mm)	C _{org}	Sand	Textur Schluff	Ton
----- [g kg ⁻¹]-----							
<u>Transekt A</u>							
Erzgang 5	A03/04 - A07	3,7	710	26	284	475	241
Erzgang 4	A09 - A13	3,8	450	14	164	632	203
Erzgang 3	A14 - A17	3,8	440	22	217	544	239
Erzgang 2	A26 - A31	3,7	350	16	215	515	270
<u>Transekt B</u>							
Erzgang 4	B03 - B05	3,8	400	26	199	564	237
Erzgang 3	B09 - B12	3,7	360	13	177	608	215
Erzgang 2	B18 - B20	4,1	340	24	166	565	269
<u>Transekt C</u>							
Erzgang 5	C02 - C05	3,7	310	19	148	513	339
Erzgang 4	C06/07 - C11	3,7	420	21	306	395	298
Erzgang 3	C12 - C16	3,6	680	29	301	426	273
<u>Transekt D</u>							
Erzgang 5	D03 - D06	3,8	250	11	207	565	228
<u>Transekt E</u>							
Erzgang E	E02 - E04	3,7	460	14	247	563	190
<u>Transekt F</u>							
Erzgang F1	F03 - F06	3,8	430	18	104	646	251
Erzgang F2	F12 - F17	3,7	390	18	57	661	282

In einer zweiten Näherung ist das vorhergehende Zwei-Komponenten-Mischungsmodell um eine weitere Komponente erweitert worden. In diesem Drei-Komponenten-Mischungsmodell findet neben dem Spurenelementsignal des Tonschiefers und des Löss auch das Spurenelementsignal der Laacher-See-Tephra Berücksichtigung. In Abb. 50 ist das Zr/Cr-Verhältnis gegen das Nb/Cr-Verhältnis aufgetragen (Nb ist in der LST angereichert), wobei die beiden Untersuchungsgebiete wiederum getrennt betrachtet wurden. Dies ist notwendig, da die lokalen Lössproben eine leicht unterschiedliche Spurenelementzusammensetzung aufweisen. Das Zr/Cr-Verhältnis des Untersuchungsgebietes 1 beträgt 5,88 und das Nb/Cr-Verhältnis 0,21, was deutlich vom Zr/Cr-Verhältnis (6,61) und Nb/Cr-Verhältnis (0,27) des Untersuchungsgebietes 2 abweicht. Dies bestätigt die Annahme, dass Löss als Lokallöss nur über kürzere Distanzen äolisch transportiert wurde (wenige Zehnerkilometer) (Sauer 2002; A. Semmel, mündl. Mitteilung). Wie aus den Mischungsdreiecken (Abb. 50) zu entnehmen, fällt der überwiegende Teil (nur 10 Ausreißer) der B-Horizontproben in den von den Mischungsdreiecken aufgespannten Bereich der drei Komponenten Tonschiefer, Löss und LST. Das bestätigt, dass die zweite Näherung hinreichend genau ist, um die Anteile der drei Mischungsglieder zur Gesamtmasse des Ausgangssubstrats der rezenten Bodenentwicklung zu quantifizieren. Die wenigen Ausreißer können unter Umständen auf die in diesem Schritt nicht eingeschlossenen lokalen Erzgänge zurückzuführen sein, die zwar nur einen geringen Massenbeitrag leisten, aber das Spurenelementmuster überproportional verändern können.

In Untersuchungsgebiet 1 dominiert der Tonschiefer mit über 50% Massenanteil das Substrat, während der Beitrag des Löss und der Tephra ungefähr zu gleichen Teilen den Rest ausmachen (Tab. 7). Der Maximalwert der Tephraeimengung mit einem Wert von 87% wurde von einem einzelnen Ausreißer verursacht. In Untersuchungsgebiet 2 ist Löss das dominante Substrat der Bodenbildung, während die Tephraeimengungen nur eine untergeordnete Rolle spielen (Tab. 7).

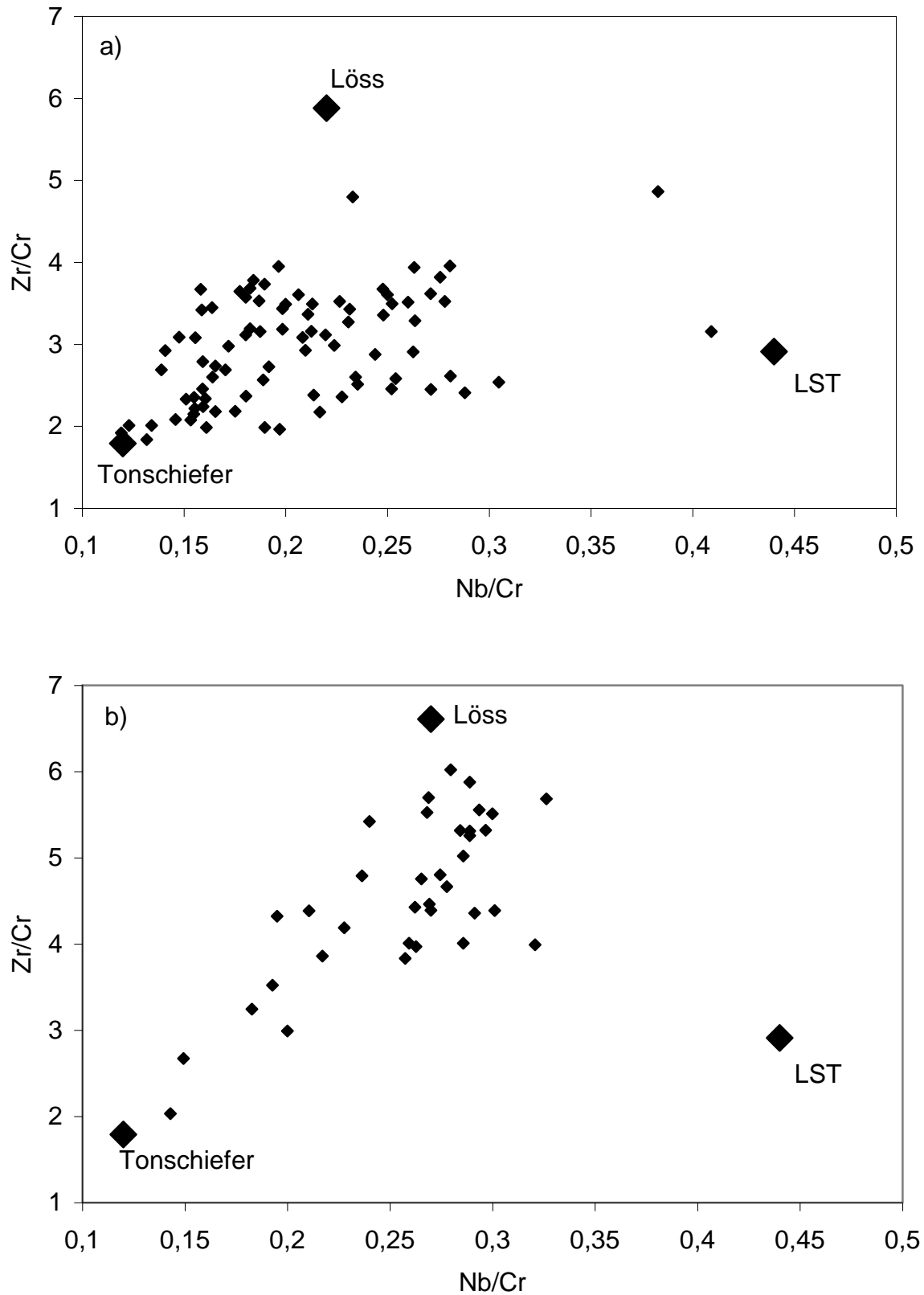


Abb. 50: Zusammenhang zwischen dem Zr/Cr-Verhältnis und dem Nb/Cr-Verhältnis für (a) Untersuchungsgebiet 1 (Transect A-D) und (b) Untersuchungsgebiet 2 (Transect E-F)

Tabelle 7: Statistische Parameter der Zr/Cr- und Nb/Cr-Verhältnisse der B-Horizonte (n=120), Mittelwerte der drei Hauptkomponenten des Substrats (Tonschiefer, Löss und Tephra, jeweils n=3) und die Beiträge dieser drei Substrate zur Gesamtmasse der B-Horizonte berechnet mit einem Drei-Komponenten-Mischungsmodell für Untersuchungsgebiet 1 (Transekt A-D) und Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E-F)

	Verhältnis		Beitrag (%) von		
	Zr/Cr	Nb/Cr	Tonschiefer	Löss	LST
<u>Untersuchungsgebiet 1 (Transekt A-D)</u>					
Mittelwert	2,96	0,21	56	23	20
Standardabweichung	0,66	0,05	21	16	16
Maximum	4,86	0,41	97	69	88
Minimum	1,84	0,12	0	0	0
Mittelwert Tonschiefer	1,79	0,12			
Mittelwert Löss	5,88	0,21			
Mittelwert LST	2,91	0,44			
<u>Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E-F)</u>					
Mittelwert	4,54	0,26	29	54	17
Standardabweichung	0,93	0,05	22	19	11
Maximum	6,02	0,33	91	87	45
Minimum	2,03	0,14	0	6	0
Mittelwert Tonschiefer	1,79	0,12			
Mittelwert Löss	6,61	0,27			
Mittelwert LST	2,91	0,44			

In einer dritten Näherung wurde schließlich noch der Massenbeitrag der lokalen Erzgänge geschätzt. Hierzu wurde ein weiteres Zwei-Komponenten-Mischungsmodell eingesetzt, basierend auf den $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnissen des Erzes als einem Mischungsglied und einem entsprechend ihres Massenbeitrags gewichteten Mittelwert der drei anderen Substrate (Tonschiefer, Löss und LST) als zweitem Mischungsglied. Dieser Mittelwert wurde für die Untersuchungsgebiete 1 und 2 getrennt berechnet. Das Ergebnis zeigt, dass der Massenbeitrag des Erzes vernachlässigbar ist ($\ll 0,1\%$, Tab. 8), obwohl die Pb-Gehalte und die Pb-Isotopensignale eindeutig vom Erz beeinflusst sind. Das bestätigt die Feststellung von Sabel (1989), dass der Massenanteil des

erzbürtigen Substrats in der Regel vergleichsweise gering ist im Vergleich zum Beitrag des autochthonen Ausgangsgesteins und der allochthonen Komponenten.

Tabelle 8: Statistische Parameter der $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse und der Beiträge des Pb-Erzes zur Gesamtmasse des Substrats; berechnet mit einem Zwei-Komponenten-Mischungsmodell basierend auf dem $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnis des Erzes als einem Mischungsglied (1,1828) und einem entsprechend ihrer Massenbeiträge gewichteten Mittelwert der Mischung aus Tonschiefer, Löss und LST als zweitem Mischungsglied (Untersuchungsgebiet 1: 1,2289 und Untersuchungsgebiet 2: 1,2276). Der gemessene Pb-Gehalt im Erz beträgt 190 g kg^{-1} .

	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ - Verhältnis	Massenbeitrag (%) des Erzes
Untersuchungsgebiet 1 (Transekt A-D)		
Mittelwert	1,1944	0,020
Standardabweichung	0,0133	0,014
Maximum	1,2288	0,071
Minimum	1,1698	0,000
Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E-F)		
Mittelwert	1,2024	0,016
Standardabweichung	0,0175	0,016
Maximum	1,2308	0,049
Minimum	1,1817	0,000

3.4 Periglaziale Transportweite von Pb aus kleinräumigen Erzgängen

3.4.1 Räumliche Verteilung von Pb entlang der Transekte

Entlang von Transekt A befinden sich vier kartierte Erzgänge, entlang von Transekt B und C jeweils drei, entlang von Transekt D und F jeweils zwei und entlang von Transekt E ein Erzgang (Abb. 51 und 52). Die mittleren Pb-Gehalte aller untersuchter B-Horizonte beträgt $38 \pm 16 \text{ mg Pb kg}^{-1}$, während der mittlere Pb-Gehalt des Tonschiefers $19 \pm 4,4 \text{ mg Pb kg}^{-1}$, des Löss $22 \pm 2,8 \text{ mg Pb kg}^{-1}$ und des Erzes (Galenit) $190 \pm 6,3 \text{ g Pb kg}^{-1}$ betragen. Hangabwärts der jeweiligen Erzgänge wurden erhöhte Pb-Gehalte im B-Horizont ($37\text{-}135 \text{ mg kg}^{-1}$) gemessen. Auffällig ist entlang von Transekt D, dass hangabwärts von Erzgang 4 keine erhöhten Pb-Gehalte auftreten. Mit großer Wahrscheinlichkeit wäre ein solcher solifluidal bedingter erhöhter Pb-Gehalt außerhalb des Transekts festzustellen, allerdings wird das Transekt quasi-natürlich durch eine Erosionsrinne begrenzt. Alle Pb-Gehaltsmaxima wurden dem jeweils nächsten hangaufwärtigen Erzgang zugeordnet.

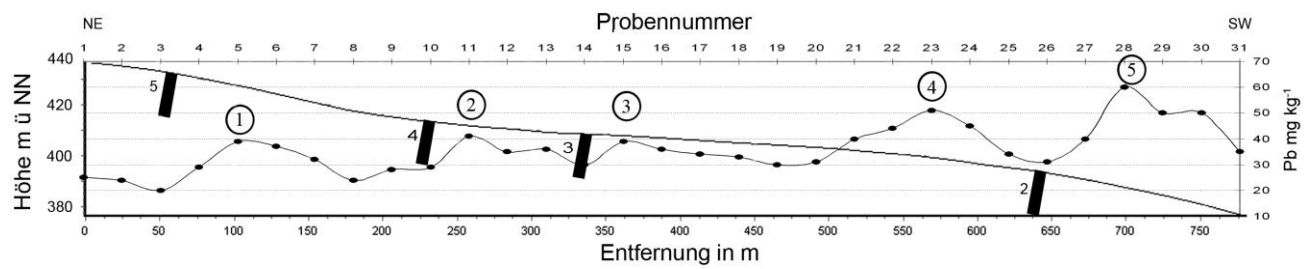
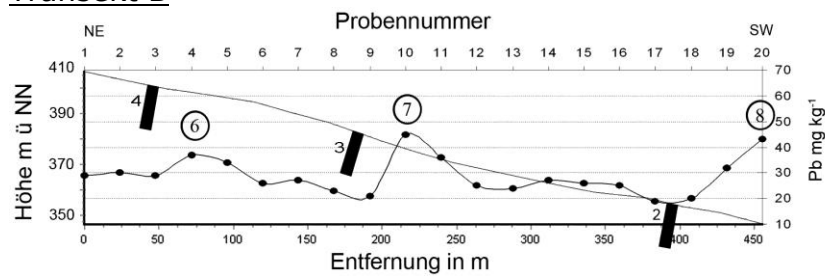
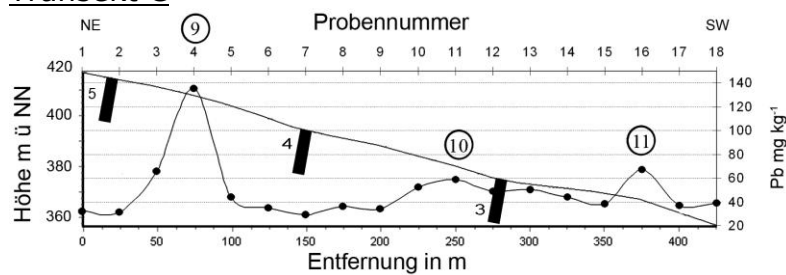
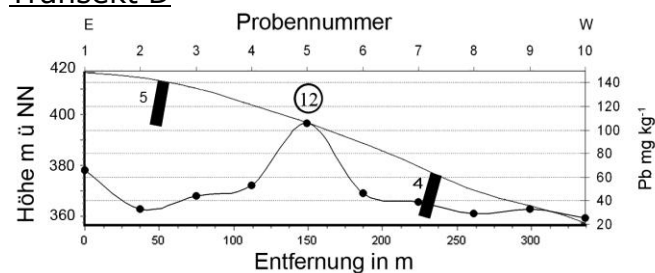
Transekt ATransekt BTransekt CTransekt D

Abb. 51: Profildarstellungen der untersuchten Transekte in Untersuchungsgebiet 1; die Probenahmepunkte sind auf der X-Achse fortlaufend nummeriert und im Graphen (Pb-Gehalte in mg Pb kg⁻¹) durch einen korrespondierenden Punkt dargestellt; außerdem nummeriert sind lokale Pb-Gehaltsmaxima; zu beachten sind zwei unterschiedliche Skalen sowohl auf der X-Achse (Probenahmepunkte und Länge des Transekts in m) als auch auf der Y-Achse (Pb-Gehalte und Höhe NN)

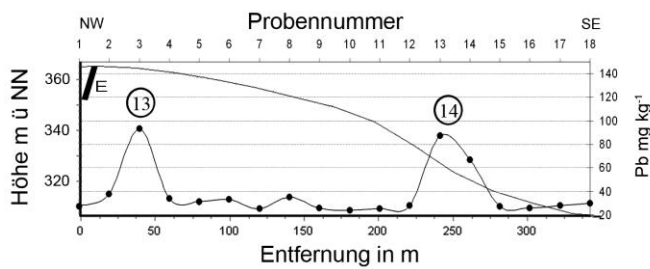
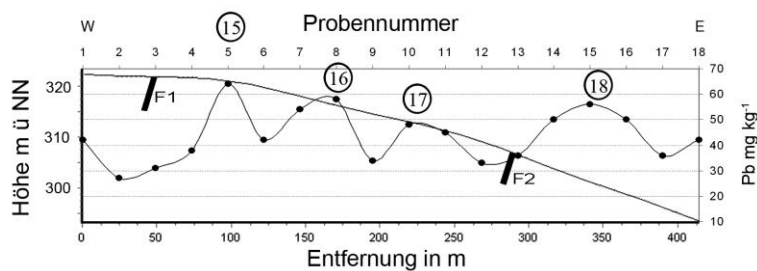
Transekt ETransekt F

Abb. 52: Profildarstellungen der untersuchten Transekte in Untersuchungsgebiet 2; die Probennahmepunkte sind auf der X-Achse fortlaufend nummeriert und im Graphen (Pb-Gehalte in mg Pb kg⁻¹) durch einen korrespondierenden Punkt dargestellt; außerdem nummeriert sind lokale Pb-Gehaltsmaxima; zu beachten sind zwei unterschiedliche Skalen sowohl auf der X-Achse (Probennahmepunkte und Länge des Transekts in m) als auch auf der Y-Achse (Pb-Gehalte und Höhe NN)

Wie Tabelle 9 zu entnehmen, gibt es außerdem Bereiche erhöhter Pb-Gehalte die nicht zweifelsfrei einem Erzgang zugeordnet werden konnten. Das lokale Pb-Gehaltsmaximum bei Probennahmepunkt A23 (Transekt A: lokales Pb-Gehaltsmaximum 4) kann, wie schon in Kapitel 3.2.1 erwähnt, als Ergebnis kolluvialer Akkumulation angesehen werden. Die lokalen Pb-Gehaltsmaxima bei Probennahmepunkt E13 (Transekt E: lokales Pb-Gehaltsmaximum 14) sowie bei Probennahmepunkt F08 (Transekt F: lokales Pb-Gehaltsmaximum 16) und Probennahmepunkt F10 (Transekt F: lokales Pb-Gehaltsmaximum 17) konnten ebenfalls nicht zweifelsfrei einem Erzgang zugeordnet werden. Erklärungen hierfür könnten zwar vorhandene aber nicht verzeichnete Erzgänge oder lokal begrenzte Ausfiederungen der verzeichneten Erzgänge sein.

Zur Bestätigung, dass die beobachteten lokalen Pb-Gehaltsmaxima das Resultat der Beimengung von erzbürtigem Pb darstellen, wurden die ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Verhältnisse aller 18 B-Horizonte mit erhöhten Pb-Gehalte bestimmt (lokale Pb-Gehaltsmaxima 1-18 in Abb. 51 und 52), außerdem die ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Verhältnisse

des Tonschiefers und des Löss, sowie des Erzes (Galenit) (Tab. 9). Unter der Annahme, dass die Pb-Gehalte in den untersuchten B-Horizonten eine einfache Mischung von zwei Mischungsgliedern des Ausgangssubstrates (eine Mischung aus dem anstehenden Tonschiefer und der äolischen Komponente Löss) und dem Erz darstellen, wurde der Kehrwert der Pb-Gehalte gegen die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse aufgetragen. Wie aus Abb. 48 zu ersehen, kann eine enge lineare Korrelation festgestellt werden, die die Annahme eines Zwei-Komponenten-Mischungsmodells bestätigt (Kober et al. 1999; Cloquet et al. 2006).

Tabelle 9: $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse aller B-Horizontproben mit erhöhtem Pb-Gehalt, die einem Erzgang zugeordnet werden konnten und der Beitrag des erzbürtigen Bleis zu den Pb-Gesamtgehalten in den B-Horizonten; außerdem sind die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse der Substratquellen der Bodenbildung aufgeführt

Gehaltsmaximum /Nr.	Probennahmepunkt	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ - Verhältnis	Beitrag des Erzes %
Gehaltsmaxima die einem Erzgang zugeordnet werden konnten:			
1	A05	1,1875	89
2	A11	1,1915	80
3	A15	1,1859	93
5	A28	1,1801	100
6	B04	1,1823	100
7	B10	1,1801	100
8	B20	1,1936	76
9	C04	1,1807	100
10	C11	1,1917	79
11	C16	1,1876	89
12	D05	1,1856	93
13	F03	1,1817	100
15	G05	1,1904	82
18	G15	1,1915	80
Gehaltsmaxima die keinem Erzgang zugeordnet werden konnten:			
4	A23	1,1977	65
14	F13	1,1829	100
16	G08	1,1858	93
17	G11	1,2308	0
Substratquellen:			
	Tonschiefer 1	1,2219	
	Tonschiefer 2	1,2351	
	Tonschiefer 3	1,2229	
	Löss 1	1,2335	
	Löss 2	1,2173	
	Löss 3	1,2219	
	Erz 1	1,1879	
	Erz 2	1,1822	
	Erz 3	1,1781	

Auf diese Weise ist es möglich, den Beitrag von erzbürtigem Pb im Verhältnis zum Gesamt-Pb-Gehalt unter Verwendung von zwei Mischungsgliedern nach Gleichung 1 zu berechnen. Der Mittelwert des $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisses des Tonschiefers ($1,2266 \pm 0,0074$) war ähnlich demjenigen des Löss ($1,2242 \pm 0,0083$). Der Beitrag des Löss variiert kleinräumig und kann zwischen 0-100% liegen (Sterckeman et al. 2006), sodass die Berechnung eines gewichteten Mittelwertes des $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisses des Substrates hinsichtlich des Löss-Beitrags nicht möglich ist. Deshalb wurde das arithmetische Mittel des $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisses des Tonschiefers und des Löss als Signal des Ausgangssubstrates genutzt. In Anbetracht der Ähnlichkeit der $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse von Tonschiefer und Löss und der vereinfachenden Annahme einer 1:1 (Tonschiefer:Löss) – Mischung ist der resultierende Fehler gering. Der Mittelwert des $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisses der Galenit-Proben beträgt $1,1828 \pm 0,0001$, was recht nahe an dem von Lévêque and Jakobus (1994) beschriebenen Wert von 1,1827-1,1835 für 12 Galenit-Proben aus 11 ehemaligen Minen im Taunus, die Krustenblei enthalten, liegt. Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich der Mittelwert des $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisses des Erzes deutlich von dem des Ausgangssubstrates unterscheidet. Dadurch ist die Grundvoraussetzung für die Verwendung eines Zwei-Komponenten-Mischungsmodells zur Berechnung des erzbürtigen Pb-Anteils gegeben.

Der Beitrag von erzbürtigem Pb in allen 14 lokalen Pb-Gehaltsmaxima, die einem Erzgang zugeordnet werden konnten, liegt zwischen 76-100% (Tab. 9). Die $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisse der lokalen Pb-Gehaltsmaxima 5, 6, 7, 9 und 13 lagen sogar geringfügig unter dem Mittelwert des $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisses von erzbürtigem Pb, waren aber immer noch höher als der niedrigste Wert des $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnisses von erzbürtigem Pb (1,781). Die Böden im Bereich der lokalen Pb-Gehaltsmaxima 14 und 16 zeigen ebenfalls eine deutliche Beeinflussung durch erzbürtiges Pb (93-100% des Gesamtbleigehalts), was die Annahme, dass hier existierende Erzgänge nicht erfasst wurden, bestätigt. Der geringere Beitrag von erzbürtigem Pb zum Gesamt-Pb-Gehalt bei dem lokalen Pb-Gehaltsmaximum 4 stützt die Vermutung der kolluvialen Überprägung dieses Bereichs (Tab. 9). Dagegen zeigt das $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Verhältnis des lokalen Pb-Gehaltsmaximums 17 keine Beimischung von erzbürtigem Pb. Der Grund für den erhöhten Pb-Gehalt in dieser Probe ist unklar.

Zusammenfassend kann hangabwärts von 14 der 15 verzeichneten Erzgängen ein korrespondierender erhöhter Pb-Gehalt zugeordnet werden. Diese lokalen Pb-Gehaltsmaxima werden im Folgenden genutzt um die steuernden Faktoren der Transportweite zu bestimmen.

3.4.2 Transportweite des Pb-Erzes

Die Erzgänge des Untersuchungsgebietes 1 streichen NNW mit einem steilen Einfallen von 75-80° WSW und besitzen Mächtigkeiten von bis zu 10 m. Basierend auf Voruntersuchungen (Müller 1990; Jakobus 1992) und der räumlichen Auflösung des genutzten Geographischen Informationssystems wurde für die folgenden Berechnungen ein Wert von 10 m für die Erzgangmächtigkeiten des Untersuchungsgebietes 1 angenommen. Die Erzgangmächtigkeiten des Untersuchungsgebietes 2 liegen bei ca. 5 m. Die Annahme der Erzgangmächtigkeit von 10 m stellt die obere Grenze für das Untersuchungsgebiet 1 dar, während die obere Grenze der Erzgangmächtigkeit des Untersuchungsgebietes 2 zwischen 5-10 m liegt. Der Wert von 5 m für die Erzgangmächtigkeit des Untersuchungsgebietes 2 stellt gleichzeitig die kleinste Auflösung des genutzten Geographischen Informationssystems dar. Die resultierenden Transportweiten basieren auf den oben genannten Annahmen (gemessen vom ungefähren Zentrum des nächstgelegenen hangaufwärtigen Erzgangs) und bewegen sich zwischen 30 und 110 m (Tab. 10). Diese Werte sind aufgrund der Auflösung des Geographischen Informationssystems auf 5 m gerundet. Außerdem floss in diese Kalkulation der maximale Fehler der Mächtigkeit der Erzgänge (~5 m) ein, wovon die Hälfte jeweils auf den Bereich unterhalb und oberhalb des Erzgangs entfällt. Dadurch beträgt der Fehler unserer Transportweitenbestimmung ca. 2,5 m. Die Rundung der Transportweite auf 5 m produziert einen weiteren Fehler von ca. 2,5 m, was sich auf einen Gesamtfehler von ca. 5 m für die Transportweitenbestimmung aufsummiert. Eine weitere Ungenauigkeit ergibt sich aus dem Probennahmeabstand von 10-15 m. Deshalb ist die exakte Position der Pb-Gehaltsmaxima unterhalb eines Erzgangs mit einem zusätzlichen Fehler von 10-15 m behaftet. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass das lokale Pb-Gehaltsmaximum das mit Erzgang 2 des Transekts B korrespondiert wohl außerhalb des Beprobungsbereichs liegt. Vorsichtig geschätzt, beträgt der gesamte Fehler der Transportweitenbestimmung ungefähr ± 20 m.

Die bestimmten Transportweiten in den Untersuchungsgebieten liegen bei 30-110 m (Tab. 10). Semmel (1968) berichtet von periglazialen Transportweiten im Mittelgebirgsbereich von mindestens 50 m, was mit den hier vorgestellten Beobachtungen konsistent ist.

Tabelle 10: Übersicht über die mittleren Transportweiten erzbürtigen Bleis im Bereich der jeweiligen Erzgänge entlang der Transekte

Untersuchungsgebiet	Bereich [Transekt/ Proben Nr.]	Mittlere Transportweite [m]
<u>Transekt A</u>		
Erzgang 5	A03/04 - A07	65
Erzgang 4	A09 - A13	30
Erzgang 3	A14 - A17	35
Erzgang 2	A26 - A31	65
<u>Transekt B</u>		
Erzgang 4	B03 - B05	30
Erzgang 3	B09 - B12	35
Erzgang 2	B18 - B20	55
<u>Transekt C</u>		
Erzgang 5	C02 - C05	60
Erzgang 4	C06/07 - C11	110
Erzgang 3	C12 - C16	80
<u>Transekt D</u>		
Erzgang 5	D03 - D06	90
<u>Transekt E</u>		
Erzgang E	E02 - E04	35
<u>Transekt F</u>		
Erzgang F1	F03 - F06	50
Erzgang F2	F12 - F17	50

3.4.3 Steuernde Faktoren der Transportweite

Mittels statistischer Methoden wurden die steuernden Faktoren der Transportweite bestimmt. Dabei zeigen die Transportweite und die Hangneigung keinen direkten Zusammenhang. Gruppiert man allerdings die Daten der Transportweite in kürzere und längere Distanzen (<55 m, >55 m), zeigen alle drei Untersuchungsgebiete mit geringer Hangneigung (2-5°) geringe Transportweiten von <55 m. Bereiche mittlerer (5-10°) und höherer Hangneigung (10-20°) konnten keiner Transportweite zugeordnet werden, obwohl die Kombination von größerer Hangneigung mit konvexer Vertikalkrümmung auch zu größeren Transportweiten tendiert (Tab. 11).

Tabelle 11: Kreuztabelle der Verteilung der Transportweiten (gruppiert in zwei Klassen) gegen die Neigung (gruppiert in drei Klassen)

			Klasse		Gesamt
			< 55 m	> 55 m	
Neigung	Niedrig	Anzahl Pb-Gehaltsmaxima	3	0	3
		%	38	0	21
	Mittel	Anzahl Pb-Gehaltsmaxima	2	4	6
		%	25	66,7	43
	Hoch	Anzahl Pb-Gehaltsmaxima	3	2	5
		%	38	33	36
Gesamt	Anzahl Pb-Gehaltsmaxima	8	6	14	
	%	100	100	100	

Nach Dikau (1989) sind in Tabelle 2 die geomorphometrischen Parameter des Reliefs in Vertikal-, Horizontal- und Querkrümmung separiert, die wiederum in drei Unterklassen unterteilt sind. Die Untersuchung des Datensatzes hinsichtlich einer Klassifikation in Formelemente nach Dikau & Saurer (1999) (HK/VK) wäre sicherlich interessant, ist statistisch allerdings nicht sinnvoll, da der Untergliederung in 9 Formelemente in diesem Fall nur 14 Fälle gegenüber stehen. Daher wurde eine Einzelbetrachtung durchgeführt.

Die statistische Berechnung mittels einer Kreuztabelle zeigt eine hohe Korrelation zwischen der Transportweite (klassifiziert in drei Klassen: 0-35 m, 36-70 m, 71-110 m) und der Vertikalkrümmung (Cramer's V: 0,597). Außerdem ist hieraus eine Beziehung zwischen den Ausprägungen der Vertikalkrümmung und der

Transportweite zu erkennen. Konvexe Reliefformen korrelieren mit mittleren und großen Transportweiten. Gestreckte Reliefformen korrelieren mit kurzen und mittleren Transportweiten, wohingegen konkave Reliefformen ausschließlich mit kurzen Transportweiten korrelieren (Tabelle 12).

Tabelle 12: Kreuztabelle der Verteilung der Transportweiten (gruppiert in zwei Klassen) gegen die drei Ausprägungen der Vertikalkrümmung

			Klasse			Gesamt
			0-34 m	35-70 m	71-110 m	
Vertikal- krümmung	Konvex	Anzahl Pb- Gehaltsmaxima	0	4	3	7
		%	0	57	100	50
	Gestreckt	Anzahl Pb- Gehaltsmaxima	2	3	0	5
		%	50	43	0	36
	Konkav	Anzahl Pb- Gehaltsmaxima	2	0	0	2
		%	50	0	0	14
Gesamt	Anzahl Pb- Gehaltsmaxima	4	7	3	14	
	%	100	100	100	100	

Die Transportweiten sind signifikant negativ korreliert mit dem Schluff-Gehalt (Abb. 53) und dementsprechend positiv mit dem Sand- ($r=0,47$) und Ton-Gehalt ($r=0,52$).

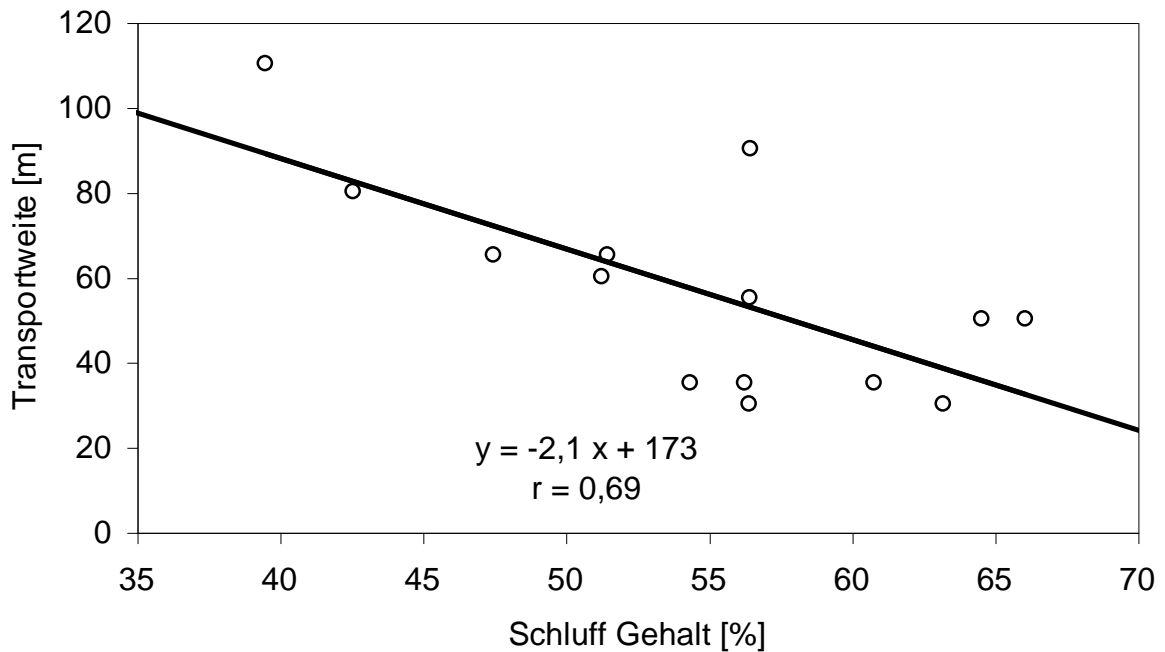


Abb. 53: Zusammenhang zwischen dem Schluffgehalt und der Transportweite

Des Weiteren zeigt sich keine signifikante Korrelation zwischen der Transportweite und der Exposition, auch nicht bei in zwei (< 55 m, > 55 m) oder drei Klassen (0-35 m, 36-70 m, 71-110 m) gruppierten Daten. Ebenfalls war kein Zusammenhang zwischen der Transportweite und dem Grobbodenanteil (> 2 mm), dem pH-Wert und der Gehalte an organischem Kohlenstoff festzustellen.

4 Zusammenfassende Diskussion

Die umfangreichen Funktionen der Böden als Lebensraum von Organismen und Pflanzen, als Schadstoffpuffer und Regulator des Wasserhaushaltes machen diese zu besonders kostbaren Gütern. Das Bundesbodenschutzgesetz von 1998 trägt der Notwendigkeit des besonderen Schutzes Rechnung. Im Rahmen dieses Gesetzes wird eine Ausweisung besonders belasteter Flächen gefordert.

Am Anfang stand die Informationsschöpfung und Geländebegehung in Frage kommender Untersuchungsgebiete. Als besonders problematisch herausgestellt hat sich die allgegenwärtige anthropogene Überprägung der Mittelgebirgslandschaft, die die Eignung potentieller Untersuchungsgebiete schon im zweiten Schritt erheblich einschränkt. Gerade in der Lahn-Dill-Mulde - mit Diabasen und vorrangig Pikriten (Cr-Gehalte von über 4000 ppm, sowie Ni, Zn und Ba) - ist es kaum möglich Untersuchungsgebiete für Transekte zu finden, die, wenn sie sich aufgrund ihrer Reliefsituation für die Fragestellung eignen, nicht subrezent bis historisch anthropogen beeinflusst sind. Die Beschränkung der Untersuchung auf durch Pb-Erz beeinflusste Untersuchungsgebiete erwies sich als vorteilhafter. Zum einen erfolgte hier der Abbau meist unterirdisch, womit eine anthropogene Überprägung der Böden deutlich geringer ausfällt als in den vorhergehend beschriebenen Gebieten und zum anderen ist die Pb-Isotopie eine bewährte Methode in der bodenkundlichen Forschung zur Quantifizierung anthropogener und geogener Einträge in Bodenhorizonte.

Der Auswahl folgte im nächsten Schritt eine Vorbeprobung hinsichtlich erhöhter Pb-Gehalte im Bereich von Erzgängen. Die danach folgende Übersichtskartierung liefert letztendlich Klarheit über die Eignung. Die im Rahmen der Beprobung erfolgte Detailkartierung der Untersuchungsgebiete war notwendig, zeigte doch die vorhandenen Bodenkarte Oberreiffenberg zwar viele Boden-Einheiten, welche aber eher substratgenetisch differenziert sind. Gerade in kleinräumig heterogenen Bereichen eignet sie sich nur als Anhaltspunkt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in Abhängigkeit von der Neigung, Exposition, Reliefform und Reliefposition die Gesamtmächtigkeit der Deckschichten variiert, wobei meist eine deutliche Mächtigkeitzunahme von Ober- über Mittelhang zum Unterhang festzustellen ist.

Die Hangneigung stellt in den Untersuchungsgebieten eine wichtige Steuergröße für die Verteilung der Solifluktsdecken dar. In Bereichen höherer Hangneigung nimmt die Mächtigkeit der Deckschichten deutlich ab. Des Weiteren begünstigt auf den beiden Transekten E und F die Ost-Exposition (durch im Lee-Bereich höheren Lösslehmgehalt) deutlich mächtigere Bodenentwicklungen. In steilen, konvexen und divergenten Reliefpositionen herrscht Materialabtrag vor. Die daraus resultierende negative Massenbilanz wurde ausgeglichen durch stete kryoklastische Aufarbeitung und kryoturbate Nachlieferung von Untergrundgestein, sodass stellenweise nur die Hauptlage ausgebildet ist. In diesen Bereichen ist die Hauptlage sehr skelettreich und arm an äolisch eingetragenen Feinmaterial. Das Solum der Böden ist oft nur ca. 0,5-0,7 m mächtig, grobkörnig und geochemisch stark vom oberflächennah Anstehenden geprägt (Sabel 2005).

Generell sind die Übergänge des Aufbaus der Deckschichten von divergenten, konvexen zu konvergenten, konkaven Formen gleitend. Divergenz und Konvexität bedingen gleichzeitig eine Abnahme der Mächtigkeit und eine Zunahme des Skelettgehaltes, so dass in diesen Reliefpositionen auch keine Mittellage verbreitet ist. In flachen, konkaven und konvergenten Reliefpositionen ist dagegen Materialerhalt bzw. Materialakkumulation vorherrschend. Dies führt zu tiefgründigeren Standorten, die reich an eingetragener äolischer Fremdkomponente und grobbodenarm sind.

Das südwest-exponierte Untersuchungsgebiet 1 zeigt die typische Toposequenz von Böden wie sie Semmel (1991) exemplarisch für den Taunus beschrieben hat. Braunerden mit wechselnder Mächtigkeit und nur noch in erosionsgeschützten Lagen erhaltene Reste von Mittelagen mit dort entwickelten Parabraunerden unterschiedlicher Staunäsetendenz.

Diese grundsätzliche Bodenverteilung kann allerdings lokal anthropogen überprägt sein. Häufig zeigen sich Erosionsbereiche und Verkürzungen der Bodenprofile durch mittelalterliche Landnutzung (Ap-Horizonte) sowie Akkumulationsbereiche (Kolluvien).

Rodungsphasen im Mittelalter beendeten die natürliche geomorphologische Stabilität in den zuvor waldbedeckten Räumen (Rohdenburg 1989; Bork et al. 1998). Dabei bedeutet Bodenerosion im Mittelgebirgsbereich gleichzeitig die Ausräumung der periglazialen Deckschichten. Von der Abtragung sind im Wesentlichen Oberlage und Hauptlage betroffen (Semmel 2002), oft wurde aber

auch die Hauptlage in vielen Mittelgebirgen komplett ausgeräumt (Kleber & Mailänder 1998; Kleber et al. 1998).

Optische Hinweise auf eine kolluviale Überprägung bei Transekt A (u.a. Probennahmepunkt A23-A25) werden durch den geringen Skelettgehalt ($\sim 30\%$), wie auch die Spurenelement- und Pb-Isotopenanalyse bestätigt. Allerdings ist es gerade bei einer Pürckhauerbeprobung schwierig kolluviale Merkmale zu erkennen. Der Darstellung in einigen Lehrbüchern zufolge sind Kolluvien auf Unterhangbereiche beschränkt (Ahnert 1996; Scheffer & Schachtschabel 1998; Eitel 1999). Die hier anzutreffende Reliefsituation zeigt jedoch ausdrücklich einen langgestreckten, fast nicht geneigten Hangbereich. Auch Transekt C zeigt kolluviale Überprägungen in dafür eher untypischen Reliefsituationen. Einige Untersuchungen weisen jedoch darauf hin, dass Kolluvien in allen Hangabschnitten anzutreffen sind (Bork et al. 1998; Niller 1998; Thiemeyer 1988; Bubenzer 1999). Unter Beachtung der Ergebnisse in Transekt A und D kann dieser Beobachtung nur zugestimmt werden. Laut Walther (1999) wurden die durch Bodenerosion abgetragenen Sedimente oft nur sukzessive bis zur nächsten lokalen Sedimentfalle transportiert und gelangten dort zur Ablagerung.

Die vorherrschende Flachgründigkeit, vor allem in Untersuchungsgebiet 1, in Verbindung mit dem hohen Skelettgehalt führt zu einer geringen Feldkapazität der Böden. Daher trocknen die Böden trotz der regenreichen Hochlagen oft aus. Aufgrund des humiden Klimas und der überall präsenten Nadelhölzer sind die Böden basenarm und sauer. Die pH-Werte der B-Horizonte liegen zwischen 3,4 und 4,5. Die Durchwurzelung reicht in der Regel bis ca. 30 cm Tiefe und nimmt dann rasch ab.

Unter natürlichen Bedingungen kommen geogene Schwermetalle meist in geringen Gehalten in Böden und Ausgangsgesteinen vor, in lokal begrenzten Anreicherungen können jedoch auch extreme Schwermetallgehalte auftreten. Während der periglazialen Deckschichtengenese fand eine Aufarbeitung und Verlagerung dieser Gehalte statt. Zur Bestimmung der verschiedenen Komponenten von komplexen periglazialen Deckschichten im europäischen Mittelgebirgsraum bieten sich lineare Mischungsmodelle an. Voraussetzung zur Nutzung dieser Modelle ist, dass kein anthropogener Spurenelementeintrag vorhanden ist. Dies kann z. B. durch Analyse der Tiefenverteilung der Spurenelemente und der Quantifizierung anthropogener Pb-Einträge mit Hilfe stabiler Pb-Isotopensignale geprüft werden. In den Untersuchungsgebieten

konnte ein Zwei-Komponenten-Mischungsmodell (Tonschiefer und Löss) nicht angewendet werden, wohingegen ein Drei-Komponenten-Mischungsmodell (Tonschiefer, Löss und Tephra) die Zusammensetzung der untersuchten Substrate bis auf wenige Ausreißer hinreichend genau erklärt. So zeigt sich, dass in Untersuchungsgebiet 1 der Tonschiefer die Hauptsubstratkomponente darstellt, wohingegen in Untersuchungsgebiet 2 Lösslehm dominiert. Die örtlich vorhandenen Pb-Erzgänge tragen nur zu einem vernachlässigbaren Anteil ($<0,1\%$) zur Gesamtmasse des Ausgangssubstrats bei, haben aber einen überproportionalen Einfluss auf die Pb-Gehalte.

Maskiert wird der geogene Anteil seit der Industrialisierung durch einen zusätzlichen Schwermetalleintrag aus anthropogenen Quellen. Abhängig von bodenchemischen und -physikalischen Parametern sind anthropogene Schwermetalle wesentlich mobiler als die geogenen Anteile. Allerdings ist die Persistenz des geogenen Schwermetallanteils und die damit einhergehende Gefahr des Übergangs in die Nahrungskette beträchtlich.

Zusätzlich kommt es durch anthropogenen Schwermetalleintrag zu einer relativ großen Akkumulation von Schwermetallen in den Humusaufgaben und den A-Horizonten der Böden. Sie stellen die eigentliche Gefahr dar, da sie in Böden mit niedrigem pH-Wert, geringem Humusgehalt und geringem sorptionsfähigem Tonanteil schneller in Lösung gehen als die geogenen Schwermetalle. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Bindungsform der Schwermetalle im Boden wesentlichen Einfluss auf deren Mobilisierbarkeit nimmt und dass verschiedene Schwermetallquellen (lithogen, pedogen und anthropogen) primär unterschiedliche Verfügbarkeiten besitzen. Im Wesentlichen sind nur die gelösten und leicht mobilisierbaren Anteile der Gesamtmetallmengen in Böden verlagerbar und pflanzenverfügbar.

Neben der Aufarbeitung der geogenen Schwermetallgehalte während der Bodenbildung fand im Mittelgebirgsbereich auch eine Verlagerung durch solifluidale Prozesse statt. In geologischen und lagerstättenkundlichen Lehrbüchern wird von Dispersionshöfen (bzw. geochemischen Aureolen oder Halos) im oberflächennahen Untergrund, verursacht von Vererzungen im Hangbereich, berichtet, deren Gehalte mit zunehmender Entfernung vom Mineralkörper allmählich abklingen (Baumann et al. 1979; Seim & Tischendorf 1990).

Schwermetallgehalte können daher auch zur Lösung geomorphologischer Fragen verwendet werden. Der durch periglaziale Solifluktion bewirkte hangabwärtige Transport von erzbürtigem Pb kann somit als Tracer des solifluidal-bedingten Transports dienen. Die hieraus resultierenden lokalen Pb-Maxima in den B-Horizonten, die mit den jeweiligen hangaufwärtigen Erzgängen korrespondieren, können zur Bestimmung der Transportweite genutzt werden.

Die Transportweiten in den Untersuchungsgebieten liegen zwischen 30 und 110 m (bei einem maximalen Fehler von ± 20 m) und sind maßgeblich von der Vertikalkrümmung des Reliefs und der Schluffkonzentration gesteuert.

Die Resultate zeigen, dass natürliche, lokal begrenzte Metallquellen einen mehr als 100 m reichenden Einfluss auf die Metallgehalte im Unterboden haben können. Stellenweise sind die Vorsorgewerte gemäß der Bundesbodenschutzverordnung von 70 mg Pb kg^{-1} für schluffige und lehmige Böden überschritten.

5 Schlussfolgerungen

- (1) Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in Abhängigkeit von der Neigung, Exposition, Reliefform und Reliefposition die Gesamtmächtigkeit der Deckschichten variiert, wobei meist eine deutliche Mächtigkeitszunahme von Ober- über Mittelhang zum Unterhang festzustellen ist.
- (2) Die Übergänge des Aufbaus der Deckschichten von divergenten, konvexen (skelettreich) zu konvergenten, konkaven Formen (skelettarm, lösslehmreich) sind gleitend.
- (3) Kolluvien kommen neben den typischen Reliefsituationen hier auch auf gestreckten Hängen mit geringer Neigung und in Ober- und Mittelhangbereichen vor.
- (4) Mit isopenanalytischen Methoden und der Tiefenverteilung der Spurenelementgehalte lässt sich bestätigen, dass die vorhandene anthropogene Pb-Belastung im Oberboden verbleibt.
- (5) Spurenelementzusammensetzung und Pb-Isotope können in Kombination mit Mischungsmodellen genutzt werden um den Anteil der jeweiligen Komponenten am Substratgemisch der Deckschichten zu quantifizieren.
- (6) In Untersuchungsgebiet 1 stellt der Tonschiefer die Hauptsubstratkomponente dar, wohingegen in Untersuchungsgebiet 2 Lösslehm als Hauptsubstratkomponente dominiert.
- (7) Die örtlich vorhandenen Pb-Erzgänge tragen nur zu einem vernachlässigbaren Anteil (<0,1%) zur Gesamtmasse des Ausgangssubstrats bei, haben aber einen überproportionalen Einfluss auf die Pb-Gehalte.
- (8) Die Untersuchung der flächenhaften Schwermetall-Verteilung in Deckschichten ergab, dass im europäischen Mittelgebirgsbereich lokal begrenzte Pb-Erzgänge erhöhte Pb-Gehalte in B-Horizonten umliegender Böden verursachen.
- (9) Durch Zuordnung lokaler Pb-Gehaltsmaxima zu einem spezifischen, korrespondierenden hangaufwärtigen Erzgang konnte mittels Pb-Isotopensignatur die Transportweite von erzbürtigem Pb bestimmt werden. Die Transportweiten sind größer als aus den lokalen Vererzungen anzunehmen und liegen in den Untersuchungsgebieten zwischen 30 und 110 m (bei einem maximalen Fehler von ± 20 m).
- (10) Die maßgeblich steuernden Größen der Transportweite sind der geomorphometrische Reliefparameter Vertikalkrümmung und die Schluffkonzentration.

Literaturverzeichnis

- AG Boden, 1994. Bodenkundliche Kartieranleitung, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter, 4. Aufl., Hannover, 392 S.
- AG Boden, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Aufl., Hannover, 438 S.
- Alloway, B.J., 1995. Heavy metals in soils. Chapman and Hall, London, 368 S.
- Ahnert, F., 1996. Einführung in die Geomorphologie. Stuttgart, 440 S.
- Anderle, H.-J., 1991. Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen, 1 : 25 000, Blatt 5715 Idstein. 2. erg. Aufl., Wiesbaden, 239 S.
- Augstern, B. & Greve, K., 1994. Umweltsanierungen Geografischer Informationssysteme - Bausteine für einen Referenzrahmen. Salzburger Geografische Mitteilungen, 21: 19-28.
- Backhaus, K., 2006. Multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin, 830 S.
- Bacon, J.R., Farmer, J.G., Dunn, S.M, Graham, M.C. & Vinogradoff, S.I., 2006. Sequential extraction combined with isotope analysis as a tool for the investigation of lead mobilisation in soils: Application to organic-rich soils in an upland catchment in Scotland. Environmental Pollution, 141: 469-481.
- Balesdent, J. & Mariotti, A., 1996. Measurement of soil organic matter turnover using ¹³C natural abundance, in: T.W. Boutton & S.I. Yamasaki: Mass spectrometry of soils. Marcel Dekker, New York: 83-111.
- Barefoot, R.R., 1997. Determination of platinum at trace levels in environmental and biological materials. Environ. Sci. Technol., 31: 309-314.

- Barthelme, N., 1995. Geoinformatik. Berlin Verlag, Heidelberg: 414 S.
- Bauer, J., Rohdenburg, H. & Bork, H.-R., 1985. Ein Digitales Reliefmodell als Voraussetzung für ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoffflüsse, in: Bork, H.-R. & Rohdenburg, H. (Hrsg.): Parametereaufbereitung für deterministische Gebiets-Wassermodelle, Grundlagenarbeiten zur Analyse von Agrarökosystemen, Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, Braunschweig, H10: 1-15.
- Baumann, L., Nikolskij, I.L. & Wolf, M., 1979. Einführung in die Geologie und Erkundung von Lagerstätten. Leipzig, 503 S.
- BBodSchV, 1999. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung of 12 July 1999. Bundesgesetzblatt I, 1554.
- Behrens, T., & Scholten, T., 2002. DGMK20+ - Erstellung der Digitalen Geomorphographischen Karte für das Bundesland Rheinland-Pfalz im Maßstabsbereich 1:25.000 bis 1:50.000. Dokumentation. Giessen, 96 S.
- Bibus, E., 1983. Reliefentwicklung im Rheinischen Schiefergebirge – Neue Befunde, neue Probleme: Jüngsttertiär und Quartär. Tagungsberichte u. wiss. Abh., 44. Dtsch. Geographentag in Münster: 74-76.
- Bill, R. & Fritsch, D., 1991. Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Bd. 1: Hardware, Software und Daten. Wichmann, Karlsruhe. 414 S.
- Bill, R., 1999. Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Bd. 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Wichmann, Karlsruhe: 431 S.
- Bindler, R., Brännvall, M.-L., Renberg, I., 1999. Natural lead concentrations in pristine boreal forest soils and past pollution trends: a reference for critical load models. Environ. Sci. Technol., 33: 3362 -3367.

- Bogaard, van den, P., Schmincke, H.-U., 1985. Laacher See Tephra: a widespread isochronous late Quaternary ash layer in Central and Northern Europe. *Geological Society of America Bulletin*, 96: 1554-1571.
- Bonell, M., 1998. Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale. *Jawra*, 34: 765-785.
- Bork, H.-R., Bork, H., Dalchow, C., Faust, B., Piorr, H.-P. & Schatz, T., 1998. *Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa*. Gotha, 328 S.
- Born, M., 1989. *Die Entwicklung der deutschen Agrarlandschaft*. Darmstadt, 185 S.
- Bourennane, H., Salvador-Blanes, S., Cornu, S. & King, D., 2003. Scale of spatial dependence between chemical properties of topsoil and subsoil over a geologically contrasted area (Massif central, France). *Geoderma* 112: 235-251.
- Brown, V.A., McDonnell, J.J., Burns, D.A. & Kendall, C., 1999. The role of event water, a rapid shallow flow component, and catchment size in summer stormflow. *Journal of Hydrology*, 217: 171-190.
- Brümmer, G.W., Gerth, J. & Herms, U., 1986. Heavy metal species, mobility, and availability in soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 149: 382-398.
- Bubenzer, O., 1999. Sedimentfallen als Zeugen der spät- und postglazialen Hang- und Talbodenentwicklung im Einzugsgebiet der Schwülme (Südniedersachsen). *Kölner Geogr. Arb.*, 72, 132 S.
- Burrough, P.A. & McDonnell, R.A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York, 333 S.

- Christophersen, N. & Hooper, R.P., 1992. Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of components analysis for the end-member mixing problem. *Water Resources Research*, 28: 99-107.
- Cloquet, C., Carignan, J., Libourel, G., 2006. Atmospheric pollutant dispersal around an urban area using trace metal concentrations and Pb isotopic compositions in epiphytic lichens. *Atmospheric Environment*, 40: 574-587.
- Cocherie, A. & Robert, M., 2007. Direct measurement of lead isotope ratios in low concentration environmental samples by MC-ICP-MS and multi-ion counting. *Chemical Geology*, 243: 90-104.
- Congalton, R.G. & Green, K., 1995. The ABCs of GIS: an Introduction to Geographic Information Systems, in: Lyone, J.G. & McCarthy, J. (Hrsg.): *Wetland and Environmental Applications of GIS*. Lewis Publishers, New York: 9-24.
- Corti, G., Agnelli, A., Certini G. & Ugolini, F.C., 2001. The soil skeleton as a tool for disentangling pedogenetic history: a case study in Tuscany, central Italy. *Quaternary International*, 78: 33-44.
- Dikau, R., 1989. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology, in: Raper, J. (Hrsg.): *Three dimensional application in Geographic Information Systems*. Taylor & Francis: 51-77.
- Dikau, R. & Saurer, H., 1999. *GIS for Earth Surface Systems*. Gebr. Bornträger, Stuttgart, 197 S.
- DIN 19684, 1977. *Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen*, Teile 1, 4, 5, 8. Beuth-Verlag, Berlin, Germany.
- Doe, B. R., 1970. *Lead isotopes*. Springer Verlag, Berlin, 137 S.

- Dodson, J.R. & Macphail, M.K., 2004. Palynological evidence for aridity events and vegetation change during the Middle Pliocene, a warm period in Southwestern Australia. *Global and Planetary Change*, 41: 285-307.
- Dörr, H., Münnich, K. O., Mangini, A. & Schmitz, W., 1990. Gasoline lead in West German soils. *Naturwiss.* 77: 428-430.
- E DIN ISO 11277: 08.02, 1998. Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation (ISO 11277: 1998 + ISO 11277: 1998 Corrigendum 1: 2002)
- DIN EN 60051: Direct acting indicating analogue electrical-measuring instruments and their accessories - Part 1: Definitions and general requirements common to all parts (IEC 60051-1:1997); German version EN 60051-1:1998
- Eitel, B., 1999. *Bodengeographie*. Braunschweig, 244 S.
- Emmanuel, S. & Erel, Y., 2002. Implications from concentrations and isotopic data for Pb partitioning processes in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 2517-2527.
- ESRI, 2000. *ArcView 3.2a Online Help*.
- Ewers, U., Schlipkötter, H.W., 1991. Lead. In: E. Merian (Hrsg.): *Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis and biological relevance*. VCH, Weinheim, Germany: 941-1014.
- Faure, G., 1977. *Principles of Isotope Geology*. Wiley, New York, 464 S.
- Felix-Henningsen, P., 1990. Die mesozoisch-tertiäre Verwitterungsdecke (MTV) im Rheinischen Schiefergebirge. *Mitteilungen. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 66 II: 779-782

- Fink, J., Haase, G., Ruske, R., 1977. Bemerkungen zur Lösskarte von Europe 1:2,5 Mio. Petermanns Geographische Mitteilungen 2: 81-94.
- Frechen, M., Ochs, E.A. & Kohfeld, K. E., 2003. Loess in Europe - mass accumulation rates during the Last Glacial Period. Quaternary Science Reviews, 22: 1835-1857.
- Freydier, R. & Viers, J., 2003. Isotopic study of lead transfer at the interface soil-plants-atmosphere. Geophysical Research Letters, 30: 1227-1241.
- Fried, G., 1984. Gestein, Relief und Boden im Buntsandstein-Odenwald. Frankfurter geowiss. Arb., D 4: 201 S.
- Friedrich, K., 1996. Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten.- Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D, Physische Geographie, Bd.21, 258 S.
- Fuchs, A., 1978. Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1: 25 000, Blatt 5716 Oberreifenberg. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden, 101 S.
- Graham, S.M., Robert, R.V.D., 1994. The analysis of high-purity noble metals and their salts by ICP-MS. Talanta, 41: 1369-1375.
- Gelinas, Y. & Schmit, J.P., 1997. Extending the use of stable lead isotope ratios as a tracer in bioavailability studies. Environ. Sci. Technol., 31: 1968-1972
- Guieu, C., Loye-Pilot, M.D., Ridame, C. & Thomas, C., 2002. Chemical characterization of the Saharan dust end-member: Some biogeochemical implications for the western Mediterranean Sea. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 107: 4258-4263.

- Goodchild, M.F., 1994. Integrating GIS and Remote-Sensing for vegetation analysis and modelling methodological issues. *Journal of Vegetation Science*, 5: 615-626.
- Govindaraju, K., 1989. Compilation of working values and sample description for 272 geostandards. *Geostandards Newsletter*, 13, 113 S.
- Haack, U.K., Heinrichs, H., Gutsche, F.H & Plessow, K., 2003. The isotopic composition of anthropogenic Pb in soil profiles of northern Germany: Evidence for pollutant Pb from a continent-wide mixing system. *Water, Air and Soil Pollution*, 150: 113-134.
- Haase, D., Fink, J., Haase, G., Ruske, R., Pécsi, M., Richter, H., Altermann, M. & Jäger, K.-D., 2007. Loess in Europe - its spatial distribution based on a European Loess Map, scale 1:2,500,000. *Quaternary Science Reviews*, 26: 1301-1312.
- Hansmann, W., Köppel, V., 2000. Lead-isotopes as tracers of pollutants in soils. *Chem. Geol.*, 171: 123-144
- Harrach, T. (1974): Kritische Bemerkungen zur Genese und Systematik der „Verwitterungsböden“. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 18: 320-326.
- Harris, C., 1972. Processes of soil movement in turf-banked solifluction lobes, Okstindan, northern Norway. In Price, R.J., Sugden, D.E. (Editors), *Polar Geomorphology*. Institute of British Geographers Special Publication, 4: 155-174.
- Harris, C., Gallop, M., Coutard, J-P., 1993. Physical modelling of gelifluction and frost creep: some results of a large-scale laboratory experiment. *Earth Surf. Proc. Land.*, 18: 383-398.
- Harris, C., 1996. Physical Modelling of Periglacial Solifluction: Review and Future Strategy. *Permafrost and Periglacial Processes*, 7: 349-360.

- Harris, C., Davies, M. C. R. & Coutard, J.-P., 1997. Rates and Processes of periglacial solifluction: an experimental approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22: 849-868.
- Harris, C., Kern-Luetschg, M., Smith, F., Isaksen, K., 2008. Solifluction processes in an area of seasonal ground freezing, Dovrefjell, Norway. *Permafrost Periglac. Proc.*, 19: 31-47.
- Hartung, J., 2007. *Multivariate Statistik : Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. Oldenbourg-Verlag, München, 815 S.
- Heinrichs, H., Brumsack, H.J., Loftfield, N., König, N., 1986. Verbessertes Druckaufschlusssystem für biologische und anorganische Materialien. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 149: 350-353.
- HLUG, 1977. *Bodenkarte von Hessen, 1 : 25 000, Blatt 5716 Oberreifenberg*. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden, Germany.
- HLUG, 1977. *Bodenkarte von Hessen, 1 : 25 000, Blatt 5617 Usingen*. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden, Germany.
- HLUG, 1978. *Geologische Karte von Hessen, 1 : 25 000, Blatt 5716 Oberreifenberg*. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Wiesbaden, Germany.
- Horn, P., Hölzl, S. & Schaaf, P., 1993. Pb- und Sr-Isotopensignaturen als Herkunftsindikatoren für anthropogene und geogene Kontaminationen. *Isotopenpraxis*, 28: 263-272.
- Hooper, R.P., 2003. Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. *Water Resources Research*, 39: 1055-1070.
- Hopper, J.F., Ross, H.B., Sturges, W.T., Barrie, L.A., 1991. Regional source discrimination of atmospheric aerosols in Europe using the isotopic

- composition of lead. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 43: 45-60.
- Jakobus, R., 1992. Die Erzgänge des östlichen Taunus. *Geol. Jb. Hessen*, 120: 145-160.
- Kabata-Pendias, A. & Pendias, H., 2001. *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, Boca Raton, USA, 432 S.
- King, R.L., Bebout, G.E., Grove, M., Moriguti, T. & Nakamura, E., 2007. Boron and lead isotope signatures of subduction-zone melange formation: Hybridization and fractionation along the slab-mantle interface beneath volcanic arcs. *Chemical Geology*, 239: 305-322.
- Kirnbauer, T., 1998. Kap. 2.4.1. Pseudomorphosen- und Kappenquarzgänge. In: Kirnbauer, T., (Hrsg.), *Geologie und hydrothermale Mineralisationen im rechtsrheinischen Schiefergebirge*. Nassauischer Verein für Naturkunde, Sonderband 1: 176-184.
- Kleber, A., 1992. Periglacial slope deposits and their pedogenic implications in Germany. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 99: 361-371.
- Kleber, A., 1997. Cover-beds as soil parent materials in midlatitude regions. *Catena*, 30: 197-213.
- Kleber, A., Mailänder, R. & Zech, W., 1998. Stratigraphic approach to alteration in mineral soils: The heavy metal example. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 1647-1650.
- Kleber, A. & Mailänder, R., 1998. Veränderungen in Mineralböden relativ zum Ausgangssubstrat am Beispiel der Bindungsformen des Bleis. *Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges.*, 88: 199-202.

- Kleber, A., Mailänder, R. & Zech, W., 1998. Stratigraphic approach to alteration in mineral soils - the heavy metal example. *Soil Sci. Soc. America J.*, 62: 1647-1650
- Kleefisch, B. & Köthe, R., 1993. Wege zur rechnergestützten bodenkundlichen Interpretation digitaler Reliefdaten. *Geologisches Jahrbuch*, 27: 59-122.
- Klein, W. & Martin, G., 1965. Geochemische Untersuchungen im Boden überhydrothermalen Erzgängen des Taunus-Ostrandes (Rheinisches Schiefergebirge). *Notizblatt Hessisches Landesamt für Bodenforschung*, 93: 311-321
- Klostermann, J., 1999. *Das Klima im Eiszeitalter*. Schweizerbart, Stuttgart, 284 S.
- Kober, B., Wessels, M., Bollhöfer, A. & Mangini, A., 1999. Pb isotopes in sediments of Lake Constance, Central Europe constrain the heavy metal pathways and the pollution history of the catchment, the lake and the regional atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 1293-1303.
- Komárek, M., Chrastný, V., Ettler, V. & Tlustoš, P., 2006. Evaluation of extraction/digestion techniques used to determine lead isotopic composition in forest soils. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 385: 1109-1115.
- Koirtjohann, S.R., 1994. Precise determination of isotopic ratios for some biologically significant elements by inductively coupled plasma mass spectroscopy. *Spectrochim. Acta, Part B*, 49: 1305-1311.
- Kuntze, H., Fleige, H., Hindel, R., Wippermann, T., Filipinski, M., Grupe, M. & Pluquet, E., 1991. Empfindlichkeit der Böden gegenüber geogenen und anthropogenen Gehalten an Schwermetallen - Empfehlungen für die Praxis. In: Rosenkranz, D., Bachmann, G., König, W. & Einsele, G. (Hrsg.): *Bodenschutz - Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*. Kapitel 1530, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 86 S.

- Leser, H., 1997. Landschaftsökologie. Ulmer Verlag, Stuttgart, 644 S.
- Lévêque, J. & Haack, U., 1993. Pb isotopes of hydrothermal ores in the Harz. In: P. Moeller und V. Lueders (Hrsg.): Formation of hydrothermal vein deposits – a case study of the Pb–Zn, barite and fluorite deposits of the Harz Mountains. Monograph Series on Mineral Deposits, 30: 197-210.
- Lévêque, J. & Jakobus, R., 1994. Bleiisotope in Galeniten der postvaristischen Quarz- und Mineralgänge des Taunus. Geologisches Jahrbuch Hessen, 122: 75-80.
- Lustig, S., Zang, B., Michalke, P., Schramel, W. & Beck, B., 1996. Transformation behaviour of different platinum compounds in a clay-like humic soil: speciation investigations. The Science of the Total Environment, 188: 195-204.
- Matsuoka, N. & Hirakawa, K., 2000. Solifluction resulting from one-sided and two-sided freezing: field data from Svalbard. Pol. Geoscience, 13: 187-201.
- Matsuoka, N., 2001. Solifluction rates, processes and landforms: a global review. Earth Sci. Rev., 55: 107-134.
- May, T.W., & Wiedmeyer, R.H., 1998. A table of polyatomic interferences in ICP-MS. Atomic Spectroscopy, 19: 150-155.
- McEachern, P., Prepas, E.E. & Chanasyk, D.S., 2006. Landscape control of water chemistry in northern boreal streams of Alberta. Journal of Hydrology, 323: 303-324.
- Millar, S., 2005. Fabric variability associated with periglacial mass-wasting at Eagle Summit, Alaska Geomorphology 72: 222– 237

- Möller, M., Volk, M., Friedrich, K., & Lymburner, L., 2008. Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 171, 419-430
- Monna, F. Lancelot, J., Croudace, I. W., Cundy, A. B. & Lewis, J. T., 1997. Pb Isotopic Composition of Airborne Particulate Material from France and the Southern United Kingdom: Implications for Pb Pollution Sources in Urban Areas. *Environ. Sci. Technol.*, 31: 2277-2286.
- Moor, H. C., Schaller, T. & Sturm, M., 1996. Recent changes in stable lead isotope ratios in sediments of Lake Zug, Switzerland. *Environ. Sci. Technol.*, 30: 2928-2933.
- Müller, D., 1990. Geologische, geochemische und geophysikalische Untersuchungen im Bereich der Buntmetallerzgänge (Pb, Cu, Zn und Ag) bei Heftrich im Taunus. Diplomarbeit Universität Mainz, unveröff., 103 S.
- Naithani, A.K. & Prasad, C., 1998. Downslope soil movement in a periglacial region of Garhwal Himalaya: Rates, processes and climatic significance. *Curr. Sci. India*, 74: 365-372.
- Nageote, S. M., & Day, J.P., 1998. Lead concentrations and isotope ratios in street dust determined by electrothermal atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analyst*, 123: 59-62.
- NIST, 1991. Certificate of Analysis. Standard Reference Material 981. Common Lead Isotopic Standard. National Institute of Standards & Technology. Gaithersburg, MD
- Niller, H.-P., 1998. Prähistorische Landschaften im Lössgebiet bei Regensburg. Kolluvien, Auenlehme und Böden als Archive der Paläoumwelt. *Regensburger Geogr. Schr.*, 31, 429 S.

- Nowack, B., Obrecht, J.M., Schluep, M., Schulin, R., Hansmann, W. & Koppel, V., 2001. Elevated lead and zinc contents in remote alpine soils of the Swiss National Park. *Journal of Environmental Quality*, 30: 919-926.
- Nriagu, J.O., 1990. The rise and fall of leaded gasoline. *Sci. Total Environ.*, 92: 13-28.
- Oelmann, Y., Kreuziger, Y., Bol, R. & Wilcke, W., 2007. Nitrate leaching in soil: Tracing the NO₃⁻ sources with the help of stable N and O isotopes. *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 3024-3033.
- Press, F., & Siever, R., 1995. *Allgemeine Geologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 602 S.
- Raab, T., Leopold, M. & Völkel, J., 2007. Character, Age and Ecological Significance of Pleistocene Periglacial Slope Deposits in Germany. *Physical Geography*, 28: 451-473.
- Rehkämper, M., Mezger, K., 2000. Investigation of matrix effects for Pb isotope ratio measurements by ICP-MC-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 15: 1451-1460.
- Roering, J.J., 2004. Soil creep and convex-upward velocity profiles: theoretical and experimental investigation of disturbance-driven sediment transport on hillslopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 1597-1612.
- Rohdenburg, H., 1965. Untersuchungen zur pleistozänen Formung am Beispiel der Westabdachung des Göttinger Waldes. *Gießener geographische Schriften*, 7, 76 S.
- Rohdenburg, H., 1968. Jungpleistozäne Hangformung in Mitteleuropa : Beiträge zur Kenntnis, Deutung und Bedeutung ihrer räumlichen und zeitlichen Differenzierung. *Göttinger bodenkundliche Berichte*, 6: 3-107.

- Rohdenburg, H., 1989. Landschaftsökologie – Geomorphologie. Catena Verlag, 220 S.
- Rosenberg, F., 1991. Geochemie. Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen, 1:25000, Blatt 5715 Idstein. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden, Germany.
- Rosman, K. J. R., Chisholm, W., Hong, S., Candelone, J. P. & Boutron, C.F., 1997. Lead from Carthaginian and Roman Spanish Mines Isotopically Identified in Greenland Ice Dated from 600 B.C. to 300 A.D. *Environ. Sci. Technol.*, 31: 3413-3416.
- Rosman, K. J. R., Chi, L. & Steinnes, E., 1998. Spatial and Temporal Variation in Isotopic Composition of Atmospheric Lead in Norwegian Moss. *Environ. Sci. Technol.*, 32: 2542-2546.
- Sabel, K.-J., 1989. Zur Renaissance der Gliederung periglazialer Deckschichten in der deutschen Bodenkunde. *Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten*, D10: 9-16.
- Sabel, K.-J., 2005. Die Bodenlandschaften Hessens. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellschaft*, 105: 21-26.
- Sauer, D., 2002. Genese, Verbreitung und Eigenschaften periglaziärer Lagen im Rheinischen Schiefergebirge - anhand von Beispielen aus Westerwald, Hunsrück und Eifel. Universität Gießen Inst. f. Bodenkunde u. Bodenerhaltung, Dissertation, 294 S.
- Sauer, D. & Felix-Henningsen, P., 2006. Saprolite, soils, and sediments in the Rhenish Massif as records of climate and landscape history. *Quaternary International*, 156-157: 4-12.
- Schaller, M., von Blanckenburg, F., Veit, H. & Kubik, P.W., 2002. Influence of periglacial cover beds on in situ-produced cosmogenic ^{10}Be in soil sections. *Geomorphology*, 49: 255-267.

- Scheffer, F. & Schachtschabel, P., 1998. Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Aufl., 494 S.
- Schlichting/Blume/Stahr, 1995. Bodenkundliches Praktikum. Blackwell Wissenschafts-Verlag, 295 S.
- Schmincke, H.U., Park, C. & Harms, E., 1999. Evolution and environmental impacts of the eruption of Laacher See Volcano (Germany) 12,900 a BP. *Quaternary International*, 61: 61-72.
- Scholten, T., Altermann, M., Schwanecke, W., Felix-Henningsen, P., 1999. Die Bedeutung periglaziärer Lagen für Funktionen des Bodens im Ostharz. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 91/II: 1096-1099.
- Schönhals, E., 1974. Die Bedeutung geologischer, insbesondere quartärgeologischer Vorgänge für die Bodenbildung in Hessen. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellschaft*, 18: 11-17.
- Schulz-Dobrick, B. & Wedepohl, K. H., 1983. The chemical composition of sedimentary deposits in the Rhenohercynian belt of central Europe. – In: Martin, H. & Eder, F.W. (Hrsg.), *Intracontinental Fold Belts. Case Studies in the Variscian Belt of Europe and the Damara Belt in Namibia*. Springer Berlin-Heidelberg: 211-229.
- Seim, R. & Tischendorf, G., 1990. *Grundlagen der Geochemie*. 632 S.
- Selby, M.J., 1993. *Hillslope Materials and Processes*. 2nd Edition, Oxford Univ. Pr., 451 S.
- Semmel, A., 1964. Junge Schuttdecken in hessischen Mittelgebirgen. *Notizblatt Hessisches Landesamt für Bodenforschung*, 92: 275-285.
- Semmel, A., 1968. Studien über den Verlauf jungpleistozäner Formung in Hessen. *Frankfurter Geographische Hefte*, 45, 133 S.

- Semmel, A., 1993. Grundzüge der Bodengeographie. 3. Aufl., Teubner, Stuttgart, 127 S.
- Semmel, A., 1994. Periglazialmorphologie. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 116 S.
- Semmel, A., 1996. Deckschichten in den deutschen Mittelgebirgen, geoökologische Charakterisierung für den Bodenschutz. In: Rosenkranz, D., Einsele, G., Harreß, H.-M. (Hrsg.): Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, BoS, 21. Lfg. VI/96, 1155: 1-16.
- Semmel, A., 1998: Anmerkung zur Schuttdeckengliederung im Thüringer Wald und hessischen Bergländern. Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, Beiheft 7: 62-78.
- Semmel, A., 1999. Spezielle Formen quasinatürlicher Massenverlagerungen in Odenwald und Taunus. Tübinger geowissenschaftliche Arbeiten, D5: 213-229.
- Semmel, A., 2001. In memoriam: die Phäno-Parabraunerde. Mitt. dt. bodenkdl. Ges., 96: 561-562.
- Semmel, A., 2002. Hauptlage und Oberlage als umweltgeschichtliche Indikatoren. Z. Geomorph. N.F., 46: 167-180.
- Shand, P., Haria, A.H., Neal, C., Griffiths, K.J., Goody, D.C., Dixon, A.J., Hill, T., Buckley, D.K. & Cunningham, J.E., 2005. Hydrochemical heterogeneity in an upland catchment: further characterisation of the spatial, temporal and depth variations in soils, streams and groundwaters of the Plynlimon forested catchment, Wales. Hydrology and Earth System Sciences, 9: 621-644.

- Shima, M., 1986. A summary of extremes of isotopic variations in extraterrestrial materials. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50: 577-584.
- Sierra M., Martinez F.J. & Aguilar J., 2007. Baselines for trace elements and evaluation of environmental risk in soils of Almeria (SE Spain). *Geoderma*, 139: 209-219.
- Sirocko, F., Seelos, K., Schaber, K., Rein, B., Dreher, F., Diehl, M., Lehne, R., Jaeger, K., Krbetschek, M. & Degering, D., 2005. A late Eemian aridity pulse in central Europe during the last glacial inception. *Nature*, 436: 833-836.
- Smalley, I.J., 1976. *Loess: Lithology and Genesis*. John Wiley & Sons Inc., 448 S.
- Speight, J.G., 1974. A parametric approach to landform regions. *Special Publication Institute of British Geographers*, 7: 213-230.
- SPSS Inc., 2004. *SPSS 14.0 for Windows*. LEAD Technologies Inc.
- Stahr, K., 1979. Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standortseigenschaften im Südschwarzwald. *Freiburger Bodenkundliche Abhandlung*, 9, 273 S.
- Sterckeman, T., Douay, F., Baize, D., Fourrier, H., Proix, N., Cchartz, C. & Carignan, J., 2006. Trace element distributions in soils developed in loess deposits from northern France. *European Journal of Soil Science*, 57: 392-410.
- Sturges, W.T. & Barrie, L.A., 1989. The use of stable lead 206/207 isotope ratios and elemental composition to discriminate the origin of lead in aerosols at a rural site in eastern Canada. *Atmos. Environ.*, 23: 1645-1657.
- Sycheva, S.A., 1998. New data on the composition and evolution of the Mezin loess-paleosol complex in the Russian Plain. *Eurasian Soil Science*, 31: 1062-1074.

- Taylor, P.D.P., de Bièvre, P., 1995. Validation of the Analytical Linearity and Mass Discrimination Model Exhibited by a ICP-MC-MS by Means of a Set of Synthetic Uranium Isotope Mixtures. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 10: 395-398.
- Thalheim, K., 1994. Mineralogisch-granulometrische Untersuchungen an Deckschichten im Osterzgebirge. *Mitteilungen deutsche bodenkundliche Gesellschaft*, 74: 35-38.
- Terhorst, B., 2007. Periglacial cover beds and soils in landslide areas of SW-Germany. *Catena*, 71: 467-476.
- Thiemeyer, H., 1988. Bodenerosion und holozäne Dellenentwicklung in hessischen Lössgebieten. *Rhein-Main. Forschung*, 105, 174 S.
- Townsend, T., Yu, Z., McGoldrick, P. & Hutton, J. A., 1998. Precise lead isotope ratios in Australian galena samples by high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 13: 809-813.
- UBA, 1995. Kennzeichnung der Empfindlichkeit der Böden gegenüber Schwermetallen unter Berücksichtigung von lithogenem Grundgehalt, pedogener An- und Abreicherung sowie anthropogener Zusatzbelastung. Text 107 01 001/02 Umweltbundesamt, Berlin, 507 S.
- Uthe, A.D., 1988. User oriented description and classification of geoscientific data. *Geologisches Jahrbuch*, A104: 63-74.
- Veit, H., 1994. Stratigraphy of cover beds and corresponding soils in central-southern Chile. *Revista chilena de historia natural*, 67: 395-403.
- Veldkamp, E., 1994. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 175-180.

- Véron, A., Flament, P., Bertho, M. L., Alleman, L., Flegat, R. & Hamelin, B., 1999. Isotopic evidence of pollutant lead sources in Northwestern France. *Atmos. Environ.*, 33: 3377-3388.
- Völkel, J. & Mahr, A. 2001. IRSL-dating of periglacial slope deposits. Results from the Bayerische Wald (Bavarian Forest). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 45: 295-305.
- Watmough, S. A. & Hutchinson, T. C., 2004. The quantification and distribution of pollution Pb at a woodland in rural south central Ontario. *Canada Environmental Pollution*, 128: 419-428.
- Wagner, T. & Schneider, J., 2002. Lead isotope systematics of vein-type antimony mineralization, Rheinisches Schiefergebirge, Germany: a case history of complex reaction and remobilization processes. *Mineralium Deposita*, 37: 185-197.
- Walter, W., 1999. Diffuser Stoffeintrag in Böden und Gewässer. Stuttgart, 310 S.
- Wedepohl, K.H., 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217-1232.
- Whiteley, J.D. & Murray, F., 2003. Anthropogenic platinum group element (Pt, Pd and Rh) concentrations in road dusts and roadside soils from Perth, Western Australia. *The Science of the Total Environment*, 317: 121-135.
- Wilcke, W., Krauss, M., Kobza, J. & Zech, W., 2001. Quantification of anthropogenic lead in Slovak forest and arable soils along a deposition gradient with stable lead isotope ratios. *Journal Plant Nutrition and Soil Science*, 164: 303-307.
- Wilcke, W. & Lilienfein, J., 2004. Soil ¹³C natural abundance under native and managed vegetation in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 827-832.

- Wilson, J.P. & Gallant, J.C., 2000. *Terrain Analysis. Principles and Applications*. John Wiley, New York, 512 S.
- Wilson, C.A., Bacon, J.R., Cresser, M.S. & Davidson, D.A., 2006. Lead isotope ratios as a means of sourcing anthropogenic lead in archaeological soils: a pilot study of an abandoned Shetland croft. *Archaeometry*, 48: 501-509.
- Woerner, G. & Schmincke, H.-U., 1984. Mineralogical and chemical zonation of the Laacher See tephra sequence. *Journal of Petrology*, 25: 805-835.
- Young, A., 1972. *Slopes. Geomorphology texts*, 3rd edition. Longman, London, 295 S.
- Zhang, G.L., Yang, F.G., Zhao, W.J., Zhao, Y.G., Yang, J.L. & Gong, Z.T., 2007. Historical change of soil Pb content and Pb isotope signatures of the cultural layers in urban Nanjing. *Catena*, 69: 51-56.
- Zurawek, R., Zyszkowski, E. & Górecki, A., 2005. Topographic Control of Periglacial Slope Covers, Slezka Massif, Southwest Poland: A Statistical Approach. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16: 241-248.

Anhang

	Seite
Tabelle A1: Wesentliche diagnostische Geländemerkmale periglazialer Lagen (AG Boden 1994)	136
Tabelle A2: Detail-Beschreibung der kartierten Bodentypen in Untersuchungsgebiet 1 (Transekt A-D); Nummern angelehnt an die Boden-Einheiten [BE] der Bodenkarte 5716 Oberreifenberg (HLUG, 1977)	137
Tabelle A3: Detail-Beschreibung der kartierten Bodentypen in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E); Nummern angelehnt an die Boden-Einheiten [BE] der Bodenkarte 5617 Pfaffenwiesbach (HLUG, 1978)	138
Tabelle A4: Detail-Beschreibung der kartierten Bodentypen in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt F); Nummern angelehnt an die Boden-Einheiten [BE] der Bodenkarte 5617 Pfaffenwiesbach (HLUG, 1978)	139
Tabelle A5: Leitprofil A1 (Datenauszug aus dem Datenbankprogramm „BOFA“ des HLUG)	140
Tabelle A6: Leitprofil A2	141
Tabelle A7: Leitprofil A3	142
Tabelle A8: Leitprofil A4	143
Tabelle A9: Leitprofil B1	144
Tabelle A10: Leitprofil B2	145
Tabelle A11: Leitprofil B3	146
Tabelle A12: Leitprofil C1	147
Tabelle A13: Leitprofil D1	148
Tabelle A14: Leitprofil D2	149
Tabelle A15: Leitprofil D3	150
Tabelle A16: Transekt A, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften	151
Tabelle A17: Transekt B, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften	152
Tabelle A18: Transekt C, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften	153
Tabelle A19: Transekt D, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften	154
Tabelle A20: Transekt E, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften	155

Tabelle A21:	Transekt F, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften	156
Tabelle A22:	Spurenelementgehalte aller B-Horizonte	157
Tabelle A23:	Leitprofile Transekt A, Spurenlementgehalte, pH-Wert sowie Textur	160
Tabelle A24:	Leitprofile Transekt B, Spurenlementgehalte, pH-Wert sowie Textur	161
Tabelle A25:	Leitprofile Transekt C, Spurenlementgehalte, pH-Wert sowie Textur	162
Tabelle A26:	Leitprofile Transekt D, Spurenlementgehalte, pH-Wert sowie Textur	163
Tabelle A27:	Hauptkomponentenladungen	164
Tabelle A28:	Tiefenverteilung Spurenelemente	165
Tabelle A29:	²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-Isotopenverhältnisse aller untersuchter B-Horizonte (n=46)	167
Tabelle A30:	Präzision der ICP-MS-Wiederholungsmessungen ausgewählter Proben	168
Tabelle A31:	Präzision der Wiederholungsmessungen der Referenz-Probe A06 mCn	168
Tabelle A32:	Beitrag der Substratkomponenten berechnet mittels Drei-Komponenten-Mischungsmodell für Untersuchungsgebiet 1 (Transekt A-D); lokaler Lösstandard von Untersuchungsgebiet 1 verwendet (*Werte sind rechnerisch negativ [Berechnung mit 8 Nachkommastellen])	169
Tabelle A33:	Beitrag der Substratkomponenten berechnet mittels Drei-Komponenten-Mischungsmodell für Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E-F); lokaler Lösstandard von Untersuchungsgebiet 2 verwendet (*Werte sind rechnerisch negativ [Berechnung mit 8 Nachkommastellen])	171
Tabelle A34:	Beitrag des anthropogenem Bleis zum Gesamt-Pb im Mineralbodenhorizont	172

Tabelle A1: Wesentliche diagnostische Geländemerkmale periglazialer Lagen (AG Boden 1994)

Bezeichnung der Lage	Kriterien	Geländemerkmale
Oberlage (LO)	Verbreitung	Mittelgebirge, Hartgesteinsdurchragungen
	Mächtigkeit	meist < 10 dm
	Körnung	Gesteinsschutt, feinerdearm
	weitere Merkmale und Besonderheiten	z.T. in Taschen und Keilen ins Liegende reichend, starke Mächtigkeitsschwankungen
Hauptlage (LH)	Verbreitung	oberflächenbildend außerhalb holozäner Abtragung und Akkumulation und der Verbreitung der Oberlage
	Mächtigkeit	in der Regel 3 - 7 dm
	Körnung Fein- erde ----- Skelett	schluffhaltige/-reiche Feinerde; bei schluffig-toniger LM bzw. LB: schluff- u. tonärmer als LM/LB; bei sandiger LM bzw. LB: schluff- u. tonreicher als LM/LB; ----- skelettfrei bis skelettreich; Mittelgebirge: deutl. skelettärmer als LO, skelettreicher als LM
	weitere Merkmale und Besonderheiten	häufig Steinsohle/Steinanreicherung an der Basis; z.T. in Taschen und Keilen ins Liegende reichend; bei fehlender LM markante Substratunterschiede zur LB
Mittellage (LM)	Verbreitung	im Berg- und Hügelland nur in erosionsgeschützten Positionen, in anderen Gebieten häufig nicht sicher von LH und LB abgrenzbar
	Mächtigkeit	meist < 5 dm
	Körnung Fein- erde ----- Skelett	schluffhaltige/ -reiche Feinerde; bei schluffig-toniger LH: schluff- u. tonreicher als LH; bei schluff- u. tonärmerer LH und lehmig-toniger LB: deutlich sandiger als LB ----- skeletthaltig bis skelettfrei, in der Regel skelettärmer als LH
	weitere Merkmale und Besonderheiten	häufig Steinsohle/Steinanreicherung an der Basis; z.T. in Taschen und Keilen ins Liegende reichend; Solifluktuationsmerkmale; häufig dichter als LH; markante Substratunterschiede zur LB
Basislage (LB)	Verbreitung	fast flächendeckend über von der Lagenbildung unbeeinflussten Gesteinen
	Mächtigkeit	in der Regel 2 - 10 dm
	Körnung	stark schwankend: von unterlagernden oder in Nachbarschaft hangaufwärts vorkommenden Gesteinen abhängig (auch die Färbung)
	weitere Merkmale und Besonderheiten	Taschen, Keile, Solifluktuationsmerkmale, fossile Bodenreste möglich; Längsachsen des Skeletts meist in Hangrichtung eingeregelt; z.T. stark verdichtet gegenüber LH/LM oder liegendem Gestein

Tabelle A2: Detail-Beschreibung der kartierten Bodentypen in Untersuchungsgebiet 1 (Transekt A-D); Nummern angelehnt an die Boden-Einheiten [BE] der Bodenkarte 5716 Oberreifenberg (HLUG, 1977)

10

Braunerde, stellenweise Parabraunerde, z.T. sehr stark erodiert, Bv-Horizont stark verkürzt zugunsten eines Ap-Horizonts, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer vereinzelt über Quarzit
30-100 cm lehmiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, stellenweise stark steinig-grusig

11

Braunerde, örtl. stark erodierte Parabraunerde, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer oder Schieferzersatz, vereinzelt blockreich, im Bereich von Felsausbissen Syrosem
30-60 cm sandiger Schluff bis sandig-toniger Lehm, steinig-grusig

12

Braunerde, stellenweise mit schwachen Pseudogleymerkmalen im Unterboden, örtl. Parabraunerde, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer vereinzelt über Quarzit
60-100 cm lehmiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, schwach steinig-grusig

27

Parabraunerde, stark erodiert, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer, Phyllit, örtl. über Quarzit, vereinzelt Ranker oder Syrosem aus Schutt
30-60 cm (örtl. 0-30 cm) lehmiger Schluff bis toniger Lehm, örtl. schluffiger Sand bis sandiger Lehm, mittel bis stark steinig-grusig

28

Parabraunerde, z.T. erodiert, aus stark lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Phyllit, Schiefer oder Schieferzersatz
30-60 cm lehmiger Schluff bis toniger Lehm, überwiegend mittel bis stark steinig-grusig

39

Parabraunerde, häufig auch Braunerde, stellenweise mit schwachen Pseudogleymerkmalen aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer, Phyllit oder Schieferzersatz, vereinzelt über Quarzit, örtl. Ranker oder Syrosem (aus Felsausbissen)
30-60 cm sandiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, mittel bis stark steinig-grusig

39a

Parabraunerde, häufig auch Braunerde, kolluvial überdeckt aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer, Phyllit oder Schieferzersatz
30-60 cm sandiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, mittel bis schwach steinig-grusig

45

Parabraunerde, z.T. kolluvial überdeckt, stellenweise mit schwachen Pseudogleymerkmalen, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer, Phyllit oder Schieferzersatz, vereinzelt über Quarzit
60-100 cm sandiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm überwiegend mittel bis stark steinig

54

Pseudogley-Parabraunerde, z.T. kolluvial überdeckt, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer, Phyllit oder Schieferzersatz, vereinzelt über Quarzit oder Sandstein

30-60 cm sandiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, mittel bis schwach steinig-grusig

56

Pseudogley-Parabraunerde aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über stark verlehmttem, rötlichgelbem Schiefer- oder Phyllitzersatz

60-100 cm sand-lehmiger Schluff bis toniger Lehm, überwiegend mittel bis schwach steinig-grusig

73

Pseudogley, örtl. kolluvial überdeckt, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt oder Lösslehm über stark verlehmttem, gelbem Schieferzersatz, vereinzelt über Schiefer

60-100 cm sandig-lehmiger Schluff bis toniger Lehm, mittel bis sehr schwach, vereinzelt stark steinig-grusig

90

anthropogen verändertes Gelände

Tabelle A3: Detail-Beschreibung der kartierten Bodentypen in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E); Nummern angelehnt an die Boden-Einheiten [BE] der Bodenkarte 5617 Pfaffenwiesbach (HLUG, 1978)

10

Braunerde, stellenweise Parabraunerde, z.T. sehr stark erodiert, Bv-Horizont stark verkürzt zugunsten eines Ap-Horizonts, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer vereinzelt über Quarzit

30-100 cm lehmiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, stellenweise stark steinig-grusig

11

Braunerde, örtl. stark erodierte Parabraunerde, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer oder Schieferzersatz, vereinzelt blockreich, im Bereich von Felsausbissen Syrosem

30-60 cm sandiger Schluff bis sandig-toniger Lehm, schwach steinig-grusig

53

Pseudogley-Parabraunerde, z. T. kolluvial überdeckt, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer, Phyllit oder Schieferzersatz, vereinzelt über Quarzit

30-80 cm sandig-lehmiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, schwach steinig-grusig

72

Pseudogley, örtl. kolluvial überdeckt, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt oder Lösslehm über Schiefer, Schieferzersatz oder Lösslehm

60->100 cm lehmiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, schwach bis sehr schwach steinig-grusig

Tabelle A4: Detail-Beschreibung der kartierten Bodentypen in Untersuchungsgebiet 2 (Transekt F); Nummern angelehnt an die Boden-Einheiten [BE] der Bodenkarte 5617 Pfaffenwiesbach (HLUG, 1978)

10

Braunerde, stellenweise Parabraunerde, z.T. sehr stark erodiert, Bv-Horizont stark verkürzt zugunsten eines Ap-Horizonts, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer vereinzelt über Quarzit
30-100 cm lehmiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, stellenweise stark steinig-grusig

11

Braunerde, örtl. stark erodierte Parabraunerde, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer oder Schieferzersatz, vereinzelt blockreich
30-60 cm sandiger Schluff bis sandig-toniger Lehm, steinig-grusig

27

Parabraunerde, z.T. stark erodiert, aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer, Schieferzersatz, örtl. über Quarzit
30-60 cm (örtl. 0-30 cm) lehmiger Schluff bis toniger Lehm, mittel bis stark steinig-grusig

39a

Parabraunerde, häufig auch Braunerde, kolluvial überdeckt aus lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt über Schiefer, Phyllit oder Schieferzersatz
30-60 cm sandiger Schluff bis schluffig-toniger Lehm, mittel bis schwach steinig-grusig

Tabelle A5: Leitprofil A1 (Datenauszug aus dem Datenbankprogramm „BOFA“ des HLUg)

Profil: A06-Grube_A1

Bericht vom: 31.10.2007

BF 7 : Braunerde, keine Varität aus lössarmem grusführender Lehm (Hauptlage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über Tonschiefer (Devon)

Profilbezeichnung : A06-Grube_A1 Erfassungsprojekt : Dissertation Bewertung : schlüssige Dokumentation Erfasser : Stückrad, Stefan Erfassungszweck : Spezialkartierung unabh. der bodenkdl. Karten Bewertung : schlüssige Dokumentation	Aufnahme datum : 31.3.2006 Erfassungsdatum : 24.2.2007 Letzte Änderung : 29.10.2007 Aufnahmeintensität : vereinfacht Beprobungsintensität : eh Grundwasserstand :	Neigung : N3.2 Exposition der Geländeform : SW Exposition am Punkt : SW Formelement : GX Formtyp : H	Aufschlussart : bodenkundliche Sondierung allg. Ort : Heftrich Flur : Gemarkung : Heftrich Gem.-Nr : 634 TK25-Blatt : 5716 Oberreifenberg	Rechts : 3453296 Hoch : 5566607 Ermittlung : GPS Genauigkeit : 1 - 0,1 m Höhe : 422 m ü. NN Ermittlung : K
--	---	---	---	---

Bodensystematik : BBn	Nutzung : F	Erosionsgrad : 1	WurzDB : 4,5 dm	Humusform : MUO	Trophie : nicht erfaßt	Ökol. Feuchte : n.e.	Nässestufen : G0 S0 H0 HG1
------------------------------	--------------------	-------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------------	-----------------------------	-----------------------------------

Horizont untergrenze [cm]	M [cm]	Horizontbezeichnung	Bodenart			Hum	Ca.	Wurzeln		Pd	TRD	Schicht untergrenze [cm]	M [cm]	Petrographie Stratigraphie Bildungsprozeß	Hauptkomponenten	
			Feinerde	Skelett	Sk-Anteil			Int.	Vert.						Fremdkomponenten	
von: 3 rep. 4 bis: 4	4	I Ah	Lu	R	2	h4	n.e.	w3	ureg	pd1	pt1	35 45	45	grusführender Lehm, Hauptlage, gelisolifluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;	
von: 20 rep. 45 bis: 41	41	I Bv	Ls2	R	3	h2	c0	w2	ua	pd3	pt3					
von: 50 rep. 75 bis: 30	30	II imCn	Sl3	X	5	h1	c0	w1	ob	pd4	pt3	45 75	30	Tonschiefer, Devon, physikalisch verwittert	unbestimmt; unbestimmt; XXf; eg0;	

Horizonte			Wurzeln			Farbe				Hohlräume				Gefüge					Hydromorphie												
Horizont-Symbol	Horizont-Untergrenze		Intensität	Verteilung	Z	B	Feuchte	Freitext	Munsell		Art	Anteil (Fläche)	Verteilung	Durchgängigkeit	Z	B	Form	Aggregatgröße	Lageart	Verfestigung	Verteilung	Anteil (Fläche)	Z	B	Art	Erscheinungsform	Verteilung	Anteil (Fläche)	Z	B	
	von	bis							HF	10YR																					Art
Ah	von	3	w3	ureg			feu2		HF	10YR2/3							sub	fk	of	slo											
	bis	4							ZF1																						
	rep	4							ZF2																						
Bv	von	20	w2	ua			feu2		HF	10YR4/6							sub	f	of	lo											
	bis	45							ZF1																						
	rep	45							ZF2																						
imCn	von	50	w1	ob			feu1		HF	10YR5/4									sp	sfe		f8									
	bis	75							ZF1																						
	rep	75							ZF2																						

Tabelle A6: Leitprofil A2 (Datenauszug aus dem Datenbankprogramm „BOFA“ des HLUG)

Profil: A14-Grube_A2

BF 15 : Fahlerde, im tieferen Untergrund pseudovergleyt aus lössarmem grusführender Lehm (Hauptlage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über grusführender Lehm (Mittellage) über tiefem lössarmem grusführender Lehm (Basislage) aus/mit Tonschiefer (Devon)

Profilbezeichnung : A14-Grube_A2		Aufnahmedatum : 31.3.2006		Neigung : N2		Aufschlussart : bodenkundliche Sondierung allg.		Rechts : 3453105								
Erfassungsprojekt : Dissertation		Erfassungsdatum : 26.2.2007		Exposition der Geländeform : SW		Ort : Heftrich		Hoch : 5566532								
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Letzte Änderung : 29.10.2007		Exposition am Punkt : SW		Flur :		Ermittlung : GPS								
Erfasser : Stückrad, Stefan		Aufnahmeintensität : vereinfacht		Formelement : GV		Gemarkung : Heftrich		Genauigkeit : 1 - 0,1 m								
Erfassungszweck : Spezialkartierung unabh. der bodenkdl. Karten		Beprobungsintensität : eh		Formtyp : TS		Gem.-Nr : 634		Höhe : 407 m ü. NN								
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Grundwasserstand :				TK25-Blatt: 5716 Oberreifenberg		Ermittlung : GPS								
Bodensystematik : LFn st Nutzung : F Erosionsgrad : 0 WurzDB : 6,5 dm Humusform : MUO Trophie : Ökol. Feuchte : Nässestufen : G0 S3 H2 HG0																
Horizont unter- grenze [cm]	M [cm]	Horizont- bezeichnung	Bodenart			Hum	Ca.	Wurzeln		Pd	TRD	Schicht unter- grenze [cm]	M [cm]	Petrographie Stratigraphie Bildungsprozeß	Hauptkomponenten	
			Feinerde	Skelett	Sk-Anteil			Int.	Vert.						Fremdkomponenten	
von: rep.	3 4	I Ah	Lu	R	2	h4	n.e.	w4	ureg	pd1	pt1	35 55	55	grusführender Lehm, Hauptlage, gelisoliffluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;	
bis: von: rep.	20 25	I Ael	Lu	R	3	h2	c0	w3	ua	pd3	pt3					
bis: von: rep.	50 55	I Ael+Bt	Lt2	R	2	h2	c0	w2	oz	pd3	pt3					
bis: von: rep.	75 20	II Bt-Swd	Lts	R	4	h2	c0	w0		pd3	pt3	45 75	20	grusführender Lehm, Mittellage, gelisoliffluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;	
bis: von: rep.	90 15	III Sd-ICv	Lts	R	5	h1	c0	w0		pd4	pt4	90	15	grusführender Lehm, Basislage, gelisoliffluktiv	Tonschiefer; Devon;	

Tabelle A7: Leitprofil A3 (Datenauszug aus dem Datenbankprogramm „BOFA“ des HLUg)

Profil: A21-Grube_A3

BF 22 : Braunerde, keine Varität aus lössarmem grusführender Lehm[Koluval] (Hauptlage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über lössarmem grusführender Lehm (Basislage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über tiefem Tonschiefer (Devon)

Profilbezeichnung : A21-Grube_A3		Aufnahmedatum : 31.3.2006		Neigung : N2.1		Aufschlussart : bodenkundliche Sondierung allg.		Rechts : 3452938							
Erfassungsprojekt : Dissertation		Erfassungsdatum : 27.2.2007		Exposition der Geländeform : SW		Ort : Heftrich		Hoch : 5566453							
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Letzte Änderung : 29.10.2007		Exposition am Punkt : SW		Flur :		Ermittlung : GPS							
Erfasser : Stückrad, Stefan		Aufnahmeintensität : vereinfacht		Formelement : GG		Gemarkung : Heftrich		Genauigkeit : 1 - 0,1 m							
Erfassungszweck : Spezialkartierung unabh. der bodenkdl. Karten		Beprobungsintensität : eh		Formtyp : TS		Gem.-Nr : 634		Höhe : 400 m ü. NN							
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Grundwasserstand :				TK25-Blatt : 5716 Oberreifenberg		Ermittlung : GPS							
Bodensystematik : BBn -		Nutzung : F		Erosionsgrad : n.e.		WurzDB : 7 dm		Humusform : MUO							
						Trophie :		Ökol. Feuchte :							
								Nässestufen : G0 S1 H1 HG0							
Horizont unter- grenze [cm]	M [cm]	Horizont- bezeichnung	Bodenart			Hum	Ca.	Wurzeln		Pd	TRD	Schicht unter- grenze [cm]	M [cm]	Petrographie Stratigraphie Bildungsprozeß	Hauptkomponenten Fremdkomponenten
			Feinerde	Skelett bzw. Torfart	Sk-Anteil Zersetzung			Int.	Vert.						
von: rep. bis:	3 4 4	I Ah	n.e.	R	2	h4	n.e.	w3	ureg	pd1	pt1	35 40 40	40	grusführender Lehm, Hauptlage, kolluvial	Tonschiefer; Devon; ö; 2;
von: rep. bis:	20 40 36	I Bv	Ls2	R	3	h2	c0	w3	oz	pd3	pt3				
von: rep. bis:	50 100 60	II ilCv	Lt2	R	5	h1	c0	w2	ob	pd3	pt3	90 100 60	60	grusführender Lehm, Basislage, gelisolifluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;
von: rep. bis:	120 20	III imCn	Ls2	X	6	h0	c0	w0		pd4	pt3	45 120 20	20	Tonschiefer, Devon, physikalisch verwittert	

Tabelle A9: Leitprofil B1 (Datenauszug aus dem Datenbankprogramm „BOFA“ des HLUg)

Profil: B05-Grube_B1

BF 38 : Braunerde, keine Varität aus lössarmem grusführender Lehm (Hauptlage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über grusführender Lehm (Basislage) aus/mit Tonschiefer (Devon)

Profilbezeichnung : B05-Grube_B1 Erfassungsprojekt : Dissertation Bewertung : schlüssige Dokumentation Erfasser : Stückrad, Stefan Erfassungszweck : Spezialkartierung unabh. der bodenkdl. Karten Bewertung : schlüssige Dokumentation	Aufnahme datum : 31.3.2006 Erfassungsdatum : 27.2.2007 Letzte Änderung : 29.10.2007 Aufnahmeintensität : vereinfacht Beprobungsintensität : eh Grundwasserstand :	Neigung : N3.2 Exposition der Geländeform : SW Exposition am Punkt : SW Formelement : GV Formtyp : H	Aufschlussart : bodenkundliche Sondierung allg. Ort : Heftrich Flur : Gemarkung : Heftrich Gem.-Nr : 634 TK25-Blatt : 5716 Oberreifenberg	Rechts : 3453212 Hoch : 5566423 Ermittlung : GPS Genauigkeit : 1 - 0,1 m Höhe : 400 m ü. NN Ermittlung : GPS
--	---	---	---	---

Bodensystematik : BBn	Nutzung : F	Erosionsgrad : 1	WurzDB : 4 dm	Humusform : MUO	Trophie :	Ökol. Feuchte :	Nässestufen : G0 S0 H0 HG1
------------------------------	--------------------	-------------------------	----------------------	------------------------	-----------	-----------------	-----------------------------------

Horizont untergrenze [cm]	M [cm]	Horizontbezeichnung	Bodenart			Hum	Ca	Wurzeln		Pd	TRD	Schicht untergrenze [cm]	M [cm]	Petrographie Stratigraphie Bildungsprozeß	Hauptkomponenten	
			Feinerde	Skelett	Sk-Anteil			Int.	Vert.						Fremdkomponenten	
von: 3 rep. 4 bis: 4	4	I Ah	Lu	R	2	h4	n.e.	w4	lg	pd1	pt1	35 40	40	grusführender Lehm, Hauptlage, gellisolfuktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;	
von: 20 rep. 40 bis: 40	36	I Bv	Lu	R	3	h2	c0	w3	oz	pd3	pt3					
von: 50 rep. 55 bis: 55	15	II ilCv	Ls3	X	5	h0	c0	w0		pd4	pt3	45 55	15	grusführender Lehm, Basislage, gellisolfuktiv	Tonschiefer; Devon; gellisolfuktiv;	

Horizonte			Wurzeln			Farbe				Hohlräume				Gefüge				Hydromorphie								
Horizont-Symbol	Horizont-Untergrenze		Intensität	Verteilung	Z B	Feuchte	Freitext	Munsell		Art	Anteil (Fläche)	Verteilung	Durchgängigkeit	Z B	Form	Aggregatgröße	Lageart	Verfestigung	Verteilung	Anteil (Fläche)	Z B	Art	Erscheinungsform	Verteilung	Anteil (Fläche)	Z B
	von	bis						HF	5GY4/1																	
Ah	von	3	w4	lg		feu1		HF	5GY4/1						kru	f	of	slo								
	bis	4						ZF1																		
	rep	4						ZF2																		
Bv	von	20	w3	oz		feu2		HF	10YR3/4						pol	f	ho	m								
	bis	40						ZF1																		
	rep	40						ZF2																		
ilCv	von	50	w0			feu2		HF	10YR8/3																	
	bis	55						ZF1																		
	rep	55						ZF2																		

Tabelle A10: Leitprofil B2 (Datenauszug aus dem Datenbankprogramm „BOFA“ des HLUG)

Profil: **B12-Grube_B2**

BF 46 : Braunerde, keine Varität aus lössarmem grusführender Lehm (Hauptlage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über grusführender Lehm (Basislage) aus/mit Tonschiefer (Devon)

Profilbezeichnung : B12-Grube_B2 Erfassungsprojekt : Dissertation Bewertung : schlüssige Dokumentation Erfasser : Stückrad, Stefan Erfassungszweck : Spezialkartierung unabh. der bodenkdl. Karten Bewertung : schlüssige Dokumentation	Aufnahme datum : 31.3.2006 Erfassungsdatum : 28.2.2007 Letzte Änderung : 29.10.2007 Aufnahmeintensität : vereinfacht Beprobungsintensität : eh Grundwasserstand :	Neigung : N4 Exposition der Geländeform : SW Exposition am Punkt : SW Formelement : GV Formtyp : H	Aufschlussart : bodenkundliche Sondierung allg. Ort : Heftrich Flur : Gemarkung : Heftrich Gem.-Nr : 634 TK25-Blatt: 5716 Oberreifenberg	Rechts : 3453129 Hoch : 5566312 Ermittlung : GPS Genauigkeit : 1 - 0,1 m Höhe : 376 m ü. NN Ermittlung : GPS
--	---	---	--	---

Bodensystematik : BBn -	Nutzung : F	Erosionsgrad : 0	WurzDB : 10 dm	Humusform : MUO	Trophie :	Ökol. Feuchte :	Nässestufen : G0 S1 H1 HG2
--------------------------------	--------------------	-------------------------	-----------------------	------------------------	-----------	-----------------	-----------------------------------

Horizont untergrenze [cm]	M [cm]	Horizontbezeichnung	Bodenart			Hum	Ca.	Wurzeln		Pd	TRD	Schicht untergrenze [cm]	M [cm]	Petrographie Stratigraphie Bildungsprozeß	Hauptkomponenten	
			Feinerde	Skelett	Sk-Anteil			Int.	Vert.						Fremdkomponenten	
von: 3 rep. 4 bis:	4	I Ah	n.e.	R	2	h4	n.e.	w5	ureg	pd1	pt1	35 40	40	grusführender Lehm, Hauptlage, gelisolifluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;	
von: 20 rep. 40 bis:	36	I Bv	Lu	R	3	h2	c0	w2	oz	pd3	pt3					
von: 50 rep. 65 bis:	25	II ilCv	Ls2	X	5	h0	c0	w1	lok	pd3	pt3	45 65	25	grusführender Lehm, Basislage, gelisolifluktiv	Tonschiefer; Devon;	

Horizonte			Wurzeln			Farbe				Hohlräume				Gefüge					Hydromorphie									
Horizont-Symbol	Horizont-Untergrenze		Intensität	Verteilung	Z B	Feuchte	Freitext	Munsell			Art	Anteil (Fläche)	Verteilung	Durchgängigkeit	Z B	Form	Aggregatgröße	Lageart	Verfestigung	Verteilung	Anteil (Fläche)	Z B	Art	Erscheinungsform	Verteilung	Anteil (Fläche)	Z B	
Ah	von	3	w5	ureg				HF																				
	bis	4						ZF1																				
	rep	4						ZF2																				
Bv	von	20	w2	oz				HF																				
	bis	40						ZF1																				
	rep	40						ZF2																				
ilCv	von	50	w1	lok				HF																				
	bis	65						ZF1																				
	rep	65						ZF2																				

Tabelle A13: Leitprofil D1(Datenauszug aus dem Datenbankprogramm „BOFA“ des HLUG)

Profil: D05-Grube_D1

BF 83 : Pseudogley-Parabraunerde, keine Varität aus lössarmem grusführender Lehm (Hauptlage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über lössführendem Gruslehm (Mittellage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über tiefem Tonschiefer (Basislage)

Profilbezeichnung : D05-Grube_D1		Aufnahmedatum : 31.3.2006		Neigung : N3.1		Aufschlussart : bodenkundliche Sondierung allg.		Rechts : 3453536							
Erfassungsprojekt : Dissertation		Erfassungsdatum : 8.3.2007		Exposition der Geländeform : SW		Ort : Heftrich		Hoch : 5566048							
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Letzte Änderung : 29.10.2007		Exposition am Punkt : SW		Flur :		Ermittlung : GPS							
Erfasser : Stückrad, Stefan		Aufnahmeintensität : vereinfacht		Formelement : XG		Gemarkung : Heftrich		Genauigkeit : 1 - 0,1 m							
Erfassungszweck : Spezialkartierung unabh. der bodenkdl. Karten		Beprobungsintensität : eh		Formtyp : H		Gem.-Nr : 634		Höhe : 395 m ü. NN							
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Grundwasserstand :		TK25-Blatt : 5716 Oberreifenberg				Ermittlung : GPS							
Bodensystematik : SS-LL -		Nutzung : F		Erosionsgrad : n.e.		WurzDB : 9 dm		Humusform : MUO							
						Trophie :		Ökol. Feuchte :							
								Nässestufen : G0 S2 H0 HG0							
Horizont unter- grenze [cm]	M [cm]	Horizont- bezeichnung	Bodenart			Hum	Ca.	Wurzeln		Pd	TRD	Schicht unter- grenze [cm]	M [cm]	Petrographie Stratigraphie Bildungsprozeß	Hauptkomponenten Fremdkomponenten
			Feinerde	Skelett bzw. Torfart	Sk-Anteil Zersetzung			Int.	Vert.						
von: rep. bis:	3 3	I Ah	Lu	R	2	h4	n.e.	w4	lg	pd1	pt1	20 50	50	grusführender Lehm, Hauptlage, gelisolifluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;
von: rep. bis:	20 17	I Bv	Lu	R	2	h1	c0	w2	ureg	pd3	pt3				
von: rep. bis:	40 50	I Bv-Sw	Lu	R	2	h1	c0	w2	ureg	pd3	pt3				
von: rep. bis:	55 75	II Bt-Sw	Lu	R	2	h1	c0	w2	ureg	pd3	pt3	55 115	65	Gruslehm, Mittellage, gelisolifluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 3;
von: rep. bis:	115 40	II Bt-Sd	Uls	R	3	h1	c0	w1	ne	pd3	pt3				
von: rep. bis:	130 15	III Sd	Uls	R	4	h0	c0	w0		pd4	pt3	130	15	Tonschiefer, Basislage, gelisolifluktiv	

Tabelle A14: Leitprofil D2 (Datenauszug aus dem Datenbankprogramm „BOFA“ des HLUg)

Profil: D06-Grube_D2

BF 86 : Pseudogley-Braunerde (S-Horizonte oberhalb 8 dm), kolluvial aus lössarmem grusführender Lehm[Kolluvial] (Holozän) aus/mit Tonschiefer (Devon) über lössarmem Gruslehm (Mittellage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über tiefem grusführender Lehm (Basislage)

Profilbezeichnung : D06-Grube_D2		Aufnahmedatum : 31.3.2006		Neigung : N4		Aufschlussart : bodenkundliche Sondierung allg.		Rechts : 3453536									
Erfassungsprojekt : Dissertation		Erfassungsdatum : 8.3.2007		Exposition der Geländeform : SW		Ort : Heftrich		Hoch : 5566048									
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Letzte Änderung : 29.10.2007		Exposition am Punkt : SW		Flur :		Ermittlung : GPS									
Erfasser : Stückrad, Stefan		Aufnahmeintensität : vereinfacht		Formelement : XG		Gemarkung : Heftrich		Genauigkeit : 1 - 0,1 m									
Erfassungszweck : Spezialkartierung unabh. der bodenkdl. Karten		Beprobungsintensität : ch		Formtyp : H		Gem.-Nr : 634		Höhe : 380 m ü. NN									
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Grundwasserstand :		TK25-Blatt : 5716 Oberreifenberg				Ermittlung : GPS									
Bodensystematik : SS-BB kol		Nutzung : F		Erosionsgrad : I		WurzDB : 10 dm		Humusform : MUO									
						Trophie :		Ökol. Feuchte :									
								Nässestufen : G0 S3 H0 HG1									
von: rep. bis:	Horizont unter- grenze [cm]	M [cm]	Horizont- bezeichnung	Bodenart			Hum	Ca.	Wurzeln		Pd	TRD	Schicht unter- grenze [cm]	M [cm]	Petrographie Stratigraphie Bildungsprozeß	Hauptkomponenten	
				Feinerde	Skelett	Sk-Anteil			Int.	Vert.						Fremdkomponenten	
von: rep. bis:	3 3 20	3 3 27	I Ah	Uls	R	4	h4	n.e.	w4	ne	pd1	pt1	20 30	30	grusführender Lehm, Holozän, kolluvial	Tonschiefer; Devon; ö; 2;	
von: rep. bis:	20 30 30	27 27 27	I M	Lu	R	3	h2	c0	w3	ureg	pd2	pt3					
von: rep. bis:	40 75 75	45 45 45	II Bv	Lu	R	4	h1	c0	w1	oz	pd3	pt3	55 100	70	Gruslehm, Mittellage, gelisolifuktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;	
von: rep. bis:	100 100 100	25 25 25	II Bv-Sw	Lu	R	4	h0	c0	w0		pd3	pt3					
von: rep. bis:	115 115 115	15 15 15	III Sd-imCv	Sl4	R	4	h0	c0	w0		pd3	pt3	130	30	grusführender Lehm, Basislage, gelisolifuktiv		
von: rep. bis:	130 130 130	15 15 15	III imCv	Sl4	XR	4	h0	c0	w0		pd4	pt3					

Tabelle A15: Leitprofil D3 (Datenauszug aus dem Datenbankprogramm „BOFA“ des HLUg)

Profil: D09-Grube_D3

BF 91 : Parabraunerde, im tieferen Untergrund pseudovergleyt aus flachem lössarmem grusführender Lehm (Hauptlage) aus/mit Tonschiefer (Devon) über Tonschiefer (Mittellage) über sehr tiefem lössarmem Gruslehm (Basislage) aus/mit Tonschiefer (Devon)

Profilbezeichnung : D09-Grube_D3		Aufnahmedatum : 31.3.2006		Neigung : N4		Aufschlussart : bodenkundliche Sondierung allg.		Rechts : 3453348							
Erfassungsprojekt : Dissertation		Erfassungsdatum : 21.3.2007		Exposition der Geländeform : SW		Ort : Heftrich		Hoch : 5566065							
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Letzte Änderung : 29.10.2007		Exposition am Punkt : SW		Flur :		Ermittlung : GPS							
Erfasser : Stückrad, Stefan		Aufnahmeintensität : vereinfacht		Formelement : VX		Gemarkung : Heftrich		Genauigkeit : 1 - 0,1 m							
Erfassungszweck : Spezialkartierung unabh. der bodenkdl. Karten		Beprobungsintensität : eh		Formtyp : H		Gem.-Nr : 634		Höhe : 368 m ü. NN							
Bewertung : schlüssige Dokumentation		Grundwasserstand :		TK25-Blatt : 5716 Oberreifenberg				Ermittlung : GPS							
Bodensystematik : LLn st		Nutzung : F		Erosionsgrad : 0		WurzDB : 10 dm		Humusform : MUO							
						Trophie :		Ökol. Feuchte :							
								Nässestufen : G0 S3 H0 HG1							
Horizont unter- grenze [cm]	M [cm]	Horizont- bezeichnung	Bodenart			Hum	Ca	Wurzeln		Pd	TRD	Schicht unter- grenze [cm]	M [cm]	Petrographie Stratigraphie Bildungsprozeß	Hauptkomponenten Fremdkomponenten
			Feinerde	Skelett bzw. Torfart	Sk-Anteil Zersetzung			Int.	Vert.						
von: rep. bis:	3 5	I Ah	n.e.	R	4	h4	n.e.	w5	reg	pd1	pt1	20 25	25	grusführender Lehm, Hauptlage, gelisolifluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;
von: rep. bis:	20 25	I Al	Ut4	R	4	h1	c0	w3	ureg	pd3	pt3				
von: rep. bis:	40 70	II Bt	Lu	R	4	h1	c0	w2	lok	pd3	pt3	120 125	100	grusführender Lehm, Mittellage, gelisolifluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;
von: rep. bis:	55 125	II sSw-Bt	Lu	R	4	h0	c0	w1	ureg	pd3	pt3				
von: rep. bis:	115 140	III Sd-imCy	Ls2	R	5	h0	c0	w0		pd3	pt3	125 140	15	Gruslehm, Basislage, gelisolifluktiv	Tonschiefer; Devon; ö; 2;

Tabelle A16: Transekt A, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften

Proben- Nummer:	Horizont	pH-Wert	Gewicht (g)		Fein- boden- art	Textur			Grob- boden- anteil	Grobb- Anteils- klasse	Proben- nahme- tiefe	Pb- Gehalt (RFA) mg kg ⁻¹	C _{org}
			Fraktion <2mm	Fraktion >2mm		Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]					
A													
1	B	3,80	24,43	22,58	Ls2	36,35	40,66	22,99	48,03	Gr4	10-20 cm	25	2,53
	Bv-Cv	3,95	44,52	38,35					46,28	Gr4	20-35 cm	20	1,33
2	B	4,01	18,69	7,85					29,58	Gr3	10-20 cm	24	
3	B	3,64	24,19	73,34	Sl3	66,44	20,87	12,69	75,20	Gr5	10-25 cm	20	
4	B	3,75	25,73	106,29					80,51	Gr5	10-30 cm	29	
5	B	3,55	24,06	66,53	Lt2	28,28	45,96	25,76	73,44	Gr5	10-30 cm	39	3,89
6	B	3,84	29,78	25,76	Ls2	28,43	49,07	22,5	46,38	Gr4	10-45 cm	37	2,45
7	B	3,73	19,51	68,78					77,90	Gr5	10-40 cm	32	
8	B	3,93	30,83	32,56	Ut4	10,86	67,15	21,97	51,36	Gr4	10-40 cm	24	1,34
9	B	3,65	17,08	11,01					39,20	Gr3	10-30 cm	28	
10	B	3,63	23,11	30,27					56,71	Gr4	10-35 cm	29	
11	B	3,84	19,48	20,4					51,15	Gr4	10-35 cm	41	
12	B	3,81	31,27	20,23	Lu	21,96	59,33	18,71	39,28	Gr3	10-30 cm	35	1,49
13	B	3,70	19,36	13,98					41,93	Gr4	10-30 cm	36	
14	Bv	3,75	34,1	84,7	Lu	21,88	55,46	22,66	71,30	Gr5	10-25 cm	30	2,68
15	B	3,79	34,46	9,39					21,41	Gr3	10-35 cm	39	
16	B	3,81	33,95	14,28					29,61	Gr3	10-30 cm	36	
	Bv-Cv	-	19,34	15,53					44,54	Gr4	30-50 cm	-	
17	B	3,84	38,63	9,95	Lt2	21,34	48,38	30,27	20,48	Gr3	10-45 cm	34	1,59
18	B	3,75	21,64	9,07					29,53	Gr3	10-30 cm	33	
	Bv-Cv	-	67,77	48,13					41,53	Gr4	30-65 cm	-	
19	B	3,86	19,34	7,85					28,87	Gr3	10-25 cm	30	
20	B	3,68	20,09	11,84					37,08	Gr3	10-30 cm	31	
	C	3,81	25,64	23,43					47,75	Gr4	30-55 cm	20	
21	B	3,72	31,22	22,89	Ls2	37,68	40,2	22,14	42,30	Gr4	10-40 cm	40	2,76
22	B	4,06	24,02	21,01					46,66	Gr4	10-35 cm	47	
23	B	3,91	23,67	9,15	Lt2	20,54	48,06	31,39	27,88	Gr3	10-25 cm	51	2,35
	Bv-Cv	-	48,59	26,07					34,92	Gr3	25-55 cm	-	
24	B	3,65	37,17	21,95					37,13	Gr3	10-35 cm	45	
25	B	3,81	53,78	17,78	Lt2	24,47	46,45	29,08	24,85	Gr3	10-35 cm	34	1,81
	Bv-Cv	-	37,55	23,95					38,94	Gr3	35-65 cm	-	
26	B	3,75	36,13	21,63					37,45	Gr3	10-40 cm	31	
27	B	3,68	31,18	12,43	Lu	20,14	51,04	28,82	28,50	Gr3	10-30 cm	40	1,39
	Bv-Cv	-	61,94	42,26					40,56	Gr4	30-60 cm	-	
28	B	3,62	21,38	9,65					31,10	Gr3	10-25 cm	60	
29	B	3,66	40,91	20,68	Lu	20,17	53,25	26,58	33,58	Gr3	10-35 cm	50	1,68
	Bv-Cv	3,81	60,06	30,81					33,91	Gr3	35-60 cm	42	
30	B	3,63	34,71	17,35					33,33	Gr3	10-45 cm	50	
31	Bv	3,76	27,97	19,44	Lu	21,21	55,27	23,52	41,00	Gr4	10-55 cm	35	1,6

Tabelle A17: Transekt B, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften

Proben- Nummer:	Horizont	pH-Wert	Gewicht (g)		Fein- boden- art	Textur			Grob- boden- anteil	Grobb.- Anteils- klasse	Proben- nahme- tiefe	Pb- Gehalt (RFA) mg kg ⁻¹	C _{org}
			Fraktion <2mm	Fraktion >2mm		Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]					
1	B	3,81	31,60	9,17	Lu	15,24	59,03	25,73	22,49	Gr3	10-25 cm	29	1,5
2	B	3,95	19,55	13,73					41,26	Gr4	10-25 cm	30	
	Bv-Cv	3,93	32,79	32,19					49,54	Gr4	25-50 cm	20	
3	B	3,80	25,26	10,22					28,80	Gr3	10-25 cm	29	
4	B	3,66	28,25	9,09	Lu	15,08	59,12	25,79	24,34	Gr3	10-25 cm	37	1,65
	C	-	28,02	22,18					44,18	Gr4	25-50 cm	-	
5	B	3,95	27,48	16,31					37,25	Gr3	10-25 cm	34	
6	B	3,80	32,63	10,32					24,03	Gr3	10-25 cm	26	
	Bv-Cv	3,83	52,79	34,79					39,72	Gr3	25-50 cm	21	
7	B	3,76	38,06	15,12	Lu	15,81	54,71	29,48	28,43	Gr3	10-30 cm	27	1,32
8	B	3,69	19,07	9,25					32,66	Gr3	10-20 cm	23	
	Bv-Cv	-	50,01	36,53					42,21	Gr4	20-55 cm	-	
9	B	3,70	37,07	14,99	Lu	17,37	57,1	25,53	28,79	Gr3	10-30 cm	21	1,49
10	B	3,69	65,15	38,45					37,11	Gr3	10-35 cm	45	
	Bv-Cv	3,69	15,16	5,93					28,12	Gr3	35-50 cm	47	
11	B	3,69	36,55	10,31					22,00	Gr3	10-25 cm	36	
12	B	3,92	53,51	35,52	Lu	19,08	59,16	21,76	39,90	Gr3	10-35 cm	25	1,21
13	B1	3,79	28,43	10,51					26,99	Gr3	10-20 cm	25	
	B2	3,77	24,87	15,54					38,46	Gr3	30-40 cm	24	
	B3	3,76	24,83	7,02					22,04	Gr3	50-60 cm	25	
14	B	3,80	29,23	14,12	Lu	14,15	57,99	27,86	32,57	Gr3	10-25 cm	27	1,49
15	B	3,86	31,13	9,14					22,70	Gr3	10-30 cm	26	
	Bv-Cv	4,01	36,86	26,46					41,79	Gr4	30-55 cm	19	
16	B	3,81	22,74	8,46					27,12	Gr3	10-25 cm	25	
17	Bv	3,83	101,00	175,4	Lu	16,85	61,57	21,58	63,46	Gr5	10-30 cm	19	2,72
18	B	3,83	35,83	27,64					43,55	Gr4	10-40 cm	20	
19	B	3,92	15,79	5,26					24,99	Gr3	10-25 cm	35	
	Bv-Cv	4,54	42,08	14,54	Lu	18,42	60,07	21,51	25,68	Gr3	25-45 cm	25	2,13
20	B	3,81	23,04	12,11	Lt3	14,65	47,76	37,59	34,45	Gr3	10-30 cm	43	3,89

Tabelle A18: Transekt C, Übersicht über Höhenlage, Reliefaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften

Proben- Nummer:	Horizont	pH-Wert	Gewicht (g)		Fein- boden- art	Textur			Grob- boden- anteil	Grobb.- Anteils- klasse	Proben- nahme- tiefe	Pb- Gehalt (RFA) mg kg ⁻¹	C _{org}
			Fraktion <2mm	Fraktion >2mm		Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]					
1	Bv	3,79	31,90	12,11	Lu	12,86	55,73	31,4	27,52	Gr3	10-30 cm	32	1,84
	Bv-Cv	3,65	16,55	6,55					28,35	Gr3	30-45 cm	24	
2	Bv	3,65	14,77	9,61					39,42	Gr3	10-20 cm	31	
3	Bv	3,75	15,81	6,53					29,23	Gr3	10-25 cm	66	
	Bv-Cv	3,66	26,48	7,09					21,12	Gr3	25-40 cm	32	
4	Bv	3,85	16,72	7,14					29,92	Gr3	10-20 cm	135	
5	Bv	3,79	14,46	7,33					33,64	Gr3	10-20 cm	44	
6	Bv	3,96	17,94	18,44					50,69	Gr4	10-25 cm	35	
7	Bv	3,77	37,85	32,01	Lt3	16,77	46,84	36,39	45,82	Gr4	10-30 cm	29	2,02
	Bv-Cv	3,73	13,37	15,89					54,31	Gr4	30-55 cm	26	
8	Bv	3,64	24,70	8,45					25,49	Gr3	10-20 cm	36	
9	Bv	3,80	24,58	7,87					24,25	Gr3	10-20 cm	34	
10	Bv	3,74	30,88	12,07					28,10	Gr3	10-25 cm	52	
11	Bv	3,74	20,24	43,42	Ls3	44,46	32,22	23,31	68,21	Gr5	10-45 cm	59	2,23
12	Bv	3,56	62,87	64,51					50,64	Gr4	10-25 cm	49	
13	Bv	3,46	30,04	109,04					78,40	Gr5	10-25 cm	50	
14	Bv	3,68	32,79	51,36					61,03	Gr5	10-25 cm	44	
15	Bv	3,55	25,50	59,56	Lt2	26,27	46,7	27,03	70,02	Gr5	10-25 cm	38	3,09
16	Bv	3,63	64,40	55,77					46,41	Gr4	10-25 cm	67	
17	Bv	3,51	27,49	18,47	Lu	14,60	55,95	29,45	40,19	Gr4	10-20 cm	37	3,23
18	Bv	3,66	73,69	76,73					51,01	Gr4	10-25 cm	39	
	Bv-Cv	3,68	33,49	88,53					72,55	Gr5	25-45 cm	35	
19	Bv	3,67	41,71	66,01	Ls2	33,01	42,47	24,52	61,28	Gr5	10-25 cm	29	2,26
20	Bv	3,65	45,33	75,81	Lt2	32,24	35,62	32,14	62,58	Gr5	10-25 cm	27	3,39
21	Bv	3,60	28,43	57,54					66,93	Gr5	10-25 cm	25	
22	Bv	3,54	34,55	38,92					52,97	Gr4	10-25 cm	31	
23	Bv	3,71	35,77	89,80	Lu	22,4	52,55	25,05	71,51	Gr5	10-25 cm	29	2,76

Tabelle A19: Transekt D, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften

Proben- Nummer:	Horizont	pH-Wert	Gewicht (g)		Fein- boden- art	Textur			Grob- boden- anteil	Grob- Anteils- klasse	Proben- nahme- tiefe	Pb- Gehalt (RFA) mg kg ⁻¹	C _{org}
			Fraktion <2mm	Fraktion >2mm		Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]					
1	B	3,83	22,34	10,41					31,79	Gr3	10-30 cm	66	
	Bv-Cv	3,73	26,27	9,15					25,83	Gr3	30-45 cm	34	
2	B	3,86	41,91	14,92	Lu	27,64	49,85	22,52	26,25	Gr3	10-30 cm	33	1,25
3	B	3,72	27,60	9,76					26,12	Gr3	10-25 cm	44	
	Bv-Cv	3,95	67,05	34,57					34,02		25-50 cm		
4	B	3,80	35,71	10,69					23,04	Gr3	10-30 cm	53	
5	B	3,89	29,15	7,40	Lu	10,42	60,15	29,43	20,25	Gr3	10-35 cm	106	2,52
6	B	3,87	30,95	15,46					33,31	Gr3	10-40 cm	46	
7	B	3,89	43,46	11,79	Lu	13,43	60,06	26,51	21,34	Gr3	10-30 cm	39	1,62
8	B	3,79	53,35	14,58					21,46	Gr3	10-30 cm	29	
	Bv-Cv	3,74	58,63	14,12					19,41	Gr3	30-60 cm	33	
9	B	3,75	39,14	8,33	Lu	11,79	58,3	29,91	17,55	Gr3	10-25 cm	33	1,98
10	B	3,75	131,69	55,75					29,74	Gr3	10-40 cm	25	

Tabelle A20: Transekt E, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften

Proben- Nummer:	Horizont	pH-Wert	Gewicht (g)		Fein- boden- art	Textur			Grob- boden- anteil	Grob- Anteils- klasse	Proben- nahme- tiefe	Pb- Gehalt (RFA) mg kg ⁻¹	C _{org}
			Fraktion <2mm	Fraktion >2mm		Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]					
1	B1	3,82	16,01	14,69	Lu	7,1	62,99	29,91	47,85	Gr4	10-30 cm	27	
	B2	4,04	15,47	18,14					53,97	Gr4	30-45 cm	20	
2	B	3,91	15,43	7,34					32,24	Gr3	10-30 cm	38	1,56
3	B	3,68	17,60	33,91					65,83	Gr4	10-35 cm	93	
4	B1	3,50	18,47	11,64	Sl4	53,55	34,39	12,06	38,66	Gr3	10-30 cm	34	0,63
	B2	3,84	37,88	36,63					49,16	Gr4	30-50 cm	24	
5	B	3,51	23,90	11,93					33,30	Gr3	10-35 cm	31	
6	B1	3,70	22,86	16,63					42,11	Gr4	10-30 cm	33	
	B2	3,79	13,96	9,41	40,27	Gr4	30-45 cm	33					
	B3	3,96	19,31	18,32	48,68	Gr4	45-60 cm	25	0,93				
7	B	3,74	19,54	11,84					37,73	Gr3	15-30 cm	25	
8	B1	3,69	22,35	10,05					Ut4	11,63	65,47	22,90	
9	B	3,70	23,09	16,59					41,81	Gr4	10-20 cm	26	
10	B1	3,62	35,58	12,11					Ut4	9,06	69,02	21,92	
		B2	3,92	10,26	6,30					38,04	Gr3	25-30 cm	-
11	B	3,47	22,82	18,02					44,12	Gr4	10-20 cm	25	
12	B	3,45	43,04	33,91					Lu	13,67	63,55	22,79	
13	B	X	19,25	9,03					31,93	Gr3	10-35 cm	87	
14	B	3,67	17,34	12,21					41,32	Gr4	10-30 cm	67	
15	B	3,56	22,19	12,38					35,81	Gr3	10-25 cm	27	
16	B1	3,59	37,66	18,36					Ut4	9,29	72,37	18,34	
17	M	4,11	28,91	17,06					37,11	Gr4	10-35 cm	28	2,43
18	M	3,38	24,33	16,03					39,72	Gr3	10-25 cm	30	
	M-Sw	-	45,65	39,45	Tu3	2,86	63,22	33,92	46,36	Gr4	25-45 cm	-	2,7

Tabelle A21: Transekt F, Übersicht über Höhenlage, Relieffaktoren, bodenphysikalischen Eigenschaften

Proben- Nummer:	Horizont	pH-Wert	Gewicht (g)		Fein- boden- art	Textur			Grob- boden- anteil	Grobb.- Anteils- klasse	Proben- nahme- tiefe	Pb- Gehalt (RFA) mg kg ⁻¹	C _{org}
			Fraktion <2mm	Fraktion >2mm		Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]					
1	B	3,55	15,83	6,64					29,55	Gr3	10-20 cm	42	
2	B	3,68	21,21	16,76	Tu3	8,16	56,26	35,5	44,14	Gr4	10-35 cm	27	2,46
3	B	3,78	14,40	10,11					41,25	Gr4	10-25 cm	31	
4	B	3,61	46,60	23,16	Lu	12,56	64,58	22,8	33,20	Gr3	10-40 cm	38	1,26
5	B	3,82	26,07	11,32					30,28	Gr3	10-30 cm	64	
6	B	3,62	16,74	10,48					38,50	Gr3	10-15 cm	42	
7	B1	3,72	38,60	22,32	Ut4	6,29	73,40	20,3	36,64	Gr3	10-25 cm	54	2,63
	B2	-	20,59	20,24	Lu	14,42	64,08	21,5	49,57	Gr4	25-40 cm	-	0,91
8	B	3,79	18,73	10,71					36,38	Gr3	10-35 cm	58	
9	B	3,59	29,92	13,51	Ut2	13,94	77,93	8,12	31,11	Gr3	10-30 cm	34	1,11
10	B	3,85	15,33	12,42					44,76	Gr4	10-20 cm	48	
11	B1	3,61	27,15	10,62	Lu	23,98	49,72	26,3	28,12	Gr3	10-25 cm	45	1,24
	B2	3,77	29,28	38,45					56,77	Gr4	25-50 cm	48	
12	B1	3,66	25,04	11,68					31,81	Gr3	10-15 cm	33	
	B2	-	25,33	19,87	tu3	4,59	60,84	34,5	43,96	Gr4	25-40 cm	-	1,04
13	B	3,69	32,94	14,38					30,39	Gr3	10-25 cm	36	
14	B	3,62	21,26	7,54	Ut3	14,16	69,73	16,0	26,18	Gr3	10-35 cm	50	1,84
15	B	3,70	25,32	12,97	Ut4	6,83	71,36	21,8	33,87	Gr3	10-30 cm	56	2,53
16	B	3,90	16,26	12,66					43,78	Gr4	10-40 cm	50	
17	B	3,99	38,39	21,51					35,91	Gr3	10-40 cm	36	
18	B	3,81	41,52	16,82	Ut2	13,68	75,48	10,8	28,83	Gr3	10-35 cm	42	1,11

Tabelle A22: Spurenelementgehalte aller B-Horizonte

Probe	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U
----- mg kg ⁻¹ -----																	
A01 B	12	94	157	14	43	10	73	15	117	85	34	438	25	480	25	12,2	4,2
A02 B	12	91	149	10	43	8	66	14	107	69	33	460	22	426	24	13	2,8
A03 B	11	88	139	8	27	7	52	13	98	51	38	510	22	358	20	14,5	3,1
A04 B	14	102	142	16	41	12	77	17	115	49	37	415	20	417	29	14,8	2,8
A05 B	14	108	144	15	39	13	73	17	128	48	35	387	20	441	39	13,2	3,7
A06 B	10	98	135	13	41	10	83	15	113	59	36	416	21	450	37	13,4	2,6
A07 B	11	90	126	13	33	9	68	14	108	59	34	431	20	400	32	13,5	2,4
A08 B	10	73	103	12	32	7	66	12	100	82	34	494	24	429	24	11,6	4
A09 B	13	84	126	8	36	8	72	14	100	69	34	464	23	437	28	12,1	3,4
A10 B	10	91	116	15	39	15	69	15	110	67	30	400	19	415	29	12	3,2
A11 B	9	75	114	13	29	8	62	12	97	68	32	431	21	392	41	11,6	3,1
A12 B	11	88	122	20	36	11	65	14	108	66	34	436	22	412	35	13,6	2,8
A13 B	11	81	116	14	35	10	67	13	99	64	33	433	22	399	36	11,7	1,8
A14 B	19	141	163	24	69	24	101	23	181	61	40	339	25	557	30	16,1	3,3
A15 B	15	110	127	20	56	16	101	20	153	69	32	326	24	507	39	14,9	2,8
A16 B	16	116	123	24	54	14	93	19	155	123	30	302	31	556	36	13,1	3,2
A17 B	12	109	110	16	51	14	94	20	156	194	29	347	45	629	34	13,7	2,7
A18 B	14	113	121	20	52	15	87	18	152	169	28	316	34	574	33	14,4	3,2
A19 B	14	111	122	19	51	14	93	19	142	122	30	315	31	523	30	14,3	2,6
A20 B	15	111	137	15	58	14	95	19	142	70	32	299	24	463	31	12,9	2,2
A21 B	16	121	149	20	69	20	98	22	160	60	31	296	24	522	40	13,8	3
A22 B	15	125	137	21	66	21	99	21	157	87	32	269	27	529	44	14,2	2,6
A23 B	14	114	125	19	55	15	93	20	156	152	32	301	36	582	51	14,9	2,5
A24 B	14	122	128	22	57	17	102	20	166	149	30	325	39	564	45	14,8	2,3
A25 B	16	120	129	25	58	15	101	20	157	142	32	316	35	562	34	13,3	1,7
A26 B	18	111	123	18	57	15	92	19	142	113	28	290	28	505	31	11,8	1,9
A27 B	14	110	128	19	55	13	93	18	149	111	34	333	30	519	40	14	2,9
A28 B	14	110	139	18	61	14	96	19	139	56	35	303	23	473	60	13,4	2,9
A29 B	14	115	138	19	65	14	94	18	136	52	34	309	22	451	50	12,2	2,9
A30 B	13	109	137	19	58	14	93	19	141	56	36	320	22	434	50	13,4	3,2
A31 B	13	101	128	16	54	13	89	18	130	52	34	333	21	432	35	12,2	3,8
B01 B	14	86	123	14	42	10	78	16	124	69	37	434	23	469	29	14,8	3,2
B02 B	12	87	126	15	41	9	72	16	124	63	37	402	23	439	30	13,8	3,4
B03 B	13	89	126	14	43	9	78	15	126	81	37	454	26	487	29	14,2	3,3
B04 B	11	89	124	14	40	10	69	14	116	69	32	452	22	413	37	13,9	3,1
B05 B	9	87	117	13	40	9	65	14	105	69	35	462	23	393	34	13,1	1,9
B06 B	13	95	126	16	44	11	74	17	126	75	36	433	25	456	26	14,7	2,8
B07 B	15	103	131	18	47	12	81	18	137	83	35	417	26	466	27	13,7	2,9
B08 B	13	101	128	13	45	11	73	16	123	66	36	381	22	424	23	11,8	3,1
B09 B	14	106	135	17	54	12	80	17	137	64	36	363	23	475	21	12,3	2,7
B10 B	18	138	155	19	68	29	121	23	179	49	40	333	24	568	45	16,2	3,8
B11 B	14	99	128	12	48	13	82	18	135	79	32	451	29	487	36	15,1	4,4
B12 B	12	93	114	18	46	11	81	16	135	95	36	449	30	504	25	15,4	4
B13 B	11	94	116	14	44	9	78	16	133	116	34	443	32	523	24	13,7	3,2
B14 B	12	93	123	14	41	8	78	16	134	118	35	432	32	528	27	14,4	3,4
B15 B	13	98	118	17	42	7	73	17	129	113	35	427	32	500	26	12,7	3,2
B16 B	14	106	134	22	45	10	79	18	148	99	34	400	30	521	25	14,6	3,8
B17 B	11	87	114	14	38	8	68	15	127	116	35	451	32	494	19	13,8	3,6
B18 B	14	104	129	20	49	9	83	19	153	116	36	424	34	562	20	14,4	3,1
B19 B	11	84	94	20	38	7	65	16	121	182	36	457	36	553	32	13,2	4,7
B20 B	12	92	115	19	36	10	67	16	121	159	33	405	32	509	43	12,6	3,7

Probe	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U
----- mg kg ⁻¹ -----																	
C01 B	11	96	115	16	48	10	84	15	122	69	33	401	23	421	32	13,4	2,8
C02 B	13	94	122	14	44	9	80	15	120	57	33	380	22	402	31	12,2	2,3
C03 B	14	109	132	18	53	16	89	18	138	46	34	324	21	410	66	13,1	3,5
C04 B	15	112	139	15	51	15	91	20	141	44	36	324	21	409	135	13,1	2,5
C05 B	15	114	144	18	58	15	94	20	143	40	34	300	21	433	44	13,8	3,4
C06 B	17	111	142	19	59	17	95	20	146	53	34	334	22	455	35	13,9	2,6
C07 B	17	118	131	10	51	16	94	20	156	85	31	312	28	462	29	13,3	3,4
C08 B	13	110	119	16	52	12	90	19	144	103	32	299	28	473	36	13	2
C09 B	16	119	143	17	63	16	110	21	165	95	32	311	31	527	34	15,1	2,1
C10 B	18	124	137	24	62	14	104	21	155	76	35	272	26	485	52	14,5	2,7
C11 B	16	120	151	35	56	14	80	20	150	44	29	290	18	473	59	12,1	2,3
C12 B	18	138	167	16	55	20	90	22	179	48	36	307	22	510	49	16,2	3,3
C13 B	14	120	144	16	46	13	81	20	143	70	36	341	26	466	50	14	2,1
C14 B	17	126	148	23	56	13	90	21	155	55	34	328	23	506	44	14,3	3,3
C15 B	13	105	128	8	37	9	70	17	130	80	36	404	24	395	38	12,4	2,9
C16 B	12	100	121	11	37	8	67	18	113	91	36	415	28	419	67	12,8	3,5
C17 B	13	106	127	12	41	8	67	17	129	85	34	401	27	443	37	13	2,2
C18 B	14	101	128	8	39	8	73	16	135	88	38	431	27	451	39	13,8	2,2
C19 B	13	98	120	12	41	10	73	17	121	75	33	370	25	425	29	12,1	2,7
C20 B	18	144	179	19	60	19	91	25	187	54	39	360	24	575	27	15,9	3,7
C21 B	19	151	187	15	56	20	86	24	182	47	35	376	23	625	25	15,9	2,4
C22 B	13	115	146	11	41	11	75	19	140	72	35	398	28	444	31	15,2	3,3
C23 B	12	92	122	15	37	8	65	16	114	92	34	426	26	424	29	13,7	3,3
D01 B	13	101	133	13	55	17	85	18	126	62	34	364	22	441	66	13,4	1,9
D02 B	12	99	124	21	54	13	89	17	125	91	34	363	26	462	33	12,8	3,5
D03 B	13	98	118	19	47	11	96	17	131	131	30	343	31	479	44	11,4	2,7
D04 B	12	100	123	19	46	9	101	17	132	106	30	354	30	474	53	12,5	2
D05 B	13	99	111	20	47	11	105	17	137	97	33	388	28	489	106	12,9	3,5
D06 B	11	94	117	17	42	8	93	16	128	90	32	383	27	446	46	12,1	2,3
D07 B	13	98	123	13	51	7	88	16	135	83	34	383	27	464	39	13,1	2,8
D08 B	12	96	121	17	48	9	89	17	128	95	34	406	30	474	29	13,2	2,4
D09 B	11	89	113	14	45	8	84	15	124	96	34	415	28	466	33	13,9	2,8
D10 B	14	97	116	13	47	8	83	17	128	91	33	418	29	439	25	14,1	4,4
E01 B	12	98	134	17	55	14	87	16	118	51	31	358	20	420	27	12,6	2,4
E02 B	11	91	115	18	45	12	82	15	113	63	31	373	21	412	38	12,7	4,3
E03 B	10	86	109	15	39	11	71	15	104	66	30	384	21	376	93	11,9	3,1
E04 B	11	96	115	13	43	14	72	17	125	73	28	344	23	429	34	12,2	3,1
E05 B	11	86	106	16	39	11	76	15	128	106	30	423	34	462	31	14,5	2,6
E06 B	10	79	100	12	35	10	69	15	114	102	31	439	27	429	33	11,9	2,8
E07 B	8	79	103	16	36	10	69	13	114	110	32	449	30	439	25	13,1	2,3
E08 B	8	68	90	8	26	7	53	11	99	106	30	478	26	396	35	12	2,7
E09 B	10	83	102	14	34	12	65	14	111	88	33	490	28	427	26	13,2	3,1
E10 B	8	71	93	11	25	8	54	11	89	87	31	530	25	361	24	11,9	2,3
E11 B	16	121	147	24	71	23	90	20	154	46	39	299	21	509	25	15	2,6
E12 B	10	87	114	11	38	12	70	14	111	71	32	500	24	390	28	13,6	4,1
E13 B	10	76	118	10	32	10	57	13	101	74	32	510	23	385	87	12,7	3,7
E14 B	11	82	110	12	36	13	68	14	110	80	36	527	26	420	67	12,5	3,7
E15 B	8	71	97	13	27	9	53	11	97	88	33	536	26	388	27	13,2	3,4
E16 B	9	64	93	6	22	6	49	10	91	93	33	560	26	354	26	12,1	4,7
E17 B	11	90	104	15	40	15	71	14	113	83	33	464	28	409	28	14,1	3,1
E18 B	8	73	100	8	28	10	63	13	96	84	33	542	24	370	30	12,7	3,4

Probe	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U
	----- mg kg ⁻¹ -----																
F01 B	9	70	101	10	29	5	53	12	102	108	29	387	26	410	42	10,8	2,9
F02 B	7	70	93	12	23	6	54	13	105	112	31	408	28	421	27	11	2,7
F03 B	9	71	99	6	28	6	62	13	104	105	28	393	26	401	31	11,5	3,1
F04 B	10	88	105	13	39	13	71	14	123	104	29	421	30	439	38	13,5	2
F05 B	11	78	108	15	34	7	65	13	115	105	34	433	28	441	64	13	3,8
F06 B	7	73	101	13	37	10	61	12	105	85	30	423	23	397	42	11,6	4,4
F07 B	9	65	95	13	24	6	55	12	97	104	33	505	27	406	54	12,9	3,6
F08 B	10	74	103	15	31	10	62	13	104	91	31	456	27	408	58	12,7	2,6
F09 B	9	72	98	12	28	8	54	12	100	96	30	466	26	387	34	11,8	3,5
F10 B	11	80	106	12	37	10	58	12	100	77	29	409	23	383	48	12,2	3,3
F11 B	9	65	90	10	25	5	49	11	91	98	30	473	26	372	45	11,5	3,5
F12 B	8	65	90	13	25	6	49	11	87	100	31	496	27	376	33	12,3	4,3
F13 B	8	72	91	12	28	7	53	12	99	96	31	484	27	390	36	13,7	2,3
F14 B	10	70	98	10	27	7	55	12	103	96	30	492	28	390	50	12,5	3,9
F15 B	10	68	92	13	26	8	54	11	94	96	32	511	27	375	56	13,3	2,3
F16 B	8	61	90	11	23	6	50	12	92	99	33	529	26	376	50	13,2	3,3
F17 B	6	72	95	14	29	8	60	13	106	102	35	540	31	418	36	13,8	4
F18 B	11	74	108	19	31	7	65	12	112	93	34	504	30	424	42	14	2,8
Maximum	19	151	187	35	71	29	121	25	187	194	40	560	45	629	135	16,2	4,7
Minimum	6	61	90	6	22	5	49	10	87	40	28	269	18	354	19	10,8	1,7
Spanne	13	90	97	29	49	24	72	15	100	154	12	291	27	275	116	5,4	3
Mittelwert	12,3	96	122	15,4	43,6	11,4	77	16,2	126	85,9	33,2	402	26,2	454	38,8	13,3	3,04
Stabw.	2,8	18,9	19	4,4	11,7	4,2	15,6	3,2	22,6	28,9	2,6	70,4	4,4	59,4	16,9	1,2	0,7
VarK	0,23	0,20	0,16	0,29	0,27	0,37	0,20	0,20	0,18	0,34	0,08	0,17	0,17	0,13	0,43	0,09	0,22

Tabelle A 23: Leitprofile Transekt A, Spurenelementgehalte, pH-Wert sowie Textur

Probe-Nr./ Horizont	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U	pH	Gesamt			Bodenart Feinboden
																			Sand	Schluff %	Ton	
<u>Leitprofil A1</u>																						
A6 L	8	59	80	12	22	6	94	6	38	54	8	89	7	399	45	2,6	0,8					
A6 OF	8	76	103	10	20	8	126	8	35	46	10	123	7	457	160	2,2	0,9	6,44				
A6 Ah	8	90	122	11	20	12	65	13	54	41	19	220	12	440	220	7,6	1,9	3,91				
A6 Bv	10	98	135	13	41	10	83	15	113	59	36	416	21	450	23	13,4	2,6	3,79	28	49	23	Ls2
A6 II mCn	17	143	197	26	78	22	91	24	170	43	43	410	24	575	21	17,7	3	3,89	66	22	12	SI3
<u>Leitprofil A2</u>																						
A14 OF	9	79	99	20	23	4	85	9	58	53	15	182	12	492	98	5,8	1,8	6,41				
A14 Ah	11	100	117	15	35	9	72	15	115	61	28	343	21	415	118	11,7	2,3	4,11				
A14 Bv	14	105	120	23	49	14	87	17	139	65	35	372	24	484	33	14,8	2,5	3,75	21	56	23	Lu
A14 Bt	21	140	158	31	74	27	106	23	172	52	36	295	25	560	34	15,6	4,1	3,76	25	43	32	Lt2
A14 II Bt (-Sw)	22	177	211	17	84	32	109	30	233	65	48	349	26	628	37	17,8	3,4	4,11	45	29	26	Lts
<u>Leitprofil A3</u>																						
A21 L	9	62	99	13	20	4	90	6	38	52	8	88	7	398	41	2,9	1,6					
A21 OF	13	104	126	16	34	11	96	14	85	55	18	166	14	458	126	7,2	0,3	5,62				
A21 Ah	14	114	125	19	39	14	92	16	103	55	23	202	16	456	140	9,3	1,5	4,99				
A21 Bv	16	121	149	20	69	20	98	22	160	60	31	296	24	522	40	13,8	3	3,72	37	41	23	Ls2
A21 II ilCv	16	124	149	12	68	18	99	21	159	47	34	319	21	530	37	13,6	3,9	3,83				
A21 III imCn	17	143	197	26	78	22	91	24	170	43	43	410	24	575	21	17,7	3	3,87				
<u>Leitprofil A4</u>																						
A31 OF	11	87	98	12	25	1	81	9	63	39	14	141	9	377	82	4,9	1,6	5,31				
A31 Ah	12	105	122	18	34	12	79	17	116	48	28	266	18	388	290	11,3	2,9	4,31				
A31 Bv	13	101	128	16	54	13	89	18	130	52	34	333	21	432	35	12,2	3,8	3,76	21	56	24	Lu
A31 Cv	16	124	149	12	68	18	99	21	159	47	34	319	21	530	37	13,6	3,9	3,83	43	37	20	Ls3

Tabelle A 24: Leitprofile Transekt B, Spurenelementgehalte, pH-Wert sowie Textur

Probe-Nr./ Horizont	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U	pH	Gesamt			Bodenart Feinboden
																			Sand	Schluff %	Ton	
<u>Leitprofil B1</u>																						
B01 OF	8	54	71	15	14	1	84	6	27	44	6	70	7	444	40	3,2	1					
B01 Ah	12	104	127	18	40	11	79	17	126	59	31	316	19	425	103	11,2	2,3	5,11				
B01 Bv	13	108	128	13	47	11	76	16	135	60	32	344	20	438	22	13,3	2,4	3,73	24	54	22	Lu
B01 II Cv	20	138	176	28	73	22	92	24	178	49	32	266	21	535	16	14,6	2,3	3,68	46	35	20	Ls3
<u>Leitprofil B2</u>																						
B2 L	7	53	73	18	18	2	81	7	33	38	12	88	5	383	43	3,7	1,2					
B2 OF	10	75	93	8	25	-1	77	9	59	54	14	158	11	406	58	5,4	0,8					
B2 Ah	8	95	110	11	32	9	70	16	117	88	29	376	25	452	111	11,7	2,5	4,47				
B2 Bv	12	94	115	15	42	8	74	15	128	98	34	432	30	481	27	12,4	3,5	3,71	14	64	21	Lu
B2 II Cv	18	128	159	26	74	23	96	22	163	55	37	371	25	572	26	15,6	3,6	3,63	39	43	18	Ls2
<u>Leitprofil B3</u>																						
B3 L	10	53	77	14	23	4	73	5	28	51	8	82	6	386	39	2,9	0,9					
B3 OF	11	87	98	12	25	1	81	9	63	39	14	141	9	377	82	4,9	1,6					
B3 Ah	8	89	101	12	25	13	68	14	101	84	24	316	21	405	164	8,8	2,5	3,64				
B3 Bv	11	87	114	14	38	8	68	15	127	116	35	451	32	494	19	13,8	3,6	3,83	16	62	22	Lu
B3 II Cv	23	159	199	26	83	29	99	27	201	53	39	318	26	663	16	16,3	3,5	3,73	45	34	21	Ls3

Tabelle A 25: Leitprofile Transekt C, Spurenelementgehalte, pH-Wert sowie Textur

Probe-Nr./ Horizont	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U	pH	Gesamt			Bodenart Feinboden
	----- mg kg ⁻¹ -----																	Sand	Schluff	Ton		
																		----	%	----		
<u>Leitprofil C1</u>																						
C11 L	6	45	70	8	12	-6	64	4	28	49	7	77	5	364	25	2,5	1,1					
C11 OF	7	68	84	12	15	-4	79	6	42	57	11	118	7	408	57	3,9	1,1	5,69				
C11 Ah	11	100	126	6	22	4	56	15	101	60	29	323	19	332	136	8,9	3,2	4,12				
C11 Bv	16	120	151	92	56	14	80	20	150	44	29	290	18	473	59	12,1	2,3	3,74	44	32	23	Ls3
C11 IImCn	21	144	208	16	67	15	91	23	173	39	40	454	24	476	49	16,6	4,2	3,58	67	23	10	SI3

Tabelle A 26: Leitprofile Transekt D, Spurenelementgehalte, pH-Wert sowie Textur

Probe-Nr./ Horizont	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U	pH	Gesamt			Bodenart Feinboden
																			Sand	Schluff %	Ton	
<u>Leitprofil D1</u>																						
D1 OF	10	76	72	17	21	1	74	6	47	43	12	101	10	414	86	3,2	1,7	4,07				
D1 Ah	13	109	129	16	41	11	92	17	120	84	27	276	23	448	123	9,7	2,7	3,69				
D1 Bv	11	111	137	21	53	12	110	19	146	93	31	323	28	477	55	12,2	2,8	3,95	18	58	23	Lu
D1 Bv-Sw	18	125	150	19	62	18	113	23	155	49	29	282	25	451	56	13,6	3,7	3,75	22	53	26	Lu
D1 II Bt-Sw	15	118	159	12	38	9	73	19	136	34	31	310	21	376	31	14,1	3,6	4,01	17	61	22	Lu
D1 II Bt-Sd	14	108	159	24	69	14	93	19	124	34	30	334	19	355	32	13	2,3	3,93	34	52	14	Uls
D1 III Sd	15	115	181	18	74	12	73	20	130	33	32	345	22	358	39	13,8	2,1	4,34	32	51	16	Uls
<u>Leitprofil D2</u>																						
D2 OF	10	75	93	8	25	-1	77	9	59	54	14	158	11	406	58	5,4	0,8	4,78				
D2 Ah	9	101	121	14	40	8	88	15	109	66	27	293	20	426	102	10	3	4,25				
D2 Bv I	13	100	131	18	52	7	91	17	133	69	33	348	26	430	31	12,5	2,2	3,96	15	65	20	Ut4
D2 Bv II	14	105	136	18	59	10	96	19	140	73	33	362	27	469	25	13,1	3,1	4,01	14	61	24	Lu
D2 ilCv-Sw	17	129	173	21	77	22	106	22	156	38	33	290	23	452	27	12	1	4,42	31	51	19	Lu
D2 II Sd-imCv	22	154	178	19	84	34	116	29	215	43	38	235	22	589	16	16,8	3,2	4,08	51	32	17	SI4
<u>Leitprofil D3</u>																						
D3 L	10	62	83	13	18	4	71	4	47	52	12	93	4	398	32	2,9	1,6	6,54				
D3 Ah	14	98	116	15	41	8	81	14	103	72	25	298	21	420	82	11	1,7	6,52				
D3 Al	12	96	123	17	49	9	87	16	129	82	31	369	27	467	25	12,5	2,2	3,94	14	66	20	Ut4
D3 II Bt	12	101	123	18	52	10	85	17	131	88	32	418	30	487	24	14	3,5	3,91	13	62	24	Lu
D3 II sSw-Bt	15	106	133	20	57	18	91	18	136	77	32	398	28	485	23	14,7	3,1	3,92	19	56	25	Lu
D3 II Sd-imCv	18	133	169	19	54	29	76	23	169	59	36	318	22	476	19	14,8	3,5	4,12	28	49	23	Ls2

Tabelle A27: Hauptkomponentenladungen

Spurenelement	Hauptkomponente 1	Hauptkomponente 2	Hauptkomponente 3
Sc	0,914718	0,122162	0,134991
V	0,963733	0,087047	0,110373
Cr	0,800031	0,382102	0,292047
Co	0,730711	-0,129580	-0,155038
Ni	0,951502	0,067323	-0,012352
Cu	0,840901	0,185078	-0,116529
Zn	0,907743	-0,070242	-0,072640
Ga	0,968424	0,009788	0,080928
Rb	0,958086	-0,140983	0,081906
Sr	-0,126395	-0,957613	-0,115662
Y	0,183842	0,339643	0,770040
Zr	-0,874318	-0,043983	0,263786
Nb	0,058166	-0,955331	0,015822
Ba	0,779369	-0,524399	0,160035
Pb	0,122763	0,323319	-0,653491

Tabelle A28: Tiefenverteilung Spurenelemente

Probe-Nr./ Horizont	Spurenelement			
	Cr	Zr	Nb	Pb
<u>L-Horizont</u>				
A06 L	80	89	7	45
A21 L	99	88	7	41
B02 L	73	88	5	43
B03 L	77	82	6	39
C11 L	70	77	5	25
D03 L	73	93	4	32
Mittelwert	78,67	86,17	5,67	37,50
Stabw.	10,56	5,71	1,21	7,58
<u>O-Horizont</u>				
A06 Of	103	123	7	160
A14 Of	99	182	12	98
A21 Of	126	166	14	126
A31 Of	98	141	9	82
B01 Of	71	70	7	40
B02 Of	93	158	11	58
B03 Of	98	141	9	82
C11 Of	84	118	7	57
D01 Of	72	101	10	86
D02 Of	93	158	11	40
Mittelwert	93,70	135,80	9,70	82,90
Stabw.	15,90	33,51	2,36	38,02
<u>A-Horizont</u>				
A06 Ah	122	220	12	220
A14 Ah	117	343	21	118
A21 Ah	125	202	16	140
A31 Ah	122	266	18	290
B01 Ah	127	316	19	103
B02 Ah	110	376	25	111
B03 Ah	101	316	21	164
C11 Ah	126	323	19	136
D01 Ah	129	276	23	102
D02 Ah	121	293	20	123
D03 Ah	116	298	21	82
Mittelwert	119,64	293,55	19,55	144,45
Stabw.	8,27	50,99	3,47	60,88

Probe-Nr./ Horizont	Spurenelement			
	Cr	Zr	Nb	Pb
<u>B-Horizont</u> (Einzelwerte siehe Tab. A22)				
Mittelwert	122	400	26	38,77
Stabw.	19,38	70,58	4,44	16,87
<u>Cv</u>				
A31 Cv	149	319	21	37
B01 Cv	176	266	21	16
B02 Cv	159	371	25	26
B03 Cv	199	318	26	16
D02 II Cv-Sw	173	290	23	27
D02 II Sd-imCv	178	235	22	16
D03 II Sd-imCv	169	318	22	19
Mittelwert	171,86	302,43	22,86	22,43
Stabw.	15,75	43,76	1,95	7,98
<u>mCn</u>				
A06 C (1. Probe)	197	310	24	21
A06 C (2. Probe)	144	269	16	16
B17 C	161	276	20	14
C05 C	208	265	13	25
Mittelwert	177,50	280,00	18,25	19,00
Stabw.	30,03	20,51	4,79	4,97

Tabelle A29: $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -Isotopenverhältnisse aller untersuchter B-Horizonte (n=46)

Probe-Nr./ Horizont	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$- Verhältnis
A03 B	1,2288
A05 B	1,1875
A06 B	1,1936
A07 B	1,2031
A08 B	1,2037
A11 B	1,1915
A13 B	1,2167
A15 B	1,1859
A20 B	1,1986
A22 B	1,2020
A23 B	1,1977
A26 B	1,2031
A27 B	1,1920
A28 B	1,1801
A29 B	1,1915
A31 B	1,1929
B04 B	1,1823
B09 B	1,2246
B10 B	1,1801
B20 B	1,1936
C02 B	1,1993
C03 B	1,1841
C04 B	1,1807
C07 B	1,1727
C11 B	1,1917
C14 B	1,1991
C16 B	1,1876
D01 B	1,1698
D02 B	1,2120
D04 B	1,1936
D05 B	1,1856
D06 B	1,1941
E01 B	1,1843
E03 B	1,1817
E04 B	1,1982
E06 B	1,2249
E08 B	1,1858
E09 B	1,2200
E12 B	1,2187
E13 B	1,1829
E15 B	1,2163
F01 B	1,2076
F05 B	1,1904
F08 B	1,1858
F09 B	1,2164
F11 B	1,2308
F15 B	1,1915
Mittelwert	1,1969
Stabw.	0,0150

Tabelle A30: Präzision der ICP-MS-Wiederholungsmessungen ausgewählter Proben

Probe	1.Messung	2.Messung	Mittelwert	Stdfehler	rel. Stdfehler
A21 Of	1,1426	1,1495	1,1461	0,0035	0,31%
D02 Of	1,1501	1,1413	1,1457	0,0044	0,38%
C11 Ah	1,1453	1,1307	1,1380	0,0073	0,64%
A22 B	1,2020	1,2057	1,2039	0,0019	0,16%
A29 B	1,1915	1,1874	1,1895	0,0020	0,17%
C04 B	1,1807	1,1847	1,1827	0,0020	0,17%
D05 B	1,1871	1,1924	1,1898	0,0027	0,23%
C11C	1,2229	1,2313	1,2271	0,0042	0,34%

Tabelle A31: Präzision der Wiederholungsmessungen der Referenz-Probe A06 mCn

MESSUNG-	Probe:	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U
Nr.:	A6C	----- mg kg ⁻¹ -----																
1		12	102	144	18	63	15	71	17	111	35	27	269	16	383	16	11,3	3,5
2		11	122	125	19	56	14	69	19	119	27	28	263	18	359	14	10,1	2,5
3		9	124	188	16	67	15	81	23	133	39	40	254	24	416	18	16,6	4,2
4		15	115	171	18	74	12	73	20	130	33	32	345	22	358	19	13,8	2,1
Mittelwert		11,7	116	157	17,7	65	14	73,5	19,7	123	33,5	31,7	283	20	379	16,7	12,9	3,1
Stabw.		2,5	9,9	28	1,3	7,5	1,4	5,3	2,5	10,1	5,00	5,9	42	3,6	27,2	2,2	2,9	0,9

Tabelle A32: Beitrag der Substratkomponenten berechnet mittels Drei-Komponenten-Mischungsmodell für Untersuchungsgebiet 1 (Transekt A-D); lokaler Lössstandard von Untersuchungsgebiet 1 verwendet (*Werte sind rechnerisch negativ [Berechnung mit 8 Nachkommastellen])

Proben-Nr.	Zr/Cr-Verhältnis	Nb/Cr-Verhältnis	Beitrag [%]		
			Tonschiefer	Löss	LST
A01B	2,79	0,16	71%	23%	6%
A02B	3,09	0,15	69%	32%	0%*
A03B	3,67	0,16	55%	46%	0%*
A04B	2,92	0,14	73%	28%	0%*
A05B	2,69	0,14	78%	22%	0%
A06B	3,08	0,16	67%	31%	2%
A07B	3,42	0,16	60%	40%	0%
A08B	4,80	0,23	17%	69%	14%
A09B	3,68	0,18	49%	44%	7%
A10B	3,45	0,16	58%	40%	2%
A11B	3,78	0,18	47%	47%	6%
A12B	3,57	0,18	52%	42%	6%
A13B	3,73	0,19	46%	45%	9%
A14B	2,08	0,15	85%	5%	10%
A15B	2,57	0,19	68%	14%	18%
A16B	2,46	0,25	54%	5%	41%
A17B	3,16	0,41	3%	9%	88%
A18B	2,61	0,28	44%	7%	49%
A19B	2,58	0,25	52%	9%	39%
A20B	2,18	0,18	78%	5%	17%
A21B	1,99	0,16	85%	1%	14%
A22B	1,96	0,20	77%	0%*	26%
A23B	2,41	0,29	46%	1%	53%
A24B	2,54	0,30	40%	3%	57%
A25B	2,45	0,27	50%	3%	47%
A26B	2,36	0,23	62%	5%	33%
A27B	2,60	0,23	56%	11%	33%
A28B	2,18	0,17	81%	6%	13%
A29B	2,24	0,16	81%	8%	11%
A30B	2,34	0,16	79%	11%	10%
A31B	2,60	0,16	73%	17%	10%
B01B	3,53	0,19	51%	40%	9%
B02B	3,19	0,18	58%	31%	11%
B03B	3,60	0,21	45%	40%	15%
B04B	3,65	0,18	51%	44%	5%
B05B	3,95	0,20	41%	50%	9%
B06B	3,44	0,20	50%	36%	14%
B07B	3,18	0,20	54%	30%	16%
B08B	2,98	0,17	65%	27%	8%
B09B	2,69	0,17	70%	19%	11%
B10B	2,15	0,15	84%	6%	10%
B11B	3,52	0,23	41%	36%	23%
B12B	3,94	0,26	25%	44%	31%
B13B	3,82	0,28	24%	39%	37%

B14B	3,51	0,26	33%	33%	34%
B15B	3,62	0,27	29%	34%	37%
B16B	2,99	0,22	52%	22%	26%
B17B	3,96	0,28	20%	42%	38%
B18B	3,29	0,26	36%	26%	38%
B19B	4,86	0,38	0%*	57%	64%
B20B	3,52	0,28	29%	31%	40%
C01B	3,49	0,20	48%	37%	15%
C02B	3,12	0,18	60%	29%	11%
C03B	2,46	0,16	77%	14%	9%
C04B	2,33	0,15	81%	11%	8%
C05B	2,08	0,15	87%	5%	8%
C06B	2,35	0,15	80%	12%	8%
C07B	2,38	0,21	65%	7%	28%
C08B	2,51	0,24	57%	8%	35%
C09B	2,18	0,22	68%	1%	31%
C10B	1,99	0,19	78%	0%*	23%
C11B	1,92	0,12	97%	4%	0%*
C12B	1,84	0,13	95%	0%	5%
C13B	2,37	0,18	74%	10%	16%
C14B	2,22	0,16	82%	8%	10%
C15B	3,16	0,19	58%	30%	12%
C16B	3,43	0,23	42%	33%	25%
C17B	3,16	0,21	51%	28%	21%
C18B	3,37	0,21	48%	33%	19%
C19B	3,08	0,21	54%	26%	20%
C20B	2,01	0,13	91%	5%	4%
C21B	2,01	0,12	94%	6%	0%
C22B	2,73	0,19	64%	18%	18%
C23B	3,49	0,21	45%	36%	19%
D01B	2,74	0,17	71%	21%	8%
D02B	2,93	0,21	56%	22%	22%
D03B	2,91	0,26	44%	16%	40%
D04B	2,88	0,24	49%	17%	34%
D05B	3,50	0,25	35%	33%	32%
D06B	3,27	0,23	45%	29%	26%
D07B	3,11	0,22	50%	26%	24%
D08B	3,36	0,25	39%	30%	31%
D09B	3,67	0,25	33%	38%	29%
D10B	3,60	0,25	34%	36%	30%
Maximum	4,86	0,41	97%	69%	88%
Minimum	1,84	0,12	0 %	0%	0%
Spanne	3,02	0,29	118%	72%	89%
Mittelwert	2,96	0,21	56%	23%	20%
Stabw.	0,66	0,05	21%	16%	16%
<u>Lokaler Standard:</u>					
Tonschiefer	1,79	0,12			
Löss	5,88	0,21			
LST	2,91	0,44			

Tabelle A33: Beitrag der Substratkomponenten berechnet mittels Drei-Komponenten-Mischungsmodell für Untersuchungsgebiet 2 (Transekt E-F); lokaler Lössstandard von Untersuchungsgebiet 2 verwendet (*Werte sind rechnerisch negativ)

Proben-Nr.	Zr/Cr-Verhältnis	Nb/Cr-Verhältnis	Beitrag [%]		
			Tonschiefer	Löss	LST
E01B	2,67	0,15	81%	20%	0%*
E02B	3,24	0,18	65%	30%	5%
E03B	3,52	0,19	59%	36%	5%
E04B	2,99	0,20	64%	23%	13%
E05B	3,99	0,32	19%	36%	45%
E06B	4,39	0,27	27%	49%	24%
E07B	4,36	0,29	22%	47%	31%
E08B	5,31	0,29	11%	69%	20%
E09B	4,80	0,27	21%	59%	20%
E10B	5,70	0,27	12%	80%	8%
E11B	2,03	0,14	91%	6%	3%
E12B	4,39	0,21	44%	55%	1%
E13B	4,32	0,19	49%	54%	0%*
E14B	4,79	0,24	32%	62%	6%
E15B	5,53	0,27	14%	76%	10%
E16B	6,02	0,28	5%	87%	8%
E17B	4,46	0,27	27%	51%	22%
E18B	5,42	0,24	23%	76%	1%
F01B	3,83	0,26	38%	38%	24%
F02B	4,39	0,30	19%	47%	34%
F03B	3,97	0,26	35%	40%	25%
F04B	4,01	0,29	28%	39%	33%
F05B	4,01	0,26	35%	42%	23%
F06B	4,19	0,23	41%	48%	11%
F07B	5,32	0,28	12%	70%	18%
F08B	4,43	0,26	29%	51%	20%
F09B	4,76	0,27	24%	58%	18%
F10B	3,86	0,22	48%	42%	10%
F11B	5,26	0,29	12%	68%	20%
F12B	5,51	0,30	6%	73%	21%
F13B	5,32	0,30	9%	69%	22%
F14B	5,02	0,29	15%	63%	22%
F15B	5,55	0,29	7%	74%	19%
F16B	5,88	0,29	4%	82%	14%
F17B	5,68	0,33	0%*	75%	29%
F18B	4,67	0,28	22%	55%	23%
Maximum	6,02	0,33	91%	87%	45%
Minimum	2,03	0,14	0 %	6%	0 %
Spanne	3,99	0,18	95%	81%	49%
Mittelwert	4,54	0,26	29%	54%	17%
Stabw.	0,93	0,05	22%	19%	11%
<u>Lokaler Standard:</u>					
Tonschiefer	1,79	0,12			
Löss	6,61	0,27			
LST	2,91	0,44			

Tabelle A34: Beitrag des anthropogenen Pb zum Gesamt-Pb im Mineralbodenhorizont

Probe-Nr./ Horizont	²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb- Verhältnis	Beitrag anthr. Pb zu Gesamt-Pb /%
O-Horizont		
A06 Of	1,1448	90,62
A14 Of	1,1524	82,87
A21 Of	1,1426	92,78
A31 Of	1,1548	80,44
C11 Of	1,1524	82,85
D01 Of	1,1355	poll 100,00
D02 Of	1,1501	85,16
Mittelwert	1,1475	87,81
Stabw.	0,0069	6,97
Spanne	1,1355 - 1,1548	80,44 - 100
A-Horizont		
A06 Ah	1,1575	77,70
A31 Ah	1,1356	99,90
C11 Ah	1,1453	90,05
GruD1 Ah	1,1508	84,50
Mittelwert Ah	1,1473	88,0374
Stabw.	0,0093	9,3839
Spanne	1,1356 - 1,1575	77,70 - 99,90
B-Horizont		
A03 B	1,2288	5,57
A08 B	1,2037	30,97
A13 B	1,2167	17,81
B09 B	1,2246	9,82
D02 B	1,2120	22,57
E06 B	1,2249	9,51
E09 B	1,2200	14,47
E12 B	1,2187	15,79
E15 B	1,2163	18,22
F09 B	1,2164	18,11
F11 B	1,2308	3,54
Mittelwert B	1,2194	15,12
Stabw.	0,0078	7,86
Spanne	1,2037 - 1,2308	3,54 - 30,97
Massiver Tonschiefer		
A06 Cn	1,2219	
B17 Cn	1,2351	
C11 Cn	1,2229	
Mittelwert TS	1,2266	
Stabw.	0,0074	
Löss		
Löss 1	1,2335	
Löss 2	1,2173	
Löss 3	1,2219	
Mittelwert Löss	1,2242	
Stabw.	0,0083	
Hintergrund-Wert	1,2343	HG

