

Thomas SCHOLTEN, Giessen
Thorsten BEHRENS, Giessen

GIS-gestützte Modellierung der räumlichen Verbreitung und Ausprägung periglaziärer Lagen in Mittelgebirgsregionen¹

Summary

Pleistocene periglacial slope deposits of mid-altitude mountain ranges show a systematic spatial distribution. The distribution and properties of the periglacial cover-beds are highly correlated to relief position and characteristics of the underlying bed rock. The evaluation and processing of digital elevation models and geological maps thus allows for GIS-supported modelling of spatial distribution and properties of Pleistocene periglacial slope deposits.

To derive algorithms that describe this correlation in a statistically significant way, thickness and substrate-specific properties of periglacial cover-beds from the Osthartz and the Solling area were collected from 678 soil-profiles and related to geomorphometric relief-parameters and petrographic parameters of the underlying bed-rock. The derived relations and combination rules permit most precise predictions of the distribution-systematics, thickness, soil-texture and stoniness of Pleistocene periglacial slope deposits. Calculations of this relief-geology-model exhibited derivations of ± 10 cm for mean total thicknesses of 121 cm in the Osthartz and 117 cm in the Solling, respectively. Predictions of soil-texture and stoniness of the multi-layered cover-beds deviated from the measured values by 7 to 26% and 19% to 28% for the Osthartz and the Solling, respectively.

¹ Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des SFB 299 „Landnutzungskonzepte für periphere Regionen“. Ferner danken wir dem Geologischen Landesamt Sachsen-Anhalt, Herrn Dr. Altermann, dem Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung und dem Niedersächsischen Forstplanungsamt für die hervorragende Kooperation und Bereitstellung von Daten.

1 Einleitung

In den deutschen Mittelgebirgen wird das anstehende Gestein durch periglaziäre Lagen unterschiedlicher Zusammensetzung und Mächtigkeit überlagert. Diese während des Pleistozäns abgelagerten und überprägten Lockergesteinsdecken werden üblicherweise als „periglaziale Deckschichten“, oder, nach der aktuellen amtlichen bodenkundlichen Kartieranleitung; AG BODEN 1994) und der Neufassung der Systematik der Böden und bodenbildenden Substrate Deutschlands (AG BODENSYSTEMATIK 1998), als „periglaziäre Lagen“ bezeichnet. Innerhalb der periglaziären Lagen finden im Wesentlichen alle Prozesse der Stoffakkumulation, Stoffumwandlung und Stoffverlagerung statt. Gleiches gilt in Mittelgebirgsregionen für viele wichtige ökologische und standortkundliche Eigenschaften des Hauptwurzelraums, für das Sickerwasser sowie die raum-zeitliche Dynamik des Landschaftswasser- und -stoffhaushalts (u.a. ROHDENBURG 1968; BIBUS 1986; FRÜHAUF 1988; ALTERMANN u. STEININGER 1995; KÖSEL 1996; KLEBER u. SCHELLENBERGER 1998; SCHOLTEN et al. 1999). Aufgrund dieser Zusammenhänge ist die Kenntnis über den Aufbau und die Eigenschaften periglaziärer Lagen sowie deren räumliche Verbreitung eine notwendige Voraussetzung für die Beschreibung des Landschaftshaushalts und die Beurteilung seines Leistungsvermögens in den Mittelgebirgen des pleistozänen Periglazialraums.

Durch geographische, geologische und bodenkundliche Forschungen in den letzten Jahrzehnten bestehen heute ausreichende Kenntnisse über den generellen Aufbau, die Gliederung, die Genese und die Zusammensetzung der periglaziärer Lagen in den deutschen Mittelgebirgen. Zudem wird von der Mehrzahl der im Bereich der periglaziären Lagen forschenden Autoren immer wieder der Einfluss des Reliefs auf die Verbreitung periglaziärer Lagen bekundet. Neben diesem Einflussfaktor weisen eine große Zahl der Untersuchungen (u.a. SCHILLING u. WIEFEL 1962; SEMMEL 1968; SCHWANNECKE 1970; ALTERMANN u. RABITZSCH 1976; ALTERMANN et al. 1988) auf eine signifikante Wirkung der Gesteinstypen auf die Mächtigkeit von periglaziären Lagen, deren Eigenschaften und untergeordnet auch deren Verbreitung hin. Im Mittelpunkt der Betrachtung standen allerdings die stratigraphische Untergliederung, die Eigenschaften und die Genese der periglaziären Lagen sowie deren zeitliche Einordnung. Eine flächendeckende Ableitung der Verbreitungssystematik im Landschaftsmaßstab liegt bisher jedoch nicht vor.

Entsprechend ist es das Ziel dieser Untersuchung, anhand statistischer Analysen eine Verknüpfung punktuell erhobener Bodenprofil Datensätze mit Flächendatensätzen des Reliefs und des Ausgangsgesteins herzustellen und daraus ein GIS-gestütztes Modell zur flächendeckenden Vorhersage der

räumlichen Verbreitung und Ausprägung periglaziärer Lagen in Mittelgebirgsregionen zu entwickeln.

2 Material, Methoden und Methodenentwicklung

Der flächendeckenden Ableitung der Verbreitungssystematik und der Eigenschaften periglaziärer Lagen liegen Auswertungsalgorithmen zugrunde, die zum einen auf Informationen zu den Mächtigkeiten und Eigenschaften der periglaziären Lagen basieren, die anhand von Verknüpfungsregeln aus den Tabellen der Bodenprofilaufnahmen entwickelt wurden, und die zum anderen auf Flächendaten zum Relief und zum Gestein fußen, die in einem Geographischen Informationssystem digital vorliegen. Diese drei unterschiedlichen Datenbasen (Tab. 1) wurden für die Arbeitsgebiete „Ostharz“ und „Solling“ aufgebaut und bilden die räumliche Grundlage der Modellentwicklung.

Datengrundlage	Arbeitsgebiete	
	<i>Solling</i>	<i>Ostharz</i>
Bodenprofil Datensätze	195 Datensätze (eigene Kartierung an Profilen der forstl. Standortkartierung)	483 Datensätze (ALTERMANN, 1998a, b; GLA Sachsen-Anhalt)
Digitales Höhenmodell	DHM im 12,5 m-Raster (LVA Niedersachsen)	DHM im 10 m-Raster (LVA Sachsen-Anhalt)
Geologische Karten	14 Blätter 1:25.000 (NLFb)	17 Blätter 1:25.000 (eigene Arbeitsgruppe)

Tab. 1: Verwendete Datengrundlagen zur flächendeckenden Ableitung der Verbreitungssystematik und der Eigenschaften periglaziärer Lagen

(GLA: Geologisches Landesamt, DHM: digitales Höhenmodell, LVA: Landesvermessungsamt, NLFb: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung)

Das Arbeitsgebiet „Ostharz“ umfasst eine Fläche von 1218 km² mit Höhenlagen von 173 bis 1142 m NN und deckt damit den gesamten Bereich des Mittel- und Unterharzes sowie den östlichen Teil des Oberharzes ab. Das Arbeitsgebiet „Solling“ erstreckt sich über eine Fläche von 614 km² bei einer Höhendifferenz von 70 m NN am Ostrand des Wesertals bis 530 m NN im Bereich der Großen Blöße und deckt damit annähernd den gesamten nördlichen Bereich des Sollinggewölbes etwa in den Grenzen des Naturparks Solling/Vogler ab.

Die im Folgenden verwendeten lithostratigraphischen Lagenbezeichnungen und die damit verbundenen Inhalte beruhen auf der Nomenklatur der aktuellen Lagensystematik der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (AG BODEN 1994; AG BODENSYSTEMATIK 1998).

Die Ausweisung von Schichtgrenzen sowie die Ansprache und lithostratigraphische Differenzierung der periglaziären Lagen erfolgte im Gelände anhand diagnostischer Schichtungs- und Verlagerungsmerkmale, z.B. deutlich erkennbare linienhafte Substratwechsel, oberflächenparallele Einreglung länglicher Gesteinsbruchstücke und Gesteinsanreicherungen an der Schichtbasis (SCHOLTEN 2001). Zur Überprüfung und Absicherung der feldbodenkundlich-geomorphologischen Lagendiagnose wurden Laboranalysen herangezogen. Als bodenanalytische Parameter zur Lagendifferenzierung dienen die Korngrößenverteilung, der Skelettgehalt (Grobbodengehalt > 2 mm), die Bodenfarbe nach Munsell, die Schwermineralverteilung sowie die abgeleiteten Größen „Feinbodenquotient“ (ALAILLY 1984) und „Schluffquotient“ (GEHRT 1994). Die Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung erfolgte nach SCHLICHTING et al. (1995). Der Skelettgehalt der Lagen und Horizonte der Bodenprofile wurde im Gelände nach den Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994) geschätzt.

Die Klassifikation der Gesteinkomplexe zu petrographischen Einheiten generiert aus den aggregierten stratigraphischen Digitalisierereinheiten der Geologischen Karten 1:25.000 Informationen zum Bodenausgangsgestein, die geeignet sind, substratspezifische Eigenschaften der periglaziären Lagen zu erklären (SCHOLTEN 2001). Dabei wird auf der obersten Ebene des Klassifikationsansatzes zunächst nach der Art des Bodenausgangsgesteins und nach den zu erwartenden Verwitterungsprodukten des Bodenausgangsgesteins unterschieden. Als Ergebnis der Klassifizierung erhält man Aussagen zur Verwitterungsbeständigkeit des Bodenausgangsgesteins, zum Skelettgehalt sowie zur vorherrschenden Kornfraktion der Verwitterungsprodukte des Bodenausgangsgesteins.

Die zur geomorphometrischen Reliefanalyse verwendeten im Folgenden aufgeführten lokalen, regionalen und komplexen Reliefparameter (BEHRENS 2002) basieren auf den Daten der jeweiligen digitalen Höhenmodelle (Tab. 1). Die Reliefparameter weisen einen signifikanten Zusammenhang zu den Eigenschaften der periglaziären Lagen in den Arbeitsgebieten auf (SCHOLTEN 2001). Die Hangneigung wurde nach dem Verfahren von ZEVENBERGEN und THORNE (1987) und die Exposition nach HORN (1981) berechnet. Die Krümmung der Geländeoberfläche wird durch den Oberflächenindex nach MCNAB (1989; ENANDER 1998) beschrieben. Bei der relativen Profilkrümmung nach BEHRENS (2002) wird die Krümmung dagegen unabhängig von der Neigungsstärke dargestellt. Der Topographische Feuchtigkeitsindex

wurde nach BEVEN und KIRKBY (1979) berechnet. Die in diesem Parameter integrierte Berechnung der Fließakkumulation mit Abflussdivergenz erfolgte nach DIETRICH und MONTGOMERY (1998). Ausgehend von einer Tiefenlinie im Relief wurde als weiterer kombinierter geomorphometrischer Reliefparameter die relative Höhenlage der seitlich der Tiefenlinien ansteigenden Hänge verwendet (u.a. FRIEDRICH 1996; BEHRENS 2002).

Anschließend wurden die erzeugten kontinuierlichen geomorphometrischen Kenngrößen klassifiziert, sodass diskrete Reliefeinheiten wie z.B. Akkumulationsbereiche am Unterhang und Expositions- und Hangneigungstypen ausgewiesen werden können. Die Klassifizierung der Parameter erfolgte anhand der Standardabweichung, berechnet für die Grundgesamtheit aller Rasterzellen bzw. Hochpunkte der digitalen Höhenmodelle der Arbeitsgebiete „Ostharz“ und „Solling“. Ausgehend vom arithmetischen Mittel wurden die Klassengrenzen in beide Richtungen im Abstand von einem Viertel der Standardabweichung gesetzt. Die Neigungsrichtung wurde in Anlehnung an die bodenkundliche Kartieranleitung (AG BODEN 1994) nach der Ausrichtung der Sonn- und der Schattseite in vier äquidistante Klassen unterteilt.

3 Ergebnisse und Interpretation

3.1 Ausweisung von Schichtgrenzen und Lagengliederung

Wie in Kap. 2 ausgeführt, erfolgte die Ausweisung der Schichtgrenzen im Bodenprofil sowie die Ansprache der periglaziären Lagen im Gelände anhand diagnostischer Merkmale, die anschließend durch Laboranalysen verifiziert wurden.

Die Abgrenzung der Basislage von den im Hangenden folgenden Mittel- bzw. Hauptlagen ist in Sandsteingebieten in der Regel eindeutig. Das Fehlen der Lösskomponente in der Basislage bewirkt im Normalfall einen markanten Substratunterschied zwischen der sandigen Matrix der Basislage und der schluffbetonten Bodenart der Mittel- bzw. Hauptlage (Tab. 2, Profile 3M1, 88M2J2 und 9A1). Auf feinkristallinen Magmatiten, die durch Kryoklastik in der Regel nicht in plattige Quader zerfallen und deren Verwitterungsprodukte eine lehmige Bodenart aufweisen, dienen die Tongehaltsdifferenzen zwischen Basis- und Mittel- bzw. Hauptlage und der Schluffquotient als Differenzierungsmerkmal.

Die Unterscheidung zwischen Haupt- und Mittellage ist aufgrund der in beiden Lagen dominierenden Lösskomponente allein anhand der Fingerprobe im Gelände nicht immer eindeutig. Anhand der Ergebnisse zur Korngrößenverteilung kann die unterschiedliche räumliche und zeitliche Herkunft der Lösses allerdings in der Regel am Feinbodenquotienten abgelesen

Profil-Nr., Gestein, Relief	Ton	Schluff	Sand	Skelett	FQ ¹⁾	UQ ²⁾	PL	Tiefe cm
	<i>Masse-%</i>							
54M2J2 *u, Rücken	11,9	38,2	50,0	2	1,9	5,8	LH 1	0-20
	12,5	41,7	45,8	40	2,4	4,5	LH 2	20-70
	15,5	14,5	70,0	60	0,4	2,6	LB 1	70-115
	10,1	31,5	58,4	45	1,2	4,5	LB 2	115-140
3M1 *fs, Mittelhang	13,3	81,8	4,9	0	35,7	8,5	LH 1	0-21
	13,0	83,1	3,9	1	41,3	10,2	LH 2	21-50
	9,6	81,1	9,4	1	14,4	15,9	LM	50-80
	8,5	13,1	78,3	60	0,2	1,4	LB	80-100
40M1 *fs, Plateau	13,8	68,6	17,7	1	9,8	3,0	LH 1	0-17
	11,9	73,9	14,5	2	12,0	3,6	LH 2	17-58
	20,5	68,0	11,5	1	12,5	9,3	LM	58-90
	18,6	26,7	54,7	1	1,0	1,6	LB	90-123
88M2J2 *fs, Oberhang	17,2	59,7	23,0	1	5,0	1,7	LH 1	0-12
	15,7	58,9	25,3	6	4,5	2,4	LH 2	12-48
	12,8	29,4	57,8	60	0,8	1,1	LB	48-125
	12,8	22,2	65,0	90	0,6	1,1	R	125-140+
9A1 *fs, Kuppe	10,9	74,9	14,3	1	11,4	2,6	LH 1	0-15
	9,4	76,2	14,4	4	9,9	2,7	LH 2	15-52
	8,3	55,4	36,3	80	2,1	2,4	LB	52-70
	7,1	34,6	58,4	80	0,8	1,0	R 1	70-124
	6,3	13,8	79,8	90	0,4	3,9		124-150+

Tab. 2: Bodenanalytische Differenzierung periglaziärer Lagen anhand von Substratparametern für verschiedene Ausgangsgesteine im Solling

(*u: Schluffstein, *fs: Feinsandstein, FQ: Feinbodenquotient; UQ: Schluffquotient; PL: periglaziäre Lage; LH: Hauptlage; LM: Mittellage; LB: Basislage; R: Anstehendes

¹⁾ FQ = Summe aus Mittelschluff- und Grobschluffgehalt dividiert durch die Summe aus Mittelsand- und Grobsandgehalt

²⁾ UQ = Quotient aus Mittelschluff- und Feinschluffgehalt)

(Tab. 2, Profil 3M1) oder durch unterschiedliche Schwermineralspektren nachgewiesen werden. Im Gelände ist häufig auch eine Steilstellung der Gesteinsbruchstücke an der Obergrenze der Mittellage zu erkennen, die auf eine intensive Einwirkung frostdynamischer Prozesse hinweist, ebenso wie die – vermehrt im Forstrevier Brüggefeld im Solling anzutreffenden – Eiskeilpseudomorphosen in der Mittellage.

In einigen Profilen belegen neben Unterschieden in der Farbe und der

Körnung auch Skelettgehaltssprünge (Tab. 2) eine Schichtung innerhalb der Hauptlage. Gerade die teilweise deutlichen Skelettgehaltsunterschiede und die häufig bis in eine Tiefe von 20 cm reichende, durch Huminstoffe hervorgerufene braunschwarze Farbe des oberen Abschnitts der Hauptlage sind nicht allein durch bodengenetische Prozesse erklärbar. Allerdings zeigen sowohl der Feinbodenquotient als auch der Schluffquotient nur geringe Abweichungen zwischen diesen Hauptlagengliedern (Tab. 2) und bieten damit keinen Nachweis für deren geologische Eigenständigkeit.

3.2 Statistische Analyse der Zusammenhänge zwischen Lagenausprägung, Relief und Gestein

Bei der statistischen Analyse der Bodeneigenschaften und deren Zusammenhänge mit dem Relief und dem Ausgangsgestein ist eine lagenspezifische Vorgehensweise erforderlich, da sowohl die Substrate der einzelnen Lagen als auch ihre zeitliche Entwicklung differieren. Es kann daher insgesamt angenommen werden, dass Konstellation und Ausmaß der wirkenden Faktoren für jede Lage in unterschiedlichem Maße wirksam werden. So weisen die Lage- und Streuungsmaße der Lageneigenschaften im Arbeitsgebiet „Ostharz“ (Tab. 3) für die Basislage die größte mittlere Mächtigkeit und Standardabweichung aller periglaziärer Lagen auf. Die starke Streuung der Werte deutet auf den großen Einfluss des Ausgangsgesteins, der Reliefposition und der Hangneigung auf die Mächtigkeit der Basislage hin. Die mittleren Mächtigkeiten von Mittellage und Hauptlage unterscheiden sich dagegen nur geringfügig. Ein analoges Verhalten beider hinsichtlich der die Mächtigkeit steuernden Faktoren ist allerdings zu verneinen, da keine signifikante Korrelation zwischen den Mächtigkeiten der Haupt- und Mittellagen nachgewiesen werden konnte. Die Mittellage tritt fast ausschließlich in erosionsgeschützten Positionen auf, dokumentiert durch die deutlich geringeren Fallzahlen in Tab. 3. Zudem unterliegt ihre Mächtigkeit im Unterschied zur Hauptlage in starkem Maß expositionsbedingten Schwankungen.

Neben der Verteilung der Lagenmächtigkeiten zeigt die deskriptive Datenanalyse für die Bodenprofile im Solling wie auch im Ostharz (Tab. 3) deutliche Unterschiede zwischen Basislage sowie Haupt- und Mittellage hinsichtlich der Texturparameter. Die mittleren Skelettgehalte der Basislage übersteigen die sich nur wenig unterscheidenden mittleren Skelettgehalte von Mittellage und Hauptlage um das Fünffache. Die Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert der Basislage ist etwa doppelt so hoch wie die der Mittellage und der Hauptlage. In Relation zur absoluten Höhe der Skelettgehalte zeigt die Basislage dagegen insgesamt eine geringere Streuung als die Mittellage und die Hauptlage. Der hohe Skelettgehalt der Basislage

		N	Min	Max	x	s
Mächtigkeit [cm]	LH	472	20	70	44	10
	LM	259	10	96	45	17
	LB	470	10	160	56	24
	Gesamt	483	35	250	121	35
Sand [Masse-%]	LH	408	1	70	18	10
	LM	227	0	58	15	9
	LB	408	3	80	40	14
Schluff [Masse-%]	LH	408	19	85	63	10
	LM	227	26	83	61	9
	LB	408	11	78	42	13
Ton [Masse-%]	LH	408	5	40	18	6
	LM	227	8	42	23	7
	LB	408	3	77	18	9
Skelett [Flächen-%]	LH	472	0	55	11	10
	LM	259	0	45	9	7
	LB	470	5	90	49	20

Tab. 3: Lage- und Streuungsmaße der Mächtigkeiten und substratspezifischen Eigenschaften periglaziärer Lagen im Ostharz (N: Anzahl der betrachteten Fälle, x: arithmetisches Mittel, s: Standardabweichung, Gesamt: Gesamtmächtigkeit aller periglaziären Lagen)

bestätigt ihre Entstehung aus dem unterlagernden Festgestein. Die gegenüber der Mittellage geringfügig höheren Skelettanteile und die größere Spannweite der Einzelwerte der Hauptlage resultieren in erster Linie aus einer lateralen Verlagerung von Gesteinsschutt in steileren Hangbereichen (u.a. THALHEIM u. FIEDLER 1990). In dieser Reliefposition liegt die Hauptlage im Hangenden der Basislage und hat daher im Verlauf der Gelifluktion aus dieser große Skelettmengen aufgenommen.

Eine Differenzierung von Haupt- und Mittellage nach den Schluffgehalten zeichnet sich nicht ab. Sowohl der Mittelwert als auch die Minima, die Maxima und die Standardabweichung der Lagen zeigen nahezu identische Werte. Die Tongehalte der periglaziären Lagen werden durch das Ausgangsgestein, den Tonanteil im Löss und die Tonbildung im Verlauf der Bodenentwicklung bestimmt. Alle Lagen weisen ähnliche Tongehalte auf, sodass der Tongehalt als Kriterium zur Lagendifferenzierung ebenfalls ungeeignet erscheint.

Die Lage- und Streuungsmaße der substratspezifischen Eigenschaften für

den Solling weisen im Vergleich zu den für den Ostharz ermittelten Werten sehr ähnliche Wertespanssen und Relationen sowohl zwischen den einzelnen Lagen als auch für die Gesamtheit der Texturparameter und des Skelettgehalts einer Lage auf. Die mittlere Mächtigkeit der periglaziären Lagen aller untersuchten Profile beträgt 117 cm. Das mittlere Tiefenprofil der Sandgehalte der Bodenprofile im Solling entspricht in seiner Abfolge dem des Ostharzes. Die mittleren Sandgehalte erreichen jedoch ein deutlich höheres Niveau.

Die statistische Auswertung der digitalen Reliefanalyse und der petrographischen Klassifizierung des Bodenausgangsgesteins umfasst die varianzanalytische Betrachtung der Zusammenhänge zwischen der Lagenmächtigkeit und den substratspezifischen Lageneigenschaften sowie den ordinal skalierten Relief- und Gesteinsparametern. So zeigt beispielsweise die Mächtigkeit der Mittellage eine deutliche Abhängigkeit von der Hangneigung, der Neigungsrichtung und der Divergenz bzw. Konvergenz des Reliefs (Tab. 4). Den höchsten Anteil der Streuung der Mittellagenmächtigkeit an der Gesamtvarianz erklärt die Neigungsrichtung mit einem Eta-Quadrat von 0,373, die den Einfluss der Lössdeposition im Leebereich der Hänge widerspiegelt, sodass an ostexponierten Hängen die Mächtigkeit der Mittellage gegenüber anderen Neigungsrichtungen größer ist (SCHÖNHALS 1974; DERS. 1996).

Die Reliefposition beeinflusst den Skelett-, Sand- und Tongehalt der Mittellage, wobei allerdings nur die Zusammenhänge zwischen Tongehalt und Hangneigung sowie Sandgehalt und Oberflächenindex signifikant sind (Tab. 4). In Berg- und Hügelländern unterlag die Mittellage häufig der Abtragung (ALTERMANN u. STEINIGER 1995). Hierbei kann eine Materialsortierung in Abhängigkeit von der Reliefposition erfolgt sein, bei der die feineren Fraktionen stärker erodiert wurden als die groben Fraktionen. Auch die Beziehung der Reliefparameter zur Mächtigkeit der Mittellage unterstreicht den großen Einfluss der Oberflächenform auf die Eigenschaften der Mittellage (ALTERMANN et al. 1988; SEMMEL 1991), indem ein hoher Anteil der Varianzen damit erklärt werden kann.

3.3 Modellbildung zur flächendeckenden Vorhersage der Mächtigkeit und substratspezifischer Eigenschaften periglaziärer Lagen

Insgesamt ergeben sich anhand der statistischen Analyse für die Verbreitungssystematik und die substratspezifischen Eigenschaften der periglaziären Lagen jeweils verschiedene Parameterkombinationen, die den Bildungsbedingungen der Lagen und den dementsprechend unterschiedlich ausgeprägten Einflüssen von Relief und Gestein Rechnung tragen. Entsprechend

Effekt	Abhängige Variable	Quadratsumme	df	F	Signifikanz	Eta-Quadrat
HN	Skelettanteil	51980	12	2,484	0,000	0,263
	Tongehalt	1908	12	4,695	0,004	0,168
EXP	Mächtigkeit	36248	12	1,574	0,000	0,323
	Mächtigkeit	40840	3	0,827	0,000	0,373
OI	Skelettanteil	1263	11	1,672	0,079	0,056
	Sandgehalt	4504	11	1,670	0,003	0,184
	Mächtigkeit	25906	11	1,625	0,000	0,238
RSC	Sandgehalt	1811	21	1,029	0,428	0,074
	Schluffgehalt	2176	21	1,018	0,441	0,073
HUET	Skelettanteil	621	14	0,622	0,846	0,027
	Tongehalt	415	14	0,751	0,722	0,036

Tab. 4: Zusammenhang zwischen den klassifizierten Reliefparametern „Hangneigung“ (HN), „Neigungsrichtung“ (EXP), „Oberflächenindex“ (OI), „Relative Profilkrümmung“ (RSC) und „Höhe über Tiefenlinie“ (HUET) sowie der Mächtigkeit und den substratspezifischen Eigenschaften der Mittellage der Bodenprofile in den Arbeitsgebieten „Ostharz“ und „Solling“ (dargestellt sind nur Werte für abhängige Variablen, welche die Voraussetzung der Varianzhomogenität erfüllen)

müssen zur flächendeckenden Vorhersage jeder Lage separate Parameterkombinationen zugewiesen werden (Tab. 5). Deutlich zum Ausdruck kommt die Differenzierung zwischen den lössgeprägten Haupt- und Mittellagen und der vom unterlagernden Gestein geprägten Basislage. Die im Vergleich zu Mittel- und Basislage geringen Schwankungen der Mächtigkeit der Hauptlage (Tab. 3) korreliert lediglich mit der Art des Verwitterungsprodukts des Bodenausgangsgesteins signifikant. Mit großer Wahrscheinlichkeit kann dies auf substratbedingte Unterschiede in der Auftautiefe während der Bildung der Hauptlage zurückgeführt werden. Untersuchungsergebnisse aus rezenten Periglazialgebieten folgend schwankt die Auftautiefe etwa zwischen 40 und 70 cm (u.a. SEMMEL 1985). Unter anderem besteht dabei eine Abhängigkeit vom Substrat (SEMMEL 1969), wobei die Tiefenlage der Permafrostoberfläche mit zunehmender Bindigkeit des Substrats abnimmt. Die Mächtigkeit der Mittellage ist in erster Linie vom Relief abhängig. Sie ist rezent nur noch in erosionsgeschützten bzw. weniger stark erodierten Reliefpositionen erhalten.

Die bodenkundlichen Profilaufnahmen zeigen in beiden Arbeitsgebieten, dass die Mittellage nicht flächendeckend auftritt. Dies ist für die Ableitung

	HN	EXP	OI	RSC	TWI	HUET	kf _{BAG}	bl _{BAG}
LH							x	
LM	x	x	x	x				
LB				x	x	x		x

Tab. 5: Signifikante Zusammenhänge der Mächtigkeit periglaziärer Lagen mit verschiedenen Reliefparametern und petrographischen Parametern

(LH: Hauptlage, LM: Mittellage, LB: Basislage, HN: Hangneigung, EXP: Neigungsrichtung, OI: Oberflächenindex, RSC: Relative Hangneigungskrümmung, TWI: Topographischer Feuchteindex, HUET: Höhe über Tiefenlinie, kf_{BAG}: Verwitterungsprodukt des Bodenausgangsgesteins, bl_{BAG}: Bestandteil erster Ordnung des Bodenausgangsgesteins)

der Gesamtmächtigkeit der periglaziären Lagen von großer Bedeutung. Die Mittellage fehlt bis auf wenige Ausnahmen an steilen Hängen. Dieser Fall tritt im Ostharz insbesondere in forstlich genutzten Bereichen auf, wo 89 % der Bodenprofile keine Mittellage aufweisen. Ebenso wie die Mächtigkeit zeigen auch die Textureigenschaften der periglaziären Lagen eine deutliche lagenspezifische Differenzierung, wobei die Neigungsrichtung und die relative Hangneigungskrümmung keinen Einfluss ausüben.

Für jede Parameterkombination (Tab. 5) werden Verknüpfungsregeln abgeleitet, auf denen das Modell aufbaut. Die Grundlage für die Algorithmen zur Ableitung der Mächtigkeit und substratspezifischer Eigenschaften periglaziärer Lagen bilden Mittelwertdifferenzen. Diese werden zunächst lagenspezifisch aus dem Gesamtmittelwert für alle Bodenprofile der Arbeitsgebiete „Ostharz“ (s. Tab. 3) und „Solling“ sowie den faktorbezogenen mittleren Mächtigkeiten der Klassen der statistisch abgesicherten Faktoren ermittelt. Zur Ermittlung der faktorbezogenen mittleren Mächtigkeiten werden für jeden signifikanten Relief- und Gesteinsparameter nach der entsprechenden Klassifizierung (s. Kap. 2). Zu- oder Abschläge ausgewiesen und abschließend aufsummiert. Für jede periglaziäre Lagen werden die relevanten Informationen zu einem Lagenmodell verrechnet. Abschließend können die einzelnen Lagenmodelle zu einem Gesamtmodell zusammengefasst werden. Die auf diese Weise erfolgte Regionalisierung umfasst bezüglich der Verbreitungssystematik die Lagenabfolge und die Lagenmächtigkeit der einzelnen periglaziären Lagen als auch die Gesamtmächtigkeit (Abb. 1). In einem zweiten Schritt werden die substratspezifischen Eigenschaften der periglaziären Lagen in die Fläche übertragen, indem die empirisch gewonnenen Bodenkennwerte in Form von Verknüpfungsregeln zu den Raumeinheiten der periglaziären Lagen nach der oben beschriebenen Vorgehensweise in Beziehung gesetzt werden.

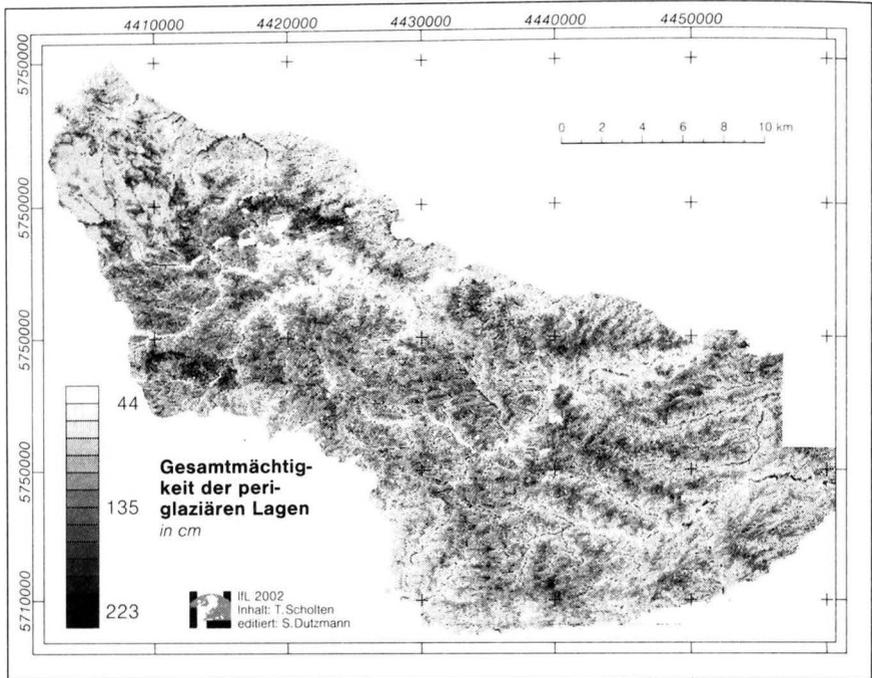


Abb. 1: Gesamtmächtigkeit der periglaziären Lagen im Arbeitsgebiet "Osthartz" (dargestellt ist das gesamte Untersuchungsgebiet; weiße Bereiche innerhalb des Untersuchungsgebietes sind Flächen ohne Reliefinformation)

3.4 Validierung der Modellvorhersagen

Die Validierung der Prognoserechnung erfolgte durch einen Wertevergleich zwischen den berechneten Mächtigkeiten und substratspezifischen Eigenschaften der periglaziären Lagen und den Ergebnissen bodenkundlicher Profilaufnahmen (SCHOLTEN 2001). Die Ergebnisse sind im Folgenden exemplarisch für die Gesamtmächtigkeit der periglaziären Lagen am Beispiel von vier Profilen aus dem Osthartz dargestellt (Tab. 6). Diese Bodenprofile blieben bei der statistischen Analyse und der Modellentwicklung unberücksichtigt und stellen somit eine unabhängige Stichprobe aus der gleichen Grundgesamtheit dar wie diejenigen der Modellierung. Weitere Berechnungen zur Güte der Parametrisierung, zur Validität der Modellvorhersagen und zur Übertragbarkeit auf andere Mittelgebirgsregionen am Beispiel des Lahn-Dill-Berglands gibt SCHOLTEN (2001).

Der Vergleich der mit dem Prognosemodell ausgewiesenen Gesamtmächtigkeiten der periglaziären Lagen mit denen der Validierungsprofile zeigt eine gute Übereinstimmung (Tab. 6). Hinsichtlich der Einzelwerte bewegen sich die Differenzen innerhalb der ermittelten mittleren absoluten Abwei-

Profilbezeichnung	Gesamtmächtigkeit der periglaziären Lagen [cm]	
	Berechnete Werte	Profilbeschreibung
A 3028	125	110
A 3029	108	95
A 1881	133	125
A 3045	136	125

Tab. 6: Vergleich zwischen den berechneten Gesamtmächtigkeiten der periglaziären Lagen und der an Validierungsprofilen gemessenen Gesamtmächtigkeit im Arbeitsgebiet „Ostharz“

chungen zwischen gemessenen und berechneten Werten von 20 cm (SCHOLTEN 2001). Die Angaben zur Textur und zum Skelettgehalt weichen je nach periglaziärer Lage um 7 bis 26 % bzw. 19 bis 28 % von den gemessenen Werten ab.

Vor dem Hintergrund unterschiedlicher Maßstabsdimensionen der für die Modellbildung verwendeten digitalen Höhenmodelle und Geologischen Karten auf der einen Seite und lagegetreuer Profilbeschreibungen auf der anderen Seite, erscheinen die modellierten Werte als hinreichend genau. Auf topischer Ebene zeigen Wertevergleiche sehr gute Übereinstimmungen. Dies wird durch den Mittelwertvergleich der für die Modellbildung genutzten Datensätze und der für den Ostharz und den Solling berechneten Werte deutlich. Die Differenz in den Gesamtmächtigkeiten beträgt bei einer mittleren Gesamtmächtigkeit der periglaziären Lagen im Arbeitsgebiet „Ostharz“ von 121 cm (s. Tab. 3) und einem Mittelwert der modellierten Gesamtmächtigkeit von 126 cm etwa 5 cm. Dieser geringe Unterschied der mittleren Gesamtmächtigkeit erhöht sich in der Dimension der Validierungsprofile auf Abweichungen zwischen 8 und 15 cm (Tab. 6). Dies resultiert in erster Linie daraus, dass im Modellmaßstab Prozesse wie z.B. kleinräumige Materialverlagerungen am Hang und Nutzungseinflüsse, die für das Einzelprofil eine Rolle spielen, methodisch nicht mehr wahrnehmbar sind und damit auch der Vorhersage entzogen werden.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die statistische Analyse der Bodenprofilaten erbrachte hinsichtlich der Spannweiten und Mittelwerte der Eigenschaften der periglaziären Lagen für den Ostharz und den Solling trotz unterschiedlicher Ausgangsgesteine vergleichbare Ergebnisse und ist damit gut für die Ableitung modellhafter

flächendeckender Aussagen geeignet. Die Ausprägung der Einzelwerte für die Lagenmächtigkeit mit 10 cm bis maximal 160 cm, für die Textur mit Bodenarten von schwach lehmigem Sand über schwach tonigen Schluff bis lehmigem Ton und für den Skelettgehalt mit Werten zwischen 0 und 90 % überstreicht eine weite Spanne.

Von besonderer Bedeutung für eine modellhafte Betrachtung der Mächtigkeiten periglaziärer Lagen wie auch für die Übertragbarkeit der hier erzielten Ergebnisse auf andere Mittelgebirgsregionen ist die Tatsache, dass die mittleren Gesamtmächtigkeiten der periglaziären Lagen von 121 cm im Ostharz und 117 cm im Solling mit hoher Genauigkeit übereinstimmen und damit als typisch für vergleichbare Mittelgebirgsregionen angesehen werden können. Durch die Einbindung der Daten beider Gebiete ist eine Ableitung der Eigenschaften periglaziärer Lagen auf Basis der unabhängigen Faktoren „Relief“ und „Gestein“ für einen weiten Bereich von reliefabhängigen und substratspezifischen Ausprägungen möglich.

Generelle Aussagen zu Gesteinsgehaltsunterschieden zwischen Haupt- und Mittellage, z.B. ein höher Skelettgehalt der Hauptlage im Vergleich zur Mittellage im Mittelgebirge (AG BODEN 1994, 365, Tab. 91 und AG Bodensystematik 1998, 179, Tab. 3), scheinen zur Differenzierung der Lagen ebenso wie zur modellhaften Vorhersage des Skelettgehalts nicht geeignet zu sein. Die diesbezüglichen Mittelwerte unterscheiden sich in den Arbeitsgebieten nur marginal. Zudem treten innerhalb der Arbeitsgebiete sowohl höhere als auch niedrigere Steingehalte der Hauptlage gegenüber der Mittellage auf; sie können damit nicht regionsspezifisch definiert werden. Ebenso zeigen die mittleren Schluffgehalte der Haupt- und Mittellagen keine signifikanten Unterschiede. Auch hier zeigt sich demnach keine spezifische vertikale Abfolge mit höheren Schluffgehalten in der Mittellage im Vergleich zur Hauptlage, wie sie verschiedentlich beschrieben wird (u.a. ALTERMANN 1993).

Die Verbreitung und Abfolge der periglaziären Lagen hängt in erster Linie vom Relief ab. Obwohl dies für die Hauptlage nur bedingt zutrifft, nimmt die Mächtigkeit der Mittellagen auf allen Hangverflachungen und Hangdellen sowie in allen Hohlformen zum tiefsten Punkt hin zu. Auch die Basislagenmächtigkeit wird vom Relief mitbestimmt, wobei insbesondere deren Zunahme im Hangverlauf für die flächendeckende Auswertung von großer Bedeutung ist. Die Genauigkeit der Vorhersage im Hinblick auf die Lagenmächtigkeit und deren Verbreitungssystematik wird daher wesentlich durch die Eigenschaften des Höhenmodells bestimmt (KÖTTE u. LEHMEIER 1993; AUERSWALD et al. 1994; WILSON et al. 2000). Bei den gewählten Rasterweiten von 10 m für das Arbeitsgebiet „Ostharz“ und 12,5 m für das Arbeitsgebiet „Solling“ kann davon ausgegangen werden, dass reliefbe-

dingte, prozessorientierte Unterschiede in der Verbreitungssystematik der periglaziären Lagen erfasst werden. So können z.B. kleinere Dellen im Bereich gestreckter Hänge oder Hangkanten bzw. konvexe Hangunstetigkeiten am Übergang von Kulminationsbereichen in den Oberhang abgebildet werden.

Die Substrateigenschaften der periglaziären Lagen und auch die Mächtigkeit der Basislage werden in erster Linie vom unterlagernden Ausgangsgestein determiniert. Diese können flächendeckend aus der Geologischen Karte und den zugehörigen Erläuterungen entnommen werden. Für die digitale Umsetzung der Geologischen Karte musste allerdings zunächst eine Methode entwickelt werden, mit der die stratigraphischen Einzelpositionen der Legende in petrographische Einheiten überführt werden konnten.

Neben der Übertragung der Algorithmen auf andere Mittelgebirgslandschaften mit periglaziären Lagen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ist insbesondere auch die Verfügbarkeit der zur Berechnung notwendigen Eingangsdaten zu gewährleisten. Daher wurden als flächenhafte Eingangsdaten digitale Höhenmodelle und die Geologischen Karten im Maßstab 1:25.000 gewählt. Digitale Höhenmodelle liegen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland bis auf wenige Ausnahmen flächendeckend vor. Die Geologische Karte ist für den überwiegenden Teil der Mittelgebirge ebenfalls vorhanden, muss allerdings in vielen Fällen zunächst digitalisiert werden. Die Notwendigkeit von lediglich zwei Datenquellen, die allgemein zugänglich sind, ist ein wesentlicher Vorzug des Verfahrens.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Prognoserechnung für die Gesamtmächtigkeit der periglaziären Lagen sowie für die Mächtigkeit der einzelnen Lagen und deren substratspezifischen Eigenschaften im Landschaftsmaßstab valide Ergebnisse liefert und damit eine wichtige Grundlage für die anwendungsorientierte Ableitung weiterer ökologisch relevanter Parameter und bodenkundlicher Kennwerte zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushalts bietet. Eine weitergehende Validierung und darauf aufbauende Verfeinerung des Relief-Gesteins-Modells durch die Anwendung auf andere Mittelgebirgslandschaften, für die bereits punktuelle Untersuchungen vorliegen, wie z.B. den Hunsrück und die Eifel (u.a. SEMMEL 1968; BARGON et al. 1971; SCHÖNIALS 1974; FELIX-HENNINGSEN et al. 1991), den Bayerischen Wald (VÖLKELE 1995) und den Westharz (u.a. MALESSA 1993) sind daher wichtige zukünftige Aufgaben.

Literatur

AG BODEN (Hrsg.) 1994: Bodenkundliche Kartieranleitung 4. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

- AG BODENSYSTEMATIK (Hrsg.) 1998: Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands. Oldenburg: Selbstverlag (= Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 86).
- ALAILY, F.A. 1984: Heterogene Ausgangsgesteine von Böden. Landschaftsentwicklung und Umweltforschung. Berlin: TU Berlin. (= Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsentwicklung der TU Berlin, 25).
- ALTERMANN, M. 1993: Gliederung und Lithologie pleistozäner Lagen im Gebiet Sachsen-Anhalts. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 72 (II), S. 819–824.
- ALTERMANN, M. 1998a: Zusammenstellung von Boden- und Standortdaten für das Gebiet des Ostharzes, Zwischenbericht. Bericht an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück. Unveröffentlicht.
- ALTERMANN, M. 1998b: Zusammenstellung von Boden- und Standortdaten für das Gebiet des Ostharzes. Teil II. Bericht an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück. Unveröffentlicht.
- ALTERMANN, M., I. LIEBEROTH und W. SCHWANECKE 1988: Gliederung der Lockergesteinsdecken der Mittelgebirge. In: Zeitschrift für angewandte Geologie 34, S. 302–306.
- ALTERMANN, M. und K. RABITZSCH 1976: Quartäre Deckschichten im Raum Elbingerode – Rüheländ (Harz). In: Herzynia N.F. 13, S. 295–331.
- ALTERMANN, M. und M. STEININGER 1995: Böden, Landnutzung, Natur- und Gewässerschutz im östlichen Harz. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 77, S. 155–206.
- AUERSWALD, K., J. WESTROP und W.-D. JUNG 1994: Eignung der mit DGM/GIS geschützten Hangneigungen für die Erosionsprognose. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 74, S. 75–76.
- BARGON, E., W. FICKEL, W. PLASS, H. REICHMANN, A. SEMMEL, H. ZAKOSEK 1971: Zur Genese und Nomenklatur braunerde- und parabraunerdeähnlicher Böden in Hessen. In: Notizblatt des hessischen Landesamtes für Bodenforschung 99, S. 361–372.
- BEHRENS, Th. 2002 (in Vorbereitung): Digitale Reliefanalyse als Basis von Boden-Landschaftsmodellen – am Beispiel der Verbreitungssystematik periglazialer Lagen in deutschen Mittelgebirgen. Dissertation am Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung an der Justus-Liebig Universität Gießen.
- BEVEN, K. und M.J. KIRKBY 1979: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. In: Bulletin of Hydrologic Sciences, 24, S. 43–69.
- BIBUS, E. 1986: Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenprofil, Standort und junge Reliefentwicklung im Schönbuch bei Tübingen. In: EINSELE, G. (Hrsg.): Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch. Wasser- und Stoffhaushalt, bio-, geo- und forstwirtschaftliche Studien in Südwestdeutschland. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, S. 27–57.
- DIETRICH, W.E. und D.R. MONTGOMERY 1998 A digital terrain model for mapping shallow landslide potential. Internet Referenz: <http://socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>, Berkeley.
- ENANDER, H. 1998: Terrain Attributes for an Area of Graves County. Internet Referenz: <http://www.murraystate.edu/qacd/cos/geo/gsc521/1998/enander/>
- FELIX-HENNINGSEN, P., E.-D. SPIES und H. ZAKOSEK 1991: Genese und Stratigraphie periglazialer Deckschichten auf der Hochfläche des Ost-Hunsrücks (Rheinisches Schiefergebirge). In: Eiszeitalter und Gegenwart 41, S. 56–69.

- FRIEDRICH, K. 1996: Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten. Frankfurt: Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften der Universität Frankfurt a.M. (= Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D – Band 21.)
- FRÜHAUF, M. 1988: Die Bedeutung lößhaltiger periglazialer Lockermaterialdecken für die Bodenbildung und Standorteigenschaften im Harz (DDR-Teil). In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Halle 4, S. 3–13.
- GEHRT, E. 1994: Die äolischen Sedimente im Bereich der nördlichen Lößgrenze zwischen Leine und Oker und deren Einflüsse auf die Bodenentwicklung. Göttingen: Dissertation an der Fakultät für Geowissenschaften und Geographie der Universität Göttingen.
- HORN, B.K.P. 1981: Hillshading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69 (1).
- KLEBER, A. und A. SCHELLBERGER 1998: Slope hydrology triggered by cover-beds. With an example from the Frankenwald mountains, northeastern Bavaria. In: *Zeitschrift für Geomorphologie*, Band 42, Heft 2, S. 469–482.
- Kösel, M. 1996: Der Einfluß von Relief und periglazialen Deckschichten auf die Bodenbildung im mittleren Rheingletschergebiet von Oberschwaben. Tübingen. Selbstverlag (Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe D, II, 1).
- KÖTHER, R. und F. LEHMEIER 1993: SARA. Ein Programmsystem zur automatischen Reliefanalyse. In: *Zeitschrift für Angewandte Geographie* 4/93, S. 11–21.
- MALESSA, V. 1993: Depositionsbedingte Tiefengradienten der Bodenversauerung in der Sösemulde (Westharz). Göttingen (= Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 98).
- MENAB, H.W. 1989: Terrain shape index: quantifying effect of minor landforms on tree height. *Forest Science*, 35 (1), S. 139–148.
- ROHDENBURG, H. 1968: Jungpleistozäne Hangformung in Mitteleuropa – Beiträge zur Kenntnis, Deutung und Bedeutung ihrer räumlichen und zeitlichen Differenzierung. In: Institut für Bodenwissenschaften (Hrsg.): *Göttinger Bodenkundliche Berichte* 6. Göttingen: Selbstverlag, S. 3–107.
- SCHILLING, W. und H. WIEFEL 1962: Jungpleistozäne Periglazialbildungen und ihre regionale Differenzierung in einigen Teilen Thüringens und des Harzes. In: *Geologie* 11, S. 428–460.
- SCHLICHTING, E., H.-P. BLUME und K. STAHR 1995: *Bodenkundliches Praktikum*. Berlin/Wien.
- SCHOLTEN, T. 2001: Beitrag zur flächendeckenden Ableitung der Verbreitungssystematik und Eigenschaften periglaziärer Lagen in deutschen Mittelgebirgen. Habilitationsschrift am Fachbereich Mathematik und Informatik, Physik, Geographie der Justus-Liebig Universität Giessen.
- SCHOLTEN, T., M. ALTERMANN, W. SCHWANECKE und P. FELIX-HENNINGSEN 1999: Die Bedeutung periglaziärer Lagen für Funktionen des Bodens im Ostharz. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 91/II, S. 1096–1099.
- SCHÖNHALS, E. 1974: Die Böden Hessens und ihre Nutzung. Darmstadt (= *Abhandlungen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung*, 2).
- SCHÖNHALS, E. 1996: Ergebnisse bodenkundlicher Untersuchungen in der hessischen Lößprovinz mit Beiträgen zur Genese des Würm-Lösses. Giessen (= *Boden und Landschaft*, 8).
- SCHWANECKE, W. 1970: Die periglazialen Umlagerungszonen im Hügelland und Mittelgebirge der DDR und ihre bodenkundliche Deutung. Beiträge zur Bodensystematik unter besonderer Berücksichtigung reliktsicher und rezenter Merkmale. In: *Tagungs-*

- bericht der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 102, Berlin, S. 83–107.
- SEMMEI, A. 1968: Studien über den Verlauf der jungpleistozänen Formung in Hessen. Frankfurt a.M.: Selbstverlag (= Frankfurter Geographische Hefte, 45).
- SEMMEI, A. 1969: Verwitterungs- und Abtragungerscheinungen in rezenten Periglazialgebieten (Lappland und Spitzbergen). Würzburg: Selbstverlag. (= Würzburger Geographische Arbeiten, 26).
- SEMMEI, A. 1985: Periglazialmorphologie. Darmstadt.
- SEMMEI, A. 1991: Schuttdecken und ihre Bedeutung für den Landschaftshaushalt in hessischen Mittelgebirgen. In: Geographische Rundschau 43, S. 298–302.
- THALHEIM, K. und H.-J. FIEDLER 1990: Merkmale für äolischen Einfluß in den känozoischen Deckschichten des Osterzgebirges (DDR). In: Chemie der Erde 50, S. 147–154.
- VÖLKEI, J. 1995: Zur Darstellung von Schichtwechselln in periglazialen Decklagen des Bayerischen Waldes unter besonderer Berücksichtigung der Mittellage und ihrer Eigenschaften. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 158, S. 177–186.
- WILSON J.P., P.L. REPETTO und R.D. SNYDER 2000: Effect of Data Source, Grid Resolution, and Flow-Routing Method on Computed Topographic Attributes. In: WILSON J.P. und J.C. GALLANT: Terrain Analysis. – Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons, S. 118–134.
- ZEVENBERG, L. W., und C.R. THORNE 1987. Quantitative analysis of land surface topography. In: Earth Surface Processes and Landforms 12, S. 47–56.