

Aus dem Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften
(Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Reinhold Jahn)
der Naturwissenschaftlichen Fakultät III
(Dekan: Prof. Dr. Peter Wycisk)
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

**Entstehung, Eigenschaften und Klassifikation tonreicher
Unterbodenhorizonte in Böden auf Carbonatgestein in norddeutschen
Berg- und Hügelländern**

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
doctor agriculturarum (Dr. agr.)

vorgelegt von
Diplomingenieurin (FH) Bodenwissenschaften Annegret Fier
geboren am 30.09.1978 in Coesfeld

Gutachter: Prof. Dr. Reinhold Jahn (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg)
Prof. Dr. Klaus Mueller (Hochschule Osnabrück)
PD Dr. Daniela Sauer (Technische Universität Dresden)

Tag der Disputation: 16.07.2012

Halle/Saale 2012

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	XI
	Summary	XV
1	Einführung, Hypothesen und Zielsetzung.....	1
2	Kenntnisstand.....	3
2.1	Veröffentlichungen zur Hypothese 1 – Residualakkumulation	3
2.2	Veröffentlichungen zur Hypothese 2 – Lessivierung	4
2.3	Veröffentlichungen zur Hypothese 3 – Residualakkumulation und Lessivierung	5
3	Naturraum	7
3.1	Standort Sentruper Berg im Teutoburger Wald	7
3.2	Standort Hardehausener Wald im Eggegebirge	10
3.3	Standort Göttinger Wald im Leinebergland	14
3.4	Standort Röhringsberg im Eichsfeld	18
3.5	Standort Holzkirch auf der Schwäbischen Alb	22
4	Methoden.....	27
4.1	Geländearbeiten und Probenaufbereitung	27
4.2	Physikalische Analysen.....	27
4.3	Chemische Analysen.....	28
4.4	Röntgendiffraktometrie an Pulverpräparaten.....	30
4.4.1	Quarzquantifizierung	30
4.4.2	Ausmessen von Tonmineralgruppen	34
4.5	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	36
4.6	Mikromorphologie	36
5	Ergebnisse und Diskussion	39
5.1	Beschreibung der Böden	39
5.1.1	Böden am Sentruper Berg im Teutoburger Wald	39
5.1.2	Boden im Hardenhausener Wald im Eggegebirge	42
5.1.3	Böden im Göttinger Wald im Leinebergland	43
5.1.4	Böden am Röhringsberg im Eichsfeld.....	48
5.1.5	Boden bei Holzkirch auf der Schwäbischen Alb.....	50
5.2	Physikalische Parameter	52
5.2.1	Steinverteilung.....	52
5.2.2	Gesteinsbestandteile – Carbonatgehalt und Zusammensetzung des Lösungsrückstands.....	54
5.2.3	Korngrößenverteilung.....	55
5.2.4	Porengrößenverteilung.....	64
5.2.5	Nutzbare Feldkapazität	66
5.2.6	Wasserleitfähigkeit	66
5.2.7	Lagerungs- und Partikeldichte	67
5.3	Allgemeine chemische Parameter.....	68

5.3.1	pH-Werte	68
5.3.2	Carbonate, Humus, C/N.....	68
5.3.3	Kationenaustauschkapazität.....	71
5.4	Mineralogische Parameter.....	76
5.4.1	Auswertung der Quarzgehalte	76
5.4.2	Tonminerale/Tonmineralgruppen	79
5.4.3	Pedogene Oxide	88
5.5	Gesamtgehalte	93
5.5.1	Gesamthöhe und Variabilität	93
5.5.2	An- und Abreicherungszone n.....	94
5.5.3	Quotienten aus Elementgehalten	96
5.6	Mikromorphologie	100
5.6.1	Diskussion Sentruper Berg a	100
5.6.2	Diskussion Sentruper Berg b	102
5.6.3	Diskussion Hardehausen.....	105
5.6.4	Diskussion Göttinger Wald a.....	106
5.6.5	Diskussion Göttinger Wald b.....	107
5.6.6	Diskussion Göttinger Wald c.....	108
5.6.7	Diskussion Röhringsberg a	109
5.6.8	Diskussion Röhringsberg b.....	110
5.6.9	Diskussion Holzkirch.....	111
5.6.10	Zusammenfassung Dünnschliffe	112
5.7	Quantitative und qualitative Schichtungsnachweise.....	113
5.7.1	Profilbezogener Inhomogenitätsindex	113
5.7.2	Horizontbezogener Inhomogenitätsindex.....	116
5.7.3	Homogenisierungsprozesse und deren Ursachen	120
5.8	Massenbilanzierung	123
5.8.1	Einflussgrößen	123
5.8.2	Tonmassenanalyse	125
5.8.2.1	Berechnung der maximalen Tonmasse aus Löss	125
5.8.2.2	Berechnung des Lössanteils mittels Tonmassenanalyse.....	128
5.8.3	Schluffmassenanalyse – Massenbilanzierung nach „Alaily“	131
5.8.4	Ursprüngliche Kalksteinmengen – Alter der Böden.....	133
5.9	Profilbezogene Ergebniszusammenstellung	137
5.9.1	Sentruper Berg a	137
5.9.2	Sentruper Berg b	140
5.9.3	Hardehausen	142
5.9.4	Göttinger Wald a.....	145
5.9.5	Göttinger Wald b	147
5.9.6	Göttinger Wald c.....	149
5.9.7	Röhringsberg a.....	151
5.9.8	Röhringsberg b.....	153
5.9.9	Holzkirch	155
5.10	Bodensystematische Einordnung – Hilfen für die Kartierung.....	159

5.11	Kalksteinverwitterungsböden mit Lössauflage – eine zeitliche und genetische Einordnung	163
6	Fazit	175
7	Literatur	177
7.1	Schriftenverzeichnis	177
7.2	Kartenverzeichnis	189

Anhang

Anhang I – Korngrößenverteilung	a-b
Anhang II – Physikalische Parameter	c-f
Anhang III – Chemische Parameter	g-h
Anhang IV – Mineralogische Parameter	
IVa – Röntgendiffraktogramme der untersuchten Böden	i-p
IVb – Tonminerale und Quarzgehalte	q-t
Anhang V – Gesamtgehalte	
Va – Elementverteilung	u-x
Vb – Elementan- bzw. abreicherungshorizonte	y-z
Anhang VI – Dünnschliffauswertung	
VIa – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Sentruper Berg a	aa-dd
VIb – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Sentruper Berg b	ee-ii
VIc – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Hardehausen	jj-nn
VI d – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Göttinger Wald a	oo-pp
VIe – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Göttinger Wald b	qq-tt
VI f – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Göttinger Wald c	uu-xx
VI g – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Röhringsberg a	yy-bbb
VI h – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Röhringsberg b	ccc-fff
VI i – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Holzkirch	ggg-kkk
Anhang VII – Massenbilanzierung	
VIIa – Berechnung der maximalen Tonmasse aus Löss und Schluffmassenanalyse	lll-mmm
VIIb – Berechnung des Lössanteils mittels Tonmassenanalyse	mmm

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Standorte der untersuchten Böden 2

Abb. 2: Lage der Bodenprofile am Sentruper Berg (SBa und SBb) im Teutoburger Wald (Quellen: LGN 2003, 2005, BKG 1998)..... 7

Abb. 3: Morphologisch-tektonische Gliederung des Teutoburger Waldes und ungefähre Position der Profilstandorte (FIEDLER 1984, ergänzt) 8

Abb. 4: Langjährige (1961–1990) Niederschlagswerte der Wetterstation Bad Iburg und Temperaturwerte der Station Osnabrück (DWD 2009) 10

Abb. 5: Lage des Bodenprofils Hardehausen (HARD) im Hardehausener Wald im Eggegebirge (LVERMA 2009, BKG 1998)..... 11

Abb. 6: Geologie und Lage des Profils Hardehausen (verändert nach ZEJSCHWITZ 1988) 12

Abb. 7: Langjährige (1961–1990) Niederschlagswerte der Wetterstation Willebadessen-Borlinghausen und Temperaturwerte der Station Bad Driburg (DWD 2009) 13

Abb. 8: Lage der Bodenprofile GOWa, b und c im Göttinger Wald im Leinebergland (Quellen: LGN 2005, BKG1998) 14

Abb. 9: Geologie und Lage der Profilstandorte im Göttinger Wald (LBEG 2009, LGN 2000a) 16

Abb. 10: Langjährige Niederschlags- und Temperaturwerte (1961–1990) der Wetterwarte Göttingen (DWD 2009) 18

Abb. 11: Lage der Bodenprofile RBa und RBb auf dem Röhringsberg im Eichsfeld (Quellen: LGN 2000b, UBA 1990, BKG 2006)..... 19

Abb. 12: Geologie und Lage der Profilstandorte auf dem Röhringsberg (LGN 2000b, TLUG 2007)..... 20

Abb. 13: Langjährige (1961–1990) Niederschlagswerte der Wetterstation Heiligenstadt-Kalteneber und Temperaturwerte der Station Leinefeld (DWD 2009) 22

Abb. 14: Lage und Geologie des Bodenprofils Holzkirch (HOLZ) auf der Schwäbischen Alb nahe Holzkirch (Quellen: LGRB 1997, BKG 1998, LV-BB 1989)..... 23

Abb. 15: Langjährige Niederschlagswerte (1961–1990) der Wetterstation Lonsee-Ettlenschieß und Temperaturwerte der Station Ulm (DWD 2009) 25

Abb. 16: Eichreihen zur Quarzquantifizierung..... 31

Abb. 17: Standardabweichungen der Wiederholungsmessungen bei 10, 20, 30, 50 und 70 % Quarz 33

Abb. 18: Generalisiertes Profil der neun untersuchten Peda zur Begriffsbestimmung..... 52

Abb. 19: Verteilung von Grus (2 bis < 63 mm) und Steinen/Blöcken kurz „Stein“ (≥ 63 mm) in Vol.-% am Gesamtboden..... 53

Abb. 20: Tiefenfunktionen der Körnung (Grobsand gS, Mittelsand mS, Feinsand fS, Grobschluff gU, Mittelschluff mU, Feinschluff fU, Ton T des carbonat- und humusfreien Feinbodens in Gew.-%) für die Mineralbodenhorizonte (a), den carbonathaltigen Verwitterungsschutt < 2 mm (Feinmaterial/b) und den Kalkstein ≥ 2 mm (Stein/c)	58
Abb. 21: Prozentuale Korngrößenverteilung des carbonat- und humusfrei analysierten Feinbodens der Mineralbodenhorizonte, des carbonathaltigen Verwitterungsschuttes < 2 mm (Feinm.) und des Kalksteins ≥ 2 mm (Stein).....	63
Abb. 22: Verteilung von Feinboden (Sand, Schluff, Ton) und Porenvolumen (Fein-, Mittel-, Grobporen) in Volumenprozent am Gesamtboden	65
Abb. 23: Tiefenverlauf der Humusgehalte in %, der C/N-Verhältnisse, der pH-Werte (CaCl_2) und der Carbonatgehalte in % (Werte wurden durch 10 geteilt um sie in der Abbildung darstellen zu können)	70
Abb. 24: Tiefenverlauf der Quarzgehalte aller Peda (nach Carbonatzerstörung); Mineralbodenhorizonte: durchgezogene Linie, Feinmaterial des Verwitterungsschuttes < 2 mm: gepunktete Linie, Kalkstein ≥ 2 mm (Stein): gestrichelte Linie.....	77
Abb. 25: Mengenverteilung der drei Tonmineralgruppen (Summe = 100 %)	81
Abb. 26: Veränderung der Summe der Tonmineralintensitäten der drei Tonmineralgruppen bei 1,42, 1,0 und 0,72 nm mit dem Tongehalt	84
Abb. 27: Tiefenverlauf des oxalat- und dithionitlöslichen Eisens aller untersuchten Peda (atro)	89
Abb. 28: Tiefenverlauf des Aktivitätsgrades (Fe_o/Fe_d) aller untersuchten Peda	90
Abb. 29: Tiefenverlauf des dithionitlöslichen Eisens geteilt durch den Tongehalt aller untersuchten Peda innerhalb der Mineralbodenhorizonte	91
Abb. 30: Tiefenverlauf der Quotienten aus Ton durch Aluminium-, Eisen- und Kaliumoxid aller Böden innerhalb der Mineralbodenhorizonte	97
Abb. 31: Inhomogenitätsindizes aller untersuchten Böden für den kalkfrei analysierten Feinboden der Mineralbodenhorizonte (dunkel hinterlegt), den carbonathaltigen Verwitterungsschutt < 2 mm (Feinmaterial, kurz „Fm.“) und den Kalkstein ≥ 2 mm (Stein) (jeweils grau, ebenfalls kalkfrei analysiert).....	118
Abb. 32: Fließdiagramm zur bodensystematischen Einordnung von Böden mit tonreichen Unterbodenhorizonten auf Carbonatgestein im norddeutschen Berg- und Hügelland.....	161
Abb. 33: Das Quartär in Niedersachsen und benachbarten Gebieten (STREIF et al. 2007)	165
Abb. 34: Idealisierter Schnitt durch einen Kalksteinrücken zu Beginn der Weichsel-Kaltzeit.....	166
Abb. 35: Idealisierter Schnitt durch einen Kalksteinrücken gegen Ende der Weichsel-Kaltzeit.....	168
Abb. 36: Idealisierter Schnitt durch einen Kalksteinrücken mit der abstrahierten Lage der untersuchten Böden.....	171

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Gliederung des Unteren Muschelkalks in Südniedersachsen nach STEIN (1966, 1968).....	17
Tab. 2: Carbonatgehalte und entsprechende Lösungsrückstandsmengen (Rückst.) der untersuchten Kalksteine und des zwischen den Kalksteinen lagernden carbonathaltigen Verwitterungsschuttes (Feinmaterial < 2 mm) sowie Tongehalte der Lösungsrückstände.....	55
Tab. 3: Mittlere Korngrößen und Minimal- bzw. Maximalwerte der untersuchten Böden in Gew.-% des carbonat- und humusfreien Feinbodens.....	56
Tab. 4: Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) und deren Einstufung nach AG BODEN (2005)	66
Tab. 5: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) und deren Einstufung nach AG BODEN (2005)	67
Tab. 6: Mittlere Carbonat-, Kohlenstoff- (C_t), Humus- und Stickstoffgehalte (N_t), C/N-Verhältnisse und pH-Werte der Peda.....	69
Tab. 7: Kationenaustauschkapazität (KAK), Basensättigung (BS), KAK der Tonfraktion und Dolomitgehalt der Mineralbodenhorizonte	72
Tab. 8: Mittlere Quarzgehalte [%] der Mineralbodenhorizonte und des Verwitterungsschuttes (Kalkstein und Feinmaterial) nach Carbonatzerstörung an den carbonathaltigen Proben	76
Tab. 9: Häufige Tonminerale in Böden aus Löss bzw. Residualton und mögliche Veränderungen des Tonmineralbestandes	87
Tab. 10: Mittlere prozentuale Elementgehalte der neun Peda (Angabe in Oxidform) im Ah-Horizont, im tonreichsten Horizont, im Feinmaterial < 2 mm des carbonathaltigen Verwitterungsschuttes und im Kalkstein ≥ 2 mm (die beiden Letzteren wurden nach vorhergehender Carbonatzerstörung analysiert).....	93
Tab. 11: Elementan- bzw. abreicherungshorizonte – Durchschnittswerte der untersuchten Peda	95
Tab. 12: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon SBa.....	100
Tab. 13: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon SBb	103
Tab. 14: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon HARD	105
Tab. 15: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon GOWa.....	106
Tab. 16: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon GOWb.....	107
Tab. 17: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon GOWc.....	108

Tab. 18: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schriff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon RBa	109
Tab. 19: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schriff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon RBb	110
Tab. 20: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schriff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon HOLZ.....	111
Tab. 21: Beispiel zur Berechnung des gemittelten Variationskoeffizienten – Boden Sentruper Berg b.....	114
Tab. 22: Gemittelte Variationskoeffizienten der untersuchten Böden als Maß der Inhomogenität	115
Tab. 23: Ermittlung des Inhomogenitätsindex I am Beispiel zweier Horizonte des Pedons Göttinger Wald c.....	116
Tab. 24: Bewertungsskala zum Ausmaß der Schichtung/Inhomogenität (STAHR & SAUER 2004)	117
Tab. 25: Berechnete c/f_{10} -Verhältnisse der Referenzlöss (Tab. 28) und an den Dünnschliffen der Oberböden geschätzte c/f_{10} -Verhältnisse.....	121
Tab. 26: kryoklastische Korngrößen-Verkleinerung und Tonmineralbildung am Beispiel von Lössböden – Merkmale und Eigenschaften (zusammengestellt aus ROHDENBURG & MEYER 1966, SCHEFFER et al. 1966).....	123
Tab. 27: Korngrößenverteilung (% , nichtcarbonatischer Anteil) 14 unverwitterter Jungweichsel-Löss aus dem Leinegebiet (1) und die Korngrößenverteilung nach der Veränderung durch Tonmineralbildung (2) (verändert nach ROHDENBURG & MEYER 1966)	124
Tab. 28: Vergleichsböden aus Löss nahe der Untersuchungsstandorte (verwendete Werte sind fettgedruckt).....	126
Tab. 29: Aktuelle Tonmassen (T_{ak}) in den untersuchten Peda und potentielle Tonmassen (T_{potL}) bei Annahme einer reinen Lössauflage oberhalb des carbonathaltigen Verwitterungsschuttes (für die Tongehalte im Löss werden 10 % Ton, 35 % Ton und standortspezifische Tongehalte (siehe Tab. 28) angenommen).....	127
Tab. 30: Aus Tonmassen berechnete Lössanteile am Mineralboden der untersuchten Böden mit und ohne Berücksichtigung von Tonneubildung durch Verwitterung	130
Tab. 31: Über den Grobschluffgehalt berechnete Lössanteile am Mineralboden der untersuchten Böden mit und ohne Berücksichtigung von Tonneubildung durch Verwitterung	133
Tab. 32: Rekonstruierte Massen und Mächtigkeiten der verwitterten Kalksteine.....	134
Tab. 33: Potentielle Rückstandsmengen aus der Kalksteinverwitterung im Spätglazial und Holozän	135
Tab. 34: Sentruper Berg a (SBa) – Ergebniszusammenstellung.....	137
Tab. 35: Sentruper Berg b (SBb) – Ergebniszusammenstellung	140
Tab. 36: Hardehausen (HARD) – Ergebniszusammenstellung	143
Tab. 37: Göttinger Wald a (GOWa) – Ergebniszusammenstellung	145
Tab. 38: Göttinger Wald b (GOWb) – Ergebniszusammenstellung	147

Tab. 39: Göttinger Wald c (GOWc) – Ergebniszusammenstellung	149
Tab. 40: Röhringsberg a (RBa) – Ergebniszusammenstellung.....	151
Tab. 41: Röhringsberg b (RBb) – Ergebniszusammenstellung	153
Tab. 42: Holzkirch (HOLZ) – Ergebniszusammenstellung.....	155
Tab. 43: Tongehalte (Masse-% Ton) des tonreichsten Horizontes (tonr. Hor.) eines Bodens und des unlöslichen Kalksteinlösungsrückstandes (Stein) des darunter liegenden Horizontes	159

Abkürzungsverzeichnis

atro	absolut trockener Boden
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	circa
CaCO ₃	Calciumcarbonat
dito	gleichfalls, dasselbe
Fe _d	dithionitlösliches Eisen
Fe _o	oxalatlösliches Eisen
fS	Feinsand
fU	Feinschluff
Gew.-%	Gewichtsprozent
GOWa	Pedon Göttinger Wald a
GOWb	Pedon Göttinger Wald b
GOWc	Pedon Göttinger Wald c
gS	Grobsand
gU	Grobschluff
HARD	Pedon Hardehausen
HOLZ	Pedon Holzkirch
Hor.-bez.	Horizontbezeichnung
J.v.h	Jahre vor heute (standardisiert auf 1950)
k.a.	keine Angabe
KAK _{pot}	potentielle Kationenaustauschkapazität
km	Kilometer
m	Meter
MIF	mineral intensity factor
mS	Mittelsand
mU	Mittelschluff
m ü. NN	Meter über Normalnull
N	Stickstoff
n.b.	nicht bestimmbar
n. Chr.	nach Christus
nFKWe	nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum
NH ₄	Ammonium
OIL	Dünnschliff unter Auflicht („oblique incident light“)
OS	organische Substanz
PPL	in einer Ebene polarisiertes Licht („plane polarized light“)
RBa	Pedon Röhringsberg a
RBb	Pedon Röhringsberg b
SBa	Pedon Sentruper Berg a
SBb	Pedon Sentruper Berg b

T	Ton
tonr. Hor.	tonreichster Horizont
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
Vol.-%	Volumenprozent
XPL	gekreuzte Polarisatoren („crossed polarizers“)
z. B.	zum Beispiel

Zusammenfassung

Im norddeutschen Berg- und Hügelland tritt wiederholt carbonatisches Festgestein zu Tage (HENNINGSEN & KATZUNG 2002). An vielen Positionen wird dieses Festgestein von Deckschichten aus Kalksteinverwitterungsschutt und Löss bzw. Lössderivaten überlagert. Die daraus entstandenen Böden weisen oftmals einen tonärmeren Oberbodenhorizont über einem deutlich tonreicheren Unterbodenhorizont auf, dessen Entstehung bislang ungeklärt ist. Grundsätzlich kommen sowohl Tonauswaschungsprozesse aus der Lössauflage als auch Tonanreicherung durch die Bildung von Lösungsrückstand aus dem sich auflösenden Kalkstein in Frage. Auch primär geogen bedingte Tongehaltsdifferenzen sind zu erörtern. Ziel dieser Arbeit ist die Klärung der Entstehung der tonreichen Horizonte.

Insgesamt wurden an fünf Waldstandorten neun Böden in unterschiedlichen Hangpositionen beschrieben und untersucht. Zwei Peda wurden im Teutoburger Wald auf Kalkstein des Turons aufgenommen (Peda Sentruper Berg a und b), eines im Eggegebirge (Pedin Hardehausen), drei im Göttinger Wald (Peda Göttinger Wald a bis c) und zwei im Eichsfeld (Peda Röhringsberg a und b). Alle drei letztgenannten Waldstandorte befinden sich auf Unterem Muschelkalk. Um einen Vergleich mit den süddeutschen Kalksteinverwitterungsböden ziehen zu können, wurde ein Boden auf Oberem Massenkalk auf der Schwäbischen Alb (Pedin Holzkirch) in die Untersuchungen einbezogen. Analysiert wurden die einzelnen Bodenhorizonte und der darunter liegende Kalkstein ≥ 2 mm. Häufig wurde auch die carbonatreiche Fraktion < 2 mm in den C-Horizonten (Feinmaterial) untersucht. Das Untersuchungsprogramm umfasst folgende physikalische, chemische und mineralogische Analysen:

- Wasserleitfähigkeit, Wasserhaltevermögen, Lagerungs- und Partikeldichte, Porengrößenverteilung, Korngrößenverteilung
- Humus- und Carbonatgehalte, pH-Werte, Kationenaustauschkapazitäten, Kohlenstoff- und Stickstoffgesamtgehalte, pedogene Oxide
- Röntgendiffraktometrie zur quantitativen Erfassung von Quarz und Tonmineralgruppen, Röntgenfluoreszenzanalysen (RFA) zur Elementgehaltsbestimmung, Bodendünnschliffe

Die wesentlichen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Die untersuchten Böden zeigen einen deutlichen Tongehaltsanstieg vom Oberboden zum Unterboden, im Mittel von 37 % auf 65 %, wobei sich der tonreichste Horizont eines Bodens jeweils unmittelbar oberhalb des cCv-Horizontes befindet. Dieser Korngrößenprung kann nicht allein durch Lessivierung erklärt werden, sondern deutet auf das Vorhandensein von Lösungsrückstand hin. Laut MÜCKENHAUSEN (1977) weist selbst eine Fahlerde in norddeutschen Lössgebieten nur bis zu 20 % Tongehaltsdifferenz auf. Der Lösungsrückstand des Feinmaterials enthält durchschnittlich 70 % Ton, der des massiven Kalksteins 67 %. Dieser Unterschied ist wahrscheinlich die Folge einer kryoklastischen Korngrößen-Verkleinerung zugunsten der Tonfraktion

durch Frost-Tau-Wechsel (SCHEFFER et al. 1966). Der Grobschluffgehalt, die mengenmäßig größte Kornfraktion im Löss, beträgt im unlöslichen Rückstand der Kalksteine nur 4 %, im tonreichsten Horizont sind es 15 %, im Oberboden durchschnittlich 31 %. Daraus wird auf eine Einmischung von Löss bis in den tonreichsten Horizont geschlossen.

Die pH-Werte (CaCl_2) bewegen sich im Oberboden mit durchschnittlich 4,4 im stark sauren Bereich. Dies ist nicht untypisch für Forststandorte und teilweise eine Folge anthropogener Säureinträge (VEERHOFF 1996). Im tonreichsten Horizont liegen die pH-Werte um 5,9.

Die Quarzgehalte nehmen vom Oberboden mit durchschnittlich 45 % zum Unterboden bzw. tonreichsten Horizont mit 26 % deutlich ab. Der unlösliche Rückstand der Kalksteine enthält durchschnittlich noch 19 % Quarz.

Die Messung verschiedener Tonmineralgruppen ergab, dass die Kalksteine Unterschiede im Tonmineralbestand aufweisen, die ihre geologische Herkunft widerspiegeln. Der Mineralboden hingegen wird überwiegend von 1,42 nm-Reflexen (Vermiculit/Smectit/Chlorit) und zum Oberboden hin ansteigenden Anteilen an 0,72 nm-Reflexen (Kaolinit/Chlorit) dominiert. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Illit-Transformation zu Vermiculit/Smectit und infolge der niedrigen pH-Werte weiter zu sekundärem Al-Chlorit stattgefunden hat.

Die Röntgenfluoreszenzanalyse ergab, dass kein Element für Löss oder Lösungsrückstand spezifisch ist. Die Silizium-Gehalte nehmen tendenziell mit der Tiefe ab, Aluminium und Eisen zu. Dies ist zwar typisch für Lessivierung, der nichtlineare Verlauf des Quotienten aus Aluminium durch Ton zeigt jedoch, dass dies zumindest teilweise auf eine Beteiligung von Lösungsrückstand am Mineralboden zurückzuführen ist.

Erst die Dünnschliffauswertungen belegen, dass in allen Böden, mit Ausnahme von Göttinger Wald a, Tonverlagerung bis in den tonreichsten Horizont hinein stattgefunden hat. Es finden sich viele Toncutanbruchstücke und Toncutane in Poren, jedoch nur wenige an Aggregaten. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass in einigen Horizonten Ton lediglich intern verlagert wurde. Die Böden am Sentruper Berg weisen in den tonreichsten Horizonten Schlufffüllungen von einigen hundert μm Durchmesser auf. Es wird angenommen, dass diese zu Beginn der Lössanwehung im Unter-Weichsel gebildet wurden. Dies setzt voraus, dass die tonreichsten Horizonte bereits vor der Lössanwehung vorhanden waren.

Die verschiedenen Analyseergebnisse legen eine unterschiedlich stark ausgeprägte Vermischung von Löss und Lösungsrückstand nahe. Zudem zeigen viele Böden Tonverlagerung, deren Einfluss auf die Profildifferenzierung jedoch nicht quantifiziert werden kann.

Um das Ausmaß der Inhomogenität für jeden Boden zu quantifizieren und Schichtwechsel zu identifizieren, wurden drei verschiedenen Quotienten gebildet und miteinander verrechnet: Grobschluff/Feinschluff, Quarz/Grobschluff und Ton/Aluminium. Aus den Ergebnissen wird abgeleitet, dass Lösungsrückstand und Löss durch

Homogenisierungsprozesse auf der Ebene einzelner Bodenteilchen und in Form ganzer Aggregate in unterschiedlichem Ausmaß miteinander vermischt sind, deutliche Schichtwechsel fehlen häufig. Hierfür werden verschiedene periglazäre und holozäne Prozesse verantwortlich gemacht: Kryoklastik, Kryotranslokation, Kryoturbation, Kryopedogenese, Hangkriechen/Erosion, phytogene und zoogene Bioturbation sowie Gefügebildung (vgl. ALTERMANN et al. 2008, ROESCHMANN 1968, RUSSOW & HEINRICH 2001, VAN VLIET-LANOË 1998).

Der Anteil an Löss bzw. Lösungsrückstand am Mineralboden wurde durch eine Massenbilanzierung quantifiziert. Zwei unterschiedliche Berechnungsansätze wurden eingesetzt, die Tonmassenanalyse und die Schluffmassenanalyse. Beide Methoden kommen zu vergleichbaren Ergebnissen und werden gemittelt: Die Mineralbodenhorizonte der Peda bestehen zu 21 bis 93 % aus Lösungsrückstand der Kalksteinverwitterung. Die berechnete Masse des Rückstands bewegt sich zwischen 146 und 386 kg/m³.

Zusätzlich wurde die seit Beginn des Spätglazials maximal entstandene Masse an Lösungsrückstand abgeschätzt. Sie liegt mit Ausnahme von Boden Sentruper Berg b (245 kg/m³) weit unterhalb der aus der Massenbilanzierung berechneten Masse an Lösungsrückstand (zwischen 4 und 122 kg/m³). Daher ist es sehr wahrscheinlich, dass ein Teil der Kalksteinlösungsrückstände bereits in vorhergehenden Warmzeiten/Interstadialen gebildet worden ist.

Die Kenntnis der Zusammensetzung der Mineralbodenhorizonte ermöglichte deren korrekte bodensystematische Einordnung. Es wurde ein Fließdiagramm entwickelt, das diese Einordnung erleichtern soll. Da die visuelle Unterscheidung von Kalksteinlösungsrückstand und lössbürtigen Tonanreicherungs-horizonten im Gelände sehr schwierig ist, werden die Ton- und Grobschluffgehalte als Kennwerte eingesetzt.

Die untersuchten Böden wurden als Terra fusca, Braunerde- bzw. Parabraunerde-Terra fusca, Parabraunerde über Terra fusca, Braunerde über Terra fusca und Terra fusca-Parabraunerde angesprochen. Ein interessantes Ergebnis ist, dass fünf der untersuchten unlöslichen Rückstände der Kalksteine geogen bedingt weniger als 65 % Ton aufweisen. Es wird angeregt, die zur bodensystematischen Ansprache einer Normterra fusca bisher angewandte Tongehaltsgrenze von ≥ 65 Masse-% auf ≥ 45 Masse-% Ton zu senken.

Der Vergleichsboden auf der Schwäbischen Alb stimmt in vielen Eigenschaften mit den untersuchten Böden auf Kalkstein der Norddeutschen Mittelgebirgslandschaft überein. Da die Hochfläche jedoch stark verkarstet ist und eine geringere Reliefenergie als das zertalte norddeutsche Berg- und Hügelland aufweist, kann ein höherer Anteil präweichselzeitlichen Lösungsrückstandes angenommen werden.

Aufbauend auf den beschriebenen Erkenntnissen wurde die Genese der untersuchten Kalksteinverwitterungsböden rekonstruiert und eine auf weitere Standorte im norddeutschen Berg- und Hügelland übertragbare genetische Modellvorstellung abgeleitet. Das Modell berücksichtigt die Lage der Böden im Relief und deren Beeinflussung durch folgende Prozesse und Faktoren: Solifluktion, präweichselzeitliche Residualton-

bildungen, Abtrag und Akkumulation, Permafrost, spätglaziale und holozäne Tonverlagerung, holozäne Vermischungsprozesse, Verwitterungsanfälligkeit der Frostschuttdecken und Mächtigkeit der Lössüberdeckung. Diese werden in eine chronologische Abfolge eingebettet.

Summary

Carbonate rock can frequently be found in the uplands and hilly regions of North Germany (HENNINGSEN & KATZUNG 2002). In many places, this rock is covered by upper layers of limestone weathering debris and loess or loess derivatives. Soils arising from these parent materials often have a clay-poorer topsoil horizon over a considerably clay-richer subsoil horizon, the genesis of which has not yet been clarified. Two genetic processes are possible: clay illuviation processes from the loess layer or clay accumulation from the formation of solution residues due to limestone weathering. Primarily geogenically determined differences in clay content shall also be explored. The aim of this thesis is to clarify the genesis of clay-rich horizons.

A total of nine soils from different slope positions of five forest sites were described and explored. Two pedons were recorded on Turonian limestone in the Teutoburg Forest (pedons Sentruper Berg a and b), one in the Eggegebirge (pedon Hardehausen), three in the Göttinger Wald (pedons Göttinger Wald a to c) and two in the Eichsfeld (pedons Röhringsberg a and b). The latter three forest sites are located on Lower Muschelkalk. To be able to compare these soils with limestone weathering soils from South Germany, a soil on upper compact limestone on the Swabian Alb (pedon Holzkirch) was included in the investigations. The individual soil horizons and the limestone ≥ 2 mm beneath them were analysed. The carbonate-rich fraction < 2 mm in the C horizons (fine grain material) was also frequently examined. The investigation programme comprised the following physical, chemical and mineralogical analyses:

- hydraulic conductivity, water capacity, bulk density, particle density, pore size distribution, grain size distribution
- humus and carbonate contents, pH values, cation exchange capacities, total carbonate and nitrogen contents, pedogenic oxides
- X-ray diffraction to quantify quartz and clay mineral groups, X-ray fluorescence analyses (RFA) to determine element content, soil thin sections

The essential findings can be summarised as follows:

The investigated soils reveal a considerable increase in clay content from the topsoil to the subsoil, with an average increase from 37 % to 65 %, whereby the horizon of each soil with the highest clay content was immediately above the cCv horizon. This jump in grain size cannot be explained by lessivation alone, but is suggestive of the presence of solution residues. According to Mückenhausen (1977), even a pale leached soil in North German loess areas has only a difference in clay content of up to 20 %. The solution residues of the fine grain material and massive limestone contain an average of 70 % and 67 % clay. This difference is probably a consequence of a cycloclastic grain size reduction in favour of the clay fraction due to repeated freeze-thaw cycles (SCHEFFER et al. 1966). The coarse silt content, the quantitatively largest grain fraction in the loess, amounts to only 4 % in the insoluble residues of limestone; it is 15 % in

the horizon with the highest clay content and on average 31 % in the topsoil. It is therefore concluded that loess is mixed even into the horizon with the highest clay content.

The pH values (CaCl_2) in the topsoil are 4.4 on average, and are therefore in the extremely acidic region. This is not atypical for forest sites and is partly the result of anthropogenic acid inputs (VEERHOFF 1996). The pH values in the horizon with the highest clay content are around 5.9.

The quartz contents decrease considerably from the topsoil, with an average of 45 %, to the subsoil or the horizon with the highest clay content at 26 %. The insoluble residues of limestone still contain an average of 19 % quartz.

Measurements of various clay mineral groups revealed that limestones differ with regard to clay mineral stock, reflecting their geological origin. The mineral soil, on the other hand, is dominated by 1.42 nm peaks (vermiculite/smectite/chlorite) and increasing amounts of 0,72 nm peaks (kaolinit/chlorite) towards topsoil. The results suggest an illit transformation to vermiculite/smectite and, because of low pH values, onwards to secondary aluminium chlorites.

The X-ray fluorescence analysis revealed that no element is specific for loess or solution residues. The silicon contents tend to decrease with depth, whilst aluminium and iron increase. Although this is typical for lessivation, the non-linear course of the ratio of aluminium to clay shows that this is based, at least in part, on the inclusion of solution residues in the mineral soil.

Only the evaluations of the soil thin sections prove that clay illuviation occurred in the horizon with the highest clay content in all soils, with the exception of Göttinger Wald a. Many fragments of clay coatings and clay coatings can be found in pores, but only a few on aggregates. It cannot be excluded that in some horizons clay was translocated internal only. The soils at Sentruper Berg reveal silt fillings with a diameter of a few hundred μm in the horizons with the highest clay content. It is assumed that these were formed at the beginning of the loess drift in the Lower Weichselian. This requires that the horizons with the highest clay content existed before the loess drift.

The results of the various analyses suggest a varying degree of mixture of loess and solution residues. In addition, many soils demonstrate clay illuviation, the impact of which on the profile differentiation, however, cannot be quantified.

To quantify the extent of the inhomogeneity for each soil and to identify layer transitions, three different ratios were composed and offset against one another: coarse silt/fine silt, quartz/coarse silt and clay/aluminium. The results enable us to derive that solution residues and loess are mixed to different extents due to homogenisation processes at the level of individual soil particles and in the form of whole aggregates; clear layer transitions are frequently lacking. Various periglacial and Holocene processes are held responsible for this: cryoclastics, cryotranslocation, cryoturbation, cryopedogenesis, downhill creep/erosion, phytogenic and zoogenic bioturbation and aggregate formation (cf. ALTERMANN et al. 2008, ROESCHMANN 1968, RUSSOW & HEINRICH 2001, VAN VLIET-LANOË 1998).

The proportion of loess or solution residues in the mineral soil was quantified by mass balance. Two different calculation methods were used: clay mass analysis and silt mass analysis. Both methods lead to comparable results, and are averaged: the mineral soil horizons of the pedons consist of 21 to 93 % of solution residues from limestone weathering. The calculated mass of the residues ranges from 146 to 386 kg/m³.

In addition, the maximum mass of solution residues arising since the beginning of the Late-glacial was estimated. With the exception of the soil Sentruper Berg b (245 kg/m³), it is far below the mass of solution residues computed from the mass balance (between 4 and 122 kg/m³). For this reason, it is highly probable that part of the limestone solution residues were formed in the previous interglacial/interstadial periods.

Knowledge of the composition of the mineral soil horizons enables their correct soil-systematic classification. A flow chart was developed to facilitate classification. Since it is very difficult to visually differentiate between limestone solution residues and loess-derived clay accumulation horizons in the field, the clay and coarse silt contents are used as parameters.

The investigated soils were termed 'Terra fusca', 'Braunerde- or Parabraunerde-Terra fusca', 'Parabraunerde over Terra fusca', 'Braunerde over Terra fusca' and 'Terra fusca-Parabraunerde'. One interesting result is that five of the investigated insoluble residues of limestone demonstrated geogenic determined less than 65 % clay. It is proposed that the clay content limit currently applied to the soil-systematic designation of a 'Normterra fusca' should be reduced from ≥ 65 mass % to ≥ 45 mass % clay.

Many characteristics of the reference soil from the Swabian Alb correspond to the investigated soils on limestone from the hilly region of North Germany. Since the plateau is highly karstified, however, and has less relief energy than the valley-incised uplands and hilly region of North Germany, a higher proportion of pre-Weichselian solution residues can be assumed.

Building on the findings described, the genesis of the investigated limestone weathered soils was reconstructed and a genetic model was derived that can be transferred to other sites in the uplands and hilly areas of North Germany. The model takes into consideration the position of the soils in the relief and how they are influenced by the following processes and factors: solifluction, pre-Weichselian residual clay formations, erosion and accumulation, permafrost, Late-glacial and Holocene clay illuviation, Holocene mixing processes, the susceptibility to weathering of frost debris layers and the thickness of the loess cover. These are embedded in a chronological sequence.



1 Einführung, Hypothesen und Zielsetzung

Das norddeutsche Berg- und Hügelland ist ein tektonisch formenreiches Bruchfaltengebirge, in dem wiederholt carbonatisches Festgestein zu Tage tritt (HENNINGSEN & KATZUNG 2002). An vielen Positionen wird dieses Festgestein von Deckschichten aus Kalksteinverwitterungsschutt und Löss bzw. Lössderivaten überlagert. Aus diesem Ausgangsgestein entwickelte Böden weisen oftmals einen tonärmeren Oberbodenhorizont über einem deutlich tonreicheren Unterbodenhorizont auf. Ungeklärt ist die Entstehung dieser tonreichen Horizonte über Carbonatgesteinen. Grundsätzlich kommen für deren Entwicklung sowohl Prozesse der Tonverlagerung aus der Lössdecke (Lessivierung) als auch Tonanreicherung aus der Kalksteinverwitterung (Residualakkumulation) in Frage. Auch primär geogen bedingte Tongehaltsdifferenzen (Schichtungen) sind zu erörtern. Ziel der Arbeit ist die Charakterisierung der tonreichen Unterbodenhorizonte, die Klärung der Genese des Mineralbodens und daraus abgeleitet die bodensystematische Einordnung dieser Böden. Auf der Grundlage einer umfangreichen Analytik werden quotientenbezogene Heterogenitätsberechnungen durchgeführt und die Massenanteile der Ausgangsmaterialien bilanziert. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, die bislang sehr unterschiedliche Ansprache und Kartierung dieser Böden zu erleichtern und zu vereinheitlichen. In erster Linie werden die folgenden drei Hypothesen überprüft:

- Die tonreichen Unterbodenhorizonte bauen sich aus Residualton der Carbonatgesteine auf (Hypothese 1).
- Die tonreichen Unterbodenhorizonte sind eine Folge der Lessivierung von Ton aus der Lössdecke (Hypothese 2).
- Die tonreichen Unterbodenhorizonte sind sowohl durch Lessivierung als auch durch Residualakkumulation geprägt (Hypothese 3).

Zur Beantwortung der Hypothesen wurden fünf Waldstandorte auf Carbonatgestein ausgewählt und neun Böden untersucht (Abb.1).

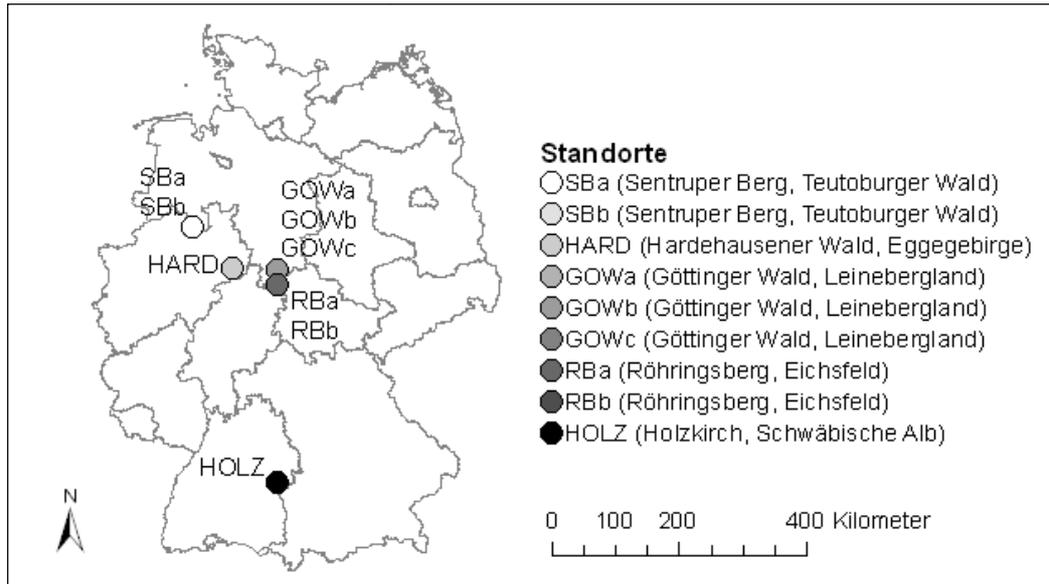


Abb. 1: Standorte der untersuchten Böden

Die untersuchten Böden sind auf Hochplateaus und an schwach geneigten Bergkuppen und Oberhängen lokalisiert. Vier Standorte befinden sich im norddeutschen Mittelgebirge: Zwei Peda wurden am Sentruper Berg im Teutoburger Wald auf Kalkstein des Turons aufgenommen (Peda Sentruper Berg a und b), eines im Hardehausener Wald im Eggegebirge (Peda Hardehausen), drei im Göttinger Wald (Peda Göttinger Wald a bis c) und zwei auf dem Röhringsberg im Eichsfeld (Peda Röhringsberg a und b). Die drei letztgenannten Waldstandorte befinden sich auf Unterem Muschelkalk. Aus dem süddeutschen Raum wurde ebenfalls ein Standort auf Oberem Massenkalk in die Untersuchungen eingebunden. Mit dem Pedon Holzkirch auf der Schwäbischen Alb soll geprüft werden, ob in beiden Regionen vergleichbare Bodenentwicklungen stattgefunden haben.

2 Kenntnisstand

Die idealtypische Vorstellung der Genese von Kalksteinverwitterungsböden umfasst deren ausschließliche Entwicklung aus der Verwitterung des anstehenden Gesteins. Durch die Abfuhr der Lösungsprodukte der Carbonatverwitterung mit dem Sickerwasser (überwiegend Ca^{2+} , HCO_3^- , teilweise Mg^{2+}) werden die nichtcarbonatischen Lösungsreste akkumuliert. Dieser Lösungsrückstand ist in der Regel tonreich und wird daher auch als Residualton bezeichnet, Schluff und Sand können in unterschiedlichen Anteilen enthalten sein. Je höher die Verwitterungsresistenz des Carbonatgesteins und je geringer der nichtcarbonatische Anteil im Gestein ist, desto langsamer schreitet die Tiefenentwicklung des Solums in erosionsfreien Lagen voran (SCHEFFER et al. 1960 und 1962). Kalksteinverwitterungsböden wurden erstmals von Kubiena (KUBIENA 1944, 1953) umfassender beschrieben. Nachfolgende Autoren erkannten zunehmend die Bedeutung von Gesteinsdiskontinuitäten und Fremdmaterialbeimengungen (vor allem Löss) bei der Entwicklung von Carbonatgesteinsböden (WERNER 1958, MÜCKENHAUSEN 1977, HEMME 1970, THÖLE & MEYER 1979, ALAILY 1984). Der heutige Kenntnisstand über die flächendeckende Verbreitung von periglazialen Lagen (Deckschichten) in den deutschen Mittelgebirgen lässt die folgenden Vorstellungen von der Bildung tonreicher Unterbodenhorizonte in tiefgründig entwickelten Böden über Carbonatgestein zu.

2.1 Veröffentlichungen zur Hypothese 1 – Residualakkumulation

Der tonreiche Unterbodenhorizont ist durch Residualakkumulation des nichtcarbonatischen Lösungsrückstandes aus der Verwitterung der unterlagernden Carbonatgesteine autochthon bzw. paraautochthon entstanden:

SCHMIDT-LORENZ (1957): Untersuchung von 15 Bodenprofilen mit tonreichen Unterbodenhorizonten im Weserbergland. Sie werden hauptsächlich dem Typ Paläo-Kalksteinbraunlehm (fossile bzw. reliktsche Terra fusca) zugeordnet. Diese sind aus periglazialen Kalksteinschuttdecken bzw. Fließerden im Pleistozän (Eem-Interglazial) entstanden und von Weichsel-Löss überdeckt. Die Möglichkeit einer holozänen Residualbildung tonreicher Unterbodenhorizonte wird vom Autor nur bei mergeligem Ausgangssubstrat für möglich gehalten, ihre tertiäre Entstehung schließt er dagegen nach stratigraphischen Befunden aus.

WERNER (1958): Untersuchung zur Genese der Terra fusca auf der Schwäbischen Alb (Mittlere Alb und Ostalb). Die Entwicklung autochthoner Terra-Bildungen auf harten Kalken und Dolomiten wird seit dem Pliozän bzw. Altpleistozän angenommen. Eine Überdeckung durch hochglaziale äolische Sedimente stellt der Verfasser nicht fest; die Entstehung der Deckschichten aus Schlufflehm ist durch eine mit der Residualakkumulation einhergehenden Lessivierung des Oberbodens zu erklären.

BLUM (1968): Untersuchungen zu den Gesetzmäßigkeiten der Pedogenese auf Carbonatgesteinen an Böden im südlichen Oberrheingraben. Beschrieben wird die Entwicklung eines Rendzina-Braunlehms aus Carbonatgestein mit 4,5 % Carbonatlösungsrückstand in ebener Lage bei starker Vorverwitterung des Ausgangsgesteins (mächtige Frostschuttdecken). Lössbeimengungen in diesem Bodenprofil quantifiziert er durch Körnungsvergleiche, Schwermineralbilanzierung und Tonmineralvergleiche als gering.

HEMME (1970): Bearbeitung der Fragestellung, inwieweit die Schlufflehm bildungen auf der Schwäbischen Alb ein Resultat von Tonverlagerungsprozessen im Oberboden oder von jüngerer periglazialer Sedimentation sind. Anhand von Mineralanalysen kommt er zu dem Ergebnis, dass es sich bei den Deckschichten aus Schlufflehm entgegen den Befunden von WERNER (1958) um würmglaziale Windsedimente (Löss) handelt. Die tonreichen Unterbodenhorizonte sind dagegen aus Carbonatgesteinen (Malmkalken) entstanden. Sie zeigen allerdings auch sehr schwache Tonilluviationscutane, welche jedoch die Tongehaltsdifferenzen zwischen Ober- und Unterboden nicht erklären könnten.

FIEDLER & HOFMANN (1991): Exkursion zu Bodenformen über Muschelkalk im Thüringer Becken. Dokumentiert wird eine Braunerde-Terra fusca (Profil 3) in ebener Lage, die aus einer geringmächtigen lehmig-tonigen Kalksteinbraunlehm-Fließerde über Basisschutt des anstehenden Trochitenkalks entstanden ist.

HÄUSLER (1992): Untersuchung zur Bodenbildung auf Carbonatgesteinen auf der Südlichen Frankenalb. Auf der Albhochfläche sind die Böden in großem Umfang von äolischen Sedimenten geprägt; die meisten Böden im Untersuchungsgebiet sind Zweischichtprofile mit einer tonarmen bzw. schluffreichen Schicht äolischen Ursprungs über einer tonreichen Schicht aus Kalksteinlösungsrückständen. Der Verfasser ordnet sie typologisch der Terra fusca-Braunerde zu. Zwischen der schluffigen Deckschicht aus Lösslehm und dem Verwitterungslehm ist regelmäßig ein 5–25 cm mächtiger Übergangshorizont durch Vermischung beider Substrate mittels Diskriminanzanalyse nachweisbar. Eine Überprüfung von Tonanreicherung in den Terra fusca-Horizonten durch Tonverlagerung anhand von Dünnschliffen wurde nicht vorgenommen. Sie wurde u.a. auf Grund des hohen pH-Wertes für unwahrscheinlich erachtet.

2.2 Veröffentlichungen zur Hypothese 2 – Lessivierung

Der tonreiche Unterbodenhorizont ist durch Verlehmung und Lessivierung der hangenden Lössdecke in situ entstanden:

BALLAGH & RUNGE (1970): Untersuchungen an zwei Böden mit tonreichen Unterbodenhorizonten über Kalkstein im Kankakee county, Illinois. Anhand von Befunden der Tonmineralanalytik, Radiokarbondatierung der Ton-Humus-Komplexe und Korngrößenverteilung der Feinerde schließen die Autoren auf die hauptsächliche Bildung der Unterbodentonhorizonte aus Illuvialton.

FIEDLER & HOFMANN (1991): Beschreibung einer schwach pseudovergleyten Braunerde-Parabraunerde aus Löss über Trochitenkalk im Muschelkalkgebiet der Ilm-Saaleplatte (Profil 1). Dieser Boden ist typisch für lösslehmüberlagerte Carbonatböden der Region. Er weist im unteren Solum absinkende Grobschluffgehalte bei deutlichem Anstieg der Tongehalte auf. Die Frage nach einer etwaigen Beteiligung von Terra-fusca-Material am Aufbau des tonigen Unterbodenhorizontes (Tongehalt 48 %) bleibt ungeklärt.

GEHRT et al. (1999): Untersuchung der Bodenentwicklung im Übergang vom holozänen Hangschutt zu periglazialen Deckschichten aus Gesteinen des Unteren Muschelkalks und Löss im Sackwald (Leinebergland). Es wird eine Parabraunerde aus Fließerden über tiefem Kalkstein beschrieben (Exkursionspunkt 5.3). Die deutlich erhöhten Tongehalte (bis 40 %) im tonreichen Unterbodenhorizont an der Grenzfläche zur liegenden Basislage sind hauptsächlich auf die massive Tonanreicherung bei abrupt ansteigenden pH-Werten und Carbonatgehalten zurückzuführen. Die häufig in den Verbreitungsgebieten der mesozoischen Kalksteine vorkommenden oberflächenparallelen rotbraunen, tonreichen Unterbodenhorizonte sind damit im Wesentlichen holozäner Genese. Vorstellungen, die diese Horizonte als ältere Residualbildungen ansehen, werden deutlich widersprochen.

2.3 Veröffentlichungen zur Hypothese 3 – Residualakkumulation und Lessivierung

Der tonreiche Unterbodenhorizont ist durch beide genetischen Prozesse (Hypothese 1 und Hypothese 2) entstanden:

THÖLE & MEYER, (1979): Bodengenetische Untersuchungen von 17 Böden auf dem Muschelkalkplateau des Göttinger Waldes. Bis auf eine Ausnahme ist keiner der nach makroskopischem Befund als Kalkstein-Verwitterungsboden angesprochenen Böden im Oberboden frei von Lössbeimengungen. Die Mischungsanteile schwanken zwischen 14 % und 99 %. Es werden zwei Parabraunerde-Terra fusca (Profil 5 und Profil 10) beschrieben: Profil 5 aus löss-vermischem Solifluktionsschutt des Unteren Muschelkalks zeigt im Unterboden im Residualton braunen Infiltrationston. Profil 10 aus Löss über Frostscht des Trochitenkalks (Oberer Muschelkalk) weist ebenfalls einen tonreichen Unterbodenhorizont (61 % Ton) mit dunkelbrauner Toninfiltration auf. Beide Böden sind sowohl durch Residualtonanreicherung als auch Tonverlagerung geprägt, wobei der zuerst genannte Prozess definitionsgemäß überwiegt.

MEYER et al. (1985): Untersuchung der Entwicklung und Gesellschaft der Böden aus Kalkstein im Muschelkalk-Gebiet des Göttinger Waldes. Beschrieben wird eine Parabraunerde-Terra fusca (Profil Hünstollenweg) als Endglied der Entwicklungsreihe auf Muschelkalk (Wellenkalk und Gelbkalk des Unteren Muschelkalks). Die Tongehalte in den Bt-T-Horizonten liegen zwischen 58 % und 65 %; durch Nachweis von Laacher-Seen-Tuff aus dem Alleröd unterhalb dieser Horizonte wird die Hauptlage als jungtundren-zeitliches Sediment eingeordnet.

BIERMAYER & REHFUESS (1985): Untersuchung der Genese von braunen Carbonatverwitterungslehmen in den Bayerischen Kalkalpen (Tegernseer Berge). Diese sind aus geschichteten, würmglazialen Hangschuttdecken des Hauptdolomits entstanden. Sie zeichnen sich durch eine Differenzierung bei Textur und Gefüge aus (5–30 cm subpolyedrischer Schlufflehm über 10–30 cm polyedrischem lehmigen Ton). Die Schlufflehmdecke wird als Lösungsrückstand einer Moräne oder einer dünnen äolischen Decke gedeutet. Diese überlagert den tonigen Lösungsrückstand der Hauptdolomitverwitterung, dessen polyedrische Aggregate häufig humusreiche, dunkle Tonhäutchen tragen. Die Bodenform wird als Parabraunerde-Terra fusca aus Decksediment über Hauptdolomitschutt bezeichnet. Wegen der starken würmeiszeitlichen Überprägung des Gebietes ist eine holozäne Entstehung der Terra fuscen sehr wahrscheinlich.

ALTERMANN (1995): Beschreibung einer Braunerde-Parabraunerde aus Löss über Schuttton aus Kalkstein (Profil A 2837) im Raum Elbingerode (Harz). Der tonreiche Unterbodenhorizont weist 38 % Ton auf, im Oberboden liegen die Tongehalte um 15 %. Sowohl Verwitterungsrückstände des Kalksteins als auch Lössderivate sind an der Substratbildung beteiligt. Tonbeläge finden sich bis in 150 cm Tiefe.

LORZ (2008): Untersuchungen an einer Catena im Mittleren Saaletal. Die Kalksteinschutte des Unteren Muschelkalks sind von schluffreichen Decken überlagert. Der Autor beschreibt eine kryoturbate Vermengung von Terra fusca-Material und Lösslehm in den Haupt- und Mittellagen. Das Relief wird als ein wichtiger Einflussfaktor auf die Lössbeeinflussung der Böden herausgestellt. Es bildeten sich sowohl Parabraunerden und Braunerden, als auch Terra fusca-Braunerden, Parabraunerde-Terra fuscen und Braunerde-Rendzinen. Weiter wurde beobachtet, dass die Grenzen des Tonverarmungs- und Tonanreicherungshorizontes häufig mit lithologischen Diskontinuitäten zusammenfallen und eine Überlagerung von lessivierungs- und schichtungsbedingten Tongehaltsänderungen auftritt. Eine Massenbilanzierung erfolgte nicht.

Zusammenfassend lässt sich anhand der vorliegenden Veröffentlichungen als Kenntnisstand festhalten:

1. Es gibt bislang sehr wenige spezielle Untersuchungen, die sich mit der Klärung der Genese von tonreichen Unterbodenhorizonten auf lössüberdeckten Carbonatgesteinen eingehend auseinandersetzen. Ungeklärt ist deshalb auch die Frage, welche der drei genannten Hypothesen auf das norddeutsche Berg- und Hügelland zutrifft.
2. Die über ähnliche Böden anderer Regionen veröffentlichten Beiträge stellen die Frage nach der Genese der tonreichen Unterbodenhorizonte häufig nicht in den Mittelpunkt ihrer Untersuchungen. Folglich entbehren diese Arbeiten regelmäßig der für die gesicherte Beantwortung dieser Frage benötigten methodischen Vorgehensweise.
3. Auf Grund der oben genannten zwei Punkte, ist die bodensystematische Einordnung derartiger Bodenbildungen zurzeit sehr uneinheitlich.

3 Naturraum

3.1 Standort Sentruper Berg im Teutoburger Wald

Lage, Geologie und Boden

Am Standort Sentruper Berg befinden sich zwei der insgesamt neun angelegten Bodenprofile: Sentruper Berg a und b, bzw. SBa und SBb. Sie liegen am Südwesthang des zum Teutoburger Wald gehörenden Sentruper Berges im Osnabrücker Bergland, ca. 3 km östlich von Bad Iburg (Abb. 2).

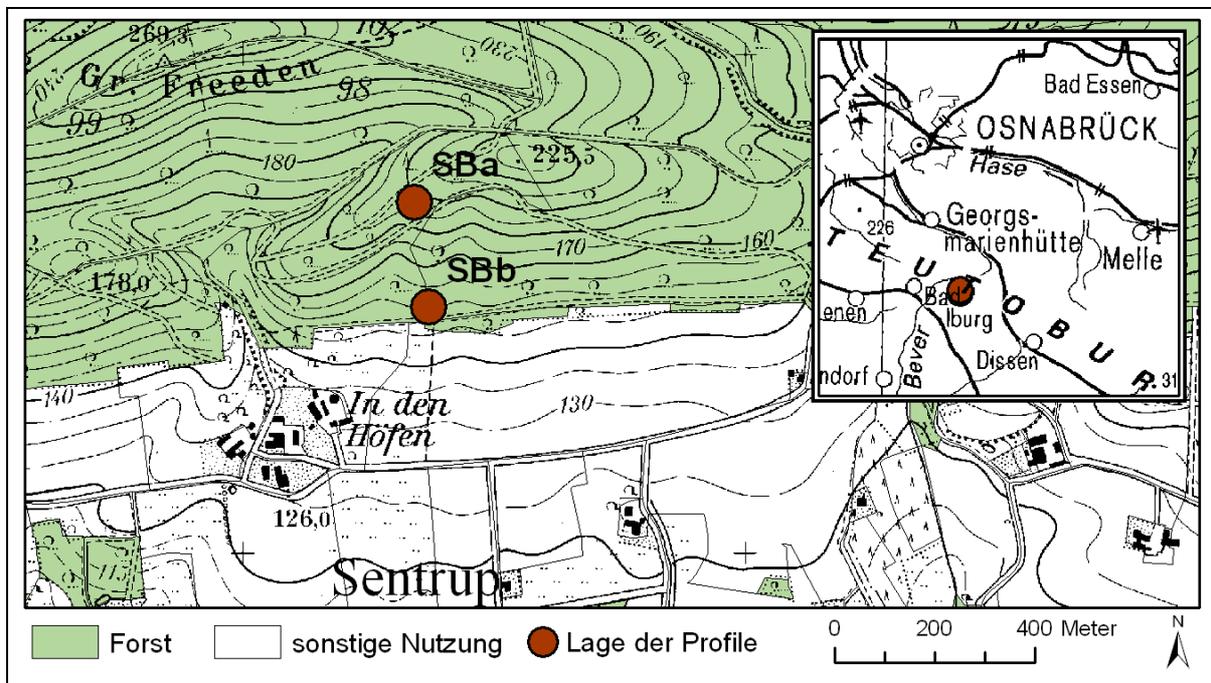


Abb. 2: Lage der Bodenprofile am Sentruper Berg (SBa und SBb) im Teutoburger Wald (Quellen: LGN 2003, 2005, BKG 1998)

Das Osnabrücker Bergland ist Teil der südniedersächsischen Mittelgebirgslandschaft und stößt spornartig in den westlichen Teil der Deutschen Tiefebene vor. Es baut sich überwiegend aus den Sedimenten der Trias, des Juras und der Kreide auf (HENNINGSEN & KATZUNG 2002). Vom späten Perm bis ins Karbon lag das Osnabrücker Bergland im nördlichen Randbereich des Variszisches Gebirges. Nach dessen Abtrag sank es im Zechstein als Teil des Germanischen Beckens ab und war während des Mesozoikums Sedimentationsraum (FIEDLER 1984). Die erneute Druckeinwirkung während der alpidischen Gebirgsbildung erzeugte eine Vielzahl tektonischer Strukturen aus Falten, Achsen, Beulen, Flexuren und Brüchen, ein Bruchfaltengebirge entstand (DROZDZEWSKI 2003). Die am Sentruper Berg anstehenden Kalksteine der Turon-Stufe der Oberkreide wurden steil aufgerichtet (Abb. 3). Dies ist eine Folge der sogenannten Osning-Überschiebung, die den oberen Abschnitt

des Osning-Lineamentes bildet und wie ein Scharnier zwischen dem sich heraushebenden Niedersächsischem Becken und dem einsinkenden Münsterländer Kreidebecken wirkte (DROZDZEWSKI 2003). Die Kalke des Turons bilden die letzten undeutlich ausgeprägten kammartigen Erhebungen entlang des Teutoburger Waldes, bevor dieser in das Münsterländer Kreidebecken übergeht.

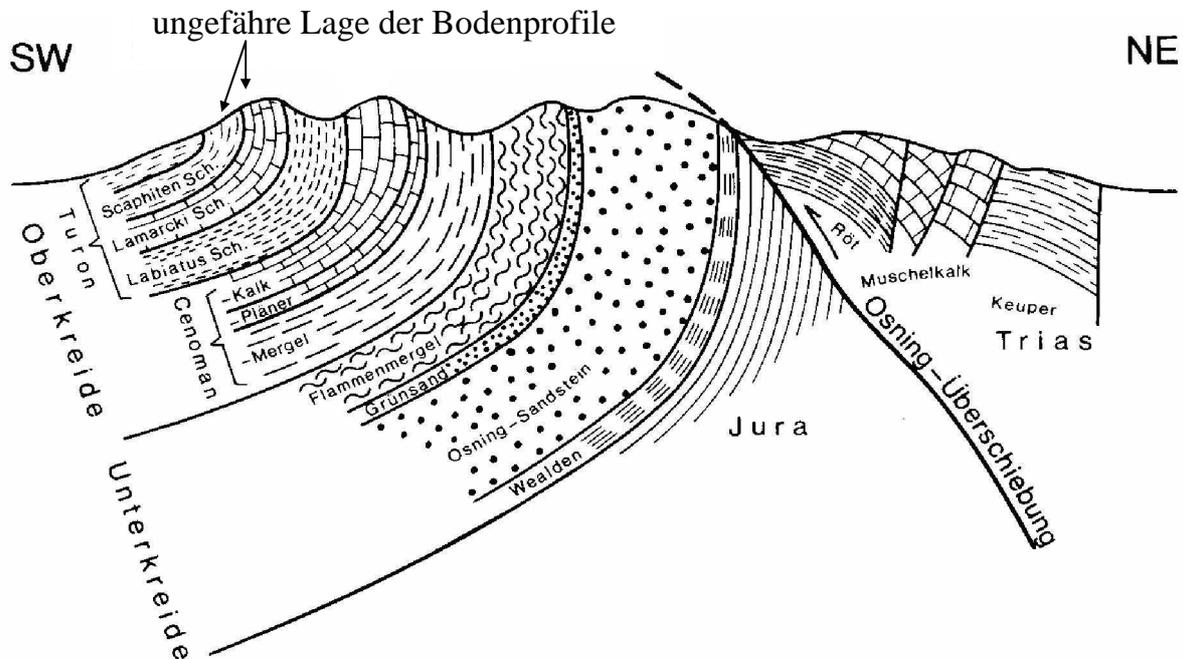


Abb. 3: Morphologisch-tektonische Gliederung des Teutoburger Waldes und ungefähre Position der Profilstandorte (FIEDLER 1984, ergänzt)

Ablagerungen der Tertiär-Zeit sind nur an wenigen Stellen des Osnabrücker Berglandes erhalten (SKUPIN 2003).

Während des Pleistozäns erfolgte eine erhebliche Überprägung des Gebietes. Ablagerungen des drenthezeitlichen Eisvorstoßes der Saale-Vereisung lassen sich noch bis in 240 m Höhe nachweisen (LIEDTKE 1981). Der Untersuchungsstandort am Sentruper Berg ist dennoch frei von glazialen Geschiebe. Dafür ist er deutlich von den unter periglazialen Bedingungen einsetzenden Lössanwehungen der Weichsel-Kaltzeit überprägt. Größere Mächtigkeiten von mehreren Metern erlangten die Lössauflagen im Osnabrücker Bergland nur an Unterhängen, besonders in Leelagen und in Akkumulationssenken, da häufig schon kurz nach der Ablagerung erosive und solifluidale Abtragungsprozesse einsetzten (SKUPIN 2003). Zusätzlich gefördert wurden diese Abtragungsvorgänge durch die mittelalterliche intensive Landnutzung und Waldrodung. Die geringen Lössmächtigkeiten führten zu einer raschen Entkalkung, so dass heute im Osnabrücker Bergland, speziell im Raum Bad Iburg, bisher kein originär kalkhaltiger Löss gefunden wurde (HÜTTER 1996).

Von den zwei Peda am Sentruper Berg liegt das erste (SBa) ca. 20 Meter unterhalb des Schichtkamms, 198 m ü. NN in mittel geneigter Hangposition im Bereich der

Lamarcki-Schichten des Turons (LBEG 2009). Diese Schichten bestehen aus einer Wechselfolge von hellgrauen knollig-knauerigen, stellenweise geschichteten Kalksteinen und feingeschichteten, grauen, bröckeligen Mergelsteinen von jeweils 2 bis 10 cm Dicke (THIERMANN 1984). Im Kalksteinverwitterungsschutt treten vereinzelt zur Familie der Muscheln zählende Inoceramen (Leitfossilien der Oberkreide) auf.

Circa 38 Höhenmeter unterhalb dieses Pedons liegt das Pedon Sentruper Berg b (SBb) kurz vor dem Übergang des bewaldeten steilen Mittelhangs zum flach auslaufenden, landwirtschaftlich genutzten Hangfuß. Laut geologischer Karte im Maßstab 1:25 000 (LBEG 2009) befindet es sich im Scaphiten-Pläner. Diese Schichten des Turons bestehen aus grauen, gefleckten, knolligen Kalksteinen im Wechsel mit grauen, feinschichtigen Mergelsteinen (THIERMANN 1984). Da sich der Boden im Verwitterungsschutt entwickelt hat, ist nicht auszuschließen, dass auch Kalksteine des Lamarcki-Pläners eingemischt sind.

Nach der Bodenkundlichen Karte im Maßstab 1:25 000 (LBEG 2008) befindet sich am Standort Sentruper Berg a bzw. im Bereich des Kammes ein Pelosol. Dieser geht am Mittelhang mit Einsetzen der Scaphiten-Schichten in eine flache Braunerde-Rendzina über. Für den Standort Sentruper Berg b ist eine mittlere Pseudogley-Parabraunerde auskartiert worden.

Klima, Vegetation und Nutzung

Klimatisch gehört das Osnabrücker Bergland zur kühlgemäßigten Klimazone der ozeanisch-subozeanischen Klimaregion (SEEDORF & MEYER 1992). Die Winter sind relativ mild, die Sommer mäßig warm bei hohen, relativ gleichmäßig verteilten Niederschlägen (Abb. 4). Die Hauptwindrichtung ist Süd-West bis West, dieses führt zu Steigungsregen an den Süd-West-Hängen. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge in Bad Iburg liegen bei 890 mm/a (Mittelwert der Jahre 1961 bis 1990, DWD 2009). Die Jahresdurchschnittstemperatur der nächstgelegenen Klimastation im ca. 14 km entfernten Osnabrück beträgt 9,1 °C. Die Jahresamplitude liegt bei 15,9 °C mit den höchsten Temperaturen im Juli (17,1 °C) und den geringsten Werten im Januar (1,2 °C).

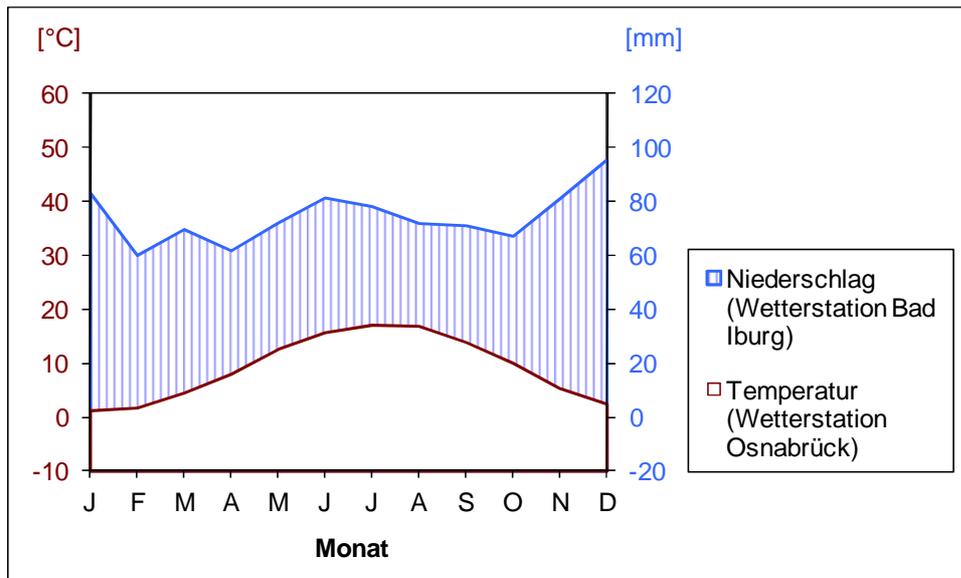


Abb. 4: Langjährige (1961–1990) Niederschlagswerte der Wetterstation Bad Iburg und Temperaturwerte der Station Osnabrück (DWD 2009)

Die potentielle natürliche Vegetation der Kalksteinverwitterungsböden des Osnabrücker Berglandes ist ein Perlgras-Buchenwald mit dichter, artenreicher Krautschicht. Auf Böden mit Lösslehmüberdeckung oder Lösslehmreinigung ist ein Flattergras-Buchenwald mit spärlicher Krautschicht typisch (HÜTTER 1996). Zudem gibt es Hinweise, dass Eichen im Iburger Raum ebenfalls natürlich verbreitet sind (KLOWEIT-HERRMANN & ZIETZ 2005). Beide Profilstandorte befinden sich heute in einem Buchen-Eichen Hochwald mit wenig Unterwuchs. Während des Mittelalters war das Erscheinungsbild des Sentruper Berges und des angrenzenden Freedens jedoch von intensiverer Nutzung geprägt. Laut KLOWEIT-HERRMANN & ZIETZ (2005) wurde am Freedens noch um 1748 n. Chr. Niederwaldwirtschaft mit 30- bis 40-jährigen Umtriebszeiten betrieben. Der Sentruper Berg wurde bis ca. 1825 als Hude (Waldweide) genutzt (KLOWEIT-HERRMANN & ZIETZ 2005). Da sich direkt unterhalb des bewaldeten Teils des Sentruper Berges ein Plaggenesch befindet, kann auch von einer regelmäßigen Entnahme der Laubstreu als Einstreu ausgegangen werden, evtl. sogar von der Entnahme von Plaggen. Aufgrund der Hangneigung kann eine ackerbauliche Nutzung in der Nähe der Profilgruben weitgehend ausgeschlossen werden.

3.2 Standort Hardehausener Wald im Eggegebirge

Lage, Geologie und Boden

Südlich des Teutoburger Waldes liegt das Eggegebirge. An dessen Südrand befindet sich, inmitten des zwischen Paderborn und Warburg gelegenen Hardehausener Waldes, der Profilstandort Hardehausen, kurz HARD (Abb. 5).

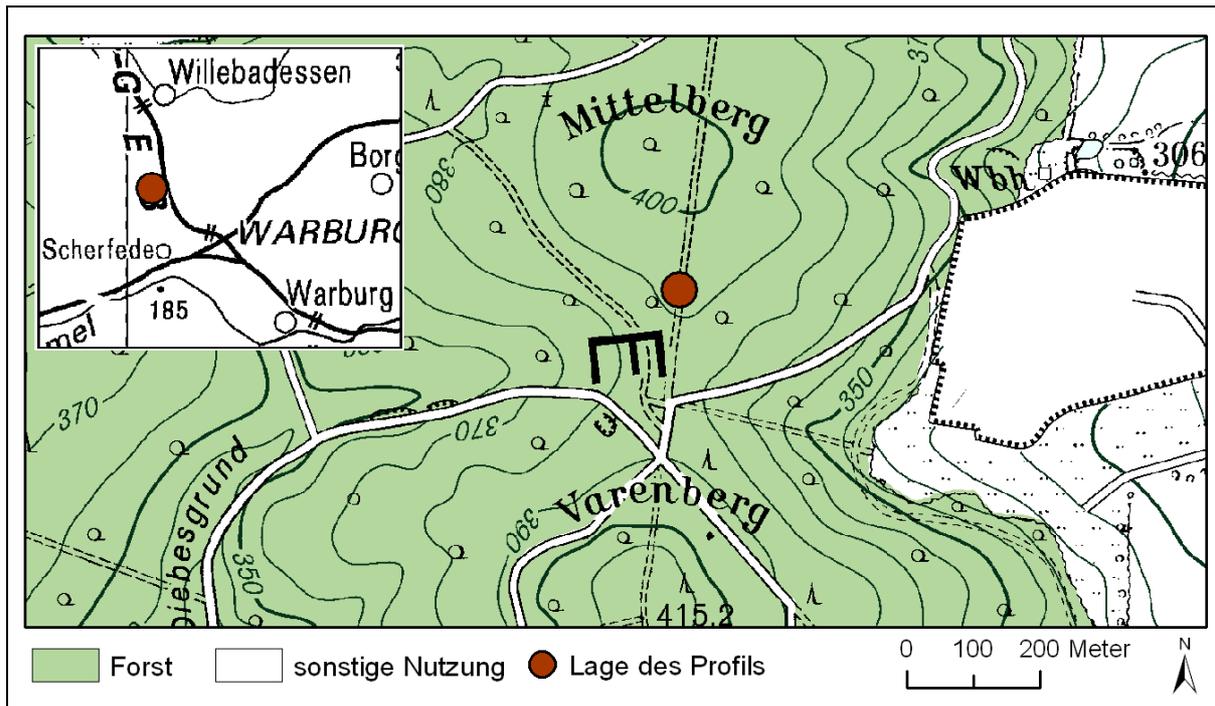


Abb. 5: Lage des Bodenprofils Hardehausen (HARD) im Hardehausener Wald im Eggegebirge (LVERMA 2009, BKG 1998)

Geologisch gesehen befindet sich das südliche Eggegebirge im Übergang von Rheinischer Masse zur Hessischen Senke (WOLBURG 1969). Während des Perms, der Trias und des Juras wurden in diesem Bereich mächtige marine und festländische Sedimente abgelagert (ZEZSCHWITZ 1988). Bereits im Rotliegenden begann die Rheinische Masse aufzusteigen. Das führte nach FARRENSCHON (1990) gegen Ende des Juras, im Zuge der jungkimmerischen Bewegung, zu Verwerfungen und zur Ausbildung einer von West nach Ost absteigenden Schollentreppe. Gegen Ende der Trias und im Jura war das südliche Eggegebirge Festland und unterlag insbesondere im Anschluss an die jungkimmerische Bewegung einer starken Einebnung und Abtragung, so dass die jüngeren Schichten des Keupers und die des Juras nicht erhalten blieben (FARRENSCHON 1990). In der folgenden Kreidezeit lagerten sich sandige Küsten- und mergelige bis kalkige Meeressedimente ab. Durch Hebungsvorgänge im Tertiär wurden diese Schichten auf der Scholle von Scherfedede, die den Bereich der Profilgrube einschließt, vollständig abgetragen, so dass dort heute überwiegend der Untere Muschelkalk ansteht (Abb. 6). Die Hebungsvorgänge setzten sich im Quartär fort und durch erosive Vorgänge wurden Schichtkämme und -stufen herausmodelliert (ZEZSCHWITZ 1988).

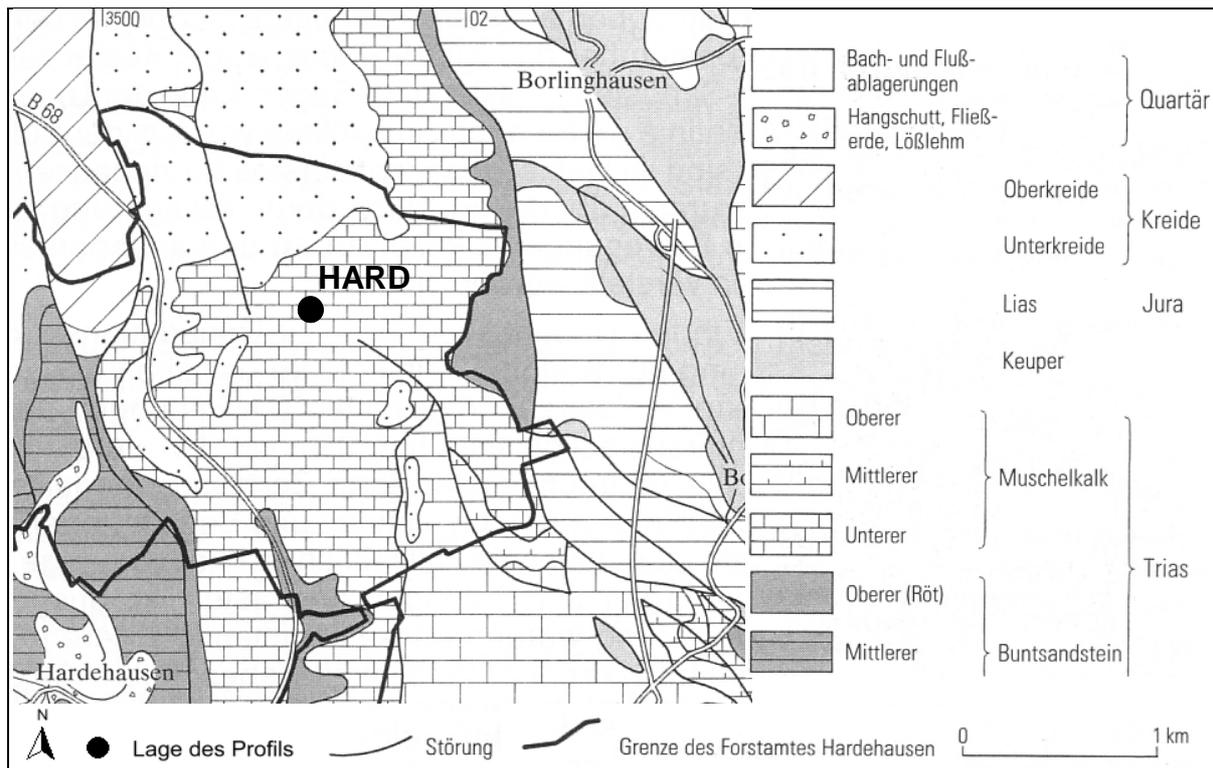


Abb. 6: Geologie und Lage des Profils Hardehausen (verändert nach ZEJSCHWITZ 1988)

Die Eismassen der Saale-Vereisung haben das südliche Eggegebirge nicht überfahren (SKUPIN et al. 2003). Jedoch überzieht der während des Weichselglazials angewehrte Löss als Lössfließerde besonders die ost- und südostexponierten Mittel- und Unterhänge (ZEJSCHWITZ 1988).

Die Profilgrube des untersuchten Bodens Hardehausen liegt ca. 2 km südwestlich von Borlinghausen (Abb. 5 und 6) im Staatsforst Neuenheerse, 400 m ü. NN. Laut geologischer Karte (PREUBISCH GEOLOGISCHE LANDESANSTALT 1935) befindet sich der Profilstandort in der Terebratelzone des Unteren Muschelkalks/Wellenkalks. Sie setzt sich im Bereich des Hardehausener Waldes aus folgenden Schichten zusammen (STILLE & MESTWERDT 1935):

- Obere Terebratelbank: 0,08–0,5 m mächtig, grau bis rostbraun, teilweise schaumig, häufig aus platten Kalkgeröllen bestehend
- Zwischenschicht: 2,5–4 m mächtig, graue, vorwiegend mürbe Wellenkalke
- Untere Terebratelbank: 1,7–4 m mächtig, sehr fest, aus dichtem grauen Kalkstein, tritt im Gelände deutlich hervor

Im Hangenden würde die 15–20 m mächtige, dünn-schichtige, plattige Schicht aus Oberem Wellenkalk folgen. Diese tritt allerdings erst wenige hundert Meter weiter nördlich des Untersuchungsstandortes an die Oberfläche. Der im Liegenden der Terebratelzone befindliche Untere Wellenkalk (würde heute wahrscheinlich weiter untergliedert in Mittleren und Unteren Wellenkalk) steht nur wenige Meter entfernt,

unterhalb der Profilgrube flächendeckend an und besteht größtenteils aus dünn-schichtigen, grauen Mergelkalken mittlerer Festigkeit (STILLE & MESTWERDT 1935).

Auf den Kalksteinen der Terebratelzone haben sich im Hardehausener Wald überwiegend basenreiche Rendzinen mittlerer Entwicklungstiefe ausgebildet (ZEZSCHWITZ 1988). Im Bereich des Unteren Wellenkalks entstanden unterdessen flächendeckend flachgründige Terra fuscen, da der Mergelkalk trotz eines relativ hohen Carbonatgehaltes von ca. 90 % auf Grund seiner feinen Schichtung physikalisch sehr leicht verwittert. ZEZSCHWITZ (1988) postuliert auf Grund des Reliefs eine weitgehende Lössfreiheit und eine reine postglaziale Bodenbildung der Böden aus Unterem Wellenkalk der Scherfeder Scholle in Plateau- und steileren Hangpositionen.

Klima, Vegetation und Nutzung

Klimatisch zählt das südliche Eggegebirge zum subatlantischen Klimabereich (MÜLLER-WESTERMEIER et al. 2001). Die zur Profilgrube nächstgelegene Wetterstation befindet sich im nur ca. 2 km entfernten und 120 m tiefer gelegenen Willebadessen-Borlinghausen mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 862 mm/a (Mittelwert der Jahre 1961 bis 1990, DWD 2009). Dieser hohe Wert ist die Folge von Steigungsregen, der überwiegend aus westlicher Richtung an das Mittelgebirge herantransportiert wird. Die Niederschlagsverteilung zeigt zwei Maxima auf, eines im Sommer und eines im Spätherbst/Frühwinter (Abb. 7). Die nächstgelegene Klimastation befindet sich erst ca. 20 km vom Profilstandort entfernt in Bad Driburg (+192 m ü. NN), die dort gemessene Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,3 °C. Auf Grund der Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe nimmt ZEZSCHWITZ (1988) eine mittlere Jahrestemperatur von 7 °C für die Höhenlage von 400 m ü. NN im südlichen Eggegebirge an; mit den höchsten Temperaturen im Juli von 15,7 °C und den tiefsten im Januar von vermutlich -1 °C.

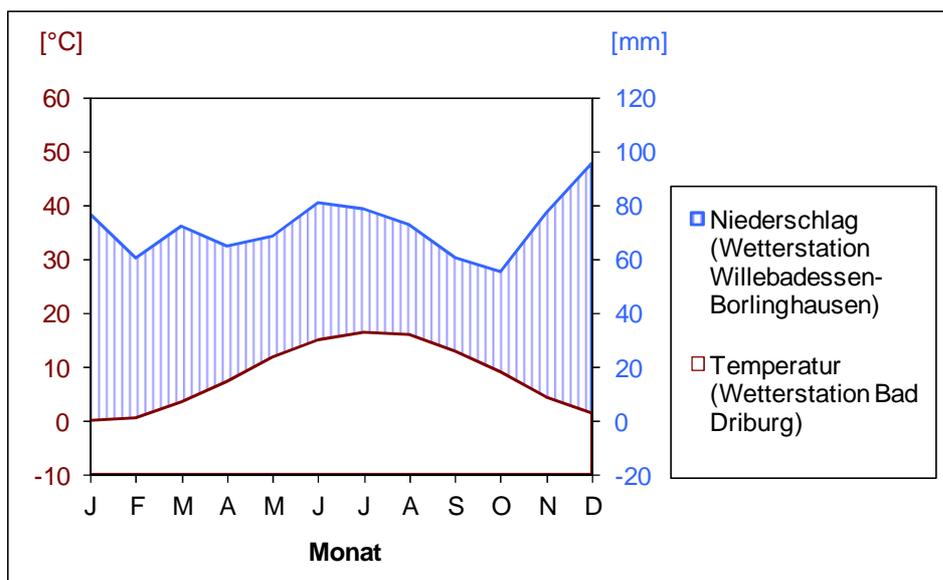


Abb. 7: Langjährige (1961–1990) Niederschlagswerte der Wetterstation Willebadessen-Borlinghausen und Temperaturwerte der Station Bad Driburg (DWD 2009)

Die potentiell natürliche Vegetation für den auf Kalkstein befindlichen Teil des Hardehausener Waldes mit geringem Lösseinfluss ist ein Perlgras-Buchen-Wald (GEMEINDEFORSTAMT WILLEBADESSEN 2009), wie er auch heute wieder am Standort vorzufinden ist.

Die erste Besiedlung der Umgebung des Hardehausener Waldes fand laut ZEJSCHWITZ (1988) vermutlich im 9. Jahrhundert statt, eine zweite Besiedlungswelle erfolgte im 12. Jahrhundert. In diese Zeit fällt auch die Gründung des Klosters Hardehausen, in dessen Besitz sich auch der Profilstandort befand. Eine Ackernutzung kann für diesen Bereich des Hardehausener Waldes nahezu ausgeschlossen werden. Das Kloster betrieb jedoch eine intensive Mast- und Hudewirtschaft und auch die umliegenden Gemeinden wie Borlinghausen hatten Huderechte. Wahrscheinlich kam es aber auf den verjüngungsfreudigen Unterkreide-Standorten nie zu einer vollständigen Entwaldung (ZEJSCHWITZ 1988).

3.3 Standort Göttinger Wald im Leinebergland

Lage, Geologie und Boden

Auf der Erhebung des Göttinger Stadtwaldes, einem Teilbereich des Göttinger Waldes, befinden sich drei weitere Profilstandorte (Göttinger Wald a bis c bzw. GOWa, GOWb und GOWc). In nur geringer Entfernung voneinander liegen sie am westlich ausgerichteten, hängigen Kulminationsbereich des Totenbergs, ca. 1,8 km südwestlich von Waake und ca. 7 km östlich von Göttingen (Abb. 8).

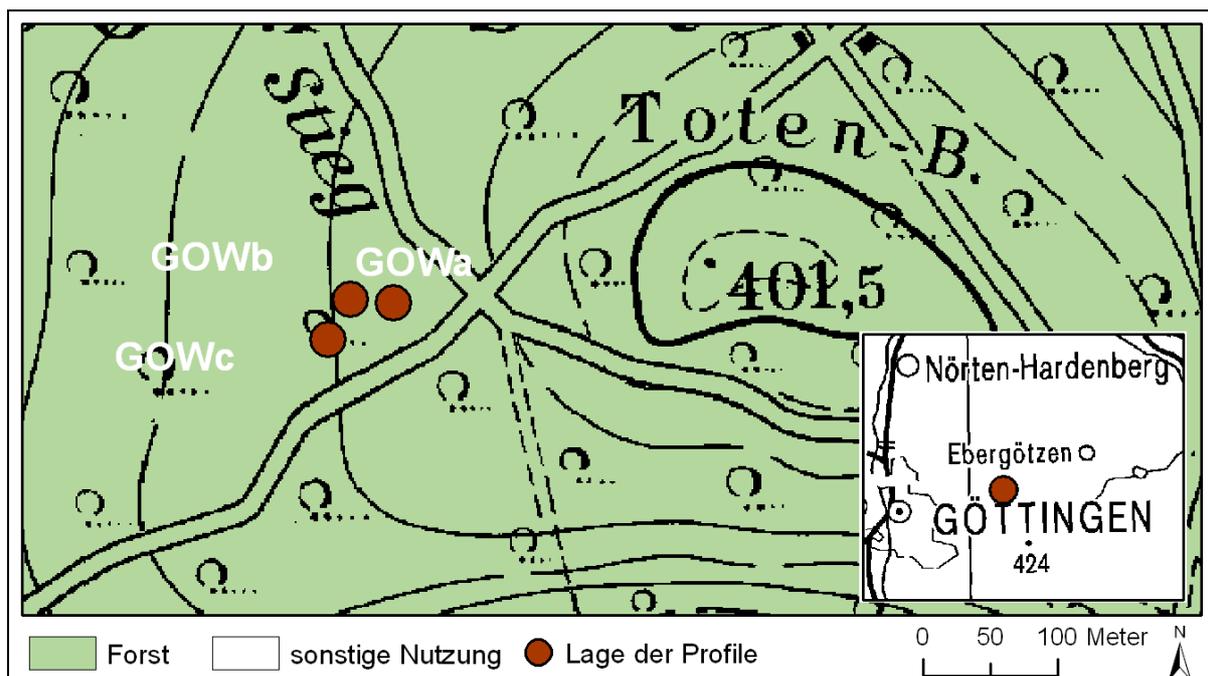


Abb. 8: Lage der Bodenprofile GOWa, b und c im Göttinger Wald im Leinebergland (Quellen: LGN 2005, BKG1998)

Der östlich von Göttingen gelegene Göttinger Wald bildet ein von Ost nach West verlaufendes ohrförmiges Plateau, das zum Leinetal hin geneigt ist und von Trockentälern durchschnitten wird (THÖLE & MEYER 1979). Das Muschelkalkplateau hebt sich um etwa 150 m vom Umland ab. Im östlichen Teil werden Höhen von bis zu 427,5 m ü. NN (Mackenröder Spitze) erreicht, bevor die Scholle an der Grenze zum Buntsandstein steil abfällt.

Der Göttinger Wald zählt zum Weser- und Leinebergland, das sich überwiegend aus Sedimenten des Mesozoikums aufbaut. Bereits während der Variszischen Gebirgsbildung war der Bereich um Göttingen ein Hochgebiet und wurde erst mit der Zechsteintransgression wieder zum Sedimentationsraum (NAGEL & WUNDERLICH 1976). Durch Hebungsphasen vom Oberen Jura bis hauptsächlich ins Tertiär hinein entstand ein Bruchfaltengebirge, das von zahlreichen Störungen und Verwerfungen durchzogen ist (HENNINGSEN & KATZUNG 2002). So entstand u.a. der von Nord nach Süd verlaufende Leinetalgraben, der relativ zu den angrenzenden Schollen um ca. 600 m abgesunken ist (NAGEL & WUNDERLICH 1976). Der Göttinger Wald befindet sich auf der Eichsfeldscholle, die am Rand des Leinetalgrabens abbricht und mehrere Nord-Süd verlaufende Störungszonen aufweist, die den Göttinger Wald teilweise durchziehen (ELBRACHT 2000). Trotz der Zerlegung des Leinetalgrabengebietes in zahlreiche einzelne Schollen sind deren Schichten fast ungestört (NAGEL & WUNDERLICH 1976).

Das Grundgerüst des heutigen Erscheinungsbildes des Göttinger Waldes, die Schichtstufen, wurde hauptsächlich durch die Hebungs- und Abtragungsvorgänge im Tertiär gebildet. Das hatte die Freilegung der Muschelkalkschichten zur Folge (THÖLE & MEYER 1979) (Abb. 9). Während des Pleistozäns fanden weitere Überformungen statt. Von den Eisvorstößen der letzten drei Vereisungen reichte nur die Elstervereisung bis auf ca. 20 km an das Arbeitsgebiet heran (LIEDTKE 1981). Das periglaziale Klima erzeugte ausgedehnte Solifluktsdecken auf den Muschelkalkflächen (THÖLE & MEYER 1979). Löss überzieht die Muschelkalkhochfläche als dünner Schleier mit Mächtigkeiten von meist unter 0,5 m (GEHRT & BOESS 1996). Größere Lössanwehungen finden sich nur an den südwestlich abfallenden Hängen (THÖLE & MEYER 1979).

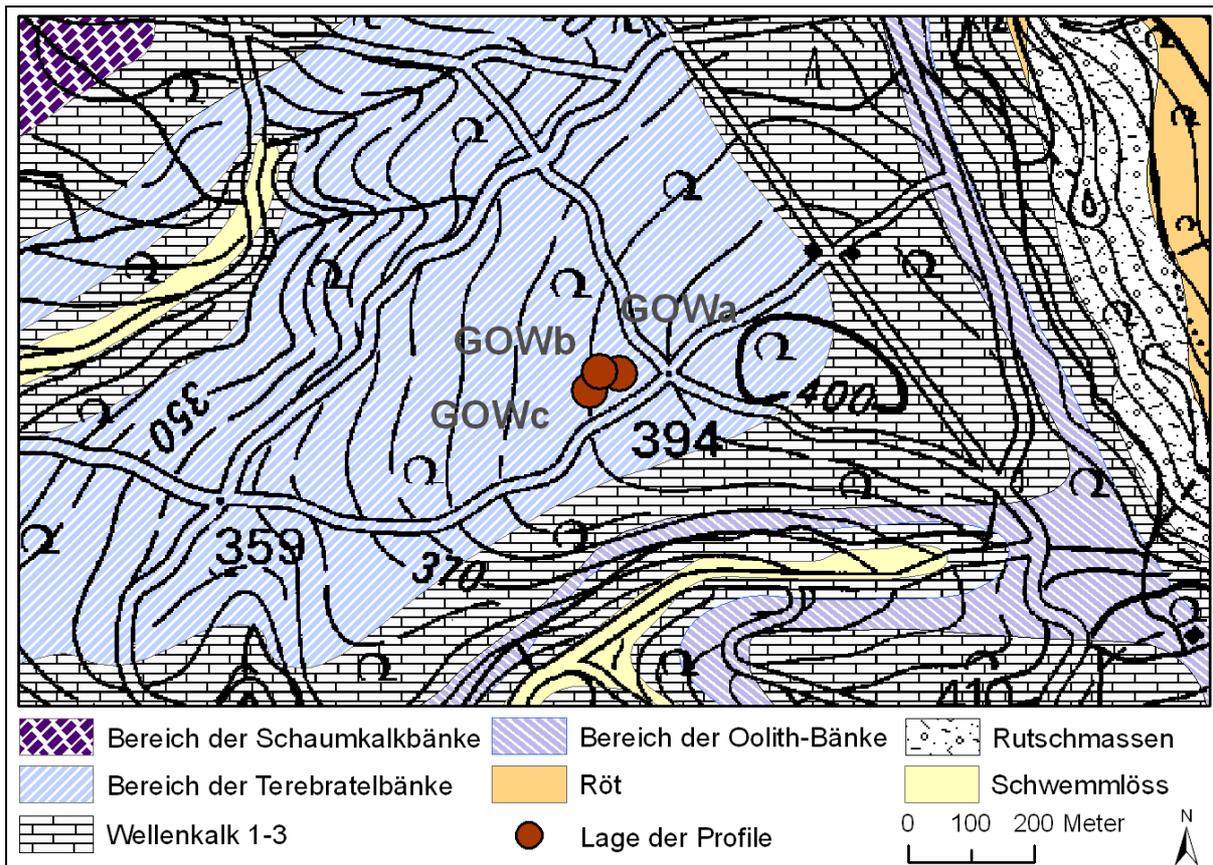


Abb. 9: Geologie und Lage der Profilstandorte im Göttinger Wald (LBEG 2009, LGN 2000a)

Die drei untersuchten Böden befinden sich alle im Unteren Muschelkalk im Bereich der Terebratelbänke, erst ca. 150 m südlich steht Wellenkalk an (Abb. 9). Der relativ harte Untere Muschelkalk nimmt den größten Teil des Plateaus ein, erst an den westlichen Randbereichen tritt Mittlerer und Oberer Muschelkalk auf (LBEG 2009, Blatt 4426 Ebergötzen Stand: 2000). Die Terebratelzone zeigt im Bereich des Göttinger Waldes folgende Abschnitte und Eigenschaften (ELBRACHT 2000):

- Obere Terebratelbank (0,8 m): im unteren Bereich faserig bis knauerig, im oberen Bereich häufig schill- und geröllführend und oolithisch
- Wellenkalkzwischenmittel (2,4 m): dünnplattiger, grauer Kalkstein mit faserig-welliger Schichtung, es können Ton- bis Mergeleinschaltungen von wenigen mm bis cm auftreten
- Untere Terebratelbank (2,8 m): dickbankiger, knaueriger, harter Kalkstein mit wulstigen Bankoberflächen, viele Hartgründe

Im Liegenden und Hangenden der Terebratelbänke schließen sich jeweils dünnbankige Wellenkalkhorizonte an (Tab. 1) (STEIN 1966, 1968). Untersuchungen an Böden im Unteren Muschelkalk von THÖLE & MEYER (1979) ergaben Carbonatgehalte der Kalksteine von bis zu 91 %. Der Dolomitgehalt lag deutlich unter einem Prozent (THÖLE & MEYER 1979, SCHEFFER et al. 1962).

Tab. 1: Gliederung des Unteren Muschelkalks in Südniedersachsen nach STEIN (1966, 1968)

Schaumkalkbänke	12 m	Unterer Muschelkalk (Wellenkalk) 100 bis 110 m
Wellenkalk 3	11 m	
Terebratelbänke	7 m	
Wellenkalk 2	30 m	
Oolithbänke	7 m	
Wellenkalk 1 (mit Basiskonglomeratbänken und Basisgelbkalk)	34 m	

Alle drei untersuchten Böden weisen unterschiedlich starken Lösseinfluss auf. Diese kleinräumigen Wechsel der Lössauflage sind typisch für den Göttinger Wald (GEHRT & BOESS 1996). Laut Bodenkundlicher Karte im Maßstab 1:25 000 (LBEG 2008) sollten sich an allen drei Profilstandorten flache Braunerden entwickelt haben. Eine Detailkartierung des ehemaligen Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (GEHRT 1993) zeigt ein differenzierteres Bild, wonach am Hang des Totenbergs hauptsächlich Terra fusca-Parabraunerden und Übergänge zu Braunerden zu finden sind.

Klima, Vegetation und Nutzung

Der Göttinger Wald gehört zum subatlantischen Klimabereich mit geringem subkontinentalen Einfluss (THÖLE & MEYER 1979). Die zu den Profilgruben nächstgelegene Wetterstation ist die Wetterwarte Göttingen. Mit 173 m ü. NN liegt sie ca. 216 m unterhalb des Untersuchungsraumes. Daher dürfte die Durchschnittstemperatur ca. 1 °C bis maximal 2 °C niedriger liegen (BLÜTHGEN & WEISCHET 1980). Der durchschnittliche Jahresniederschlag der Station Göttingen beträgt 645 mm (Mittelwert der Jahre 1961 bis 1990, DWD 2009). Der niederschlagsreichste Monat ist der Juni mit 81,3 mm (Abb. 10). Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 9,1 °C, mit den höchsten Temperaturen im Juli von 17,1 °C und den tiefsten im Januar von 0,3 °C. Die relativ niedrigen Jahresniederschläge und die leicht erhöhte Jahresamplitude von 16,8 °C (im Vergleich zu 15,9 °C in Osnabrück) sind ein Indiz für den zunehmenden kontinentalen Einfluss.

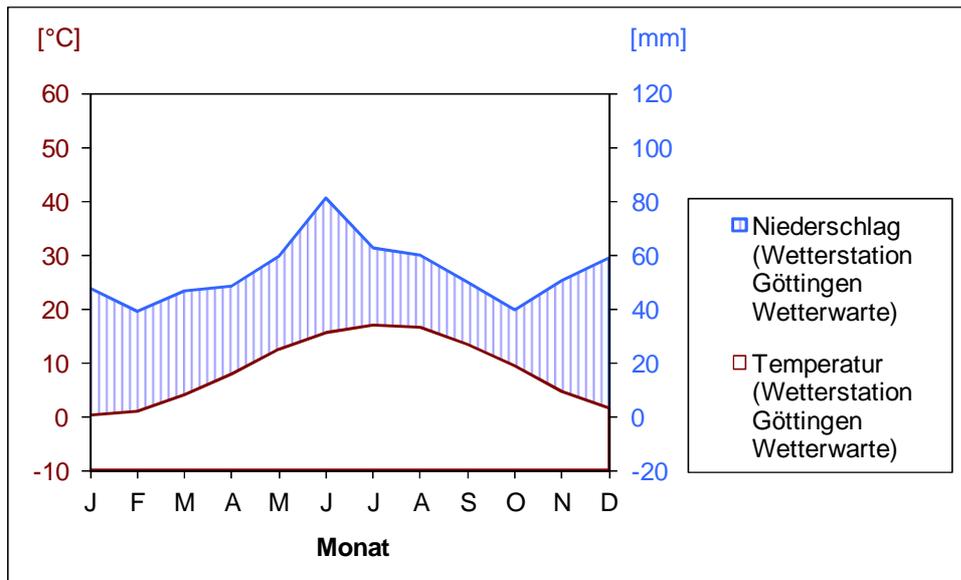


Abb. 10: Langjährige Niederschlags- und Temperaturwerte (1961–1990) der Wetterwarte Göttingen (DWD 2009)

Bereits in der Jungsteinzeit begann der Getreideanbau auf den Lössböden im Umkreis des Göttinger Waldes. Zu dieser Zeit herrschten Eichenmischwälder vor. Mit der Klimaveränderung im Subatlantikum setzte sich die Buche vermehrt durch (SEEDORF & MEYER 1992). Die im frühen Mittelalter verstärkt auftretende Besiedlung des Göttinger Raumes fand hauptsächlich auf den ackerbaulich besser nutzbaren Böden im Röt, Mittleren Buntsandstein und Mittleren Muschelkalk statt. Das Muschelkalkplateau des Göttinger Waldes blieb fast siedlungsfrei. Es setzte jedoch eine starke Nutzung in Form von Waldhude und Holzgewinnung ein. Der zunächst gemeinschaftlich genutzte, den Untersuchungsstandort einschließende Waldbereich zwischen Waake, Mackenrode und Roringen ging 1346 in den Besitz der Stadt Göttingen über. So blieb der Wald von einer völligen Abholzung verschont (DEPPE & TROE 1956). Auch SCHEFFER et al. (1962) berichten, dass der von Unterem Muschelkalk gebildete östliche Teil des Plateaus immer von Laubwald bedeckt gewesen ist. Allerdings wurde erst in der Mitte des 19. Jahrhunderts von Nieder- und Mittelwaldwirtschaft auf Hochwaldwirtschaft umgestellt (DEPPE & TROE 1956). Weite Teile der Hochfläche sind heute mit einem naturnahen Kalkbuchenwald bestanden. Der Untersuchungsstandort weist einen Kalkbuchen-Hochwald mit starker Naturverjüngung und größeren Anteilen von Ahorn auf.

3.4 Standort Röhringsberg im Eichsfeld

Lage, Geologie und Boden

Im Obereichsfeld im Landkreis Eichsfeld befinden sich zwei weitere Profilstandorte (Röhringsberg a und b bzw. RBa und RBb). Sie liegen 50 Meter voneinander entfernt

auf dem Röhringsberg, einer 487 m ü. NN liegenden plateauförmigen Erhebung, ca. 8 km südwestlich von Heiligenstadt (Abb. 11). Solche Hochflächen sind typisch für das westliche Obereichsfeld, sie bestehen aus Unterem Muschelkalk und erreichen Höhen zwischen 450 bis 500 m ü. NN. Die bis zu 270 m tiefer gelegenen Täler hingegen bauen sich aus Gesteinen des Buntsandsteins auf (TLUG 2007).

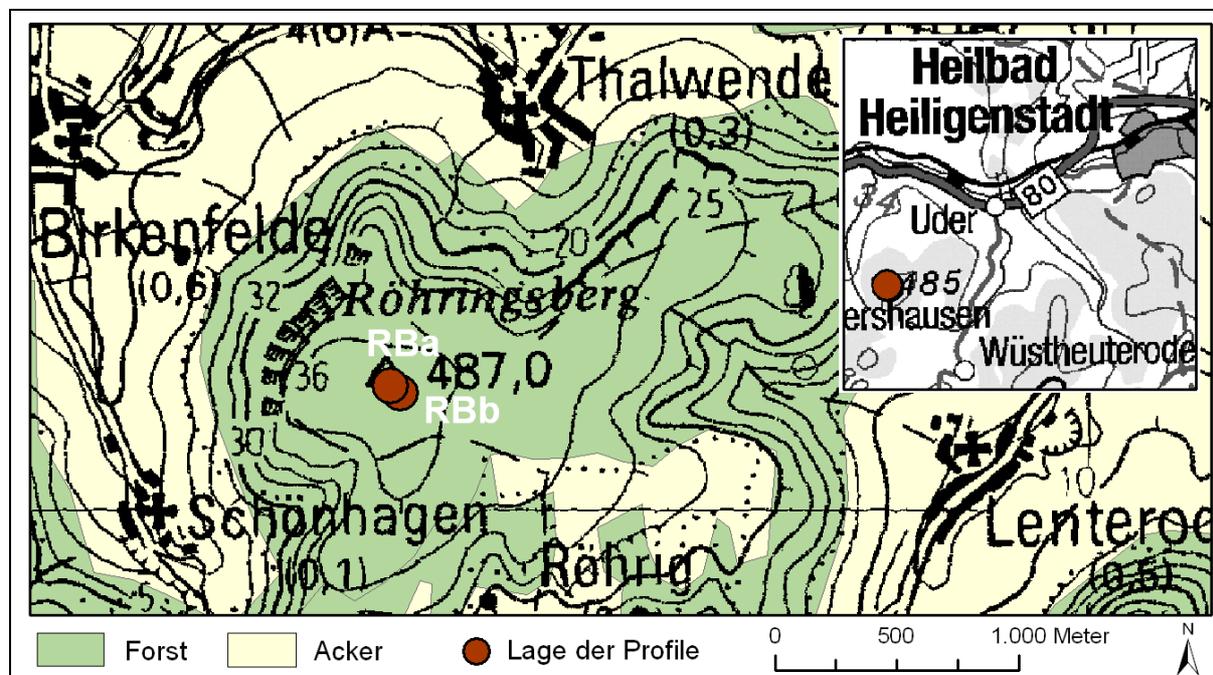


Abb. 11: Lage der Bodenprofile RBa und RBb auf dem Röhringsberg im Eichsfeld (Quellen: LGN 2000b, UBA 1990, BKG 2006)

Geologisch gehört das Eichsfeld zum Westrand des Thüringer Beckens, einer schüsselförmigen Synklinalstruktur, die von zahlreichen meist herzynisch verlaufenden Störungszonen durchzogen ist (RÖHLING & NOLTE 2002). Während des Karbons war das Eichsfeld Teil des Variszischen Gebirges. Dessen Abtragungsschutt wurde insbesondere im Perm in Innensenken und im Vorland abgelagert (Rotliegendes). Auf diese Festlandsphase erfolgte eine lange Absenkungsphase des Eichsfeldes als Teil des Germanischen Beckens. Das Gebiet wurde Sedimentationsraum für die marinen, als auch festländischen Sedimente des Zechsteins und der Trias (PATZELT 1994). In der nachfolgenden Zeit war das Obereichsfeld überwiegend festländisch geprägt. Sedimente des Keupers sind nur noch vereinzelt in Grabenzonen vorhanden (z. B. Eichenberg-Saalfelder Graben). Die Schichten des Juras und der Kreide fehlen heute weitestgehend (GERLACH et al. 1985). PATZELT (1994) vermutet, dass diese Schichten teilweise schon in der Kreidezeit vor dem Cenoman abgetragen wurden, als Folge der saxonischen Gebirgsbildung, die eine erste Schollenhebung erzeugte. Der hier im Focus stehende Röhringsberg ist Teil der Eichsfeldscholle, die durch mehrere Störungszonen begrenzt wird: Ohmgebirgs-Grabenzone im Südosten, Leinetal-Graben im Westen, Südharz-Monoklinale im Norden und die Eichenberg-Saalfelder Störungszone im Süden (FRANKE 2009). Im Tertiär setzten weitere Hebungsvorgänge ein. Die dadurch hervorgerufenen Abtragungsvorgänge setzten sich bis ins Pleistozän

fort. Flüsse und Bäche schnitten sich in die ehemals ebene Fläche bis in den Buntsandstein ein und formten das heutige stark zertalte Erscheinungsbild des Obereichsfeldes (FREYBERG 1960). Tertiäre Sedimente sind daher in Nordwest-Thüringen ebenfalls nicht erhalten (PATZELT 1994).

Im Pleistozän drangen die Eismassen der Elster-Eiszeit bis ins Thüringer Becken vor, das Obereichsfeld war jedoch währenddessen und in den folgenden Eiszeiten immer Periglazialgebiet (LIEDTKE 1981). Die Bildung von talwärts gerichteten Fließerden und Solifluktionsschuttdecken war die Folge (PATZELT 1994). Laut Geologischer Karte 1:25 000 Blatt 4626 (TLUG 2007, kartiert von Moesta, F. 1878 und Pröscholdt, H. & Zeise, O. 1902) hat Löss nur eine geringe Verbreitung im Obereichsfeld und findet sich vornehmlich in Tallagen. Eine Arbeit von BÖHME (2004) und eigene Kartierarbeiten zeigen jedoch, dass auch die Höhenzüge einen Lössschleier aufweisen.

Die zwei untersuchten Bodenprofile auf dem Röhringsberg befinden sich auf Kalkstein des Unteren Muschelkalks im Bereich der Terebratelbänke (Abb. 12). Die Abfolge der Schichten im Unteren Muschelkalk ist mit der im Göttinger Wald (Tab. 1) vergleichbar und erreicht eine Mächtigkeit von mindestens 95 Metern (PATZELT 1994).

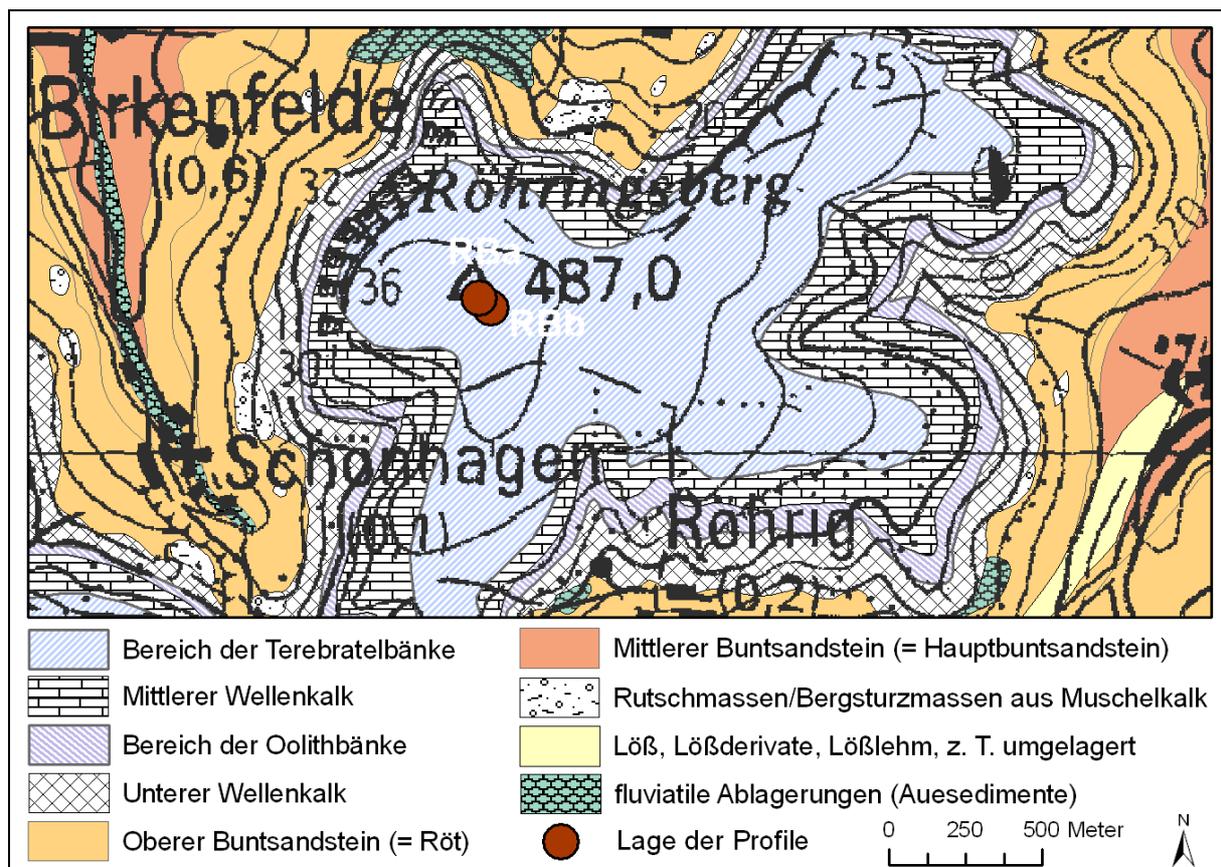


Abb. 12: Geologie und Lage der Profilstandorte auf dem Röhringsberg (LGN 2000b, TLUG 2007)

Der Bereich der Terebratelbänke kann, wie an den Untersuchungsstandorten Hardehausen und Göttinger Wald, in drei Hauptzonen unterteilt werden. Ein ca. 9 km

vom Standort entferntes geologisches Profil bei Bernterode weist folgende Mächtigkeiten und Eigenschaften auf (PATZELT 1996):

- Obere Terebratelbank (~2,5 m): häufiger Wechsel zwischen Arenit (Kalkstein aus Rundkörperchen in Sandkorngröße) und Lutit (Schlammkalk), letztere oft als Hartgründe ausgebildet; häufig fossilführende oolithische oder pseudo-oolithische Kalksteinlagen (größtenteils Muscheln, Schnecken und Crinoiden)
- Zwischenmittel (entspricht dem Wellenkalk, ~2,8 m): meist dünn unebenplattige, etwas mergeligere Kalksteine
- Untere Terebratelbank (~2,8 m): im Wechsel Lutit und Arenit, oft Hartgründe im Lutit

Die Terebratelzone zeigt im gesamten nordwestlichen Thüringen eine ähnliche Zusammensetzung und eine Mächtigkeit von meist 7 bis 8 Metern auf (PATZELT 1996). Die genaue Position der zwei Bodenprofile innerhalb der drei Hauptzonen der Terebratelbänke ist nicht bekannt.

Über die Böden am Standort liegen Informationen in Form der bodengeologischen Konzeptkarte im Maßstab 1:50 000 vor. Ihr ist zu entnehmen, dass am Profilstandort stark steiniger Lehm aus Sedimenten des Unteren Muschelkalks vorzufinden ist (TLUG 2000). Bodentypen werden nicht genannt.

Klima, Vegetation und Nutzung

Die Profile auf dem Röhringsberg liegen 486 m (RBa) bzw. 485 m (RBb) ü. NN auf einer Bergkuppe. Die nächstgelegene Wetterstation befindet sich ca. 7 km entfernt auf 447 m ü. NN in Heiligenstadt-Kalteneber. Aufgrund der ähnlichen Höhenlage dürften die klimatischen Verhältnisse mit dem Untersuchungsstandort vergleichbar sein. Die Niederschläge fallen, meist aus westlicher Richtung kommend, relativ gleichmäßig verteilt mit leichten Niederschlagsspitzen im Juni und Dezember und erreichen im Mittel 738 mm pro Jahr (Mittelwert der Jahre 1961 bis 1990, DWD 2009). Temperaturdaten liegen von der Station Leinefeld vor. Allerdings ist sie 20 km vom Röhringsberg entfernt und liegt mit 356 m ü. NN 130 m niedriger als die beiden Profilstandorte. Daher dürften die tatsächlichen Temperaturen am Standort insgesamt etwas niedriger (maximal -1,3 °C) ausfallen (BLÜTHGEN & WEISCHET 1980). Die Jahresdurchschnittstemperatur an der Station Leinefeld ist mit 7,5 °C die niedrigste der fünf Untersuchungsstandorte. Die Jahresamplitude beträgt 17,1 °C. Im Vergleich zum Göttinger Wald ist sie um 0,3 °C höher. Die niedrigste Temperatur wird im Januar mit -1,2 °C erreicht, die höchsten Temperaturen werden im Juli und August mit 15,9 °C gemessen (Abb. 13).

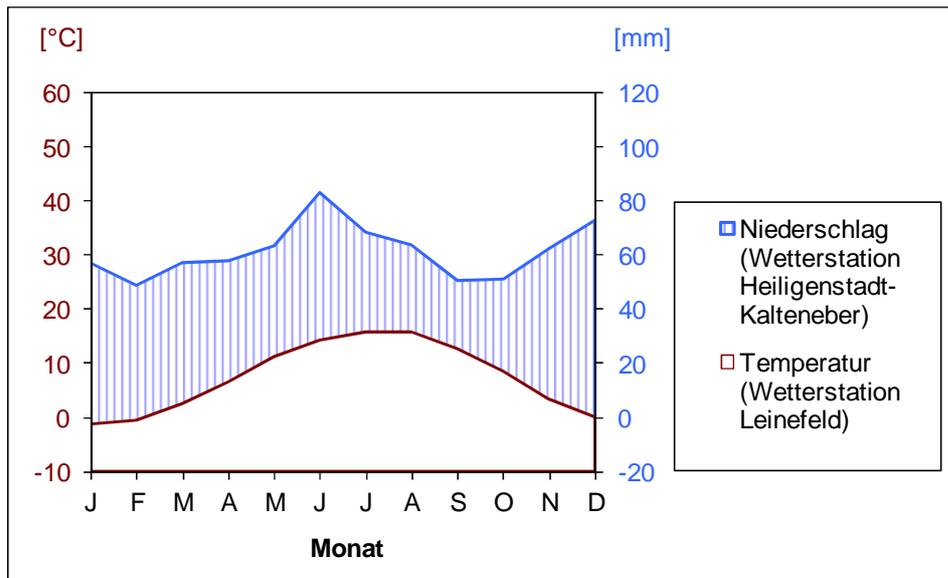


Abb. 13: Langjährige (1961–1990) Niederschlagswerte der Wetterstation Heiligenstadt-Kalteneber und Temperaturwerte der Station Leinefeld (DWD 2009)

Die potentiell natürliche Vegetation des Eichsfeldes besteht aus Rotbuchen- und Rotbuchenmischwäldern mit hohem Eichenanteil (BRICKS 1993). Auch heute dominieren noch die Buchen an der Baumartenverteilung (FORSTAMT HEILIGENSTADT 2009). Die Waldflächen beschränken sich jedoch meist auf Hänge und Kuppen, während die Tallagen überwiegend als Acker- und Grünland genutzt werden. Der Röhringsberg ist heute vorwiegend mit Laubmischwald bestockt, am Untersuchungsstandort finden sich Buchen, Eichen und Ahorn. Eine Besiedlungsphase des Plateaus ist nicht bekannt, dennoch wurde das Plateau flächenweise im ausgehenden Mittelalter gerodet (FRITZE 2009). Der Grund war wahrscheinlich eine Glashütte, die um 1545 bei Röhrig betrieben wurde und neben Wasser und quarzreichem Sand auf Holz als Brennstoff angewiesen war (MÜLLER 1973). Das Glasmachergewerbe war im Eichsfeld weit verbreitet und hatte einen hohen Holzbedarf von ca. 2000–3000 Festmetern pro Hütte und Jahr (FRITZE 2009). Erst um 1910 wurde mit der Wiederaufforstung des Plateaus begonnen, welches bis dahin wohl überwiegend als Viehweide genutzt wurde (RIETHMÜLLER 2009).

3.5 Standort Holzkirch auf der Schwäbischen Alb

Lage, Geologie und Boden

Der fünfte Standort (Holzkirch bzw. HOLZ) befindet sich auf der Schwäbischen Alb in der Nähe von Holzkirch im Alb-Donau-Kreis (Abb. 14). Das Pedon liegt in der Lonetal-Flächenalb, einer welligen, meist ackerbaulich genutzten Hochfläche, die von Westen nach Osten von 640 m bis auf 510 m ü. NN Höhe abfällt (BINDER 1988). Sie

besteht größtenteils aus Massenkalken, die teilweise von tertiären und quartären Ablagerungen überdeckt sind (SCHALL 2002).

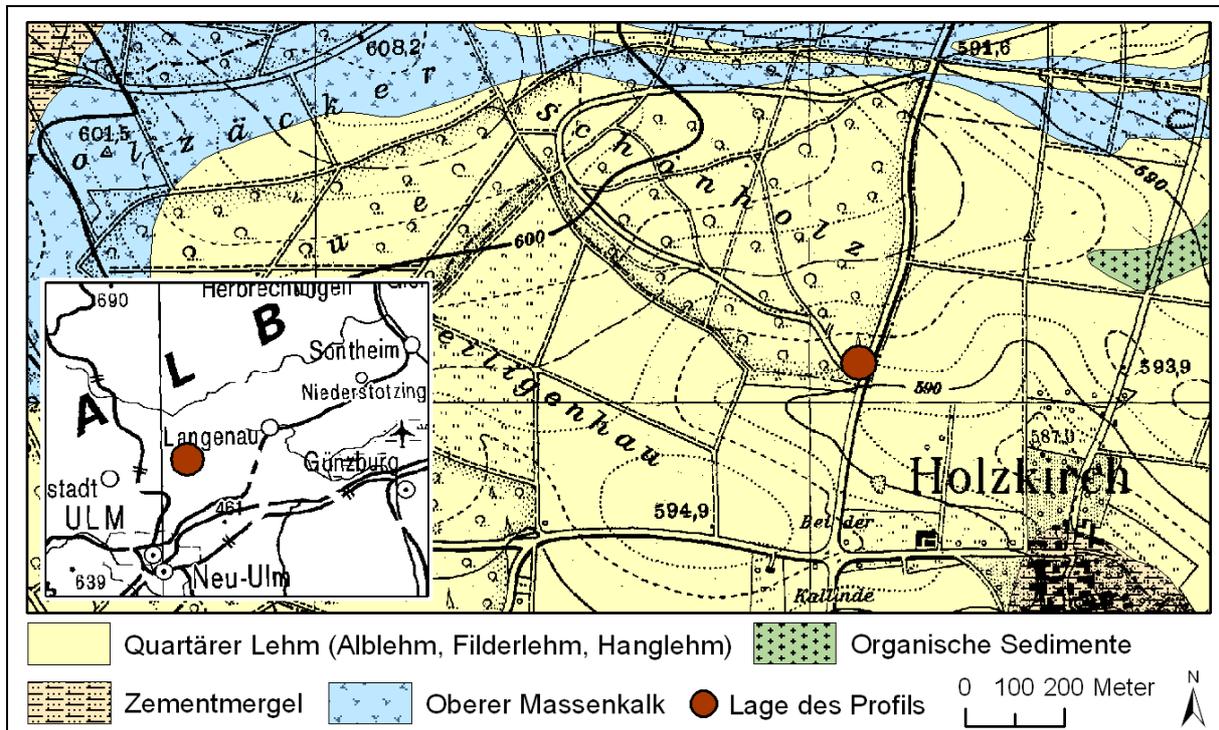


Abb. 14: Lage und Geologie des Bodenprofils Holz Kirch (HOLZ) auf der Schwäbischen Alb nahe Holz Kirch (Quellen: LGRB 1997, BKG 1998, LV-BB 1989)

Die Schwäbische Alb ist ein etwa 200 km langes und 40 km breites Mittelgebirge. Sie zählt zur süddeutschen Schichtstufenlandschaft, die sich hauptsächlich aus mesozoischen Sedimenten aufbaut. Die Schichtstufen wurden im Tertiär, eventuell auch schon in der Kreidezeit, im Zuge der Entstehung des Oberrheingrabens angehoben und leicht schräg gestellt (HENNINGSEN & KATZUNG 2002). Die unterschiedliche Verwitterungsstabilität der mesozoischen Sedimente führte zur Ausbildung der Schichtstufen. Die harten Kalke des Juras bildeten den ausgeprägten Stirnhang (Albtrauf) der Schwäbischen Alb. Die Schichten fallen leicht nach Osten und Südosten ein und gehen sanft ins Alpenvorland über (BLEICH et al. 1987).

Bereits gegen Ende des Juras und während der Kreide und des frühen Tertiär unterlag die Schwäbische Alb der festländischen Verwitterung und Abtragung. In dieser Zeit wurden u.a. Böhnerze gebildet: fossile, eisenhaltige Bodenbildungen aus Relikten der Kalkverwitterung, die einst eine flächenhafte Ausbreitung hatten, durch Erosion aber häufig nur noch in Spaltenfüllungen erhalten geblieben sind (GEYER & GWINNER 1984). Eine weitere verwandte fossile Kalkverwitterungsbildung sind aluminium- und eisenreiche, kaolinitische, braune und rote Bolustone. Beide Formen sind laut SCHALL (2002) auf der Flächenalb um Holz Kirch vertreten. Weitere Ablagerungen in diesem Gebiet sind im späten Tertiär abgelagerte Meeresmolassen und Kalkgerölle (Jura-nagelfluh), die teilweise Feuersteingerölle (Verwitterungsrückstand der Jurakalke) enthalten (SCHALL 2002).

In den Kaltzeiten des Pleistozäns war die Schwäbische Alb meist Periglazialbereich (GEYER & GWINNER 1984). Lediglich für die Westalb kann eine Vergletscherung in der Riß-Eiszeit angenommen werden (HANTKE 1978). Die intensive Frostverwitterung im eiszeitlichen Klima hat auf den Hochflächen Schuttdecken entstehen lassen, wobei diese vorwiegend an Hängen und Talrändern größere Mächtigkeiten erreichen. In der unmittelbaren Umgebung von Holzkirch sind keine Ablagerungen verzeichnet (LGRB 1997). Residualtone aus der Kalksteinverwitterung erreichen auf der Flächenalb stellenweise mehr als 1 m Mächtigkeit, deren Bildungszeitraum wird von KÖSEL (2002) hauptsächlich in die pleistozänen Warmzeiten gestellt. Löss und Lösslehm aus dem Würm und teilweise auch aus dem Rißglazial überlagern an vielen Stellen die Schwäbische Alb und erreichen Mächtigkeiten von wenigen Dezimetern bis Metern (HENNINGSEN & KATZUNG 2002). Größere Lössmächtigkeiten werden auf der Flächenalb erreicht, allerdings führten solifluidale und kryoturbate Prozesse schon während der Ablagerung zu einer Vermischung mit den liegenden Substraten. Häufig geht daher der Lösslehm an seiner Basis in Residualton über (KÖSEL 2002).

Die hydrogeologischen Verhältnisse des Lonetals sind geprägt durch Karsterscheinungen, die zu einer raschen Versickerung von Oberflächenwasser führen (SCHALL 2002). So treten z. B. in der Umgebung von Holzkirch zahlreiche Dolinen auf (LGRB 1997).

Der geologischen Karte 1: 25 000 (Blatt 7425 Lonsee) ist zu entnehmen, dass am Profilstandort Holzkirch Lösslehm ansteht, der verbreitet von Residualton unterlagert ist (LGRB 1997). Nähere Auskunft über die Schichtenfolge gibt ein geologischer Schnitt ca. 1,75 km nördlich der Profilgrube (LGRB 1997):

- Verschwemmungssediment (qvs): durch ackerbauliche Nutzung erodiertes schluffiges, schwach humoses Bodenmaterial in Karstsenken und Trockentälern, teilweise auch pleistozäne-periglaziale Ablagerungen
- Zementmergel-Formation – Zwischenkalke (ZK) der Oberjura: Kalkstein, bankig, grau bis gelblich-braun, rau brechend, scherbilg verwitternd
- Oberer Massenkalk (joMo): Kalkstein, oft mergelreich, ungeschichtet, hellgrau, z.T. als Stromatolith- oder Schwammkalk ausgebildet, mit zwischengeschalteten Riffschuttbänken, lokal zuckerkörnig und dolomitisch
- Unterer Massenkalk (joMu): Kalkstein, feinsparitisch, ungeschichtet, sehr hart, oft vertikal geklüftet und würfelig brechend, hellgrau, lokal zuckerkörnig und dolomitisch

Die geologische Karte gibt keine Auskunft über das Gestein im Liegenden des Lösslehms der Profilgrube. Durch die freundliche Unterstützung von RICHTER (2010) konnte der leicht dolomitisierte Kalkstein anhand eines Anschliffs dem Oberen Massenkalk zugeordnet werden.

Auf den Carbonatgesteinen des Oberjuras haben sich im Blattgebiet Lonsee 7425 sowohl Rendzinen, als auch Terra fuscen aus Residualton entwickelt. Da sie Mächtigkeiten von mehreren Dezimetern aufweisen, gehen sowohl KÖSEL (2002), als

auch HEMME (1970) davon aus, dass sie maßgeblich bereits während der pleistozänen Warmzeiten gebildet worden sind. Durch äolische Komponenten fand meist eine Verdünnung des Tongehaltes in den ersten Dezimetern statt. KÖSEL (2002) beschreibt zudem, dass Terra fusca häufig von äolisch beeinflussten Fließerden der Jüngeren Tundrenzeit überlagert wurden, sog. Terra fusca-Braunerden oder Braunerden über Terra fusca. Diese wurde durch die starke ackerbauliche Nutzung im Mittelalter teilweise wieder erodiert. Auf den Lösslehmstandorten der Flächenalb haben sich Parabraunerden ausgebildet, örtlich treten auch Parabraunerden über Terra fusca auf (KÖSEL 2002). Laut der Bodenübersichtskarte 1:200 000 (großmaßstäbigere Kartenwerke liegen für das Blattgebiet noch nicht vor) befindet sich am Profilstandort eine Parabraunerde aus Löss und Lösslehm (LGRB 2006).

Klima, Vegetation und Nutzung

Der Profilstandort Holzkirch liegt 592 m ü. NN auf der Flächenalb. Dieser Standort zeigt bereits einen deutlichen kontinentalen Einfluss auf. Die zum Profilstandort nächstgelegene Wetterstation befindet sich im 73 m höher gelegenen und ca. 6 km entfernten Lonsee-Ettlenschieß, 665 m ü. NN. Im Jahr fällt hier 900 mm Niederschlag, der überwiegende Anteil im Sommerhalbjahr (Mittelwert der Jahre 1961 bis 1990, DWD 2009). Angaben zur Temperatur liegen von der Station Ulm vor (Abb. 15), sie befindet sich ca. 17 km vom Standort Holzkirch entfernt und 21 m tiefer. Die Jahresdurchschnittstemperatur in Ulm beträgt 7,9 °C mit den höchsten Werten von 17,4 °C im Juli und den niedrigsten im Januar mit -1,7 °C (DWD 2009). Die Jahresamplitude ist mit 19,1 °C die höchste aller Untersuchungsstandorte und kennzeichnend für die zunehmende Kontinentalität. Die vorherrschende Windrichtung ist Südwest (SCHALL 2002).

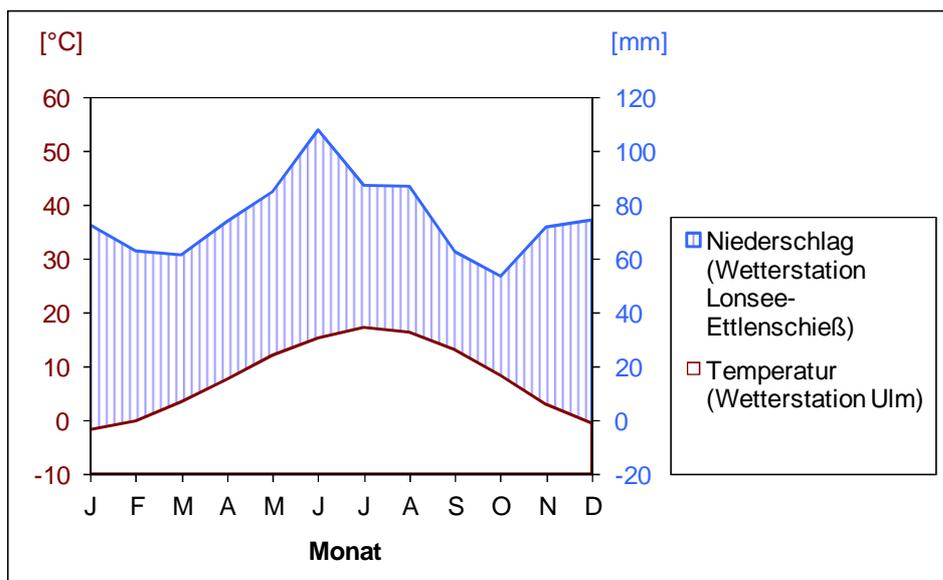


Abb. 15: Langjährige Niederschlagswerte (1961–1990) der Wetterstation Lonsee-Ettlenschieß und Temperaturwerte der Station Ulm (DWD 2009)

Ursprünglich war die Schwäbische Alb bewaldet, mit der Buche als dominante Baumart (BLEICH et al. 1987). Bereits im Neolithikum, zur Zeit der Lilienbandkeramik, begann der erste Ackerbau auf der Schwäbischen Alb. Bis Mitte des 14. Jahrhunderts verringerte sich der Waldbestand beständig. Der bestehende Bestand wurde intensiv genutzt (Feuerholzgewinnung aus Stockausschlägen). Im 16. Jahrhundert wurden zunächst Kiefern angepflanzt, Aufforstungen wurden seit dem 17. Jahrhundert durchgeführt (BLEICH et al. 1987). Die Flächenalb wird heute überwiegend landwirtschaftlich genutzt, in den Wäldern dominiert wieder die Buche (SCHALL 2002).

Der Forst Schönholz (Staatsforst), indem sich das Bodenprofil Holzkirch befindet, ist nach Aussage von Revierleiter Herr Lönnecker nie ackerbaulich genutzt worden. Während des Mittelalters ist von einer Mittelwaldwirtschaft und von intensiver Streuentnahme auszugehen. Vor ca. 150 Jahren wurde der Forst in Hochwald überführt und ist mit standorttypischen Baumarten (u.a. Buche, Eiche) bewachsen (LÖNNECKER 2009).

4 Methoden

4.1 Geländearbeiten und Probenaufbereitung

An den Untersuchungsstandorten wurden Profilgruben bis zum Ausgangsgestein der Bodenbildung angelegt und nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 angesprochen (AG BODEN 2005). Pro Bodenhorizont wurden ca. 3 kg Feinbodenmaterial entnommen und, sofern möglich, auch ungestörte Proben mittels Stechzylinder sowie Proben für die Dünnschliffherstellung. Zusätzlich erfolgte aus den steinreichen Horizonten die Entnahme von ca. 8 kg Grobbodenmaterial. Der Anteil an Grobboden wurde in Vol.-% abgeschätzt. In den aus Verwitterungsschutt bestehenden C-Horizonten wurde zusätzlich in sechs Böden (SBa, SBb, HARD, GOWa, GOWb und GOWc) die Fraktion < 2 mm beprobt. Es handelt sich um wenig verwittertes carbonatreiches Material, das im Folgenden als „Feinmaterial“ bezeichnet wird, um es von den kalkfreien Bodenhorizonten zu unterscheiden. Die Bodenfarbe wurde mittels Munsell-Farbtafel bestimmt.

Von jeder entnommenen Feinbodenprobe wurde eine ein Kilogramm schwere und auf < 2 mm abgeseibte Mischprobe erstellt. Pflanzenreste wurden entfernt, die Proben luftgetrocknet und deren Wassergehalt bei 105 °C bestimmt. Alle chemischen Analysen und die Korngrößenbestimmung wurden an diesem Material durchgeführt. Die Grobbodenfraktion wurde sorgfältig von anhafteten Boden und Verwitterungskrusten befreit. Um Informationen über das unverwitterte und unveränderte Ausgangsgestein zu erhalten, wurden nur Kalksteine mit mehr als 1,8 cm Durchmesser für die weiteren Analysen verwendet.

4.2 Physikalische Analysen

Die Wasserhaltekapazität und die Porengrößenverteilung wurden an Stechzylindern in fünffacher Wiederholung pro Horizont nach DIN ISO 11274 (Unterdruck- und Hochdruckmethode) untersucht (DIN E.V. 2000). Gemessen wurde bei pF 1,8, 2,5 und 4,2. Gleichzeitig erfolgte die Ermittlung der Lagerungsdichte (dB) nach DIN ISO 11272 und der Dichte der Festsubstanz (dF) mittels Luftpyknometer (DIN e.V. 2000). Die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) wurde nach DIN ISO 19683-9 je nach Wasserdurchlässigkeit mit fallendem oder konstantem Druckhöhenunterschied gemessen (DIN E.V. 2000). Dazu wurden 10 bis 15 Stechzylinder pro Horizont entnommen. Zur Bestimmung der Dichte der Kalksteine wurde deren Gewicht durch das in Wasser verdrängte Volumen geteilt.

Die Korngrößenbestimmung erfolgte als Doppelbestimmung am luftgetrockneten Feinboden der Mineralbodenhorizonte, am Feinmaterial des Verwitterungsschuttes und am Kalkstein nach vorhergehender Carbonatzerstörung. Die Kalksteine wurden

vorab in einem Backenbrecher auf 2 bis 4 mm zerkleinert, um ausreichend Oberfläche zu erzeugen. Erste Untersuchungen zeigten, dass schon geringe Carbonatgehalte eine stark flokkulierende/verkittende Wirkung haben und besonders den Tongehalt um mehrere Prozentpunkte erniedrigen. Daher wurde an allen Proben, einschließlich des Feinbodens, mit einem Carbonatgehalt von mehr als 0,1 % eine Carbonatzerstörung durchgeführt. Zur Zerstörung der Carbonate wurde ein mit Eisessig auf pH 4,8 eingestellter 2-molarer Natriumacetatpuffer verwendet (SCHLICHTING et al. 1995). Die Proben wurden auf maximal 40 °C erhitzt, um Tonmineralveränderungen auszuschließen. Die Pufferlösung wurde ausgetauscht bis keine pH-Wertänderung mehr eintrat. Der Zeitaufwand betrug z.T. mehrere Wochen. Nach Abschluss der Carbonatzerstörung wurden die Suspensionen mit Aqua dest. versetzt bis ein Leitwert von $< 600 \mu\text{S cm}^{-1}$ erreicht wurde, zentrifugiert, dekantiert und der Rückstand weiterbehandelt.

Die Korngrößenanalyse erfolgte nach VDLUFA (2002) durch Nasssiebung der Sandfraktionen und Pipettanalyse nach Köhn nach vorheriger Humuszerstörung mit Wasserstoffperoxid und Dispergierung mit Natriumpyrophosphat. Die Einwaage der carbonatfreien Proben betrug in Abhängigkeit vom Tongehalt 5 bis 10 g. Im Mittel betrug die Abweichungen innerhalb einer Doppelbestimmung 1 Prozentpunkt für die Korngrößen Ton bis Grobschluff, in der Sandfraktion lagen sie deutlich niedriger. Bei einer Abweichung von mehr als 2,5 Prozentpunkten innerhalb einer Korngrößenfraktion einer Doppelbestimmung erfolgte eine Wiederholung der Analyse. Der durch die Ungleichbehandlung von carbonatfreien und -haltigen Proben zusätzlich eingebrachte Analysenfehler ist vernachlässigbar, wie ein Methodenvergleich zeigte.

Abgeleitet aus der Körnungssummenkurve dienen verschiedene Maßzahlen zur genaueren Charakterisierung der Kornverteilung eines Horizontes und lassen damit im Horizontvergleich Aussagen über Schichtwechsel oder Wechsel im Ablagerungsmilieu zu. Der Median (Quartile Q_2 bzw. Md) gibt den Korndurchmesser bei 50 % Massenanteil an. Der Sortierungskoeffizient nach TRASK (1932) ergibt sich aus den Quartilen Q_3 und Q_1 bei 75 und 25 %: $So = \sqrt{Q_{75} / Q_{25}}$ und ist ein Maß für die Gesamtbreite der Korngrößenverteilung. Die mathematische Berechnung dieser Quartile aus der Körnungssummenkurve wurde mit Origin 5.0 durchgeführt.

4.3 Chemische Analysen

Die Untersuchungen wurden als Doppelbestimmung an der luftgetrockneten Feinerde durchgeführt. Für die Bestimmung der Carbonate, des Gesamt-Kohlenstoffs und Gesamt-Stickstoffs wurden die Bodenproben auf eine Korngröße $< 63 \mu\text{m}$ gemahlen und bei 100 °C getrocknet.

Die Bestimmung des **pH-Wertes** erfolgte nach VDLUFA Methode A 5.1.1 in Suspensionen der Böden mit Calciumchlorid-Lösung 0,01 M, Kaliumchlorid-Lösung 1 M und mit H₂O dest. im Verhältnis 1 : 2,5 (VDLUFA 1991).

Der Gesamt-Kohlenstoffgehalt (C_t) wurde nach DIN ISO 10694: 1996-08 durch trockene Verbrennung bei 1200 °C mit einem Gerät zur Elementaranalyse der Firma ELTRA, Typ CS-500 gemessen (DIN e.V. 2000).

Am TIC-Modul dieses Gerätes erfolgte zudem die Bestimmung der Carbonatgehalte ($CaCO_3$) durch Carbonatzerstörung mittels 50%iger Phosphorsäure und anschließender infrarotspektrometrischer Detektion des anorganischen Kohlenstoffs (C_{anorg}): $CaCO_3 = C_{anorg} \times 8,333$. Der Gehalt des organischen Kohlenstoffs (C_{org}) wurde durch Differenzbildung rechnerisch ermittelt: $C_{org} = C_t - C_{anorg}$. Der **Humusgehalt** wurde durch Multiplikation des Anteils organischen Kohlenstoffs mit dem Faktor 1,72 berechnet (AG BODEN 2005).

Die Bestimmung des Gesamt-Stickstoffs (N_t) erfolgte nach DIN ISO 13878: 1998-11 durch trockene Verbrennung bei 950 °C mit einem Gerät zur Elementaranalyse der Firma LECO, Typ FP- 428 (DIN e.V. 2000).

Die Bestimmung der potentiellen Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) erfolgte nach BOWER (1955) bzw. nach BGR (1978) durch Hintausch mit Natriumacetat bei pH 8,2 und Rücktausch mit Ammoniumacetat bei pH 7. Die in der Rücktauschlösung gemessene Menge an Natrium entspricht der KAK_{pot} . Die Ergebnisse wurden auf absolut trockenen Boden (atro) bezogen.

Die **austauschbaren Kationen** Calcium, Natrium, Kalium und Magnesium wurden in einer zweiten Extraktion durch Austausch mit Ammoniumacetat bei pH 7 bestimmt (BOWER 1955, BGR 1978). Die Ergebnisse wurden auf atro bezogen. Bei carbonathaltigen Proben werden Carbonate durch die Austauschlösungen anteilig zerstört und Calcium freigesetzt. Dieses wird als austauschbares Calcium mitbestimmt, was zu Basensättigungen über 100 % führt. Bei den betroffenen Proben wurde deswegen das austauschbare Calcium rechnerisch aus der Differenz zwischen der KAK_{pot} und den übrigen austauschbaren Kationen bestimmt.

Die anteilige Carbonatzerstörung durch die Austauschlösungen hat bei Proben mit Carbonat-Anteilen dolomitischen Ursprungs eine Freisetzung von Magnesium zur Folge, das ebenfalls als austauschbares Magnesium mitbestimmt wird. Um diesen Fehler auszuschließen, wurde Magnesium zusätzlich in der Natriumacetat Hintausch-Lösung bei der Bestimmung der KAK_{pot} erfasst. Laut BOWER (1955) beträgt die Löslichkeit von Calcit und Dolomit in Natriumacetat nur ein Zehntel der Löslichkeit in Ammoniumacetat und die Löslichkeit von Dolomit im Natriumacetat ist ausreichend niedrig, um eine Bestimmung von austauschbarem Magnesium in dolomitischen Böden zuzulassen. Lag der Magnesiumgehalt im Extrakt zur Bestimmung der einzelnen Kationen signifikant höher als in der Natriumacetat Hintausch-Lösung, wurde dieses als Nachweis für das Vorhandensein von Dolomit gewertet. In diesen Fällen wurden die Ergebnisse der Messungen aus der Natriumacetat Hintausch-Lösung zur Ermittlung des austauschbaren Magnesiums an der Basensättigung herangezogen.

Die **pedogenen Oxide** aus Eisen (Fe_d), Aluminium (Al_d) und Mangan (Mn_d) wurden mit Dithionit-Citrat kalt extrahiert, die **aktiven Oxide** aus Eisen (Fe_o) und Aluminium

(Al_o) mit oxalsaurem NH₄-Oxalat (BLAKEMORE et al. 1981). Die Messung erfolgte an der ICP, die Ergebnisse wurden auf atro bezogen.

4.4 Röntgendiffraktometrie an Pulverpräparaten

Mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie kann der Mineralbestand der Proben genauer erfasst werden. Es wurden Pulverpräparate angefertigt und deren Quarzgehalte sowie ausgewählte Tonmineralgruppen gemessen.

Zur Herstellung der Pulverpräparate wurden luftgetrocknete und ansonsten unbehandelte Bodenproben (keine Humuszerstörung) aus Kapitel 4.1 verwendet. Carbonathaltige Proben aus dem Mineralboden, dem Feinmaterial und der Steinfraction wurden zunächst einer Carbonatzerstörung unterzogen (vgl. Kapitel 4.2, Carbonatzerstörung mittels Na-Acetatpuffer und anschließende Trocknung der Proben). Parallel wurde der Wassergehalt der Lösungsrückstände bestimmt. Den Proben wurde zunächst ein interner Standard in Form von 20 % Calciumfluorit (CaF₂, rein) zugemischt. Der Standard minimiert zahlreiche Einflussgrößen auf die Messung wie schwankende Intensitäten der Primärstrahlung, Intensitätsverluste durch Massenadsorption, schwankende Packungsdichten und Textureffekte (DOHRMANN & ECHLE 1997). Für reproduzierbare, quantitative Messungen müssen die Proben auf Korngrößen von ca. 5 bis 15 µm reduziert werden (MOORE & REYNOLDS 1997, BISH 1994). Um die erforderliche Feinheit zu erreichen, wurden je 2 g Probe mit 20 ml Ethanol als Kühlmittel 10 Minuten lang in einer McCroneTM-Mühle gemahlen. Es handelt sich um eine Vibrations-Labormühle, angetrieben von einem 1/30 PS Motor. Das Mahlgeschirr besteht aus einem Polypropylenbehälter gefüllt mit 48 in 8 Reihen aufeinander geschichteten Achatzylindern. Laut Herstellerangaben wird Biotit in dieser Mühle innerhalb dieser Zeit auf durchschnittlich 5 µm zerkleinert. Zur Überprüfung des Mahlergebnisses wurde Mahlgut über Siebe mit 20 µm Maschenweite gegeben, die Suspensionen passierten das Sieb problemlos. Es kann daher von einer erfolgreichen Reduzierung der gesamten Probe auf die erforderlichen Korngrößen ausgegangen werden. Nach dem Mahlvorgang wurden die Proben in Abdampfschalen überführt. Sobald sich das Ethanol verflüchtigt hatte, wurde die Probe aus den Schalen gekratzt und leicht gemörsert, um beim Trocknen entstandene Aggregate zu zerstören.

4.4.1 Quarzquantifizierung

Erstellen der Eichreihe

Zur Bestimmung der Quarzgehalte wurde eine Methode nach DOHRMANN & ECHLE (1997) gewählt. In 10er Schritten von 10 bis 90 % Quarzanteil wurde aus Quarz und Fluorit eine Eichreihe erstellt. Vor einer Messung wurde jede Probe auf eine Glasplatte

gegeben und erneut gemischt. Dann wurde das Pulver vorsichtig, in einen ca. 2 x 3 cm großen Aluminiumprobenträger überführt. Das Material wurde verteilt und mit der scharfen Kante einer Rasierklinge ganz leicht verdichtet, um eine Vorzugsorientierung der Tonminerale weitestgehend zu vermeiden (ZHANG et al. 2003). Überflüssiges Material wurde zunächst vorsichtig zur Seite geschoben, der Rest abgepusht. Zuletzt wurde die Oberfläche kurz mit einer angerauten Glasplatte abgedeckt, um letzte Unebenheiten zu beseitigen.

Berechnung der Quarzgehalte

Zwei Reflexe vom Quarz, $d_{100}=0,426$ nm und $d_{112}=0,182$ nm, und ein Fluoritreflex bei $d_{311}=0,165$ nm eignen sich laut DOHRMANN & ECHLE (1997) gut für quantitative Messungen. Sie wurden in einem Siemens D5005 Röntgendiffraktometer mit CuK_α -Strahlung in 0,02 Grad Schritten mit je 5 Sekunden Messzeit gemessen. Die Flächen unter diesen Reflexen (integrierte Intensitäten berechnet nach der Trapezmethode) wurden mit Hilfe des Programms DIFFRAC^{plus} EVA® 3.0 nach Abzug des Untergrundes bestimmt (der Integrationsbereich wurde vorgegeben, die Y-Koordinaten der Basislinie setzte das Programm automatisch). Die Fläche eines Quarzreflexes wurden jeweils mit der Fläche des zugehörigen Fluoritreflexes ins Verhältnis gesetzt: $A_Q/(A_Q+A_F)$. Dieses relative Flächenverhältnis wurde für jeden Eichpunkt mehrfach gemessen und der jeweilige Mittelwert gegen den Quarzgehalt aufgetragen (Abb. 16). An diese Werte wurde eine Regression angepasst (Polygon 2. Ordnung). Die Regression bzw. Eichkurve wurde dann zur Berechnung der relativen Quarzanteile in den Bodenproben genutzt.

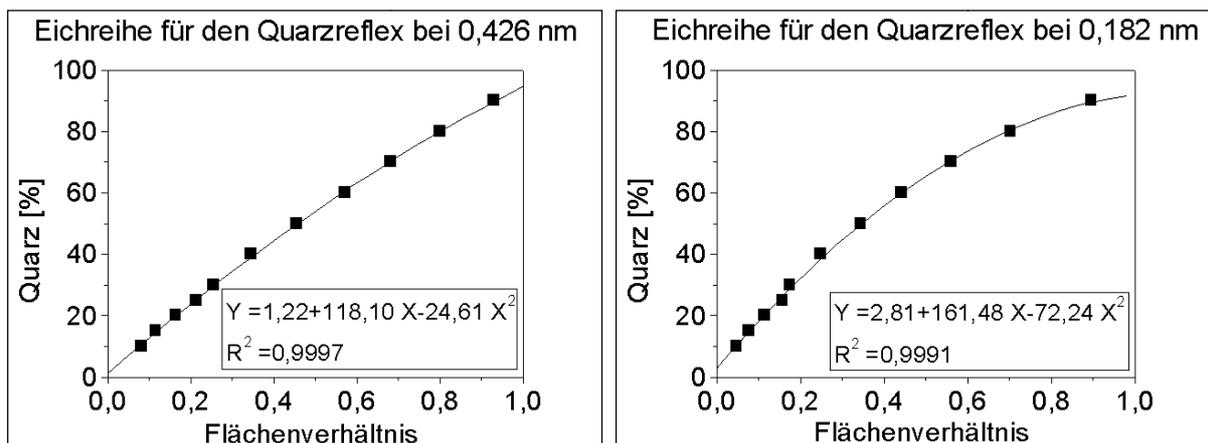


Abb. 16: Eichreihen zur Quarzquantifizierung

Auch für die Bodenproben wurde zunächst das Quarz/Fluorit-Flächenverhältnis der Proben ermittelt und über die Regressionen der jeweilige relative Quarzanteil y der Bodenprobe errechnet. Die Eichreihe besteht nur aus Quarz und Fluorit, beide Anteile (Quarz = y und Fluorit = z) ergeben somit immer 1 bzw. 100 %. Alle anderen Proben bestehen zusätzlich aus Bodenmaterial. Je größer dieser Anteil ist, umso stärker muss der relative Quarzanteil verringert werden. Aus dem relativen Quarzanteil lässt sich in

mehreren Schritten der absolute Anteil an Quarz (**e**) berechnen, die ursprüngliche Bodenprobe plus 20 % Fluorit wird dabei mit **d** abgekürzt:

$$\text{a) } 20\% \text{ CaF}_2 = \frac{z \times 100}{d} \Leftrightarrow d = \frac{z \times 100}{20\% \text{ CaF}_2}$$

$$\text{b) } e = \frac{y \times 100}{d}$$

$$\text{c) } y + z = 100 \Leftrightarrow z = 100 - y$$

Jetzt können a) und danach c) in b) eingesetzt werden:

$$e = \frac{y \times 100}{\frac{z \times 100}{20\% \text{ CaF}_2}} \Rightarrow e = \frac{y \times 100}{\frac{(100 - y) \times 100}{20\% \text{ CaF}_2}} \Leftrightarrow e = \frac{y \times 20\% \text{ CaF}_2}{(100 - y)} \quad (1)$$

Der absolute Anteil Quarz (**e**) bezieht sich hier noch auf die Bodenprobe mit dem beigemischtem Fluorit und einem Restwasseranteil. Darum muss **e** noch um diese Anteile reduziert werden: Der absolute Quarzanteil der Bodenprobe bezogen auf die Trockensubstanz berechnet sich dann aus:

$$\text{Quarz [\%]} = e \times \frac{100}{(100 - 20\% \text{ CaF}_2)} \times \frac{100}{(100 - \% \text{ Wasser})} \quad (2)$$

Jede Bodenprobe wurde einmal angemischt, aber zweimal mit jeweils neuer Präparation an der XRD gemessen und ein Mittelwert pro Reflex (0,426 bzw. 0,182 nm) ermittelt. Zusätzlich wurden diese zwei Werte noch gemittelt.

Abschätzung des Messfehlers

Bedingt durch die Messtechnik und Probenpräparation streuen die ermittelten Quarzgehalte in einem gewissen Bereich. Um diese Schwankungen zu erfassen, wurden Proben mit 10, 20, 30, 50 und 70 % Quarz hergestellt. Sie wurden mehrmals (im Schnitt 8-mal hintereinander) neu präpariert, gemessen und die Quarzgehalte ermittelt. Für jeden dieser Quarzgehalte wurden dann die Standardabweichungen der Wiederholungsmessungen berechnet. Mit steigendem Quarzgehalt erhöhen oder erniedrigen sich die Standardabweichungen nicht (Abb. 17).

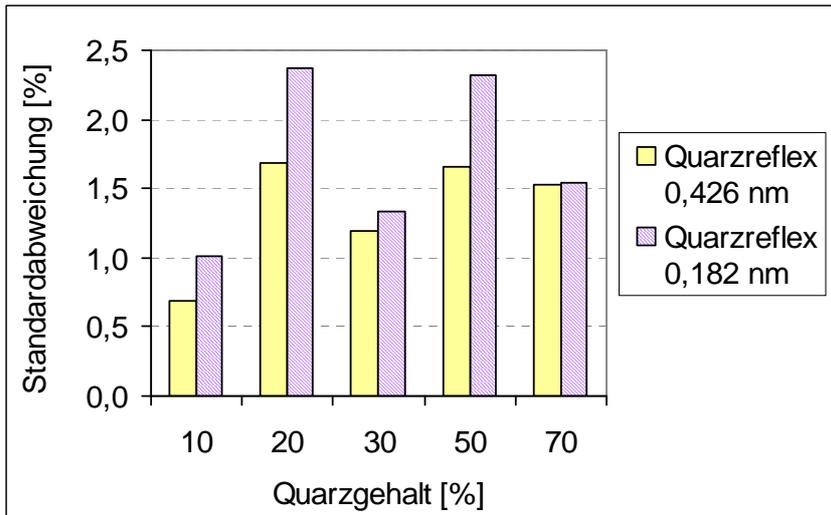


Abb. 17: Standardabweichungen der Wiederholungsmessungen bei 10, 20, 30, 50 und 70 % Quarz

Um die Standardabweichung des Verfahrens zu bestimmen, wurden diese Standardabweichungen zusammen mit den Standardabweichungen der Doppelbestimmungen der normalen Bodenproben nach KÖSTER (1979) gemittelt:

$$s = \frac{\sqrt{n \times s_1^2 + m \times s_2^2 + \dots + p \times s_3^2}}{n + m + \dots + p} \quad (3)$$

s: Standardabweichung des Verfahrens

$s_1 \dots s_3$: Standardabweichung der Doppelbestimmung bzw. Wiederholungsmessungen

n...p: Anzahl der Wiederholungen

Für den ersten Quarzreflex ergibt sich ein Wert von 1,9 Prozentpunkten, für den zweiten Reflex von 2,2 Prozentpunkten. Diese Standardabweichung lässt nur eine Aussage über die Zuverlässigkeit des Verfahrens zu. Um aber eine Aussage zu einem einzelnen Messwert machen zu können, müssen zusätzlich die vorgegebene statistische Sicherheit (hier: 95 %-Signifikanzniveau) und die Anzahl an Messwerten, aus denen die Standardabweichung ermittelt wurde, berücksichtigt werden. Mit Hilfe der folgenden Formel nach KÖSTER (1979) lässt sich dann ein Streubereich ermitteln:

$$\Delta x = t(n, S) \times s \quad (4)$$

Δx : Streubereich

S: statistische Sicherheit (hier 95 %)

t: t-Wert

Für ein n von 180 Proben ergibt sich ein t-Wert von 1,975 (z. B. KÖHLER et al. 1996) und damit ein Streubereich von $\pm 3,8$ Prozentpunkten für den ersten Quarzreflex und $\pm 4,3$ Prozentpunkten für den zweiten Quarzreflex. Dieser Fehler ist allein auf die Fehler bei der Probenvorbereitung vor einer Messung und auf den Gerätefehler zurückzuführen. Fehler bei der Probenahme und der Probenvorbereitung bleiben unberücksichtigt.

Werden zwei Horizonte betrachtet, deren Quarzgehalt aus jeweils einer Doppelbestimmung ermittelt wurde, stellt sich die Frage, ob sie signifikant voneinander abweichen, oder die Abweichung noch im Bereich der ermittelten Messungenauigkeit liegt. Dazu wird der Vertrauensbereich analog zum Streubereich ermittelt:

$$\Delta\bar{x} = t(n,S) \times \frac{s}{\sqrt{n_i}} \Rightarrow \Delta\bar{x} = 1,975 \times \left(\frac{1,9}{\sqrt{2}}\right) = 2,7 \quad (5)$$

Für eine Doppelbestimmung, wie sie bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen vorliegt, liegt der Bereich somit bei 2,7 bzw. 3,1 Prozentpunkten für den ersten bzw. zweiten Quarzreflex. Je größer die Anzahl an Mehrfachbestimmungen ist, umso kleiner wird der Vertrauensbereich. Solange sich die Vertrauensbereiche zweier Messungen überschneiden, sind sie nicht signifikant unterschiedlich bezogen auf den betrachteten Fehler.

Durch die Mittelwertbildung der Quarzgehalte aus den beiden gemessenen Quarzreflexen wurden zusätzlich störende Einflussgrößen auf die Messwerte, wie sie z. B. durch überlagernde Reflexe hervorgerufen werden können, reduziert. Werden die Quarzgehalte beider Quarzreflexe aus allen Messungen der Bodenproben miteinander korreliert, ergibt sich ein hoher Pearson'scher-Korrelationskoeffizient von 0,99. Die mittlere Abweichung zwischen den beiden Quarzgehalten beträgt im Schnitt 1,7 und maximal 5,4 Prozentpunkte.

4.4.2 Ausmessen von Tonmineralgruppen

In einer Bodenprobe werden die Signalintensitäten der Tonminerale durch eine Vielzahl von physikalischen Eigenschaften beeinflusst. Da diese Eigenschaften innerhalb der verschiedenen Tonminerale variieren, entsprechen gleiche Intensitäten der d_{001} -Reflexe nicht zwangsläufig gleichen Gewichtsanteilen (MOORE & REYNOLDS 1997). Eine genaue quantitative Erfassung der Tonminerale einer Bodenprobe ist mit großem analytischem wie rechentechnischem Aufwand verbunden. Auf Grund der großen Probenanzahl wurde hier eine weniger zeitaufwendige Methode gewählt, sie ermöglicht jedoch nur semiquantitative Aussagen bezüglich der Mengenverteilung von drei betrachteten Tonmineralgruppen. Einzelne Tonminerale können nicht unterschieden werden.

Zur Messung der Tonmineralgruppen wurden die Proben aus der Quarzquantifizierung verwendet (Pulverpräparate mit CaF_2 als internem Standard) und lediglich neu präpariert. Die Vorteile des internen Standards wurden bereits in Kapitel 4.4.1 erläutert. Gemessen wurde mit einer Schrittweite von 0,02 Grad und mit einer Messzeit von jeweils 30 Sekunden. Neben der Fläche unter den Reflexen bei 1,42 nm, 1,0 nm und 0,716 nm wurde wiederum die Fläche unter dem Fluoritreflex bei 0,165 nm erfasst. Die Flächenbestimmung wurde mit Hilfe des Programms DIFFRAC^{plus} EVA® 3.0 nach Abzug des Untergrundes durchgeführt (integrierte Intensitäten berechnet nach der Trapezmethode). Alle Tonmineralreflexe wurden mit einer

Spannweite von $0,6\ 2\theta$ ausgemessen, wobei die X-Achse als Basislinie vorgegeben wurde (Y-Achsenabschnitt = 0). Analog zur Quarzquantifizierung wurde die berechnete Fläche eines Tonmineralreflexes (A_{TM}) durch die Fläche des Fluoritreflexes ($A_{Fluorit}$) geteilt. Dieser Wert muss noch um die Einwaage an Fluorit und um den Wassergehalt der Probe bereinigt werden:

$$\text{bereinigte Tonmineralintensitäten} = \frac{A_{TM}}{A_{Fluorit}} \times \frac{100}{(100 - \% \text{ CaF}_2)} \times \frac{100}{(100 - \% \text{ Wasser})} \quad (6)$$

Mit Hilfe der bereinigten Tonmineralintensitäten lassen sich Veränderungen zwischen den Tonmineralgruppen in verschiedenen Proben bzw. Horizonten erfassen.

In einem weiteren Schritt kann die Mengenverteilung der drei Tonmineralgruppen genauer erfasst werden. Dazu werden die bereinigten Tonmineralintensitäten mit sogenannten MIF's (mineral intensity factors) multipliziert. Die Bestimmung bzw. der Einsatz von MIF's ist eine weit verbreitete Herangehensweise zur Quantifizierung von Tonmineralen in Böden (KAHLE et al. 2002). Der größte Teil dieser Faktoren ist für Texturpräparate entwickelt worden, nur sehr wenige für die hier eingesetzten Pulverpräparate. Die Bestimmung dieser Faktoren ist zeitaufwendig, daher wird an dieser Stelle auf Literatur- (BAZEGAR et al. 1995) bzw. Erfahrungswerte (JAHN 2011) zurückgegriffen. Der 1,42 nm-Reflex wird mit 0,3 (MIF für Smectit) multipliziert, der 1,0 nm-Reflex mit 1,0 (MIF für Illit) und der 0,72 nm-Reflex mit 0,5 (MIF für Kaolinit). Eine mögliche Fehlerquelle ist die Tatsache, dass sich die eingesetzten MIF's auf einzelne Tonminerale beziehen. Hinter den hier gemessenen Tonmineralgruppen können sich jedoch mehrere Tonminerale verbergen (z. B. erzeugt sowohl Illit als auch Glimmer einen Reflex bei 1,0 nm). Für eine Quantifizierung der Gewichtsanteile hätte für jede Tonmineralgruppe ein MIF gemessen/errechnet werden müssen. Auch könnte sich der Grad der Vorzugsorientierung der Tonminerale in den verwendeten Pulverpräparaten vom Grad der Vorzugsorientierung der zur Ableitung der MIF's verwendeten Pulverpräparaten unterscheiden. Da die Passgenauigkeit der eingesetzten Faktoren nur ansatzweise geprüft werden kann, werden die Ergebnisse mit und ohne Intensitätsfaktoren dargestellt.

Die untersuchten Horizonte weisen unterschiedlich hohe Tongehalte auf, je weniger Ton eine Probe enthält, desto niedriger sind die gemessenen Intensitäten. Zum besseren Vergleich verschiedener Horizonte, wird die Summe der bereinigten Tonmineralintensitäten bzw. Tonmineralmengen jeweils auf 100 % bezogen.

Einige ausgesuchte Pulverpräparate wurden nach der Messung der Tonmineralgruppen mit Glycerin belegt. Es handelt sich um eine qualitative Tonmineralbestimmung. Ist Smectit vorhanden, expandiert dieser von 1,42 nm auf 1,76–1,8 nm (LAGALY & KÖSTER 1993), Vermiculit und Chlorit bleiben unverändert. Das Pulver wurde auf einer angerauten Glasplatte mit Glycerin (99 %, wasserfrei) zu einem festen Brei verrührt und in einen Probenträger eingefüllt. Die Oberfläche wurde mit einer Rasierklinge geglättet. Die Messung erfolgt in einem X'Pert PRO Röntgendiffraktometer mit $\text{CuK}\alpha$ -Strahlung in 0,0167 Grad Schritten mit je 10 Sekunden Messzeit.

4.5 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Die Elementzusammensetzung der Bodenproben wurde qualitativ und quantitativ über die Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt.

Die Feinbodenproben der Mineralbodenhorizonte und die gewonnenen Lösungsrückstände aus der Carbonatzerstörung der Kalksteine und des Feinmaterials wurden zunächst bei 100 °C getrocknet und in einer Scheiben-Schwingmühle (RETSCH RS 100) in einem Achat-Einsatz für 2 Minuten bei 700 Umdrehungen pro Minute zerkleinert. Anschließend wurde die Probe erneut bei 100 °C getrocknet. Je 8 g Probenmaterial und 2 g Hoechst-Wachs wurden im Achatmörser homogenisiert und mit 200 kN zu Tabletten gepresst. Die Messung erfolgte am Siemens Spektrometer SRS 3000 (wavelength dispersive XRF). Die Einstellungen wurden an zertifizierten Breitländer-Proben überprüft. Unter Berücksichtigung des bei 1030 °C gemessenen Glühverlustes werden die Elementgehalte in Oxidform in Gewichtsprozent angegeben. Die Nachweisgrenze ist für jedes Element spezifisch. Die Menge des bei der Gewinnung des Lösungsrückstandes in Lösung gegangenen Eisens wurde atomabsorptionsspektrometrisch bestimmt. Die RFA-Ergebnisse der Lösungsrückstände wurden nachträglich um diese Gehalte korrigiert.

4.6 Mikromorphologie

Dünnschliffe sind ein wichtiges Hilfsmittel, um Tonverlagerung sicher zu identifizieren. Die Proben für die Dünnschliffherstellung wurden horizontal aus der Profilwand entnommen. Dazu wurden Filmdöschen mit 30 mm Durchmesser verwendet. Die Präparation wurde vom Labor T. Beckmann, Schwülper-Lagesbüttel durchgeführt (Methode nach ALTEMÜLLER 1974, modifiziert nach BECKMANN 1997). Die Beschreibung der Dünnschliffe am Polarisationsmikroskop richtet sich nach STOOPS (2003). Die von STOOPS (2003) verwendeten englischen Termini werden meist beibehalten, um die damit beschriebenen Merkmale zweifelsfrei zuordnen zu können.

Um die Menge an Tonverlagerung im Dünnschliff zu quantifizieren, wurde der Flächenanteil mit Hilfe einer Größentabelle (STOOPS 2003) visuell abgeschätzt. Dieses Verfahren ist mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet, dafür aber sehr zeiteffizient. Zudem beschreibt MCKEAGUE et al. (1981), dass diese schnelle Abschätzung im Vergleich zu einer Punktzählmethode mit 5000 erfassten Punkten zu sehr ähnlichen Ergebnissen führt. Um die untersuchten Schliffe hinsichtlich ihrer Tonüberzüge umfassend zu beschreiben, wurden vier Tonverlagerungsmerkmale unterschieden: Toncutane an Poren, Toncutanbruchstücke, Toncutane an Aggregaten und Verfüllungen (mit Ton verfüllte Poren). Abgeschätzt wurden sowohl die Volumenprozent des verlagerten Tons in Bezug auf die gesamte Fläche des Schliffs, als auch in Bezug auf die Festsubstanz (porenfrei). Dieser Anteil entspricht ungefähr

den Gewichtsprozenten an verlagertem Ton. Zu beachten ist allerdings, dass in tonreichen Böden der Anteil an Festsubstanz oft überschätzt wird, u.a. da sich Feinporen zwischen dem Ton unterhalb der Auflösung des Mikroskops befinden (MURPHY 1984). Toncutane zählen zu den sogenannten „pedofeatures“: Separate Strukturen innerhalb des Bodenmaterials, die sich durch die Konzentration, Form oder Farbe von der restlichen Grundmasse/Matrix unterscheiden.

Neben der Menge an Tonverlagerung wird auch der Aufbau der Toncutane beschrieben, um z. B. Rückschlüsse auf unterschiedliche Entstehungsmilieus oder Schichtungen ziehen zu können. Dabei wird zwischen reinen (limpid: reiner Feinton), staubigen (dusty: feiner bis grober Ton einschließlich Mikropartikel), unreinen (impure: Ton mit Einschlüssen von feinen Schluffpartikeln) und schluffigen (silt coatings: bestehen aus Körnern in Schluffgröße) Toncutanen bzw. Laminen (Lagen unterschiedlicher Korngröße und/oder Farbe innerhalb einer Toncutane) unterschieden. Je stärker der Ton orientiert ist, umso deutlicher sind die Extinktionslinien bzw. Auslöschungsbänder ausgebildet. Optimal orientierter Ton in einer runden Pore zeigt kreuzförmige Extinktionslinien bei gekreuzten Polarisatoren (XPL), auf einer geraden Oberfläche abgelagerter Ton wechselt zwischen totaler Auslöschung und keinerlei Extinktion bei Drehen des Objektisches (FITZPATRICK 1993). In diesem Fall werden die Auslöschungsbänder mit „scharf“ beschrieben. Werden die Bänder breiter und treten nicht mehr durchgängig auf, werden sie mit „deutlich“ bezeichnet, alle anderen Formen mit „diffus“ oder „undeutlich“. Verlieren Tonüberzüge durch Frost-/Tauwechsel oder Bioturbation ihre parallele Ausrichtung mit der Zeit wieder, werden sie als „reorientiert“ umschrieben. Die Toncutane zeigen dadurch zunehmend undulöse Auslöschungsmuster, d.h. beim Drehen des Objektisches unter gekreuzten Polarisatoren kommt es zu einem kleinräumigen, unruhigen Wechsel von Hell und Dunkel.

Weiterhin werden das Mikrogefüge, die c/f-Relativverteilung und die „b-fabric“ erfasst. Ersteres kann sich durch die höhere Auflösung von dem im Feld beobachteten Makrogefüge unterscheiden bzw. detaillierter beschrieben werden. Oft treten auch verschiedene Gefüge nebeneinander auf. Das c/f-Verhältnis ($c/f = \text{coarse/fine}$) teilt die Bodenpartikel in grobes und feines Material ein. Die Grenze ist abhängig von der Auflösung des Mikroskops, der Größenverteilung des zu beschreibenden Materials oder der Zielsetzung der Untersuchung. In der vorliegenden Arbeit wird die Grenze bei $10\ \mu\text{m}$ (c/f_{10}) festgelegt und das c/f-Verhältnis in Bezug auf 100 % angegeben. Ein c/f_{10} -Verhältnis von $7/3$ bedeutet damit 70 % grobes und 30 % feines Material. Die b-fabric beschreibt die unter gekreuzten Polarisatoren zu erkennende Verteilung und Orientierung von Interferenzfarben in der Mikromasse (Feinmasse eines Dünnschliffs, die unterhalb der Auflösung des Mikroskops liegt). Mit nur einem Polarisator (PPL) ist kein Unterschied zwischen b-fabric und Mikromasse zu erkennen. Bei den meisten b-fabrics handelt es sich um verschiedenste Ausprägungsmuster orientierten Tons, der unter Druckeinfluss durch Quellungs- und Schrumpfungsvorgänge eine Einregelung erfahren hat. Die b-fabric zählt nicht zu den „pedofeatures“. STOOPS (2003) unterscheidet zwischen einer von Interferenzfarben freien, undifferenzierten

Mikromasse („indifferentiated“), einer gesprenkelten („speckled“) und einer gestreiften („striated“) Mikromasse. Die gesprenkelte Mikromasse wird weiter unterteilt in punktförmig gesprenkelt (sehr kleine, fein verteilte Bereiche mit orientiertem Ton, die nicht in Kontakt zueinander stehen) und mosaikförmig gesprenkelt (sehr kleine, fein verteilte Bereiche mit orientiertem Ton, die in Kontakt zueinander stehen). Gestreifte Bereiche können ebenfalls feiner unterschieden werden:

- granostriated: parallel zu den Wänden von Körnern und Konkretionen eingeregelter Ton, produziert einen dünnen „Heiligenschein“ um die Körner
- porostriated: parallel zur Porenwandung orientierter Ton
- monostriated: einzelne Linien orientierten Tons frei in der Grundmasse
- parallel striated: parallele Linien orientierten Tons
- cross striated: sich kreuzende Linien orientierten Tons
- random striated: unregelmäßiges Muster von Linien
- circular striated: kreisförmige Linien

Organische Bestandteile, Konkretionen und Tierlosung wurden ebenfalls quantitativ erfasst. Um dunkle/opake Komponenten wie Holzkohle identifizieren zu können, wurde Auflicht eingesetzt (OIL, „oblique incident light“).

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Beschreibung der Böden

Die folgenden Profilbeschreibungen geben einen ersten Überblick über die untersuchten Böden. Um Verwechslungen zu vermeiden, erhalten die Horizonte und die Böden bereits ihre endgültigen, aus den Ergebnissen aller Untersuchungen abgeleiteten Bezeichnungen.

5.1.1 Böden am Sentruper Berg im Teutoburger Wald

Boden Sentruper Berg a (SBa)

Standort: Niedersachsen, Landkreis Osnabrück, Blatt 3814 Bad Iburg, R: 3438342, H: 5780704

Das Pedon SBa befindet sich 198 m ü. NN am südlich ausgerichteten, schwach konvex gewölbten Oberhang des Sentruper Bergs im Teutoburger Wald. Der grundwasserferne, mittel geneigte Standort ist mit Buchen (Hochwald) bewachsen.

Ausgangsgestein: Löss über Kalksteinverwitterungsmaterial der Oberkreide (Turron)



Foto 1: Pedon SBa

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
	+6	L	Humusform: Moder
	+4	Of	
	+2	Oh	
1	0-3	Ah	stark toniger Schluff, sehr dunkelbraungrau (10 YR 2/2), stark humos, schwaches Krümel- bis Polyedergefüge, carbonatfrei, mittel durchwurzelt, sehr stark sauer, zapfenförmige/deutliche Horizontgrenze
2	3-18	Al-Bv	stark schluffiger Ton, graubraun (10 YR 5/4), schwach humos, Subpolyedergefüge, carbonatfrei, mittel durchwurzelt, sehr stark sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
3	18-35	Bvt	stark schluffiger Ton, gelblichbraun (10 YR 5/6), sehr schwach humos, Polyeder- bis Subpolyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, sehr stark sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
4	35-50	IIBt-Tv	toniger Ton, dunkelgelblichbraun (10 YR 4/6), schwach humos, Polyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, stark sauer, wellige/scharfe Horizontgrenze
5	50-69	cCv	Festgesteinzersatzmaterial aus 95 % Grobboden (50 % Stein und 45 % Grus, hellgelbgrau (2,5 Y 6/3)) und 5 % Feinmaterial (toniger Ton, dunkelgraubraun (10 YR 4/4) mit Übergängen, schwach humos, extrem carbonatreich, sehr schwach alkalisch), Kohärent- bis Subpolyedergefüge, schwach durchwurzelt, wellige/diffuse Horizontgrenze
6	69-88	cmCv	carbonatisches Festgestein aus 98 % Grobboden (Stein, grusig brechend, hellgelblichgrau (2,5 Y 7/2)) und 2 % Feinmaterial (toniger Ton, hellgelbgrau (2,5 Y 6/3), sehr schwach humos, extrem carbonatreich, sehr schwach alkalisch), sehr schwach durchwurzelt

Bodentyp (nach KA5): Braunerde-Parabraunerde über lessivierter Terra-Fusca (Ableitung siehe Kapitel 5.9.1)

Boden Sentruper Berg b (SBb)

Standort: Niedersachsen, Landkreis Osnabrück, Blatt 3814 Bad Iburg, R: 3438372, H: 5780493

Das Pedon SBb befindet sich 160 m ü. NN am südlich ausgerichteten, schwach konvex gewölbten Mittelhang des Sentruper Bergs. Der grundwasserferne, mittel geneigte Standort ist mit Buchen und Eichen bestanden.

Ausgangsgestein: Löss über Kalksteinverwitterungsmaterial der Oberkreide (Turon)



Foto 2: Pedon SBb

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
	+4 +2 +0,5	L Of Oh	Humusform: Moder
1	0-4	Ah	mittel toniger Schluff, dunkelgrau (10 YR 3/1), stark humos, Subpolyedergefüge, carbonatfrei, schwach durchwurzelt, sehr stark sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
2	4-30	Al+Btv	mittel toniger Schluff, gelblichbraun (10 YR 5/8), schwach humos, Subpolyedergefüge, carbonatfrei, mittel durchwurzelt, sehr stark sauer, ebene/diffuse Horizontgrenze
3	30-49	Sw-Btv	mittel toniger Schluff, gelblichbraun (10 YR 5/8), 15 % hellgelblichbraune Flecken (10 YR 6/6), 5 % hellrostfarbene Stippen (7.5 YR 6/8), 10 % gebleichte Flecken (10 YR 7/4), Hydromorphie, sehr schwach humos, Subpolyedergefüge, schwach verfestigt, carbonatfrei, mittel durchwurzelt, sehr stark sauer, wellige/deutliche Horizontgrenze
4	49-61	IISd-Bvt- Tv	schwach schluffiger Ton, graubraun (10 YR 5/4), 30 % hellgelblichbraune (10 YR 6/6) Flecken, 4 % hellrostfarbene Stippen (7.5 YR 6/8), 5 % gebleichte Flecken (10YR 7/4), Hydromorphie, sehr schwach humos, Polyedergefüge, mittel verfestigt, carbonatfrei, stark durchwurzelt, stark sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
5	61-70	Sd-Bt-Tv	toniger Ton, graubraun (10YR 5/3), 5 % dunkelgelblichbraune Flecken (10 YR 4/6), 20 % dunkel- bis hellrostfarbene Rostflecken (7.5YR 5/8), Hydromorphie, sehr schwach humos, Polyedergefüge, mittel verfestigt, sehr carbonatarm, stark durchwurzelt, sehr schwach sauer, wellige/deutliche Horizontgrenze
6	70-90	cCv1	Festgesteinzersatzmaterial aus 90 % Grobboden (60 % Stein, 30 % Grus, hellgelblichbraun (2,5 Y 6/2)) und 10 % Feinmaterial (schwach schluffiger Ton, teils gelblichgrau (2.5 Y 5/2), teils dunkelgraubraun (10 YR 4/3), sehr schwach humos, extrem carbonatreich, sehr schwach alkalisch), Kohärentgefüge, sehr schwach durchwurzelt, wellige/diffuse Horizontgrenze
7	90- 120+	cCv2	Festgesteinzersatzmaterial aus 85 % Grobboden (10 % Stein, 75 % Grus, hellgelblichbraun (2,5 Y 6/2)) und 15 % Feinmaterial (toniger Ton, hellgelbgrau (2,5 Y 6/3), sehr schwach humos, extrem carbonatreich, sehr schwach alkalisch), Kohärentgefüge, schwach durchwurzelt, Calcitkristalle in 120 cm Tiefe

Bodentyp (nach KA5): pseudovergleyte Parabraunerde-Braunerde über pseudovergleyter lessivierter Terra fusca (Ableitung siehe Kapitel 5.9.2)

5.1.2 Boden im Hardenhausener Wald im Eggegebirge

Boden Hardehausen (HARD)

Standort: Nordrhein-Westfalen, Kreis Höxter, Blatt 4420 Peckelsheim, R: 3501640, H: 5714788

Das Pedon HARD befindet sich 400 m ü. NN an einem östlich ausgerichteten, mittel konvex gewölbten, hängigen Kulminationsbereich des Hardehausener Waldes. Der Standort ist schwach geneigt, grundwasserfern und mit Buchen bewachsen.

Ausgangsgestein: Kalksteinverwitterungsmaterial des Unteren Muschelkalks (Wellenkalk) mit Lösseinmischung



Foto 3: Pedon HARD

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
	+4	L	
	+3	Of	Humusform: mullartiger Moder
	+1	Oh	
1	0-5	Ah	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (10 YR 3/3), sehr stark humos, Subpolyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, stark sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
2	5-17	Al-Bv-Tv	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (7,5 YR 4/4), stark humos, Subpolyeder- bis Polyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, stark sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
3	17-29	Bt-Tv	toniger Ton, dunkelgraubraun (5 YR 4/4), 45 % Grobboden (35 % Grus, 10 % Stein), stark humos, Polyedergefüge, carbonatarm (Matrix kalkfrei), mittel durchwurzelt, neutral, wellige/diffuse Horizontgrenze

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
4	29-44	Tv	toniger Ton, dunkelrötlichbraun (5 YR 4/6), 55 % Grobboden (5 % Stein, 50 % Grus), mittel humos, Polyedergefüge, carbonathaltig (Matrix kalkfrei), mittel durchwurzelt, neutral, geneigte/diffuse Horizontgrenze
5	44-61+	cCv	Festgesteinzersatzmaterial aus 90 % Grobboden (2 % Stein, 88 % Grus, häufig hellgelbgrau (2,5 Y 6/3), schwankt) und 10 % Feinmaterial (toniger Ton, hellgelbgrau (2,5 Y 7/3), schwach humos, sehr carbonatreich, sehr schwach alkalisch), Kohärentgefüge, keine Wurzeln

Bodentyp (nach KA5): lessivierte Terra fusca (Ableitung siehe Kapitel 5.9.3)

5.1.3 Böden im Göttinger Wald im Leinebergland

Boden Göttinger Wald a (GOWa)

Standort: Niedersachsen, Landkreis Göttingen, Blatt 4426 Ebergötzen, R: 3571635, H: 5713276

Das Pedon GOWa befindet sich 390 m ü. NN am sehr schwach konvex gewölbten, nordwestlich ausgerichteten, hängigen Kulminationsbereich des Totenbergs auf der plateauförmigen Erhebung des Göttinger Stadtwaldes. Die unmittelbare Profilumgebung ist nicht geneigt, grundwasserfern und mit Buchen und Ahorn bewachsen.

Ausgangsgestein: Kalksteinverwitterungsmaterial des Unteren Muschelkalks mit Lösseinmischung



Foto 4: Pedon GOWa

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
	+4	L	Humusform: F-Mull
	+1	Of	
1	0-6	Ah	schwach schluffiger Ton, dunkelbraungrau (10 YR 3/2), 0,5 % Grobboden (Grus), sehr stark humos, Krümel- bis Subpolyedergefüge, carbonatfrei, sehr stark durchwurzelt, schwach sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
2	6-14	Ah-Bv-Tv	schwach schluffiger Ton, dunkelbraungrau (10 YR 4/2), 0,5 % Grobboden (Grus), stark humos, Subpolyeder- bis Polyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, schwach sauer, ebene/diffuse Horizontgrenze
3	14-23	Bv-Tv	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (10 YR 4/3), 1 % Grobboden (Grus, nach unten zunehmend), stark humos, Polyedergefüge, sehr carbonatarm, schwach durchwurzelt, sehr schwach sauer, wellige/deutliche Horizontgrenze
4	23-31	Tv-cCv	Festgesteinzersatzmaterial aus 61 % Grobboden (Grus, hellgelbgrau (2.5 Y 6/3)) und 39 % Feinmaterial (toniger Ton, zu 65 % dunkelgraubraun (10 YR 4/3) und zu 35 % dunkelbraungrau (10 YR 3/2), mittel humos, sehr carbonatreich, sehr schwach alkalisch), Polyeder- bis Subpolyedergefüge, sehr schwach durchwurzelt, wellige/diffuse Horizontgrenze
5	31-44+	cCv	Festgesteinzersatzmaterial aus 82 % Grobboden (Grus, hellgelbgrau (2.5 Y 6/3)) und 18 % Feinmaterial (toniger Ton, hellgelbgrau (2.5 Y 5/4), schwach humos, extrem carbonatreich, sehr schwach alkalisch), sehr schwach durchwurzelt

Bodentyp (nach KA5): Braunerde-Terra fusca (Ableitung siehe Kapitel 5.9.4)

Boden Göttinger Wald b (GOWb)

Standort: Niedersachsen, Landkreis Göttingen, Blatt 4426 Ebergötzen, R: 3571603, H: 5713279

Das Pedon GOWb befindet sich 389,5 m ü. NN am nordwestlich ausgerichteten, sehr schwach konvex gewölbten, hängigen Kulminationsbereich des Totenbergs auf der plateauförmigen Erhebung des Göttinger Stadtwaldes. Die unmittelbare Profilumgebung ist schwach geneigt, grundwasserfern und mit Buchen und Ahorn bewachsen.

Ausgangsgestein: Kalksteinverwitterungsmaterial des Unteren Muschelkalks mit Lösseinmischung



Foto 5: Pedon GOWb

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
	+1	L	Humusform: F-Mull
	+0,5	Of	
1	0-10	Ah	schwach schluffiger Ton, dunkelgrau (10 YR 3/1), sehr stark humos, Krümel- bis Subpolyedergefüge, carbonatfrei, sehr stark durchwurzelt, mäßig sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
2	10-21	Al-Bv	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (10 YR 3/3), 3 % Grobboden (1 % Grus, 2 % Stein), stark humos, schwach ausgeprägtes Polyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, mäßig sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
3	21-30	Btv-Tv	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (10 YR 3/3), 3 % Grobboden (1 % Grus, 2 % Stein), stark humos, Subpolyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, sehr schwach sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
4	30-43	Bvt-Tv	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (7.5YR 4/4), 31 % Grobboden (1 % Grus, 30 % Stein), mittel humos, Subpolyedergefüge, sehr carbonatarm, mittel durchwurzelt, neutral, wellige/diffuse Horizontgrenze
5	43-70+	cCv	Festgesteinzersatzmaterial aus 85 % Grobboden (70 % Grus, 15 % Stein, hellgelbgrau (2,5 Y6/3)) und 15 % Feinmaterial (toniger Ton, hellgelbgrau (2,5 Y 6/4), schwach humos, Polyeder- bis Kohärentgefüge, extrem carbonatreich, sehr schwach alkalisch), sehr schwach durchwurzelt

Bodentyp (nach KA5): Parabraunerde-Terra fusca (Ableitung siehe Kapitel 5.9.5)

Boden Göttinger Wald c (GOWc)

Standort: Niedersachsen, Landkreis Göttingen, Blatt 4426 Ebergötzen, R: 3571587, H: 5713249

Das Pedon GOWc befindet sich 388 m ü. NN am nordwestlich ausgerichteten, sehr schwach konvex gewölbten, hängigen Kulminationsbereich des Totenbergs auf der plateauförmigen Erhebung des Göttinger Stadtwaldes. Die unmittelbare Profilumgebung ist schwach geneigt, grundwasserfern und mit Buchen und Ahorn bewachsen.

Ausgangsgestein: Löss über Kalksteinverwitterungsmaterial des Unteren Muschelkalks



Foto 6: Pedon GOWc

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
	+4	L	Humusform: F-Mull
	+1	Of	
1	0-5	Ah	stark schluffiger Ton, dunkelbraungrau (10 YR 3/2), stark humos, Krümelgefüge, carbonatfrei, sehr stark durchwurzelt, stark sauer, wellige bis zapfenförmige/deutliche Horizontgrenze
2	5-23	Ah+Bv-Al	stark schluffiger Ton, graubraun (10 YR 5/4), mittel humos, Polyeder- bis Subpolyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, sehr stark sauer, 30 % dunkelbraungraue (10 YR 3/2) Humusflecken, ebene/diffuse Horizontgrenze
3	23-30	Bvt	mittel schluffiger Ton, dunkelbraun (7.5 YR 4/6), mittel humos, Polyedergefüge, carbonatfrei, mittel durchwurzelt, stark sauer, 20 % dunkelbraungraue (10 YR 3/2) Humusflecken in Wurzelbahnen, ebene/diffuse Horizontgrenze

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
4	30-40	Bvt-Tv	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (7.5 YR 4/4), 15 % Grobboden (5 % Grus, 10 % Stein, hellgrau (2.5 Y 6/1)), schwach humos, Polyedergefüge, carbonatfrei, schwach durchwurzelt, schwach sauer, 15 % dunkelbraungraue (10 YR 3/2) Humusflecken in Wurzelbahnen, wellige/diffuse Horizontgrenze
5	40-60	Bvt-Tv+cCv	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (7.5 YR 4/4), 70 % Grobboden (30 % Grus , 40 % Stein, hellgrau (2.5 Y 6/1)), mittel humos, Polyedergefüge, carbonatfrei, sehr schwach sauer, sehr schwach durchwurzelt, wellige/diffuse Horizontgrenze
6	60-70	cCv1	Festgesteinzersatzmaterial aus 58 % Grobboden (55 % Grus, 3 % Stein), hellgelblichgrau (2.5 Y 6/2)) und 42 % Feinmaterial (schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (10 YR 4/4), schwach humos, sehr carbonatreich, sehr schwach alkalisch), sehr schwach durchwurzelt, wellige/ diffuse Horizontgrenze
7	70-90+	cCv2	Festgesteinzersatzmaterial aus 61 % Grobboden (45 % Grus, 16 % Stein, hellgelblichgrau (2.5 Y 6/2)) und 39 % Feinmaterial (schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun bis graubraun (10 YR 4/4 bis 5/4), schwach humos, sehr carbonatreich, sehr schwach alkalisch), sehr schwach durchwurzelt

Bodentyp (nach KA5): Terra fusca-Parabraunerde (Ableitung siehe Kapitel 5.9.6)

5.1.4 Böden am Röhringsberg im Eichsfeld

Boden Röhringsberg a (RBa)

Standort: Thüringen, Landkreis Eichsfeld, Blatt 4626 Heilbad Heiligenstadt, R: 3572135, H: 5690505

Das Pedon RBa befindet sich 486 m ü. NN am nordöstlichen Kulminationsbereich des Röhringsbergs. Die unmittelbare Profilumgebung ist nicht geneigt und das Mikrorelief ist leicht wellig. Der Standort ist grundwasserfern, wird als Forst genutzt und ist mit Buchen und Ahorn bestanden.



Foto 7: Pedon RBa

Ausgangsgestein: Kalksteinverwitterungsmaterial des Unteren Muschelkalks mit Lösseinmischung

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
	+3 +1,5	L Of	Humusform: F-Mull
1	0-6	Ah	mittel schluffiger Ton, dunkelbraungrau (10 YR 3/2), stark humos, Krümelgefüge, carbonatfrei, sehr stark durchwurzelt, stark sauer, zungenförmige/deutliche Horizontgrenze
2	6-20	Alh-Bv	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (7.5 YR 4/4), mittel humos, Subpolyeder- bis Polyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, stark sauer, ebene/diffuse Horizontgrenze
3	20-35	IIBt-Tv	toniger Ton, dunkelgraubraun (7.5 YR 4/3), 20 % Grobbo-den (hellgrau (2.5 Y 6/1)), mittel humos, Polyedergefüge, carbonatfrei, mittel durchwurzelt, schwach sauer, ebene/deutliche Horizontgrenze
4	35-45+	cmCv	carbonatisches Festgestein, hellgrau (2.5 Y 6/1)

Bodentyp (nach KA5): lessivierte Terra fusca (Ableitung siehe Kapitel 5.9.7)

Boden Röhringsberg b (RBb)

Standort: Thüringen, Landkreis Eichsfeld, Blatt 4626 Heilbad Heiligenstadt, R: 3572175, H: 5690475

Das Pedon RBb befindet sich 485 m ü. NN auf dem nordöstlich ausgerichteten Oberhang des Röhringsbergs. Die unmittelbare Profilumgebung ist sehr schwach geneigten und das Mikrorelief ist leicht wellig. Der Standort ist grundwasserfern, wird als Forst genutzt und ist mit Buchen, Ahorn und Eichen bestanden.

Ausgangsgestein: Löss über Kalksteinverwitterungsmaterial des Unteren Muschelkalks



Foto 8: Pedon RBb

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
	+3	L	Humusform: F-Mull
	+1,5	Of	
1	0-5	Ah	stark schluffiger Ton, dunkelbraungrau (10 YR 3/2), stark humos, Krümelgefüge, carbonatfrei, sehr stark durchwurzelt, sehr stark sauer, wellige/deutliche Horizontgrenze
2	5-23	Al	stark toniger Schluff, graubraun (10 YR 5/4), schwach humos, Subpolyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, sehr stark sauer, zungenförmige/diffuse Horizontgrenze
3	23-36	Sw-Bt	mittel schluffiger Ton, dunkelbraun (7.5 YR 4/6), 3 % dunkelrostfarbene bzw. dunkelrötlichbraune (5 YR 4/6) Flecken, Hydromorphie, sehr schwach humos, Polyedergefüge, carbonatfrei, mittel durchwurzelt, stark sauer, wellige/diffuse Horizontgrenze
4	36-65	IISd-Bvt-Tv	schwach schluffiger Ton, dunkelgraubraun (7.5 YR 3/4), 20 % dunkelrostfarbene bzw. dunkelrötlichbraune (5 YR 4/6) und 2 % schwarze (10 YR 1.7/1) Stippen, Hydromorphie, schwach humos, Polyedergefüge, carbonatfrei, sehr schwach durchwurzelt, mäßig sauer, zungenförmige/deutliche Horizontgrenze
5	65-75+	cCv	Festgesteinzersatzmaterial aus 85 % Grobboden, hellgelblich-grau bis grau (2.5 Y 6/2 bis 5/1) und 15 % Feinmaterial

Bodentyp (nach KA5): pseudovergleyte Parabraunerde-Terra fusca (Ableitung siehe Kapitel 5.9.8)

5.1.5 Boden bei Holzkirch auf der Schwäbischen Alb

Boden Holzkirch (HOLZ)

Standort: Baden-Württemberg, Alb-Donau-Kreis, Blatt 7425 Lonsee, R: 3573039, H: 5378047

Das Pedon HOLZ befindet sich 592 m ü. NN auf einem ebenen Kulminationsbereich auf einem Hochplateau (Forst Schonholz). Der Standort ist grundwasserfern, nicht geneigt und mit Buchen und Eichen (Hochwald) bewachsen. Im Unterwuchs finden sich Holunder, junge Eichen und Buschwindröschen.

Ausgangsgestein: Löss über Kalksteinverwitterungsmaterial des Juras



Foto 9: Pedon HOLZ

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
	+4	L	Humusform: F-Mull
	+1	Of	
1	0-7	Ah	stark schluffiger Ton, dunkelgraubraun (7.5 YR 3/3), mittel humos, Krümel- bis Subpolyedergefüge, carbonatfrei, sehr stark durchwurzelt, stark sauer, ebene/deutliche Horizontgrenze
2	7-22	Al-Bv	stark schluffiger Ton, graubraun (10 YR 5/4), mittel humos, Subpolyedergefüge, carbonatfrei, stark durchwurzelt, stark sauer, ebene/diffuse Horizontgrenze
3	22-40	Btv	stark schluffiger Ton, dunkelgraubraun (10 YR 4/4), schwach humos, Subpolyeder- bis Polyedergefüge, carbonatfrei, mittel durchwurzelt, stark sauer, ebene/diffuse Horizontgrenze

Nr.	Tiefe [cm]	Horizont	Beschreibung
4	40-57	Bvt	mittel schluffiger Ton, dunkelgraubraun (7.5 YR 4/4), sehr schwach humos, Polyedergefüge, carbonatfrei, schwach durchwurzelt, mäßig sauer, sehr geringe redoximorphe Merkmale, ebene/diffuse Horizontgrenze
5	57-70	IIBvt-Tv	schwach schluffiger Ton, dunkelbraun (7.5 YR 4/6), sehr schwach humos, Polyedergefüge, carbonatfrei, schwach durchwurzelt, mäßig sauer, sehr geringe redoximorphe Merkmale, ebene/deutliche Horizontgrenze
6	70-80+	Tv+cCv	Festgesteinszersatzmaterial, 80 % Grobboden, sehr hellgrünlichgrau (5 Y 8/1) und 20 % Feinboden

Bodentyp (nach KA5): verbrauchte Terra fusca-Parabraunerde (Ableitung siehe Kapitel 5.9.9)

5.2 Physikalische Parameter

In den folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Horizonte und Kornfraktionen der untersuchten Peda mit festen Begriffen belegt, um eine schnelle Beschreibung zu ermöglichen (Abb. 18). Unter Oberboden wird dabei der erste Mineralbodenhorizont verstanden: Es handelt sich in allen Peda um einen Ah-Horizont. Auflagehorizonte wurden nicht chemisch untersucht. Die Zahl und Benennung der weiteren Horizonte richtet sich nach den standortabhängigen pedologischen Gegebenheiten. Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen liegt auf dem tonreichsten Unterbodenhorizont eines jeden Pedons, kurz „tonreichster Horizont“ genannt. Er enthält häufig noch Kalksteine, die Bodenmatrix ist aber kalkfrei. Dieser Horizont liegt in allen Böden oberhalb des carbonathaltigen Kalksteinverwitterungsschuttcs. Der Verwitterungsschutt wurde bei der Probenaufbereitung in die Fraktion < 2 mm (Feinmaterial) und ≥ 2 mm aufgeteilt (Stein). Das betrifft insgesamt sechs Peda. Leider wurde der große Einfluss des Feinmaterials auf die Zusammensetzung des tonreichsten Horizontes erst spät erkannt, so dass für die Böden am Röhringsberg und aus Holzkirch nur Daten über den Kalkstein ≥ 2 mm vorliegen.

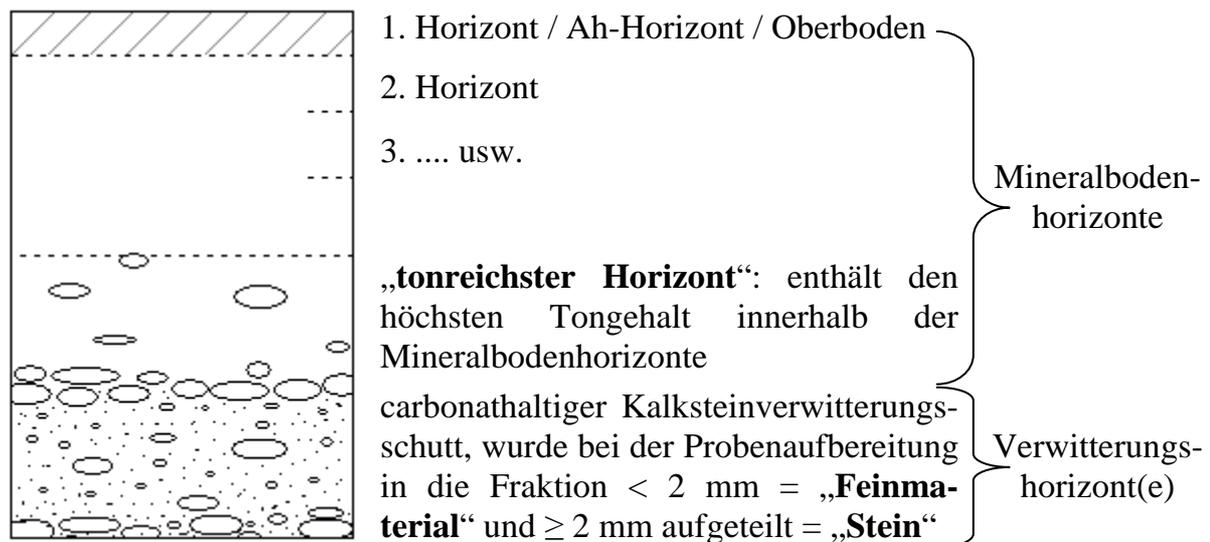


Abb. 18: Generalisiertes Profil der neun untersuchten Peda zur Begriffsbestimmung

5.2.1 Steinverteilung

Die Grobbodenfraktion der untersuchten Böden besteht ausschließlich aus Kalkstein und wurde in die Kornfraktionen kantige Steine/Blöcke (≥ 63 mm) und Grus (2 bis < 63 mm) untergliedert. Die Mengenverteilung wurde jeweils an der Profilwand in Volumenprozent abgeschätzt. Für die Böden am Röhringsberg und auf der Schwäbischen Alb (HOLZ) liegen nur Daten der gesamten Grobbodenfraktion vor. Auffällig ist die Verteilung von Grus zu Steinen/Blöcken im Tiefenverlauf der einzelnen Böden (Abb. 19).

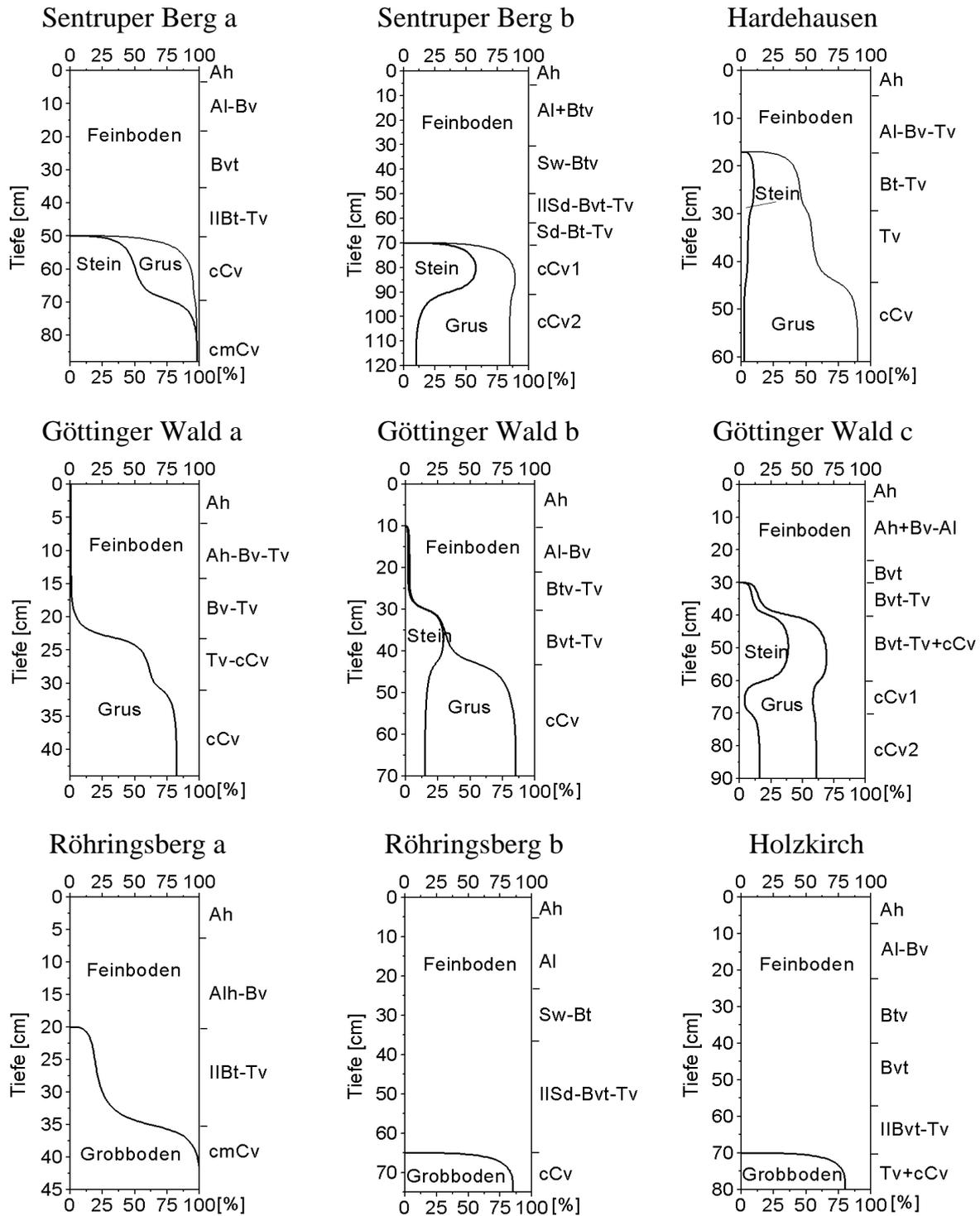


Abb. 19: Verteilung von Grus (2 bis < 63 mm) und Steinen/Blöcken kurz „Stein“ (≥ 63 mm) in Vol.-% am Gesamtboden¹

¹ Anmerkung: Der Übersicht halber wird in der Abbildung auch das kalkhaltige Feinmaterial < 2 mm der C-Horizonte als Feinboden bezeichnet.

Vier Peda weisen einen hohen Anteil an Steinen/Blöcken in den Mineralbodenhorizonten bzw. in den oberen Verwitterungshorizonten auf. Dann kehrt sich das Verhältnis zu Gunsten der Grusfraktion um. Es ist anzunehmen, dass der Anteil an Steinen/Blöcken mit zunehmender Tiefe und Nähe zum unverwitterten Gestein wieder ansteigt. Bis zum annähernd unveränderten Gestein konnten nur die Peda Röhringsberg a und Sentruper Berg a aufgegraben werden, da die Verwitterungsschuttdecke weniger als zwei Dezimeter mächtig ist. Das Pedon Göttinger Wald a ist innerhalb des aufgeschlossenen Bereiches frei von Steinen/Blöcken, das Ausgangsmaterial ist grusiger Kalksteinverwitterungsschutt.

Für die Anreicherung von Steinen/Blöcken in oder direkt unter den tonreichsten Horizonten der Peda kommen mehrere Erklärungen in Frage. Es könnte sich um Steinpflasterböden handeln, bei denen das feinere Material zwischen den Steinen/Blöcken ausgeblasen wurde. Oder die Steinsohle entstand durch Bodenfließen, wobei eine Sortierung stattfand und die größeren Steine an die Oberfläche transportiert wurden. Auch könnten die Steine/Blöcke vom Oberhang aberodiert sein und sich auf die Verwitterungsschuttdecke gelegt haben. Gegen einen Transport von Steinen vom Oberhang spricht u.a., dass sich das Pedon Hardehausen auf einer kleinen Kuppe befindet und die Böden im Göttinger Wald und am Röhringsberg am Oberhang.

Am wahrscheinlichsten ist es, dass es sich bei den tonreichsten Horizonten teilweise um Rückstände der Verwitterungsschuttdecken handelt. Die darin oft noch enthaltenen Kalksteinbrocken ≥ 63 mm sind aufgrund ihrer geringen Oberfläche und/oder anderer chemischer Zusammensetzung verwitterungsstabiler als der feinkörnigere Grus (2 bis < 63 mm) oder das carbonathaltige Feinmaterial < 2 mm.

5.2.2 Gesteinsbestandteile – Carbonatgehalt und Zusammensetzung des Lösungsrückstands

In Tabelle 2 sind die Carbonatgehalte der untersuchten Kalksteinproben wie auch des Feinmaterials und die sich daraus ergebenden Rückstandsmengen aufgeführt (vgl. auch Anhang I).

Tab. 2: Carbonatgehalte und entsprechende Lösungsrückstandsmengen (Rückst.) der untersuchten Kalksteine und des zwischen den Kalksteinen lagernden carbonathaltigen Verwitterungsschuttes (Feinmaterial < 2 mm) sowie Tongehalte der Lösungsrückstände

Pedon	Tiefe [cm]	Horizont	Kalkstein			Feinmaterial		
			CaCO ₃ [%]	Rückst. [%]	Ton [%]	CaCO ₃ [%]	Rückst. [%]	Ton [%]
SBa	50-69	cCv	92,5	7,5	70	50,5	49,5	78
	69-88	cmCv	92,3	7,7	70	69,3	30,7	74
SBb	70-90	cCv1	85,1	14,9	73	50,1	49,9	58
	90-120	cCv2	86,7	13,3	67	65,1	34,9	71
HARD	17-29	Bt-Tv	95,8	4,2	60			
	29-44	Tv	97,3	2,7	57			
	44-61	cCv	89,8	10,2	45	45,4	54,6	70
GOWa	23-31	Tv-cCv	94,4	5,6	75	32,1	67,9	75
	31-44	cCv	93,7	6,3	76	64,3	35,7	84
GOWb	30-43	Bvt-Tv	95,7	4,3	63			
	43-70	cCv	94,7	5,3	62	67,3	32,7	78
GOWc	40-60	Bvt-Tv+cCv	98,0	2,0	52			
	60-70	cCv1	97,2	2,8	56	27,7	72,3	58
	70-90	cCv2	96,5	3,5	57	30,4	69,6	49
RBa	35-45	cmCv	98,8	1,2	64			
RBb	65-75	cCv	99,5	0,5	63			
HOLZ	70-80	Tv+cCv	99,8	0,2	89			

Ein Kalkstein muss laut AG BODEN (2005) mindestens 85 % Carbonat aufweisen. Das Spektrum der hier untersuchten Kalksteine reicht von wenig über 85 % Carbonat im Pedon Sentruper Berg b bis annähernd 100 % im Pedon Holzkirch. Dementsprechend niedrig fallen die Rückstandsmengen aus. Mit Hilfe der Munsell-Farbtabelle wurde die Farbe der im Labor gewonnenen Lösungsrückstände erfasst. Sie sind überwiegend grau gefärbt, lediglich das Pedon Hardehausen geht mit einem dunkelgelbbraun gefärbten Rückstand etwas stärker in Richtung der meist dunkelgraubraunen tonreichen Horizonte, die ihre jetzige Eigenfarbe somit erst durch eine intensive Verbraunung erhalten haben.

Die Feinmaterialien weisen bereits deutlich niedrigere Carbonatgehalte als die eigentlichen Kalksteine auf. Auch die Farbe der gewonnenen Lösungsrückstände ist teilweise brauner. Beides deutet darauf hin, dass Verwitterung stattgefunden hat. Auch eine Vermischung von Feinmaterial mit Löss ist in Betracht zu ziehen.

5.2.3 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenanalyse wurde am Feinboden der einzelnen Mineralbodenhorizonte, dem massiven Kalkstein („Stein“) und am kalkhaltigen „Feinmaterial“ durchgeführt. An Proben mit mehr als 0,1 % Carbonat wurde eine Kalkzerstörung vorgenommen. Die einzelnen Messergebnisse sind im Anhang I aufgeführt. Tabelle 3 zeigt die

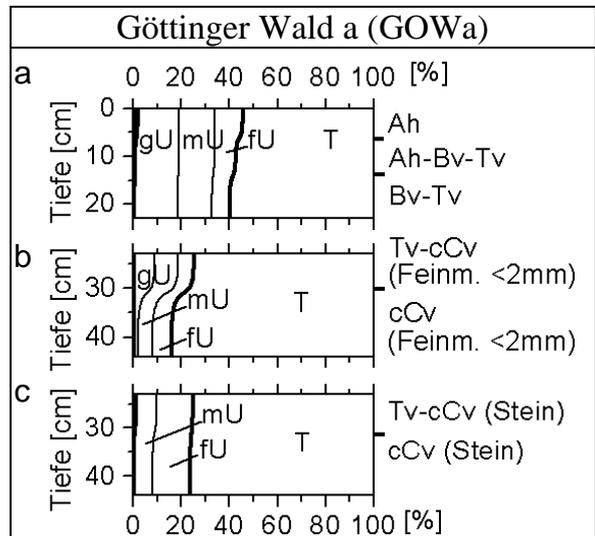
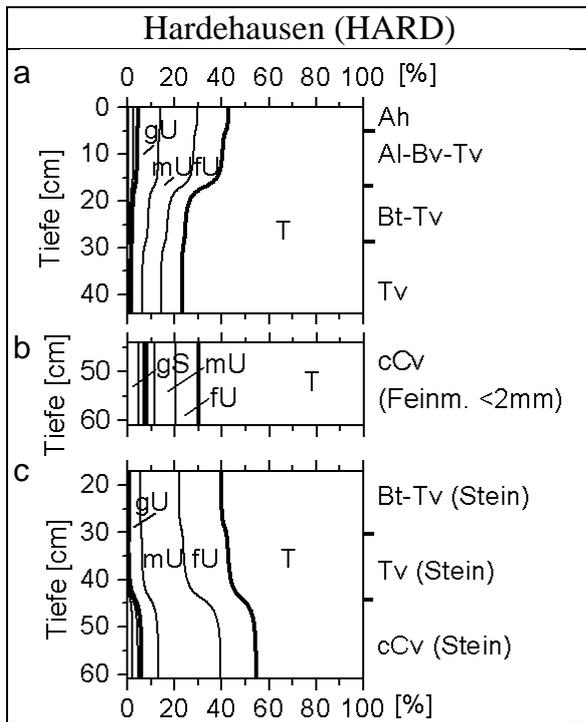
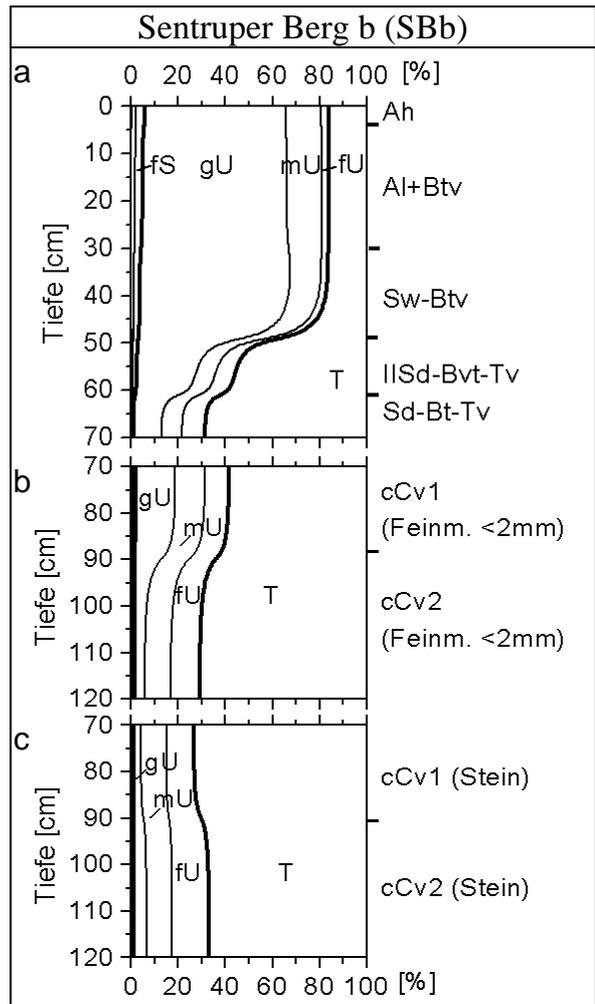
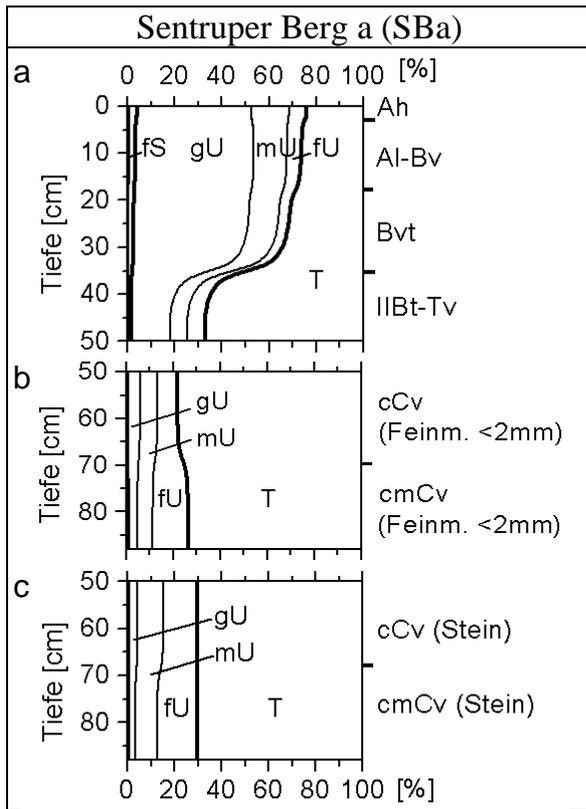
gemittelten Korngrößen der Oberböden (Ah-Horizonte), der tonreichsten Horizonte, des Feinmaterials und der Kalksteine aller neun Böden.

Tab. 3: Mittlere Korngrößen und Minimal- bzw. Maximalwerte der untersuchten Böden in Gew.-% des carbonat- und humusfreien Feinbodens

[%]	T	fU	mU	gU	fS	mS	gS	T	U	S	gU/fU
Ah-Hor.	37	9	20	31	2	1	0	37	60	3	4,5
Min	16	4	15	10	1	0	0	16	38	1	0,7
Max	57	13	31	60	4	2	1	57	78	6	16,5
tonr. Hor.	65	7	11	15	1	0	0	65	34	1	2,2
Min	55	6	7	5	0	0	0	55	22	0	0,5
Max	77	10	16	25	1	1	0	77	44	2	3,8
Feinm.	70	9	10	9	1	0	1	70	28	2	1,2
Min	49	6	6	2	0	0	0	49	16	0	0,2
Max	84	15	16	28	1	2	5	84	50	8	4,7
Stein	67	15	12	4	1	0	0	67	32	1	0,3
Min	45	7	2	0	0	0	0	45	8	0	0,0
Max	89	19	27	12	2	2	2	89	49	6	0,7

T Ton, fU Feinschluff, mU Mittelschluff, gU Grobschluff, fS Feinsand, mS Mittelsand, gS Grobsand, Ah-Hor. Ah-Horizonte, tonr. Hor. tonreichster Horizont, Feinm. carbonathaltiger Verwitterungsschutt < 2 mm, Stein Kalkstein \geq 2 mm

Zunächst werden die Ah-Horizonte betrachtet. Sie enthalten im Durchschnitt 37 % Ton, weisen aber eine große Spannweite von 16 bis 57 % Ton auf. Je flachgründiger die Böden sind, umso höher liegen die Tongehalte (vgl. Abb. 20). Auch die Schluffgehalte schwanken im Oberboden stark. Im Mittel enthalten sie 60 % Schluff, hauptsächlich Grob- und Mittelschluff. Der Sandanteil, maßgeblich Feinsand, ist sehr gering und liegt bei maximal 6 % im Pedon SBb.



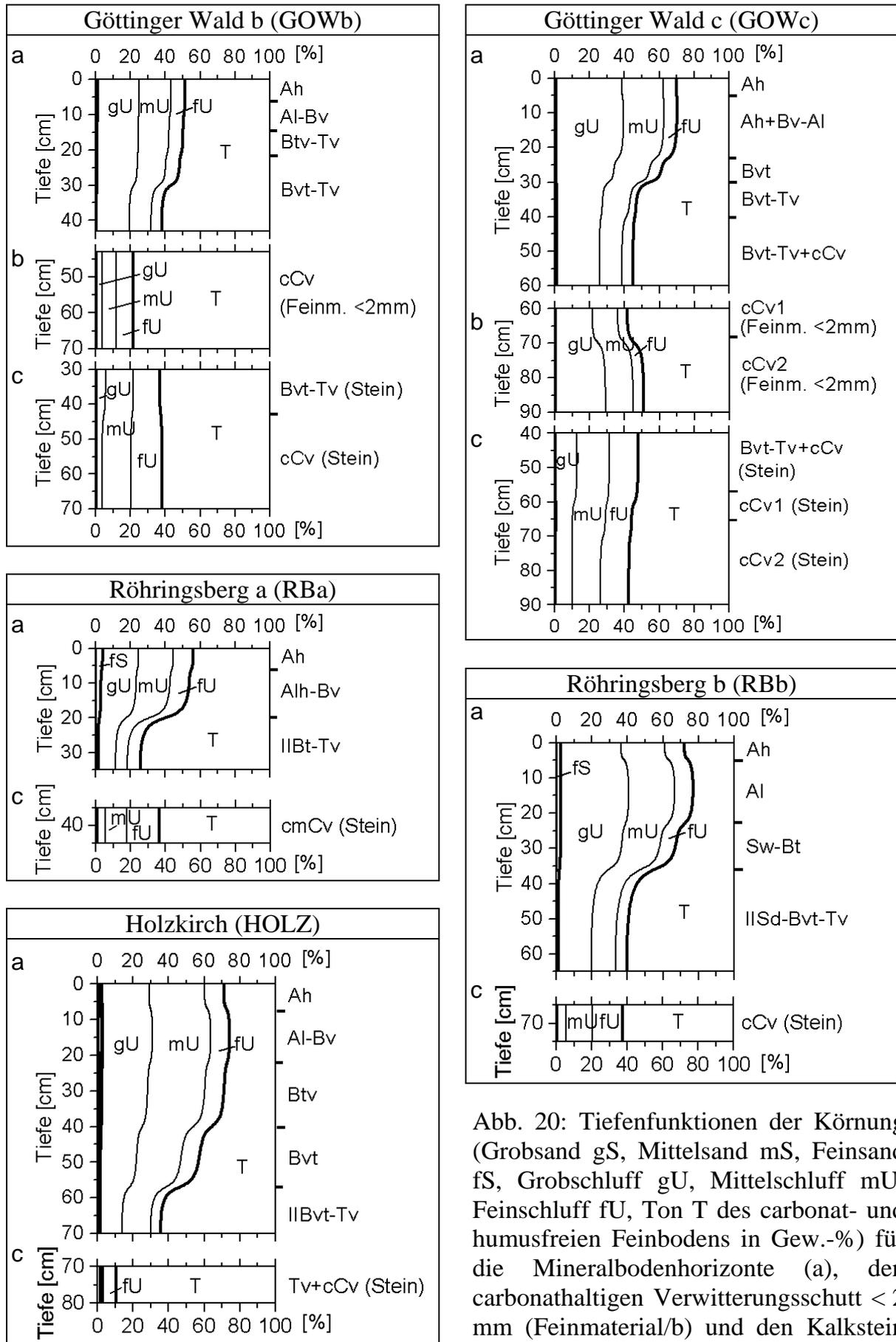


Abb. 20: Tiefenfunktionen der Körnung (Grobsand gS, Mittelsand mS, Feinsand fS, Grobschluff gU, Mittelschluff mU, Feinschluff fU, Ton T des carbonat- und humusfreien Feinbodens in Gew.-%) für die Mineralbodenhorizonte (a), den carbonathaltigen Verwitterungsschluff < 2 mm (Feinmaterial/b) und den Kalkstein ≥ 2 mm (Stein/c)

Zur Rekonstruktion der Genese der Standorte ist unter anderem die Frage zu klären, ob die Oberböden aus reinem Anwehungsloess bestehen oder bereits Vermischungen mit kalksteinbürigen Lösungsrückständen aufweisen. In direkter Umgebung der Untersuchungsstandorte wurde kein von Kalkstein unbeeinflusster Löss gefunden. Deswegen wird für Vergleiche auf Literaturangaben zurückgegriffen. Allgemein wird für Anwehungslosse Mitteleuropas eine Spannweite von 10–25 % Ton, 65–80 % Schluff und 10–15 % vorwiegend Fein- und Mittelsand angegeben (EHLERS 1994). Der C-Löss einer Parabraunerde aus dem Leinetalgraben bei Göttingen besitzt 16 % Ton, 9 % fU, 10 % mU, 62 % gU und 4 % Sand (GÄTH 1987). Nur die Oberböden am Sentruper Berg weisen eine ähnliche Zusammensetzung auf. Bei den anderen Böden sind die Grobschluffanteile niedriger und die Tongehalte höher. GEHRT (1994) beschreibt, dass für südniedersächsische Lössse ein Schluffquotient ($gU/(fU+mU)$) von 1,3 und mehr als sicherer Hinweis auf eine Lössbeeinflussung zu bewerten ist. Das trifft nur auf die Böden am Sentruper Berg und im Göttinger Wald c zu, alle anderen Böden zeigen niedrigere Schluffquotienten (Anhang I).

Der tonreichste Unterbodenhorizont der untersuchten Böden besitzt im Mittel 65 % Ton und schwankt zwischen 55 und 77 % Ton (Tabelle 3). Im Durchschnitt ergibt sich eine Differenz von 28 % Ton zum Oberboden. Sechs Böden (SBa, SBb, GOWc, RBa, RBb, HOLZ) zeigen 25 % Tongehaltsunterschied und mehr (vgl. Anhang I). Im Pedon Hardehausen sind es 20 % Tongehaltsunterschied. In den Böden Göttinger Wald a und b fällt die Differenz mit 6 und 13 Prozentpunkten deutlich niedriger aus. Laut MÜCKENHAUSEN (1977) weist selbst eine Fahlerde in norddeutschen Lössgebieten nur bis zu 20 % Tongehaltsdifferenz auf. Eine Auswertung der Bodendatenbank des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg ergab, dass brandenburgische Parabraunerden im Median 13 % Tongehaltsunterschied zwischen Al- und Bt-Horizonten aufweisen, Fahlerden 10 % (KÜHN et al. 2006). Bei mindestens sechs der untersuchten Böden ist darum davon auszugehen, dass Lessivierung allein nicht für die Entstehung der tonreichsten Unterbodenhorizonte verantwortlich ist. Die im Vergleich zum Ah-Horizont höheren Tongehalte im tonreichsten Horizont gehen mit einer Reduzierung der Grob- und Mittelschlufffraktion einher, der Feinschluffanteil sinkt kaum, der Sandanteil geht im Vergleich zum Oberboden zurück.

Der Lösungsrückstand der Kalksteine besteht im Mittelwert aus 67 % Ton, allerdings schwanken die Rückstände in einem weiten Bereich (Abb. 20, Tab. 2). Besonders niedrig sind sie mit 45 % im cCv-Horizont im Hardehausener Wald. Aber auch die Böden Göttinger Wald b und c und Röhringsberg a und b erreichen die für die Ausgrenzung eines Tv-Horizontes notwendigen 65 % Ton nicht (AG BODEN 2005). In einigen Böden wurden die Steine aus mehreren Horizonten untersucht, dabei liegen die Tongehalte nie mehr als 6 Prozentpunkte auseinander. Anders ist das im Boden Hardehausen, hier sinken die Tongehalte von 60 % in 17–29 cm Tiefe auf 45 % in 44–61 cm Tiefe. Das lässt sich wahrscheinlich auf geologisch bedingte Unterschiede in der Zusammensetzung der Kalksteine zurückführen. In der Schlufffraktion der untersuchten Kalksteine dominiert Fein- und Mittelschluff. Die Sandfraktion spielt nur im Kalkstein des cCv-Horizontes von Hardehausen mit 6 % eine größere Rolle. Im

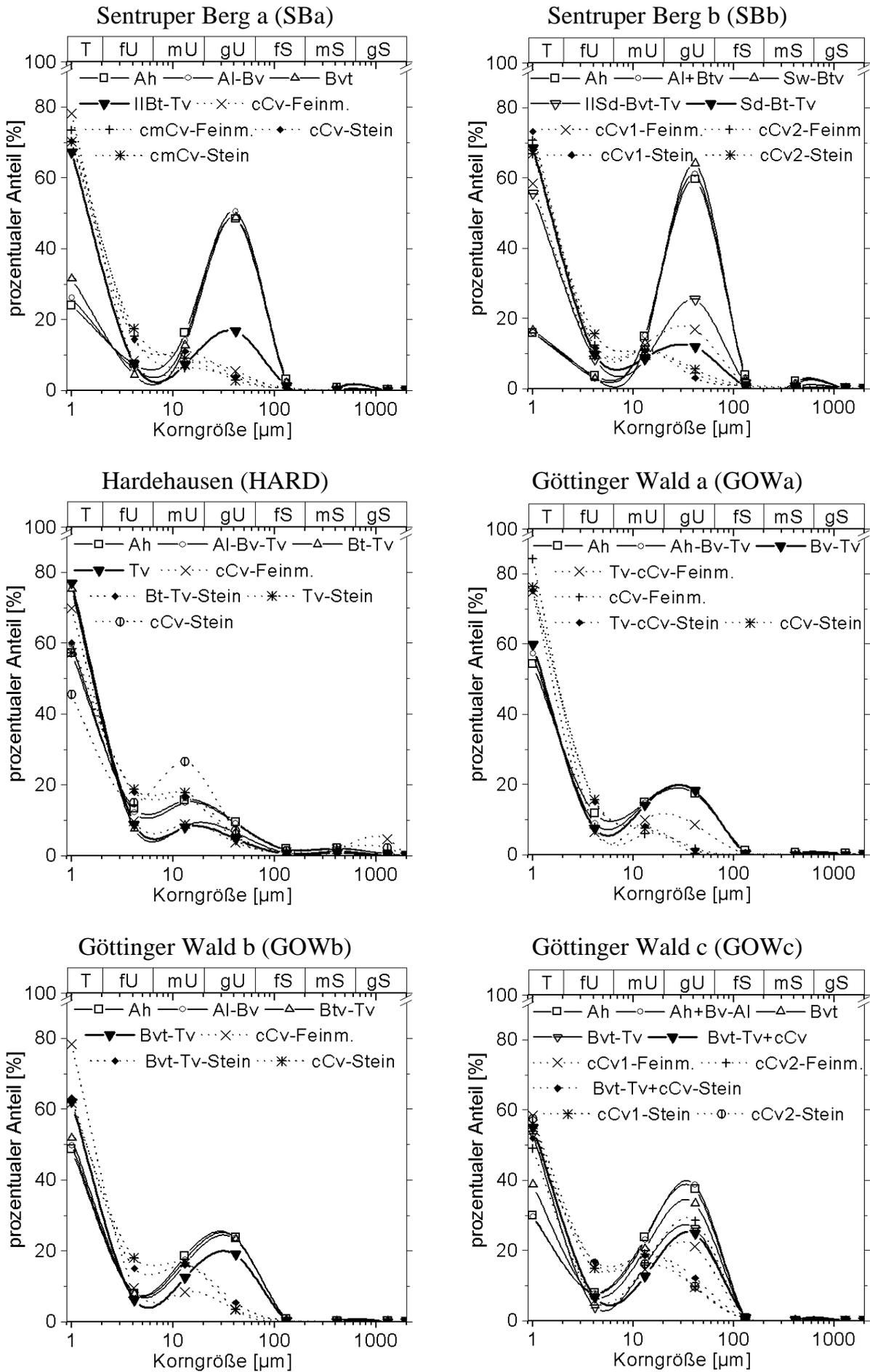
Vergleich zu den Oberböden, die die Korngrößenmaxima im Ton und Grobschluffbereich haben, liegen die Maxima in den Kalksteinen im Ton und Feinschluffbereich.

Das Feinmaterial nimmt eine Sonderstellung zwischen dem Kalkstein und dem tonreichsten Horizont ein. Der kalkfreie Lösungsrückstand des Feinmaterials enthält, sofern er mitbeprobte wurde, im Durchschnitt 70 % Ton und nur 28 % Schluff. Also mehr Ton und weniger Schluff als der Kalkstein und der tonreichste Horizont im Mittel aufweisen. Das kann möglicherweise auf eine frostmechanische Zerkleinerung von Schluffkörnern zurückgeführt werden (SCHEFFER et al. 1966 und Kapitel 5.11.1).

Quotienten aus den Korngrößenangaben erleichtern die Identifizierung bestimmter Komponenten/Substrate. Da die Sandfraktion in allen Böden sehr gering ausfällt, sind Quotienten aus der Schlufffraktion am aussagekräftigsten. So kann über den Quotient aus Grobschluff und Feinschluff (gU/fU) festgestellt werden, ob eine Mischung von Löss mit tonigerem Material vorliegt. Grobschluff ist charakteristisch für Löss, Feinschluff kommt in tonigeren Substraten meist in größeren Mengen vor (ALAILY 1984). Die zwei Böden am Sentruper Berg zeigen eine Dreiteilung mit recht hohen Quotienten von 6,5 und 16,5 in den Ah-Horizonten. Im tonreichsten Horizont folgt ein deutlicher Abfall auf 1,2 und 2,2. Der Kalkstein weist nur noch einen Quotienten von 0,3 auf. Der C-Löss aus dem Leinetalgraben hat zum Vergleich einen Quotienten von 7, ähnelt also den beiden Oberböden. Alle anderen Böden zeigen eine deutliche Zweiteilung in Mineralbodenhorizonte und die carbonathaltigen Verwitterungshorizonte. Während der Kalkstein auch hier im Durchschnitt nur einen Quotienten von 0,3 erreicht, bewegen sich die Mineralbodenhorizonte im Mittel zwischen 2,3 (tonreichster Horizont) und 2,7 (zweiter Horizont). Im Ah- bzw. ersten Horizont sind die Quotienten mit 2,5 etwas niedriger als im zweiten. Dies ist wahrscheinlich die Folge von verwitterungsbedingten Mineralgrößenänderungen. Das Feinmaterial weist stark unterschiedliche Quotienten auf. Im Pedon Göttinger Wald c ähnelt es dem tonreichsten Horizont. In den Peda Sentruper Berg b und Göttinger Wald a trifft das nur auf das direkt an diesen Horizont angrenzende Feinmaterial zu. Alle weiteren untersuchten Feinmaterialproben tendieren im Quotienten eher zum Kalkstein. Die Ergebnisse deuten auf eine unterschiedlich starke Einmischung von Lössmaterial z. T. bis in das Feinmaterial der Böden Sentruper Berg b und Göttinger Wald a und c hin.

Die alleinige Betrachtung der Grobschlufffraktion aller Böden lässt vergleichbare Schlussfolgerungen zu. Der Stein enthält im Schnitt 4 % gU und das Feinmaterial 9 % gU , bei einer großen Spannweite von 8 bis 28 %. Der Oberboden besitzt im Durchschnitt 31 % gU , minimal 10 % gU . Der Grobschluffanteil in den tonreichsten Horizonten ist mit durchschnittlich 15 % immer signifikant höher als im Stein (mit Ausnahme des Pedons Hardehausen). Das zeigt ebenfalls, dass im tonreichsten Horizont mit großer Wahrscheinlichkeit eine Vermischung mit Löss stattgefunden hat. Als eine mögliche Quelle für Grobschluff im tonreichsten Horizont wäre noch die frostmechanische Zerkleinerung der Sandfraktion der Lösungsrückstände der Kalksteine in Betracht zu ziehen, allerdings ist dafür mit Ausnahme von Pedon Hardehausen nicht genug Sand in den Kalksteinen enthalten (vgl. Tab. 3).

Löss hat seinen Korngrößenschwerpunkt im Grobschluff, der Lösungsrückstand im Ton. Die Verteilung der Korngrößenfraktionen im tonreichsten Horizont kann darum Hinweise auf dessen Herkunft geben. Der Verlauf und die Zusammensetzung der Korngrößen sind in Abbildung 21 dargestellt. Die Ermittlung der Sortierungskoeffizienten nach TRASK (1932) (vgl. Kapitel 4.2) war in den meisten Horizonten auf Grund der hohen Tongehalte nicht möglich.



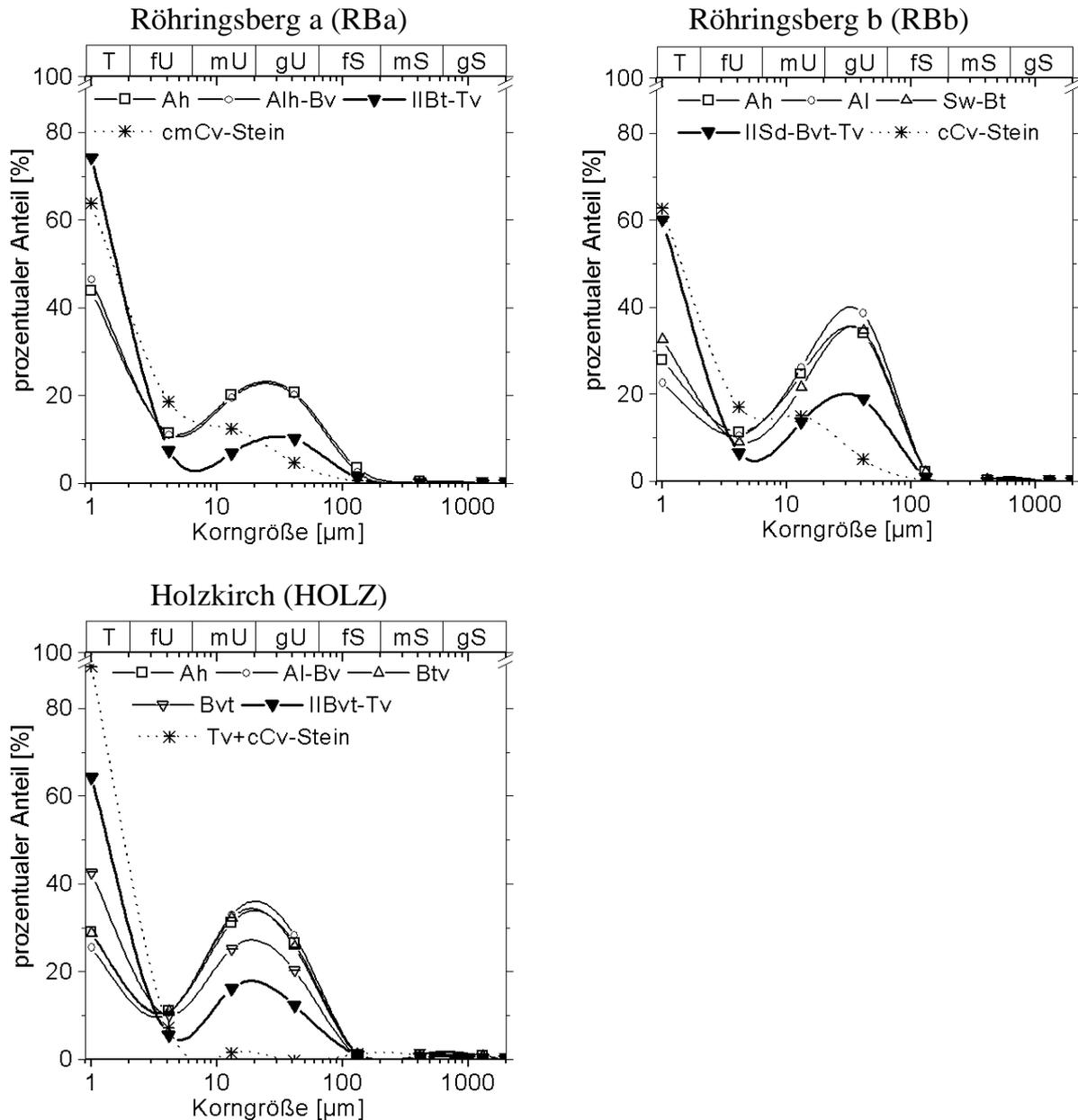


Abb. 21: Prozentuale Korngrößenverteilung des carbonat- und humusfrei analysierten Feinbodens der Mineralbodenhorizonte, des carbonathaltigen Verwitterungsschuttes < 2 mm (Feinm.) und des Kalksteins \geq 2 mm (Stein)

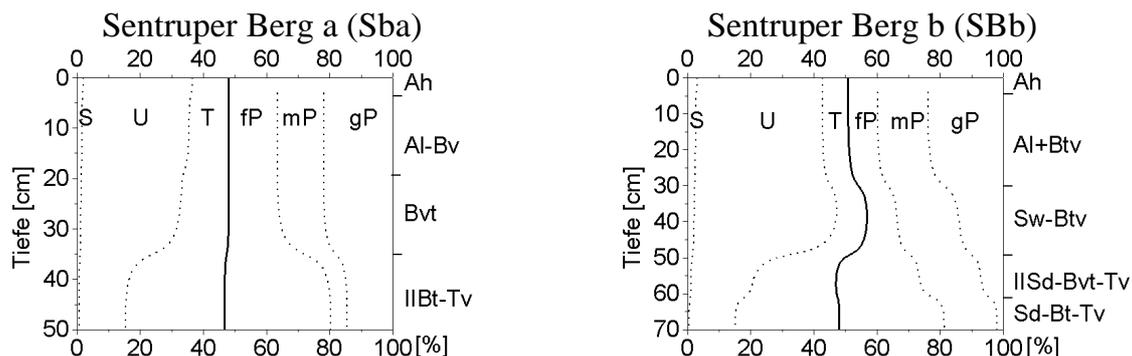
Der Verlauf der Graphen der tonreichsten Horizonte ist in Abbildung 21 durch eine dickere Linie hervorgehoben. Sie ist in vielen Fällen eine optische Mischung aus den Graphen der Lösungsrückstände der Kalksteine und der hangenden Horizonte. In den Böden Hardehausen und Göttinger Wald a weisen alle Graphen einen sehr ähnlichen Verlauf ohne ausgeprägten gU-Peak auf. Das ist auf einen geringen Lösseinfluss zurückzuführen. Die tonreichsten Horizonte der neun Peda weisen Tongehalte auf, die in einigen Fällen höher als im Stein (Pedon Röhrlingsberg a) und auch im Feinmaterial liegen (Pedon Hardehausen) und in den übrigen Fällen ähnlich hoch oder niedriger sind. Höhere Tongehalte können auf Frostzerkleinerung und/oder Toneinwaschung zurückgeführt werden, kleinere auf eine unterschiedlich starke Vermischung mit Löss. Eine Einzelfallbetrachtung erfolgt in Kapitel 5.9.

Die Auswertung der Korngrößenanalyse zeigt, dass die Böden Mischböden aus Residualton und Löss sind. Der Lösseinfluss erstreckt sich bis in die tonreichsten Horizonte und teilweise auch in das Feinmaterial. Umgekehrt deuten hohe Tongehalte im Oberboden darauf hin, dass in vielen Peda Residualton bis zur Oberfläche eingearbeitet ist. Daraus folgt, dass eine starke, eventuell kryoturbate Durchmischung von Residualton und/oder Feinmaterial mit Löss stattgefunden hat. Eine reine Lössüberdeckung der Kalksteine mit nachfolgender Lessivierung ist auszuschließen, da dafür sowohl die Tongehalte als auch die Tongehaltssprünge von den Oberböden zu den tonreichsten Horizonten zu hoch sind. In welchem Umfang zusätzlich Lessivierung stattgefunden hat, werden die weiteren Auswertungen, insbesondere Kapitel 5.6, zeigen.

5.2.4 Porengrößenverteilung

Zur Bestimmung der Porengrößenverteilung, der Lagerungsdichte und der gesättigten Wasserleitfähigkeit wurden aus jedem Mineralbodenhorizont Stechzylinder entnommen. In sehr geringmächtigen oder sehr steinreichen Horizonten entfiel die Probenahme. Darum fehlen Angaben über die Ah-Horizonte der Böden am Sentruper Berg (SBa, SBb) und am Röhringsberg (RBa, RBb) und der tonreichsten Horizonte der Böden Hardehausen und Göttinger Wald b und c.

Das Gesamtporenvolumen der untersuchten Horizonte liegt zwischen 43 (3. Horizont SBb) und 68 Vol.-% (1. Horizont GOWc) (Abb. 22, Anhang II). Es bewegt sich damit zwischen mittel und sehr hoch (AG BODEN 2005). In den Böden Göttinger Wald a und b und am Röhringsberg sinken die Gesamtporenvolumina mit zunehmender Tiefe. In den Böden am Sentruper Berg nimmt das Porenvolumen nach unten leicht zu. Im Boden Holzkirch (HOLZ) nimmt das Volumen zunächst ab und steigt im tonreichsten Horizont wieder leicht an. In der Regel sollten Gesamtporenvolumina mit abnehmender Korngröße zunehmen (HARTGE & HORN 1999). Dieses ist hier trotz deutlich steigender Tongehalte bis zum tonreichsten Horizont in mehreren Böden nicht der Fall. Das kann eine Folge der Durchschlammung der Aggregatzwischenräume mit Ton sein und kann anhand der Dünnschliffe insbesondere für Horizonte der Peda Göttinger Wald b und c, Röhringsberg b und Holzkirch nachgewiesen werden (vgl. Kapitel 5.6).



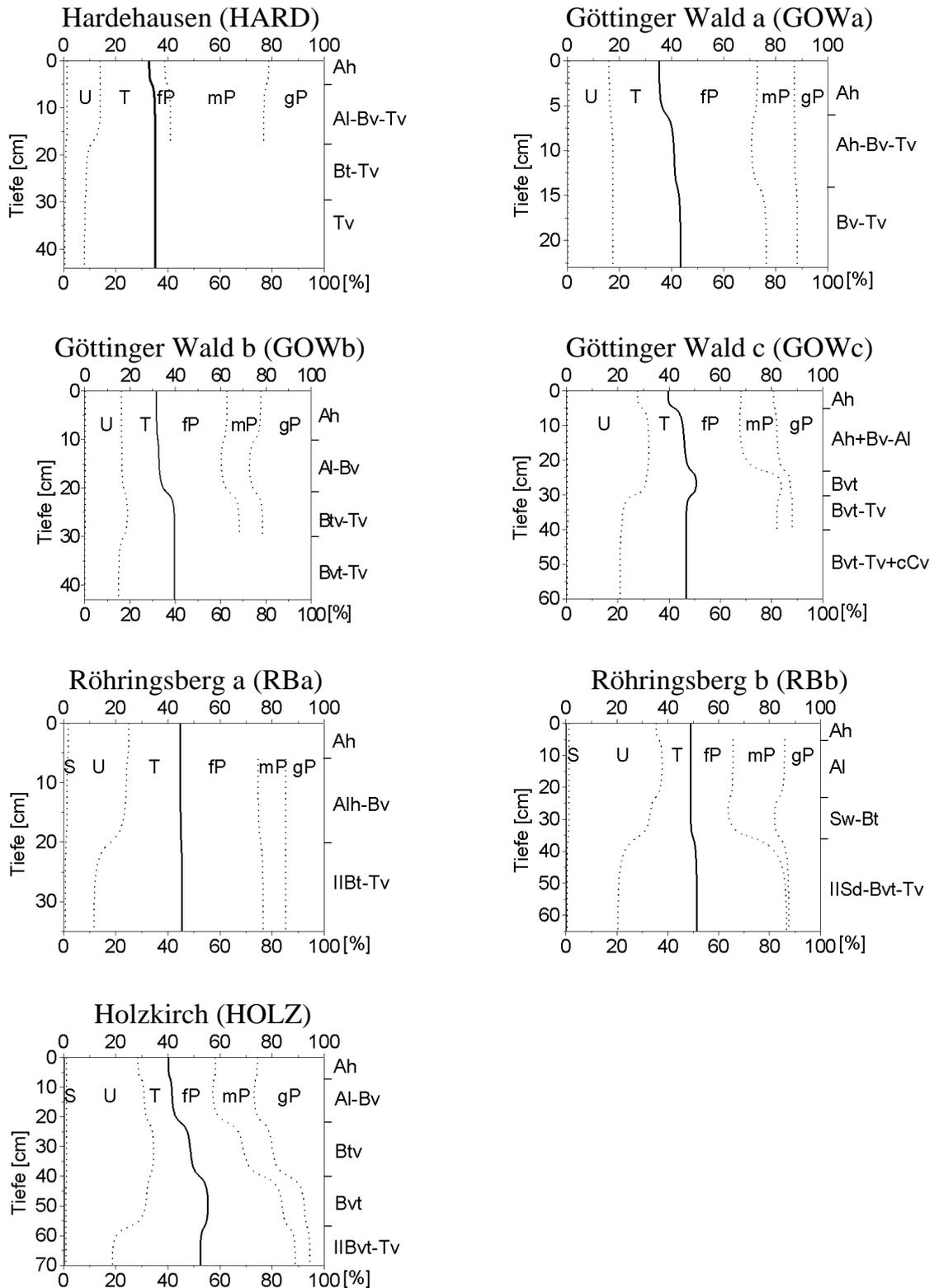


Abb. 22: Verteilung von Feinboden (Sand, Schluff, Ton) und Porenvolumen (Fein-, Mittel-, Grobporen) in Volumenprozent am Gesamtboden

Werden nur die Feinporen betrachtet, steigen die Anteile mit zunehmender Tiefe stark an und sind im tonreichsten Horizonten als hoch bis sehr hoch einzustufen (AG BODEN 2005). Der Grund dafür liegt in den steigenden Tongehalten, mit denen sich auch der Anteil an Feinporen vergrößert (HARTGE & HORN 1999). Der Zahl der Grob- und

Mittelporen nimmt mit zunehmender Tiefe in der Regel ab. Die Grobporen zeigen ihre Maxima jedoch teilweise nicht im ersten sondern im zweiten Horizont und nehmen erst dann stetig ab. Vermutlich ist dies auf Verdichtung des Oberbodens durch Waldarbeiten oder durch Verfüllen der Grobporen mit Humus bzw. Losung zurückzuführen.

5.2.5 Nutzbare Feldkapazität

In den untersuchten Böden verringert sich die nutzbare Feldkapazität (nFK) mit zunehmender Tiefe (Anhang II). Dies ist auf den steigenden Anteil an Ton bzw. Feinporen zurückzuführen (HARTGE & HORN 1999). Während sich die nFK in den Oberböden noch zwischen hoch und mittel bewegt, sinkt sie in den tonreichsten Horizonten auf mittel bis sehr gering (AG BODEN 2005).

Die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) lässt sich für alle Peda abschätzen, wenn fehlende Werte um Tabellenwerte, abgeleitet aus der Bodenart und dem Humusgehalt, ergänzt werden (AG BODEN 2005). Für die effektive Durchwurzelungstiefe wird hier der Bereich bis zum Beginn der cCv-Horizonte angenommen. Handelt es sich um grusige cCv-Horizonte, können sie zwar auch bedingt durchwurzelt werden, die nutzbare Feldkapazität dürfte aber eher gering sein. Da keine gesicherten Daten vorliegen, werden sie nicht berücksichtigt. Die flachgründigen Peda Göttinger Wald a und Röhringsberg a weisen nur eine sehr geringe nFKWe auf. In den tiefgründigeren Böden Hardehausen, Röhringsberg b, Sentruper Berg b und Holzkirch liegen sie im mittleren bis hohen Bereich (Tab. 4).

Tab. 4: Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) und deren Einstufung nach AG BODEN (2005)

	SBa	SBb	HARD	GOWa	GOWb	GOWc	RBa	RBb	HOLZ
nFKWe [mm]	79	173	95	41	63	88	49	91	102
Einstufung	gering	hoch	mittel	sehr gering	gering	gering	sehr gering	mittel	mittel

5.2.6 Wasserleitfähigkeit

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) ist ein Maß für die Durchlässigkeit eines wassergesättigten Bodens und kann Hinweise auf Stau- und Haftnässe geben (AG BODEN 2005). Bis auf Pedon Röhringsberg a zeigen alle Böden eine starke Abnahme der Wasserleitfähigkeit mit zunehmender Tiefe (Anhang II). Die tonreichsten Horizonte, sofern beprobt, weisen gesättigte Wasserleitfähigkeiten zwischen sehr gering und mittel auf (AG BODEN 2005). In den Oberböden, aus denen Stechzylinder für die kf-Messung gewonnen werden konnten, ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit dagegen als extrem hoch einzustufen (Tab. 5). In den Böden Sentruper Berg b und

Röhringsberg b ist die verringerte Wasserdurchlässigkeit der Unterböden in Form von Pseudogleymerkmalen makroskopisch erkennbar (vgl. Kapitel 5.1.1).

Tab. 5: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) und deren Einstufung nach AG BODEN (2005)

	SBa	SBb	HARD	GOWa	GOWb	GOWc	RBa	RBb	HOLZ
kf [m/s] Oberboden	n.b.	n.b.	$2,59 \cdot 10^{-04}$	$1,80 \cdot 10^{-04}$	$1,05 \cdot 10^{-04}$	$1,08 \cdot 10^{-04}$	n.b.	n.b.	$7,81 \cdot 10^{-05}$
Einstufung			extrem hoch	extrem hoch	extrem hoch				extrem hoch
kf [m/s] tonr. Hor.	$3,68 \cdot 10^{-06}$	$1,64 \cdot 10^{-08}$	n.b.	$4,31 \cdot 10^{-07}$	n.b.	n.b.	$2,89 \cdot 10^{-06}$	$2,98 \cdot 10^{-06}$	$1,09 \cdot 10^{-08}$
Einstufung	mittel	sehr gering		gering			mittel	mittel	sehr gering

5.2.7 Lagerungs- und Partikeldichte

Die Lagerungsdichten (dB) sind in den Ah-Horizonten nach AG BODEN (2005) meist als sehr gering einzustufen ($0,9$ bis $1,1 \text{ g/cm}^3$), nehmen aber mit der Tiefe zu und erreichen im tonreichsten Horizont geringe bis mittlere Werte von $1,2$ bis $1,5 \text{ g/cm}^3$ (Anhang II). Dies spricht für eine durch Tonverlagerung hervorgerufene Einlagerungsverdichtung, wie sie bereits in Kapitel 5.2.4 diskutiert wurde.

Die Dichte der Kalksteine bewegt sich zwischen $2,4$ und $2,6 \text{ g/cm}^3$. Der Mittelwert liegt bei $2,5$. Dichten unter $2,5$ treten am Sentruper Berg und im Pedon Röhringsberg a auf.

Die Dichte der Festsubstanz (dF) bzw. die Partikeldichte bewegt sich zwischen $2,6$ und $2,8$. Die Oberböden weisen häufig etwas niedrigere Dichten auf, da die Dichte der organischen Substanz unter der von Quarz oder Tonmineralen liegt (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997). Im Tiefenverlauf verändern sich die Dichten kaum (vgl. Anhang II).

5.3 Allgemeine chemische Parameter

5.3.1 pH-Werte

Die pH-Werte (CaCl_2) der untersuchten Böden steigen in der Regel mit zunehmender Tiefe stark an (Abb. 23, Tab. 6, Anhang III). Nur in den Peda Holzkirch, Röhringsberg a und im Göttinger Wald sind die pH-Werte im Ah-Horizont gegenüber dem zweiten Horizont leicht erhöht. Das ist wahrscheinlich auf Waldkalkungsmaßnahmen zurückzuführen. Im Mittel liegen die pH-Werte der Oberböden im stark sauren Bereich um pH 4,4; die Spannweite beträgt 3,4 bis 5,9, wobei die flachgründigeren Peda zu den höheren pH-Werten tendieren. Diese sehr stark sauren bis schwach sauren pH-Werte sind für Waldböden typisch. Die Auswertung von 192 Oberböden unter Forst in Niedersachsen ergab, dass 90 % stark versauert sind ($\text{pH}_{(\text{KCL})} < 4,2$) (PRECHTEL & SCHNEIDER 2002). Die Gründe für diese niedrigen Werte liegen neben der natürlichen Versauerung zum großen Teil in anthropogenen Säureinträgen. VEERHOFF et al. (1996) geben an, dass innerhalb der letzten 20 bis 30 Jahre der pH-Wert (KCl) je nach Ausgangs-pH-Wert um 0,4 bis 2 Einheiten gesunken ist.

Die tonreichsten Unterbodenhorizonte weisen im Durchschnitt einen pH von 5,9 auf, wobei sie relativ stark zwischen 4,4 und 7,1 schwanken. Diese teilweise hohen Werte sind hauptsächlich auf die bereits beschriebenen Kalksteinbröckchen unter 2 mm in der Feinbodenfraktion zurückzuführen. Das Feinmaterial des Verwitterungsschuttes ist durchgehend carbonathaltig, dementsprechend liegen die pH-Werte im sehr schwach alkalischen Bereich zwischen 7,3 und 7,5.

5.3.2 Carbonate, Humus, C/N

Die Überprüfung der Carbonatgehalte mittels Salzsäure an der Profilwand ergab, dass die Bodenmatrix aller Peda bis zu den tonreichsten Horizonten entkalkt ist. Auch die Dünnschliffe der Mineralbodenhorizonte weisen keine erkennbaren Calcitkristalle auf (vgl. Kapitel 5.6). Dennoch enthalten einige Feinerdeproben der tonreichsten Horizonte ca. 0,1 % Carbonat (Tab. 6, Anhang III). Das Pedon Hardehausen erreicht sogar 5,7 % bzw. 1,8 % CaCO_3 im darüber liegenden Horizont. Verantwortlich hierfür sind einzelne Kalksteinbröckchen unter 2 mm Durchmesser in den Mischproben, die damit zur Feinerdefraktion zählen. Im Feinmaterial der C-Horizonte steigt der Carbonatgehalt stark an und beträgt im Mittel 51 %.

Tab. 6: Mittlere Carbonat-, Kohlenstoff- (C_t), Humus- und Stickstoffgehalte (N_t), C/N-Verhältnisse und pH-Werte der Peda

	Carbonat [%]	C_t [%]	C_{org} [%]	Humus [%]	N_t [%]	C/N	pH (CaCl ₂)
Ah-Horizont	0,0	4,8	4,8	8,2	0,3	14	4,4
Min	0,0	2,5	2,5	4,3	0,2	11	3,4
Max	0,0	8,5	8,5	14,6	0,6	20	5,9
2. Horizont	0,0	2,6	2,6	4,4	0,2	14	4,3
Min	0,0	0,8	0,8	1,3	0,0	11	3,7
Max	0,0	5,6	5,6	9,7	0,5	17	5,6
tonreichster Hor.	0,7	1,7	1,6	2,8	0,2	9	5,9
Min	0,0	0,5	0,5	0,9	0,1	7	4,4
Max	5,7	3,8	3,8	6,6	0,3	11	7,1
Feinmaterial	51,2	7,0	0,8	1,4	0,1	11	7,4
Min	27,7	4,1	0,2	0,4	0,0	7	7,3
Max	69,3	8,9	2,4	4,1	0,2	14	7,5

Die aus dem organischen Kohlenstoff berechneten Humusgehalte sind erwartungsgemäß im Oberboden (Ah-Horizonte) am höchsten und mit durchschnittlich 8,2 % stark humos (AG BODEN 2005). Die Gehalte nehmen mit zunehmender Tiefe rasch ab (vgl. Abb. 23), steigen aber im tonreichsten Horizont häufig wieder leicht an, im Durchschnitt auf 2,8 % (mittel humos). Das kann mit den pH-Werten zusammenhängen, die in den tonreichsten Horizonten deutlich höher liegen als in den darüber liegenden Horizonten. So nimmt besonders im Pedon Sentruper Berg b die Durchwurzelung auf Grund der günstigeren Bedingungen im tonreichen Horizont wieder leicht zu und damit auch die Masse an humusbildenden Wurzelrückständen. In den flachgründigeren Peda Hardehausen und Göttinger Wald a und b ist die Abnahme der Humusgehalte weniger stark ausgeprägt und ein erneuter Anstieg im tonreichsten Horizont fehlt. Da die pH-Werte in diesen Böden höher als im Durchschnitt liegen, dürfte der Grund für die gleichmäßigen Humusgehalte in einem aktiverem Bodenleben liegen, welches eine stärkere und tiefere Humuseinmischung bedingt. Das oft noch sehr schwach durchwurzelte Feinmaterial ist mit durchschnittlich 1,4 % als schwach humos einzustufen (AG BODEN 2005).

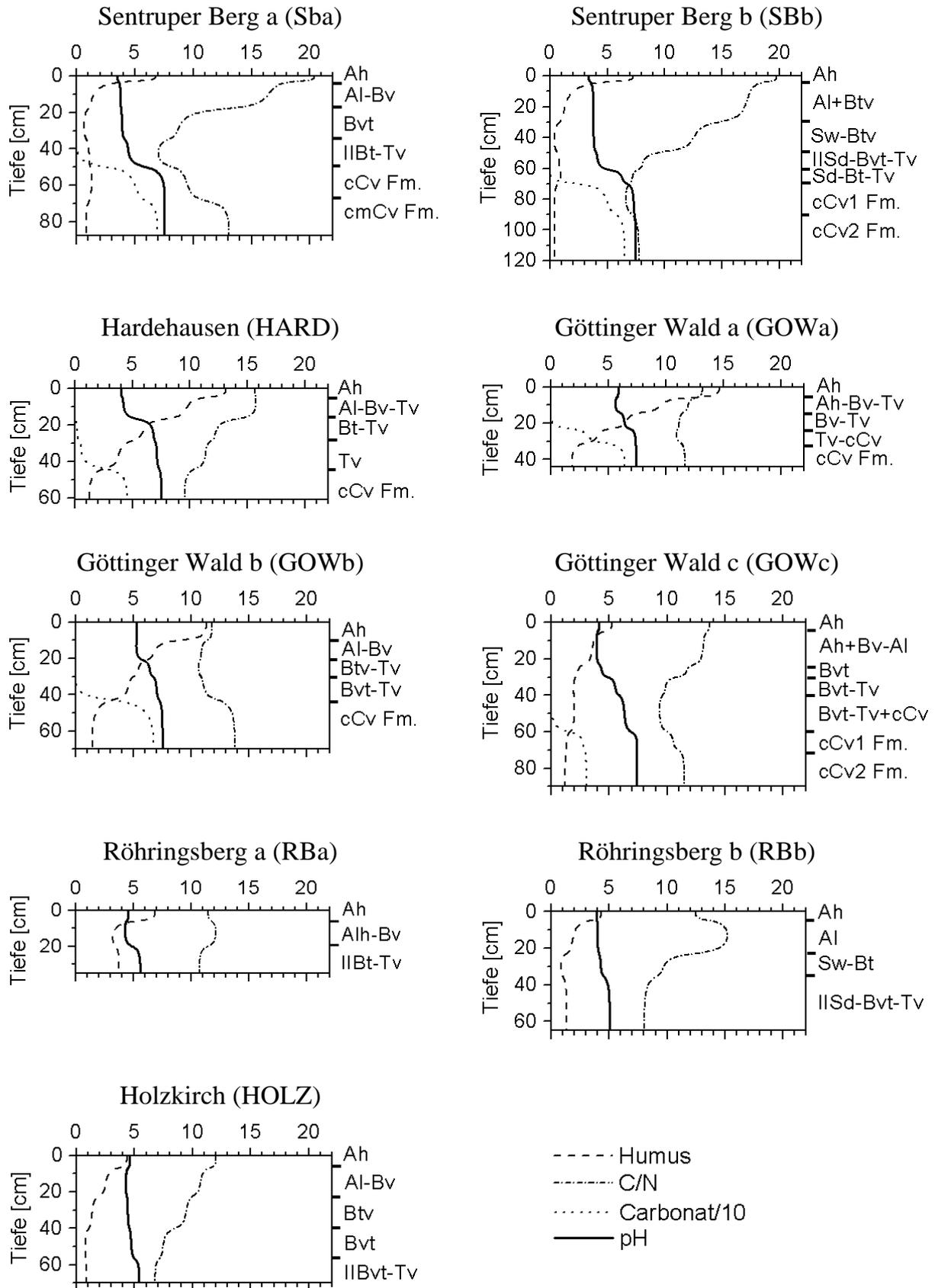


Abb. 23: Tiefenverlauf der Humusgehalte in %, der C/N-Verhältnisse, der pH-Werte (CaCl₂) und der Carbonatgehalte in % (Werte wurden durch 10 geteilt um sie in der Abbildung darstellen zu können)

Die Stickstoffgehalte (N_t) zeigen einen vergleichbaren Tiefenverlauf wie die Humusgehalte (Anhang III). Die Werte sinken zunächst und steigen in allen Böden mit Ausnahme von Hardehausen und Göttinger Wald a und b im tonreichsten Horizont wieder leicht an. Dieser Anstieg kann eine Folge des erhöhten Wurzelwachstums sein (Stickstoff aus den Pflanzenrückständen) oder mit Stickstoffauswaschung und erhöhter Stickstofffixierung an Dreischichttonminerale zusammenhängen. Die Gehalte im Ah-Horizont sind mit durchschnittlich 0,3 % eher als niedrig einzuordnen. Zum Vergleich: Für Bodendauerbeobachtungsflächen in Schleswig-Holstein wurden 0,34 bis 0,5 % N_t unter Forst in A(e)h-Horizonten bestimmt (LANU 2002). Im Göttinger Wald wurden an sechs Standorten im Mittel 0,54 % N_t in 0–10 cm Tiefe gemessen (MEIWES et al. 2009).

Das C/N-Verhältnis ist ein Maß für die biologische Aktivität und die Humusqualität. C/N-Verhältnisse unter 20 sind Anzeichen für günstige Zersetzungsbedingungen bzw. eine hohe Mikroorganismenaktivität (WOLFF & RIEK 1996). In den untersuchten Peda ist das C/N-Verhältnis in der Regel im Ah-Horizont mit durchschnittlich 14 am weitesten und wird mit zunehmender Tiefe kontinuierlich enger. Nur in den Peda am Röhringsberg liegt der höchste Wert im zweiten Horizont. Erst im Feinmaterial der C-Horizonte einiger Peda wird das Verhältnis wieder etwas weiter. Vermutlich geht im Feinmaterial der N-Gehalt im Gegensatz zum C-Gehalt überproportional zurück, da hier nur noch wenig Stickstoff durch Wurzelreste eingebracht wird. Die weitesten C/N-Verhältnisse weisen die Ah-Horizonte der Peda am Sentruper Berg mit 20 auf. Nach AG BODEN (2005) liegt das am Übergang von einer mittleren zu einer geringen Humusqualität für Ah-Horizonte und spiegelt sich auch in der Humusform Moder des Standortes wieder (Kapitel 5.1.1, die Auflage wurde nicht analytisch untersucht). Vermutlich verzögern die niedrigen pH-Werte am Sentruper Berg den Streuabbau, so dass sich organischer Kohlenstoff stärker anreichert als Stickstoff. Die verbleibenden Ah-Horizonte besitzen Verhältnisse zwischen 16 und 11; das entspricht nach AG BODEN (2005) einer hohen bis mittleren Humusqualität. Die Humusform dieser Böden ist überwiegend F-Mull.

5.3.3 Kationenaustauschkapazität

Kationenaustausch

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) gibt die Zahl der negativen Bindungsplätze je Kilogramm Boden an. Da die realen pH-Werte der Böden meist im sauren Bereich liegen, kann für die effektive KAK ein deutlich niedrigerer Wert angenommen werden. Die Bestimmung der potentiellen KAK ermöglicht jedoch einen Vergleich der Böden und insbesondere der Tonfraktionen untereinander. Die potentielle Kationenaustauschkapazität der untersuchten Böden ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tab. 7: Kationenaustauschkapazität (KAK), Basensättigung (BS), KAK der Tonfraktion und Dolomitgehalt der Mineralbodenhorizonte

Boden	Horizontmächtigkeit [cm]	KAK [cmol _e /kg Boden]	BS [%]	KAK Ton	KAK Ton	KAK Ton	Dolomit [g/kg Boden]
				OS \triangleq 250 [cmol _e /kg Ton]	OS \triangleq 200 [cmol _e /kg Ton]	OS \triangleq 150 [cmol _e /kg Ton]	
SBa	0-3	24	4	34	49	64	0,0
	3-18	19	2	61	64	66	0,0
	18-35	22	12	64	65	66	0,0
	35-50	49	48	70	71	71	0,0
SBb	0-4	21	11	21	45	70	0,0
	4-30	11	3	48	52	57	0,0
	30-49	10	3	53	54	55	0,0
	49-61	41	33	71	71	72	0,0
	61-70	52	64	74	74	75	0,0
HARD	0-5	49	20	33	46	59	0,0
	5-17	48	23	45	54	63	0,0
	17-29	51	85	50	55	59	0,3
	29-44	45	100	48	50	53	0,4
GOWa	0-6	54	58	38	54	70	0,1
	6-14	49	58	49	58	67	0,1
	14-23	48	66	56	62	68	0,1
GOWb	0-10	45	44	39	52	65	0,1
	10-21	39	45	47	55	62	0,0
	21-30	40	54	54	59	65	0,1
	30-43	44	66	55	59	62	0,1
GOWc	0-5	23	19	34	43	52	0,0
	5-23	21	13	41	47	53	0,0
	23-30	24	25	48	52	55	0,0
	30-40	35	56	57	59	61	0,0
	40-60	39	63	63	65	67	0,1
RBa	0-6	33	26	38	47	55	0,0
	6-20	28	18	44	48	51	0,0
	20-35	49	48	55	58	61	0,0
RBb	0-5	20	14	36	44	52	0,0
	5-23	12	6	35	39	43	0,0
	23-36	17	20	46	47	48	0,0
	36-65	38	39	58	59	60	0,0
HOLZ	0-7	22	38	42	50	58	0,0
	7-22	18	27	46	51	56	0,0
	22-40	18	36	53	56	58	0,0
	40-57	27	47	59	60	61	0,0
	57-70	45	58	67	68	69	0,0

Die höchsten Kationenaustauschkapazitäten werden in den Oberböden und in den tonreichsten Horizonten erzielt. In den Oberböden ist dieser Effekt hauptsächlich auf die hohe variable KAK der organischen Substanz zurückzuführen. Die mit der Tiefe zunehmenden Tongehalte bedingen höchstwahrscheinlich ebenfalls einen Anstieg der KAK.

Kritisch bleibt anzumerken, dass bei der Analyse humusreicher Böden die KAK_{pot} von der Stärke der Pufferlösung und dem Feststoffanteil der Bodensuspension beeinflusst wird (DOHRMANN 1997): Bei stark sauren Böden reicht die Pufferkapazität der Extraktionslösung u.U. nicht aus, der pH-Wert in der Austauschlösung liegt zwischen dem der Pufferlösung und dem ursprünglichen Boden pH-Wert; je niedriger der

ursprüngliche pH-Wert, desto niedriger ist die bestimmte KAK. In den in dieser Arbeit untersuchten Böden steigen der pH-Wert und ebenso die KAK mit zunehmender Tiefe an. Möglicherweise ist das neben ansteigenden Tongehalten auch auf eine nicht ausreichend gepufferte Austauschlösung zurückzuführen, die in den meist stark sauren Oberböden eine niedrigere KAK erzeugt als in den schwach sauren bis neutralen Unterböden.

Die KAK kann dazu dienen, die Tonminerale eines Bodens genauer zu charakterisieren. Ein Anstieg der KAK pro kg Boden kann auf eine Zunahme der Dreischichttonminerale hinweisen. Dazu muss der KAK-Wert der organischen Substanz (wurde nicht separat untersucht) von der KAK des Gesamtbodens subtrahiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die KAK der Humusfraktion in Abhängigkeit von der Humusqualität schwankt. Je enger das C/N-Verhältnis der organischen Substanz, desto größer ist der Huminsäureanteil und damit in der Regel die Kationenaustauschkapazität (AG BODEN 2005). Für die organische Substanz terrestrischer Böden des gemäßigt-humiden Klimas gibt RINGER (1965) eine Spannweite von 180 bis 300 cmol_c/kg an, nach AG BODEN (2005) variiert die KAK meist zwischen 150 und 250 cmol_c/kg und liegt im Mittel bei 200 cmol_c/kg. Diese Werte können in folgende Formel zur Berechnung der KAK des humusfreien Mineralbodens eingesetzt werden:

$$(KAK_{\text{Humus}} \times \%_{\text{Humus}}) + (KAK_{\text{Boden_ohne_Humus}} \times (100 - \%_{\text{Humus}})) = KAK_{\text{Gesamt}} \times 100$$

$$\Leftrightarrow KAK_{\text{Boden_ohne_Humus}} = \frac{(KAK_{\text{Gesamt}} \times 100) - (KAK_{\text{Humus}} \times \%_{\text{Humus}})}{(100 - \%_{\text{Humus}})} \quad (7)$$

Die Formel berücksichtigt die Mengenveränderung im Boden durch die Subtraktion des Humusanteils (%_{Humus}). Da der Kationenaustausch neben Humus im Wesentlichen durch die Tonminerale eines Bodens bestimmt wird, wird das Ergebnis aus Formel 7 noch durch den Tongehalt (Kapitel 5.2.3) geteilt. Daraus ergibt sich die KAK pro kg Ton (Tab. 7).

Bei einer angenommenen KAK der organischen Substanz von 200 cmol_c/kg, zeigen die Böden mit zunehmender Tiefe einen Anstieg der Bindungsplätze pro kg Ton, das deutet auf eine Änderung in der Tonmineralzusammensetzung hin. Ob dies ein Hinweis auf einen Schichtwechsel oder nur verwitterungsbedingt ist, werden die weiteren Auswertungen zeigen müssen.

Der Zusammenhang zwischen pH und KAK der organischen Substanz ist von HELLING et al. (1964) untersucht und in folgender Formel zusammengefasst worden: $KAK_{\text{Corg}} = 0,51\text{pH} - 0,59$. Da der pH-Wert der Austauschlösung nicht bestimmt worden ist, kann leider keine KAK für den Humus abgeleitet werden. Daher wird zum Vergleich in Tabelle 7, neben 200 cmol_c/kg, mit der oben angegebenen Spannweite gearbeitet. Wird für Humus eine KAK von 250 cmol_c/kg angenommen, verstärken sich die Unterschiede zwischen Ober- und Unterboden. Wird nur 150 cmol_c/kg unterstellt, verringern sich die Unterschiede bzw. weisen die Oberböden in einigen Böden die höchste KAK auf. Da gerade letzteres auf Grund der niedrigen Tongehalte sehr

unwahrscheinlich ist und keine genaueren Daten vorliegen, wird mit 200 cmol_c/kg als genaueste verfügbare Annahme gearbeitet.

Basensättigung

Die Basensättigung (BS-Wert) gibt den prozentualen Anteil der Kationen Calcium, Kalium, Magnesium und Natrium an der gesamten KAK an (Tab. 7). In fünf der neun untersuchten Böden ist die Basensättigung im obersten Horizont gegenüber den nachfolgenden Horizonten leicht erhöht. Dies kann auf einen bekannten Effekt zurückgeführt werden: Bäume nehmen über die Wurzeln Kationen aus dem Unterboden auf und über die Laubstreu bzw. die Mineralisation werden diese im Oberboden angereichert, die sogenannte „Basenpumpe“ (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997). Die absolute Höhe der Basensättigung in den Oberböden schwankt, je höher der pH-Wert, desto höher ist auch die Basensättigung eines Standortes: Am Sentruper Berg wird in den ersten drei Horizonten eine Basensättigung von maximal 12 % erreicht, der pH liegt bei 3,9 (CaCl₂) und niedriger, im Göttinger Wald a beträgt die Basensättigung bereits 58 % bei einem pH von 5,9. Die höchsten Basensättigungen eines Bodens werden in den tonreichsten Unterbodenhorizonten erzielt. Auch dies ist pH-Wert bedingt, in dieser Tiefe ist die Versauerung weniger weit fortgeschritten.

Eine Überschätzung der Basensättigung tritt auf, wenn Carbonate, insbesondere Calcit, im Boden vorhanden sind. Calcit wird in der Regel durch die eingesetzten Salzlösungen partiell gelöst und erhöht die gemessene Calciumkonzentration. Dieses Problem tritt bei den meisten zurzeit eingesetzten Methoden zur Bestimmung der KAK bzw. Basensättigung auf (DOHRMANN 2006). Im Boden Hardehausen sind voraussichtlich zwei Unterbodenhorizonte von diesem Phänomen betroffen, dessen Carbonatgehalte 1,8 % und 5,7 % betragen und deren Basensättigung mit 85 % und 100 % vergleichsweise hoch liegt. Auch an den Standorten Sentruper Berg b, Göttinger Wald a und b muss mit einer geringfügigen Freisetzung von Calcium aus Carbonaten gerechnet werden, die Gehalte erreichen 0,1 % CaCO₃. Erst seit kurzem existieren auch einfach zu handhabende Methoden zur Bestimmung der KAK und des austauschbaren Calciums bei Anwesenheit von Carbonaten (DOHRMANN & KAUFHOLD 2009).

Da die hier untersuchten Böden auf Grund ihrer Geologie dolomitarm sind, wurde auf eine explizite Dolomitbestimmung verzichtet. Es ist jedoch möglich, den ungefähren Gehalt des dolomitbürtigen Magnesiums im Mineralboden mittels der hier verwendeten Methode zur Bestimmung der KAK abzuschätzen. Denn laut BOWER (1955) beträgt die Löslichkeit von Calcit und Dolomit in Na-Acetat nur ein Zehntel der Löslichkeit in NH₄-Acetat (Kapitel 4.3). Daher kann der Dolomitgehalt entweder direkt aus dem Magnesiumgehalt der NH₄-Acetat-Extraktionslösung zur Bestimmung der KAK_{pot} berechnet werden oder aus dem Magnesiumgehalt des NH₄-Acetat-Extraktes zur Bestimmung der austauschbaren Kationen abzüglich des Magnesiumgehaltes in der Na-Acetat-Hintauschlösung zur Bestimmung der KAK_{pot}. Beide Verfahren liefern vergleichbare Ergebnisse, sie werden in g/kg Boden (atro) angegeben und auf den Dolomitgehalt umgerechnet:

$$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2 \text{ [g/kg]} = \text{Mg [g/kg]} \times 184,403/24,305 \quad (8)$$

Die maximalen Dolomitgehalte (Tab. 7) liegen bei nur 0,4 g/kg Boden (0,04 %) im tonreichsten Horizont von Boden Hardehausen, bei einem Carbonatgehalt von 5,7 %. In den Mineralbodenhorizonten sind die Gehalte somit vernachlässigbar gering.

5.4 Mineralogische Parameter

5.4.1 Auswertung der Quarzgehalte

Die Auswertung der Quarzgehalte erfolgt auf Grund der Annahme, dass Löss im Vergleich zu Kalkstein quarzreicher ist (vgl. PECSI & RICHTER 1996 mit THÖLE & MEYER 1979). Dadurch sollte der Quarzgehalt der Böden geeignet sein, Rückschlüsse auf die Entstehung der tonreichsten Horizonte zu ziehen. Quarz ist sehr verwitterungsresistent und wird kaum verlagert, kann aber im Boden durch Tonverlagerung eine residuale Anreicherung in den Al- und eine Abreicherung in den Bt-Horizonten erfahren.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Ah-Horizonte weisen zwischen 28 und 65 % Quarz auf, der Durchschnitt liegt bei 45 % Quarz (Tab. 8, Anhang IVb). Zu beachten ist, dass jeweils die gesamte Probe ohne Vorbehandlung (ausgenommen der Carbonatzerstörung einiger Proben) gemessen wurde, also auch noch Humus vorhanden war. Durch den hohen Humusgehalt in den Ah-Horizonten kommt es zu einer relativen Erniedrigung des Quarzgehaltes, daher enthält der zweite, humusärmere Horizont im Schnitt 2 % mehr Quarz als der erste.

Tab. 8: Mittlere Quarzgehalte [%] der Mineralbodenhorizonte und des Verwitterungsschuttes (Kalkstein und Feinmaterial) nach Carbonatzerstörung an den carbonathaltigen Proben

Horizont	Quarz [%]
Ah-Horizont	45
Min	28
Max	65
2. Horizont	47
Min	26
Max	65
tonreichster Horizont	26
Min	16
Max	31
Feinm. < 2 mm	21
Min	12
Max	37
Stein \geq 2 mm	19
Min	1
Max	35

PÉCSI und RICHTER (1996) geben für Löss Quarzgehalte zwischen 40 und 80 % an. WEDEPOHL (1969) bestimmte für mitteldeutsche Lössen durchschnittlich 40–45 % Quarz. GEBHARDT (1964) ermittelte in einem C-Horizont einer Parabraunerde im Göttinger Wald 53 % Quarz (bezogen auf kalk- und eisenoxidfreie Substanz). MEYER et al. (1962) geben ebenfalls 53 % Quarz (kalkfrei) für zwei Parabraunerden bei

Frellstedt und Einbeck (Niedersachsen) an. Am Sentruper Berg liegen die Quarzgehalte mit 63 % (SBa) bzw. 65 % (SBb) im Ah-Horizont (vgl. Abb. 24) noch über den Literaturangaben für den mittel- und norddeutschen Raum.

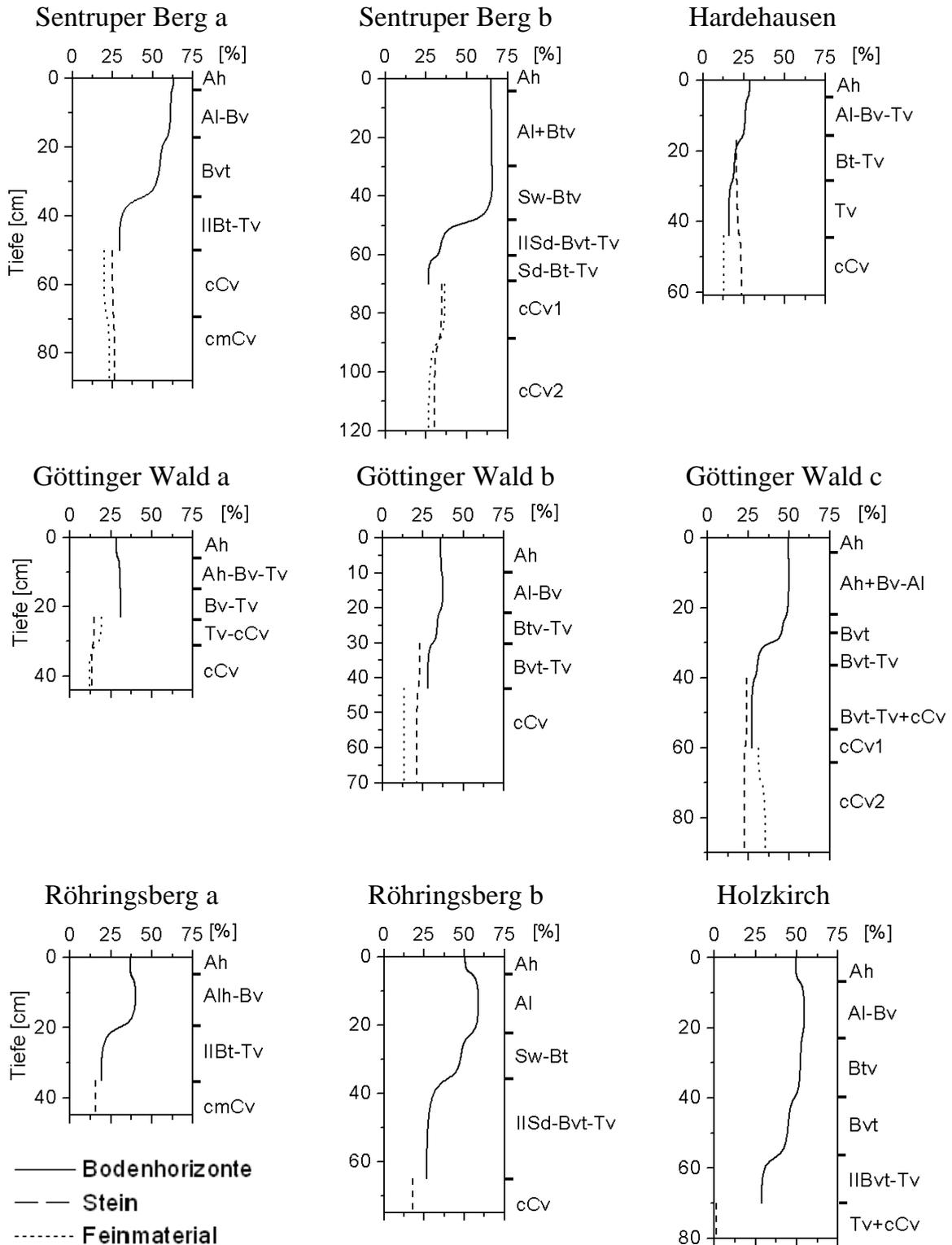


Abb. 24: Tiefenverlauf der Quarzgehalte aller Peda (nach Carbonatzerstörung); Mineralbodenhorizonte: durchgezogene Linie, Feinmaterial des Verwitterungsschuttes < 2 mm: gepunktete Linie, Kalkstein ≥ 2 mm (Stein): gestrichelte Linie

Das kann sowohl mit einer residualen Anreicherung durch Tonauswaschung zusammenhängen als auch mit lokalen Gegebenheiten (besonders quarzreicher Löss). C-Löss hat immer eine Lokalkomponente. RAU (1965) konnte anhand von C-Lössen aus dem Thüringer Becken zeigen, dass die Mineralzusammensetzung der Fraktion 100–200 µm deutlich durch das unterlagernde bzw. umgebende Gestein geprägt wird. C-Löss über Mittlerem Buntsandstein war quarz- und feldspatreicher als C-Löss über Oberem Muschelkalk. Möglicherweise hat der Löss am Sentruper Berg eine Überprägung durch den in der Umgebung verbreitet anstehenden Osning-Sandstein (vgl. Abb. 3) erfahren. Besonders niedrig sind die Quarzgehalte im Ah-Horizont der Peda Hardehausen und Göttinger Wald a, mit 29 bzw. 28 % Quarz. Das ist ein weiteres Indiz für einen geringen Lösseinfluss auf diese beiden Böden. Dies zeichnet sich bereits anhand der Texturergebnisse ab.

Die tonreichsten Horizonte weisen mit 5 % eine weitaus geringere Standardabweichung als die Ah-Horizonte auf und liegen im Mittel bei 26 % Quarz (Tab. 8). Im Feinmaterial des carbonathaltigen Verwitterungsschuttes verringern sich die Quarzgehalte noch weiter auf 21 %, wobei hier von Pedon zu Pedon und auch innerhalb eines Bodens recht große Unterschiede bestehen. Den geringsten mittleren Quarzgehalt weist der Lösungsrückstand der Kalksteine mit 19 % auf, wobei die Spannweite von 1 % (Pedon Holzkirch) bis 35 % (Pedon Sentruper Berg b) relativ groß ist. Diese Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass sich der lössbeeinflusste Oberboden im Quarzgehalt vom Kalksteinlösungsrückstand unterscheidet.

In der Einzelfallbetrachtung werden interessante Details einiger Böden deutlich. Der Boden Sentruper Berg b weist den geringsten Quarzgehalt im tonreichsten Horizont auf, was auf eine relative Quarzabreicherung durch eingewaschenen Ton hindeutet. Auch in Pedon Göttinger Wald c deutet sich dies an. Allerdings sind in diesem Boden auch die Lösungsrückstände der Kalksteine, im Gegensatz zum Feinmaterial, ähnlich quarzarm.

In den Peda Sentruper Berg a, Hardehausen und Göttinger Wald a und b besitzt jeweils das Feinmaterial den geringsten Quarzgehalt. Eine Erklärung könnten mergelige Zwischenlagen bieten, die die Kalksteine dieser Standorte aufweisen (Kapitel 3). Da diese Zwischenschichten durch die größere Oberfläche schneller verwittern können als massiver Kalkstein, dürfte sich ein großer Teil des Feinmaterials des Verwitterungsschuttes daraus aufbauen. Sollten die Zwischenlagen nun weniger Quarz als der eigentliche Kalkstein enthalten, könnte das die niedrigen Quarzgehalte im Feinmaterial erklären. Diese Hypothese bedarf jedoch einer Überprüfung. Im vorläufigen Widerspruch zu dieser Annahme steht, dass das Feinmaterial im Pedon Göttinger Wald c deutlich quarzreicher als der Kalkstein ist; in den Peda Göttinger Wald b und Sentruper Berg b trifft dies nur für das Feinmaterial direkt unterhalb des tonreichsten Horizontes zu. Das könnte jedoch durch Lösseinmischungen erklärt werden und wird durch die Texturergebnisse (Kapitel 5.2.3) untermauert.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Quarzgehalte vom Ah-Horizont bis zum tonreichsten Horizont in allen Peda (mit Ausnahme des wenig lössbeeinflussten Pedons Göttinger Wald a) abnehmen. Dieser Rückgang kann durch eine starke

Lessivierung erklärt werden, aber ebenso durch eine von oben nach unten geringer werdende Lösseinmischung in das bereits vorhandene Residuum. Welcher Prozess dominiert, kann allein aufgrund der Quarzgehalte nicht festgestellt werden.

5.4.2 Tonminerale/Tonmineralgruppen

Primäres Ziel dieser Untersuchung ist es, herauszufinden, ob anhand der Tonmineralgruppen eine Unterscheidung zwischen Löss und Residualton innerhalb der Mineralbodenhorizonte und insbesondere im tonreichsten Horizont möglich ist.

Zur Auswertung der Röntgendiffraktogramme wurden die d_{001} -Reflexe der Tonminerale bei 1,42 nm, 1,0 nm und 0,72 nm herangezogen. Hinter den drei Tonmineralgruppen verbergen sich in der Regel folgende Schichtsilikate (LAGALY & KÖSTER 1993):

- ~1,42 nm = Chlorit und auch Vermiculit, Smectit (Schichtabstände dieser beiden Tonminerale können je nach Wassergehalt und Art der Zwischenschichtkationen jedoch zwischen 1 und 2 nm variieren)
- ~1,0 nm = Glimmer, Illit
- ~0,72 nm = Kaolinit, Chlorit (Basisreflex 2. Ordnung; stärker als 1. Ordnung falls primärer Chlorit, nicht jedoch bei sekundärem Chlorit)

Das Ergebnis ist in Form von drei Abbildungen dargestellt. Abbildung IVb-1 (Anhang IVb) zeigt die bereinigten Intensitäten der Tonmineralreflexe bei 1,42, 1,0 und 0,72 nm. In Abbildung IVb-2 (Anhang IVb) wurden diese mit MIF's (mineral intensity factors) multipliziert, um die Mengenverteilung der drei Tonmineralgruppen genauer zu erfassen. Das bewirkt moderate Änderungen in der Verteilung. Aus beiden Abbildungen können analoge Aussagen abgeleitet werden. In einer weiteren Abbildung (Abb. 25) werden die Mengen der drei Tonmineralgruppen auf 100 % bezogen, um die Horizonte untereinander besser vergleichen zu können.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei Bodenfraktionen einzeln betrachtet: Lösungsrückstand des Kalksteins ≥ 2 mm, Lösungsrückstand des carbonathaltigen Feinmaterials der Cv-Horizonte < 2 mm und der Mineralboden. Zuvor wird auf das Auftreten von Wechsellagerungsmineralen eingegangen.

Wechsellagerungsminerale

Im Lösungsrückstand von Feinmaterial und Kalkstein treten zwischen den 1,42 und 1,0 nm-Reflexen zusätzliche Reflexe auf (Anhang IVa). Es handelt sich um Wechsellagerungsminerale. Sie finden sich in den Lösungsrückständen des Kalksteins und des Feinmaterials der Böden. Die Stapelfehlordnungen liegen am Standort Göttinger Wald, am Röhringsberg und am Standort Hardehausen nah am 1,0 nm-Reflex. Am Sentruper Berg tendieren sie eher zum 1,42 nm-Reflex. In Holzkirch zeigt der gesamte

Bereich zwischen 1,0 und 1,42 nm eine erhöhte Intensität. Wahrscheinlich handelt es sich bei diesen Reflexen um die in der Natur häufig vorkommenden Illit/Smectit- bzw. Glimmer/Smectit-Wechselagerungen (KÖSTER & SCHWERTMANN 1993). Liegen sie sehr nah am 1,42 oder 1,0 nm Basis-Reflex, beeinflussen sie dessen Form und damit auch die gemessenen Intensitäten. Die strukturelle Ähnlichkeit zu den regelmäßigen Tonmineralen ist in diesen Fällen relativ hoch, daher ist der verursachte Fehler hauptsächlich quantitativer Natur.

Auch die Mineralbodenhorizonte sind nicht völlig frei von Wechselagerungen, sie sind jedoch schwächer ausgeprägt.

Der Kalkstein

Die im Labor gewonnenen Lösungsrückstände der Kalksteine ≥ 2 mm lassen sich in drei Gruppen mit ähnlichen Verhältnissen zwischen den einzelnen Tonmineralgruppen unterteilen (Abb. 25, Anhang IVb). Auffällig ist, dass diese drei Gruppen unterschiedlichen geologischen Zeitabschnitten angehören:

- Am Sentruper Berg dominieren die 1,42 nm-Reflexe im Lösungsrückstand, gefolgt von den 1,0 nm-Reflexen. Dieser Kalkstein stammt aus dem Turon (Oberkreide), wobei SBa dem Lamarcki-Pläner zuzuzählen ist und SBb dem Scaphiten-Pläner (vgl. Kapitel 3.1).
- Die Böden in Hardehausen, im Göttinger Wald und auf dem Röhringsberg werden im Kalkstein von den 1,0 nm-Reflexen dominiert, 1,42 und 0,72 nm-Reflexe treten nur untergeordnet auf. Alle befinden sich im Bereich der Terebratelbänke des Unteren Muschelkalks (vgl. Kapitel 3.2-3.4).
- Im Boden Holzkirch ist der 0,72 nm-Reflex im Lösungsrückstand, aber auch im Mineralboden vergleichsweise stark ausgeprägt. Es handelt sich um Kalk aus dem Oberen Jura (vgl. Kapitel 3.5).

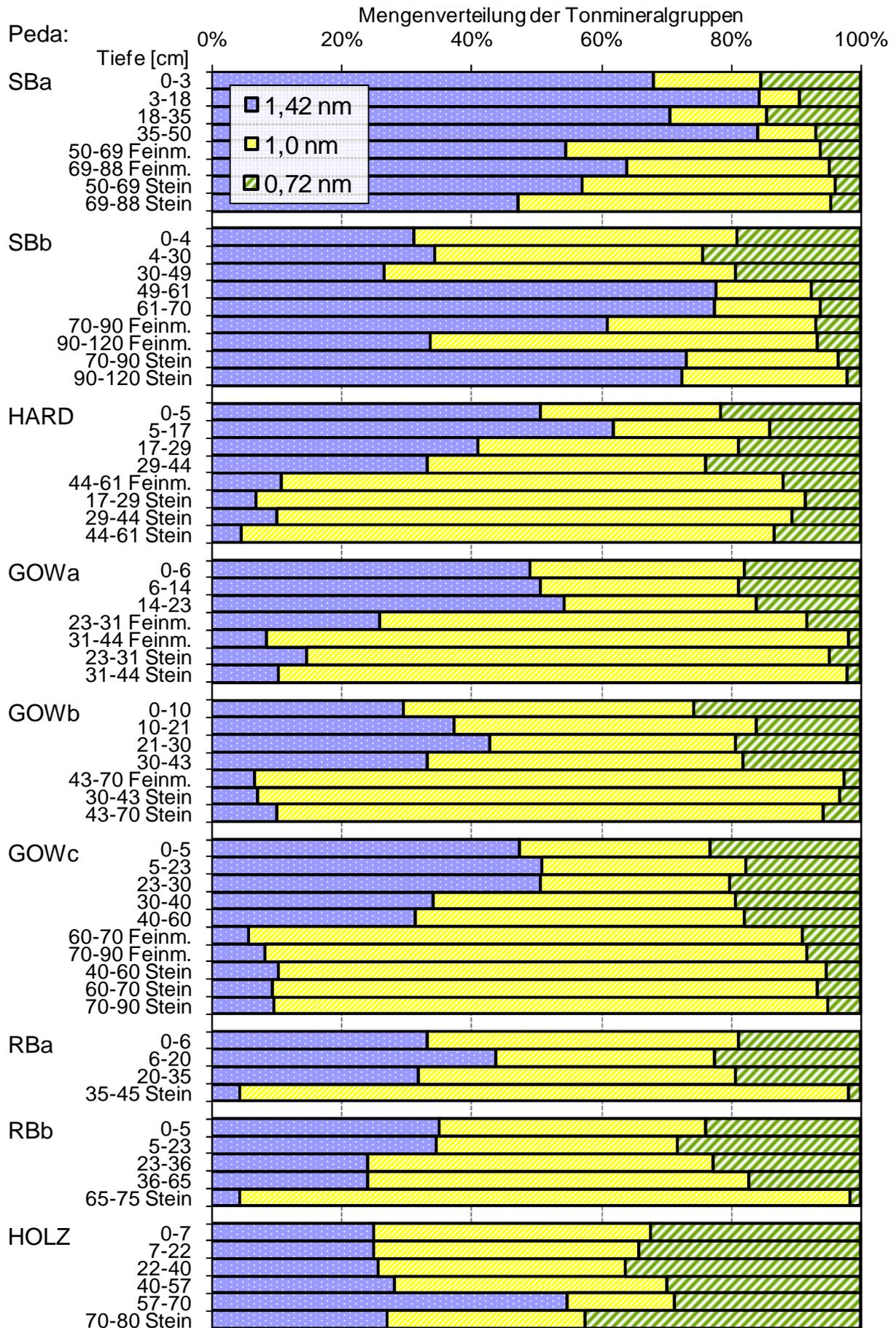


Abb. 25: Mengenverteilung der drei Tonmineralgruppen (Summe = 100 %)

Die offensichtliche Bindung der Tonmineralzusammensetzung an geologische Schichten ist auf die jeweiligen Entstehungsbedingungen zurückzuführen. Der Lösungsrückstand von Kalksteinen setzt sich aus terrigenen (äolisch oder fluviatil eingetragene Sedimente mit magmatischem, metamorphem oder sedimentärem Ursprung) und authigenen Mineralen zusammen (FLÜGEL 2009). Der Tonmineralbestand wird folglich vom Liefergebiet bzw. der Nähe zur Küste beeinflusst, es kann jedoch in Abhängigkeit von der Hydrothermie und den Temperatur- und Druckverhältnissen während der Diagenese zu Veränderungen kommen (z. B. KOSTER V. GROOS & GUGGENHEIM 1986). So kommen Illite laut FLÜGEL (2009) zwar bevorzugt in marinen Bereichen zur Ablagerung, ein diagenetischer Ursprung ist dennoch nicht ausgeschlossen. Kalksteine mit hohem Smectitanteil bilden sich eher im der Küste vorgelagerten Bereich. Kaolinit wird in der Regel küstennah unweit des Liefergebietes abgelagert und ist terrigenen Ursprungs. Das umgebende basische Milieu verhindert eine diagenetische Umwandlung anderer Tonminerale zu Kaolinit (FLÜGEL 2009).

Der Standort Holzkirch befindet sich im Bereich des ehemaligen Jura-Meeres. Durch die Heraushebung Süddeutschlands wurde das Meer zunehmend flacher und zog sich schließlich nach Süden in die Tethys zurück (SCHALL 2002). In Folge dessen könnten verstärkt terrigene Sedimente zur Ablagerung gekommen sein. Dies und die Verteilung der Reflexe lassen zunächst einen hohen Kaolinitanteil vermuten. Da der Tongehalt im Lösungsrückstand mit 89 % sehr hoch ist, kann die Elementverteilung (Anhang Va) für Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Tonfraktion herangezogen werden. Der SiO_2 -Anteil im Lösungsrückstand des Kalksteins ist mit 32 % der niedrigste der untersuchten Böden, der Fe_2O_3 -Gehalt mit 23 % der höchste, der Aluminiumgehalt (Al_2O_3) liegt bei 17 %. Da Kaolinite zwischen 45–47 % SiO_2 und 38–40 % Al_2O_3 enthalten, Chlorite jedoch nur 22–35 % SiO_2 und 15–48 % Al_2O_3 (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2002) kann ein nicht unerheblicher Anteil an Chloriten vermutet werden (Smectite, Vermiculite und Illite/Glimmer enthalten ebenfalls in der Regel mehr als 33 % SiO_2). Zumal der 1,42 nm-Reflex (enthält Chlorit-Basisreflex 1. Ordnung) ebenfalls deutlich ausgeprägt ist.

Die Kalksteine der weiteren Standorte wurden eher küstenfern in Flachmeeren des Unteren Muschelkalks und der Oberkreide gebildet (FARRENSCHON 2003, SKUPIN 2003). Die Intensität der 0,72 nm-Reflexe ist deutlich geringer. In den Böden aus Unterem Muschelkalk überwiegen die 1,0 nm-Reflexe. Sie sind sehr wahrscheinlich auf Illit zurückzuführen. So stellten zum Beispiel THÖLE UND MEYER (1979) und SCHWERTMANN (1961) hohe Illitgehalte im Ton des Lösungsrückstandes des Unteren Muschelkalks im Göttinger Wald fest. Gleiches gilt für südwestdeutsche Kalksteine des Unteren Muschelkalks (PAPENFUß 1965).

GEBHARDT & LÜDERS (1970) fanden sehr hohe Montmorillonitgehalte in Kalksteinen der Oberkreide des Cenomans und Turons im nördlichen Harzvorland. Der d_{001} -Basisreflex dieses Tonminerals der Smectit-Gruppe liegt bei 1,42 nm. Es kann vermutet werden, dass Montmorillonit auch am Sentruper Berg maßgeblich für die starke Ausprägung dieses Reflexes verantwortlich ist. Die Belegung des Pulverprä-

parates Sentruper Berg a der Steinfraktion ≥ 2 mm in 50–68 cm Tiefe mit Glycerin ergab, dass sich hinter dem Reflex bei 1,42 nm im Wesentlichen Smectite verbergen. Die 1,42 nm-Mineralen expandierten vollständig auf 1,8 nm (Anhang IVa).

Die Röntgenbeugungsanalyse der Kalksteine zeigt in Abhängigkeit des geologischen Ursprungs eindeutige Unterschiede im Tonmineralbestand der untersuchten Standorte. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Probenbehandlung/Carbonatzerstörung keinen oder nur wenig Einfluss auf die Tonminerale hatte. Die Behandlung mit einem 2 M Na-Acetatpuffer und das Erhitzen der Probe auf maximal 40 °C gelten zudem als tonmineralschonend (SCHLICHTING et al. 1995). Ein Vergleich der im Labor gewonnenen Kalksteinlösungsrückstände mit den unbehandelten Mineralbodenhorizonten in den folgenden Kapiteln wird daher als unproblematisch angesehen.

Carbonathaltiges Feinmaterial

Die im Labor gewonnenen Lösungsrückstände des carbonathaltigen Feinmaterials (< 2 mm) der C-Horizonte gleichen in der Mengenverteilung ihrer Tonmineralgruppen zumeist den Kalksteinen ≥ 2 mm. Im Boden Göttinger Wald a liegt das Feinmaterial unmittelbar unterhalb des tonreichsten Horizontes in der Mengenverteilung zwischen dem Mineralboden und dem Kalksteinlösungsrückstand. Das Feinmaterial am Sentruper Berg b hat einen geringeren Anteil an 1,42 nm-Reflexen als der Kalksteinlösungsrückstand. Möglicherweise ist dies eine Folge von Lösseinmischung, insbesondere in 70–90 cm Tiefe, oder von lithologischen Unterschieden zwischen dem massiven Kalkstein und dem Feinmaterial (mergelige Zwischenlagen, vgl. Kapitel 5.4.1).

Mineralboden

In fast allen Mineralbodenhorizonten ist eine Veränderung der Mengenverteilung der drei Tonmineralgruppen im Vergleich zur Verteilung im Lösungsrückstand der Kalksteine und des Feinmaterials zu beobachten: Sowohl die Reflexe bei 1,42 nm als auch bei 0,72 nm nehmen zu. Die relative Menge der 0,72 nm-Reflexe steigt mit Ausnahme vom Peda Holzkirch tendenziell zum Oberboden hin an. Die höchsten Anteile an 1,42 nm-Reflexen weisen die tonreichsten Horizonte in den Böden am Sentruper Berg, im Boden Göttinger Wald a und in Holzkirch auf. Dies könnte ein Hinweis auf Lessivierung sein. SCHWERTMANN & NIEDERBUDE (1993) berichten, dass an der Tonverlagerung bevorzugt Smectite (Reflex bei 1,42 nm) der Feintonfraktion teilnehmen. Dieser Befund schließt jedoch Tonverlagerung auch an den anderen Standorten nicht aus, sie könnte lediglich durch einen hohen Anteil an Lösungsrückstand im tonreichsten Horizont mit schwachem 1,42 und starkem 1,0 nm-Reflex überdeckt sein. In welchem Umfang in den genannten Böden Tonverlagerung stattgefunden hat, wird in den Kapitel 5.6 und 5.9 behandelt.

Bevor die Zusammensetzung der Mineralbodenhorizonte eingehender betrachtet wird, soll auf folgendes Phänomen hingewiesen werden: In Abbildung 26 wurde jeweils die

Summe der drei untersuchten Tonmineralreflexe gegen den Tongehalt eines Horizontes (bezogen auf die humushaltige Probe, da die Tonmineralgruppen ohne Humuszerstörung gemessen wurden) aufgetragen. Die Summe der Tonmineralintensitäten steigt, abgesehen von den Böden am Sentruper Berg, nur geringfügig mit dem Tongehalt an (Abb. 26). Erwartet wurde ein Anstieg der Intensitäten proportional zum Tongehalt, zumal auch die Kationenaustauschkapazität des Tons aller untersuchten Böden mit der Tiefe zunimmt (wenn eine KAK der organischen Substanz von 200 cmol/kg zu Grunde gelegt wird, vgl. Kapitel 5.3.3). Das Bestimmtheitsmaß beträgt lediglich 0,29, werden MIF's nicht berücksichtigt liegt es nur bei 0,22.

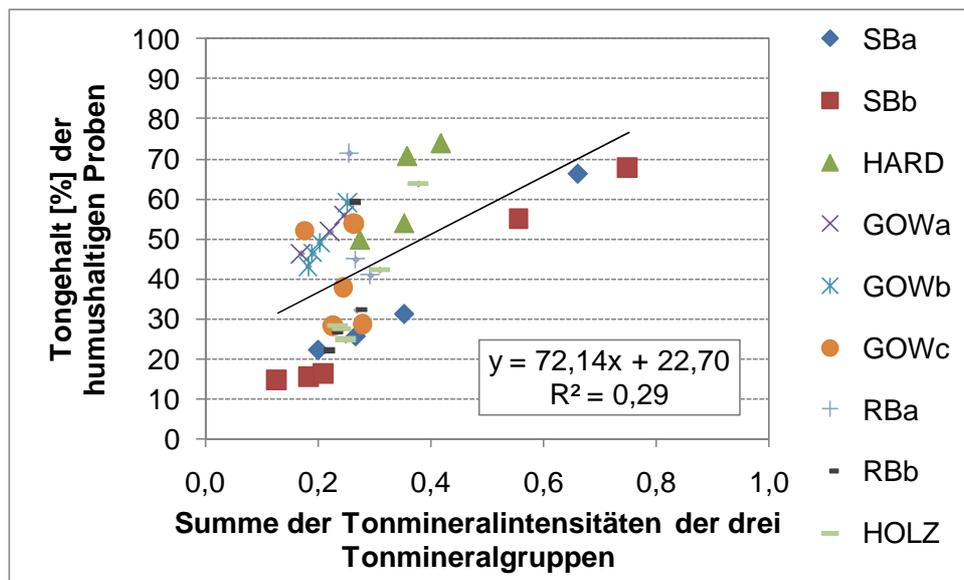


Abb. 26: Veränderung der Summe der Tonmineralintensitäten der drei Tonmineralgruppen bei 1,42, 1,0 und 0,72 nm mit dem Tongehalt

Insbesondere im Fall des Bodens Hardehausen könnte der geringe Anstieg der Summe der Tonmineralintensitäten mit der Tiefe auf Wechsellagerungsminerale zurückzuführen sein, die in der Auswertung nicht mit erfasst werden. Aber auch weitere Einflussgrößen können die quantitative Auswertung behindern, wie unterschiedlich hohe amorphe Anteile, Schwächung der Intensität durch Eisenoxide (LAGALY & KÖSTER 1993), schwankende Anteile an Quarz und Feldspäten in der Tonfraktion, organische Substanz (erhöht das Untergrundrauschen und wurde in den Proben nicht zerstört), Vorzugsorientierungen, Carbonatrete und schwankende (sekundäre) Chloritanteile (Chlorit erzeugt einen Reflex bei 1,42 und 0,72 nm und wird somit zweimal erfasst). Welche dieser pedogenen wie auch methodisch bedingten Gründe im Einzelfall zutreffen, kann nur vermutet werden. Insbesondere das Auftreten sekundärer Chlorite wird in diesem Kapitel noch eingehender diskutiert werden.

Trotz dieses Umstandes soll im Folgenden betrachtet werden, welche Tonminerale für Löss und Residualton jeweils typisch sind und welche weiteren Faktoren die Tonmineralentwicklung in den betrachteten Böden beeinflusst haben könnten.

1) Löss als Ausgangsmaterial der Bodenbildung

Für Löss geben SCHWERTMANN & NIEDERBUDE (1993) an, dass sich bereits im Pleistozän aus Biotiten durch kryoklastische Verwitterung Smectite und Vermiculite bildeten. Mit Einsetzen der Bodenbildung führte durch Verwitterung freigesetztes Kalium zur Illitisierung der Vermiculite und hochgeladener Smectite. Eine Zusammenstellung verschiedener Tonmineralanalysen norddeutscher Lössen in GEHRT (2000) zeigt ebenfalls, dass die Tonfraktion vorwiegend Illit, aber auch Vermiculit, Smectit und deren Wechsellagerungen enthält, wobei die Verhältnisse regional schwanken. Kaolinit und Quarz nehmen in der Tonfraktion weniger als 10 % ein (GEHRT 2000). THÖLE & MEYER (1978) kommen zu ähnlichen Ergebnissen für Löss im Göttinger Wald. Mengenmäßig sollten demnach die 1,0 nm-Reflexe (u.a. Illit) in lössbürtigen Horizonten überwiegen, gefolgt von den 1,42 nm-Reflexen. Die hier untersuchten Mineralböden weichen mit ihrem hohen Anteil an 1,42 nm-Reflexen in vielen Horizonten von den Vorgaben norddeutscher Lössen ab. Der Illit-Reflex macht lediglich in den ersten drei Horizonten am Sentruper Berg b mehr als 50 % aus, deren hoher Grobschluffgehalt auf einen hohen Lössanteil schließen lässt. In einigen tonreichen Horizonten nehmen die 1,0 nm-Reflexe ebenfalls den größten Mengenanteil ein, diese Horizonte weisen allerdings auch im Lösungsrückstand des Kalksteins ≥ 2 mm einen hohen Anteil dieser Reflexe auf.

Die oberen drei Horizonte des Bodens Holzkirch (verhältnismäßig geringe Gehalte an 1,42 nm Reflexen) passen besser in das Schema einer lössbürtigen Genese. In der Tonfraktion süddeutscher Lössen dominieren Illite, aufgeweitete Illite und im Gegensatz zu norddeutschen Lössen deutlich mehr Smectite (NIEDERBUDE 1996). Wobei die Gehalte in Abhängigkeit der Entfernung zum Liefergebiet und der Höhenlage stark schwanken können. Ungewöhnlich ist jedoch der hohe Anteil an 0,72 nm-Reflexen. Die Ergebnisse weisen in keinem Pedon auf eine rein lössbürtige Genese des Mineralbodens hin.

2) Residualton als Ausgangsmaterial der Bodenbildung

Die Mineralbodenhorizonte zeigen eine vom Lösungsrückstand der C-Horizonte abweichende Zusammensetzung der Tonmineralgruppen. Es überwiegen zumeist Tonminerale mit Reflexen bei 1,42 nm. Wird eine rein residualtonbürtige Genese der tonreichsten Horizonte und Horizonte mit hohem Anteil an 1,42 nm-Reflexen vorausgesetzt, müssen die primären Tonminerale daher pedogenetische Umbildungen durchlaufen haben. In der Literatur finden sich Hinweise, dass sich hinter dem 1,42 nm-Reflex hauptsächlich Smectite verbergen:

HÄUSLER & NIEDERBUDE (1992) geben als klassische Abfolge der Mineralverwitterung der Dreischichttonmineralgruppe in Kalksteinverwitterungsböden die Umwandlung von primärem Illit zu aufweitbaren Tonmineralen, insbesondere Smectit, und bei langzeitiger Bodenversauerung vermutlich weiter zu Kaolinit an. Der erste Schritt wird dabei stark vom Mineralbestand der Kalksteine beeinflusst.

THÖLE & MEYER (1979) konnten an Böden im Göttinger Wald zeigen, dass die primär illitdominierten Lösungsrückstände der Kalksteine des Unteren Muschelkalks, wie auch durch Verwitterung der Schlufffraktion entstandene Dreischicht-Tonminerale, pedogenetisch zu Smectiten und auch Vermiculiten umgewandelt wurden. Sie vermuten, dass dieser Prozess pH-unabhängig ist und auch die Höhe des Mischungsanteils an Löss im Kalksteinlösungsrückstand nur wenig Einfluss auf diesen Prozess hat. Ein weiteres interessantes Ergebnis ihrer Arbeit ist die Feststellung, dass die kalksteinbürtigen Böden des Göttinger Waldes nur wenig Kaolinit (10 % der Tonfraktion < 0,6 µm) enthalten und dieser häufig Ausdruck einer Lössbeimischung ist. Möglicherweise bildet der Kaolinitgehalt eine gute Trenngröße zwischen Löss und kaolinitarmen Residualtonen.

Im Solum montmorillonitreicher Kalksteine des Cenomans und Turons (Oberkreide) im nördlichen Harzvorland fanden GEBHARDT & LÜDERS (1970) ebenfalls hohe Gehalte an Montmorillonit und dioktaedrischem Glimmer. Einschränkend muss erwähnt werden, dass eine Einmischung von Sandstein der Unterkreide im Solum vorlag.

3) Weitere Einflussfaktoren auf die Tonmineralentwicklung

Die Literaturrecherchen zeigen, dass Böden aus Löss (überwiegend Illit) und Residualton (überwiegend Smectit/Vermiculit) grundsätzlich im Mineralbestand voneinander abweichen und die hier untersuchten Böden mit ihrem hohen Anteil an 1,42 nm-Reflexen augenscheinlich eher kalksteinbürtig sind. Allerdings läßt bereits die Korngrößenanalyse den Schluss zu, dass in vielen Horizonten und auch im tonreichsten Horizont Löss und Lösungsrückstand gemischt vorliegen. Folgendes Rechenbeispiel zeigt, dass ein hoher lössbürtiger Anteil an den Mineralbodenhorizonten nicht ausgeschlossen ist. Selbst kleine Mengen Residualton in einem ansonsten lössdominierten Boden haben auf Grund ihres hohen Tonanteils einen starken Einfluss auf die Tonmineralzusammensetzung: Besteht ein Horizont beispielsweise zu 80 % aus Löss mit einem Tonanteil von 16 % und zu 20 % aus Residualton mit einem Tonanteil von 65 % würde sich die Tonfraktion je zur Hälfte aus beiden Ausgangssubstraten zusammensetzen.

Zudem kann vermutet werden, dass ab einem gewissen Mischungsverhältnis beider Ausgangssubstrate das Kalium-Nachlieferungsvermögen bzw. die Illitnachlieferung aus der Mineralverwitterung des Lösses nicht mehr ausreicht, die Bildung/Freisetzung von Vermiculiten und Smectiten aus Kalkstein mengenmäßig zu kompensieren. Insbesondere wenn es sich um illitarme Kalksteine handelt. Die Böden könnten also große Lössbeimengungen enthalten, die mit der hier verwandten Methode jedoch nicht nachweisbar sind.

Zusätzlich zu diesen Überlegungen ist ein Prozess zu berücksichtigen, der erst in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen hat und den Tonmineralbestand der Böden stark überprägt haben könnte: die anthropogen verursachte Versauerung. Sinken in Böden die pH-Werte (CaCl₂) unter pH 5 ab, können sich sekundäre Al-Chlorite bilden. Durch Versauerung freigesetzte Aluminium-Ionen hydrolysieren zu

Al-Hydroxo-Komplexen und werden in die Zwischenschichten von Vermiculiten und Smectiten eingelagert (VEERHOFF 1992). Gleichzeitig reduziert sich dadurch die KAK des Tonminerals (SCHWERTMANN & NIEDERBUDE 1993). Würde der pH unter 3,5 sinken, könnten sich Aluminiumionen aus den Zwischenschichten lösen und es würden erneut quellfähige Tonminerale entstehen, bevor sie endgültig zerstört und zu amorphen Abbauprodukten umgewandelt werden (VEERHOFF 1992).

Viele Horizonte der hier untersuchten Böden bewegen sich zwischen pH 3,4 und 5 (Kapitel 5.3.1). Sowohl die pH-Werte als auch die Ergebnisse der Glycerinbelegung an einigen Proben deuten auf Al-Chlorite hin (Anhang IVa): Besteht der unlösliche Rückstand des Kalksteins vom Boden Sentruper Berg a noch hauptsächlich aus Smectit, expandiert im tonreichsten Horizont nur ein Teil der 1,42 nm Tonminerale auf ca. 1,8 nm. In 3–18 cm Tiefe ist keine Reaktion mehr auf das Glycerin festzustellen, obwohl bei 1,42 nm ein deutlicher Reflex vorhanden ist. Es muss sich daher um Vermiculite oder Chlorite handeln. Im Boden Hardehausen in 5–17 cm Tiefe (pH 4,2) und im tonreichsten Horizont im Boden Göttinger Wald c (pH 6,3, jedoch Kalksteinbröckchen < 2 mm in der Probe) ist ebenfalls keine Reaktion auf das Glycerin festzustellen. Da der 0,72 nm-Reflex, der auch den Chlorit-Basisreflex 2. Ordnung enthält, besonders in den oberflächennahen Horizonten verstärkt vertreten ist, können sekundäre Al-Chlorite vermutet werden.

In Tabelle 9 sind die typischen Tonminerale in Böden aus Löss bzw. Residualton zusammenfassend dargestellt. Mögliche Veränderungen des Tonmineralbestandes werden aufgezeigt.

Tab. 9: Häufige Tonminerale in Böden aus Löss bzw. Residualton und mögliche Veränderungen des Tonmineralbestandes

Böden aus Löss	Böden aus Residualton
<ul style="list-style-type: none"> • norddeutsche Löss: Illit (1,0 nm) gefolgt von Vermiculit und Smectit (1,42 nm) bzw. deren Wechsellagerungen • süddeutsche Löss: Illite, aufgeweitete Illite, deutlich smectitreicher <p>Quellen: THÖLE & MEYER (1978), SCHWERTMANN & NIEDERBUDE (1993), NIEDERBUDE (1996), GEHRT (2000)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Smectit und auch Vermiculit (1,42 nm) • mit zunehmendem Alter Kaolinit (0,72 nm) <p>Quellen: GEBHARDT & LÜDERS (1970), THÖLE & MEYER (1979), HÄUSLER & NIEDERBUDE (1992)</p>
<p>pH 5–3,5: Bildung sekundärer Al-Chlorite aus aufweitbaren Dreischichttonmineralen Quellen: VEERHOFF (1992), SCHWERTMANN & NIEDERBUDE (1993)</p>	
<p>untersuchte Böden: hoher Anteil an 1,42 nm-Reflexen, zum Oberboden hin ansteigende Mengenanteile an 0,72 nm-Reflexen</p>	

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die Mineralböden unterscheiden sich mit ihrem relativ hohen Anteil an 1,42 nm-Reflexen und zum Oberboden

hin ansteigenden Mengenanteilen an 0,72 nm-Reflexen meist deutlich von den im Labor gewonnenen Lösungsrückständen der Kalksteine und des Feinmaterials. Der in den Mineralbodenhorizonten enthaltene Residualton muss demnach eine pedogenetische Umbildung erfahren haben. Die oberflächennahen Horizonte sind unerwartet illitarm, obwohl auf Grund der Korngrößenanalyse in vielen Böden ein hoher Lössanteil (in der Regel illitreich) angenommen werden kann. Aus der Korngrößenanalyse kann abgeleitet werden, dass fast alle Horizonte inklusive der tonreichsten Horizonte zu unterschiedlichen Anteilen Mischhorizonte aus Löss und Residualton sind. Daher ist – in hohem Maße unabhängig vom Mischungsverhältnis in den einzelnen Horizonten – von einer Illit-Transformation zu Vermiculit/Smectit und bedingt durch die niedrigen pH-Werte auch weiter zu sekundärem Chlorit auszugehen. In den Mineralböden Sentruper Berg b und Holzkirch könnten die hohen Anteile an 1,42 nm-Reflexen in den tonreichsten Horizonten auf Lessivierung hinweisen. Auf Grund der sich überlagernden Prozesse und gleichgerichteten Tonmineralbildungen ist es nicht möglich, den Anteil an Löss bzw. Residualton im tonreichsten Horizont genauer zu bestimmen.

5.4.3 Pedogene Oxide

Laut BLUME & SCHWERTMANN (1969) können die aus Silikaten freigesetzten pedogenen Eisen-, aber auch Aluminium- und Manganoxide im Boden als Maß für die Stärke der stattgefundenen Verbraunung herangezogen werden. Insbesondere Eisenoxide können pedogenetische Prozesse nachweisen bzw. helfen, zwischen Bodenklassen zu differenzieren. Voraussetzung ist, dass homogene Böden mit der Hauptverwitterungszone im Oberboden vorliegen (BLUME & SCHWERTMANN 1969). Es wird zwischen zwei Kristallisationsstufen unterschieden. Das durch NH_4 -Oxalat extrahierbare Eisen (Fe_o) erfasst laut SCHWERTMANN (1964) die amorphen bzw. schlecht kristallisierten Eisenoxide. Das dithionitlösliche Eisen (Fe_d) umfasst zusätzlich die kristallinen pedogenen Eisenoxide, die im Zuge der Verwitterung aus den amorphen Oxiden entstehen. Hierbei nicht erfasst wird das silikatisch gebundene Eisen der primären Minerale (SCHLICHTING et al. 1995). Es ergibt sich aus dem Eisengesamtgehalt (Fe_t) abzüglich des dithionitlöslichen Eisens (Fe_d). Der Quotient aus Fe_o/Fe_d wird Aktivitätsgrad genannt und nimmt in der Regel mit zunehmendem Alter ab (SCHWERTMANN 1964).

In Abbildung 27 ist der Tiefenverlauf des oxalatlöslichen Eisens (atro, ohne Humus- und Carbonatzerstörung) im Mineralboden dargestellt. Es weist in sechs Böden (SBa, SBb, GOWb, GOWc, RBa und RBb) eine zweigipflige Verteilung mit erhöhten Werten im Ah-Horizont und besonders im tonreichsten Horizont auf. Im Peda Hardehausen tritt der höchste Wert im ersten Horizont auf und nimmt nach unten hin ab. Die Schwankungen im Tiefenverlauf von Boden Göttinger Wald a sind insgesamt gering. Im Pedon Holzkirch findet sich der höchste oxalatlösliche Eisengehalt im Btv-Horizont (3. Horizont).

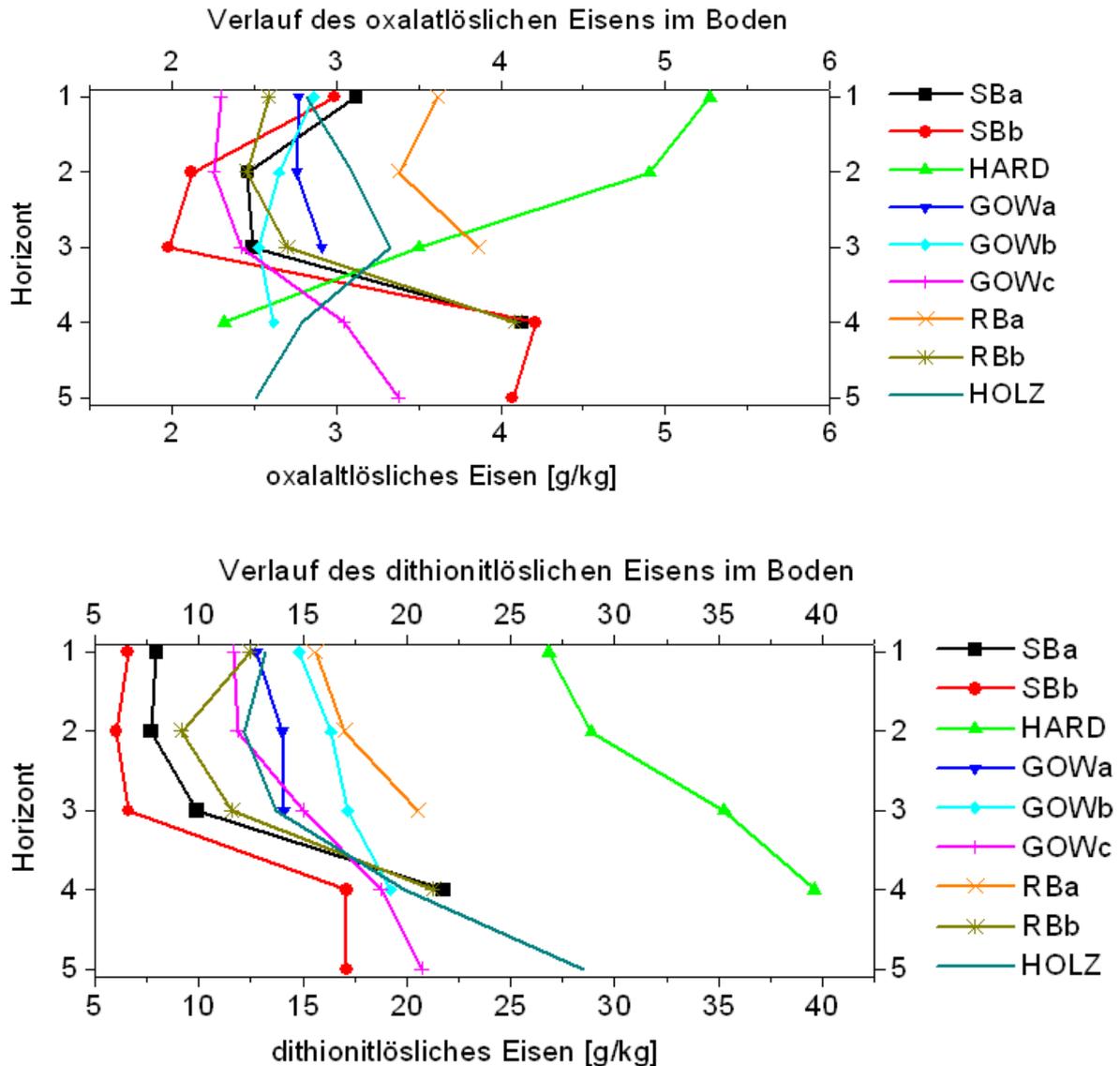


Abb. 27: Tiefenverlauf des oxalat- und dithionitlöslichen Eisens aller untersuchten Peda (atro)

Die höheren oxalatlöslichen Gehalte in den Ah-Horizonten können sowohl auf die hohen Humusgehalte als auch die niedrigen pH-Werte zurückgeführt werden. Diese Faktoren wirken sich laut BLUME & SCHWERTMANN (1969) hemmend bzw. verzögernd auf die Kristallisation der aus Silikaten freigesetzten Eisenoxide aus. Ungewöhnlich sind die hohen Fe_o -Gehalte in den tonreichsten Horizonten. In homogenen Braun- und Parabraunerden sollte der Fe_o -Gehalt vom Oberboden bis zum C-Horizont abnehmen (BLUME & SCHWERTMANN 1969). Der erneute Anstieg der Werte wäre typisch für einen Podsol, jedoch konnten in keinem Boden ausgeprägte Podsolierungsprozesse festgestellt werden. Auch eine Pseudovergleyung erzeugt erhöhte Fe_o -Gehalte, dann sollte aber auch der Aktivitätsgrad ansteigen (SCHLICHTING & BLUME 1962), was nicht der Fall ist. Zudem hätten Hinweise im Gelände gefunden werden müssen. Sichtbare hydromorphe Merkmale zeigen aber nur die Böden

Sentruper Berg b und Röhringsberg b. Um diese Werte zu interpretieren müssen zusätzlich die Fe_d und Fe_o/Fe_d betrachtet werden.

Das dithionitlösliche Eisen nimmt vom Oberboden zum tonreichsten Horizont hin zu (Abb. 27). Lediglich der Gehalt im Boden Göttinger Wald a zeigt kaum Veränderungen mit zunehmender Tiefe. Der Boden Hardehausen fällt durch hohe Gehalte bis 40 g/kg Fe_d auf. SCHWERTMANN (1964) gibt an, dass für Braunerden erhöhte dithionitlösliche Eisengehalte im Oberboden typisch sind, in Parabraunerden hingegen ist der Fe_d -Gehalt im Bt-Horizont am höchsten. Die Untersuchungsergebnisse deuten daher zunächst auf eine Lessivierung hin.

Der Aktivitätsgrad (Fe_o/Fe_d) ist ein Maß für den Verwitterungsgrad von Böden. Alte, zumeist tropische Böden weisen Quotienten von unter 0,1 auf, unter humiden Verhältnissen sind Werte zwischen 0,2 bis 0,4 normal, unter redoximorphen Bedingungen steigt der Wert auf 0,4 bis 0,6, in Podsolen können Quotienten bis 1 erreicht werden (CORNELL & SCHWERTMANN 2003). In den hier untersuchten Peda werden in den Oberböden Quotienten zwischen 0,19 und 0,45 gemessen (Abb. 28). In den folgenden Horizonten geht der Aktivitätsgrad bis zum tonreichsten Horizont kontinuierlich auf 0,06 bis 0,24 zurück.

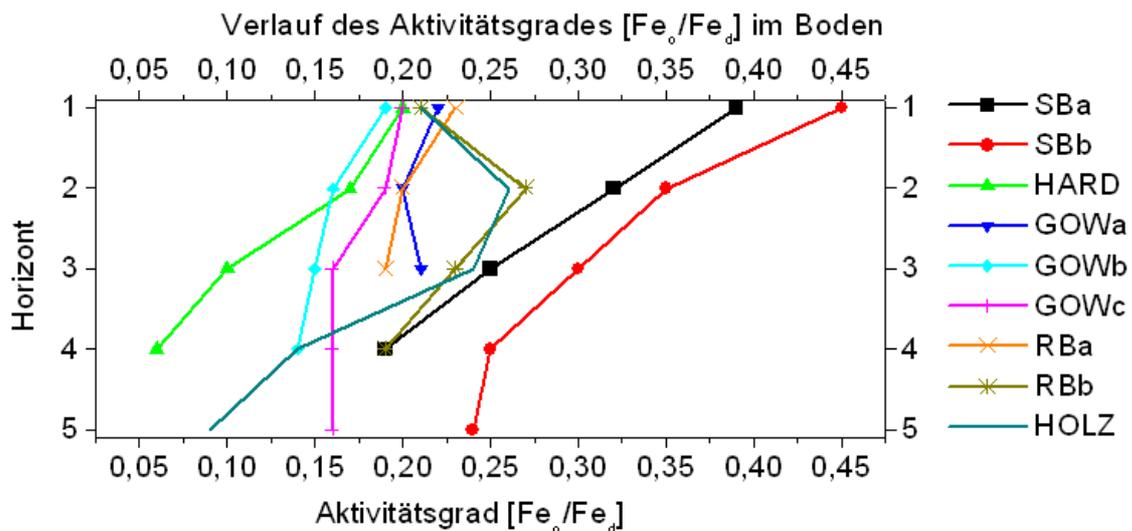


Abb. 28: Tiefenverlauf des Aktivitätsgrades (Fe_o/Fe_d) aller untersuchten Peda

Der Verlauf des Aktivitätsgrades unterstützt augenscheinlich die Hypothese, dass Tonverlagerung für die ansteigenden Fe_d -Gehalte in den tonreichsten Horizonten verantwortlich ist: In einer reinen Parabraunerde ist der Aktivitätsgrad durch die Anreicherung von Fe_d im Bt-Horizont am niedrigsten und steigt im C-Horizont wieder an (SCHWERTMANN 1964). Bemerkenswert ist jedoch, dass der Aktivitätsgrad zurückgeht, obwohl die Gehalte an oxalatlöslichem Eisen mit zunehmender Tiefe meist ansteigen. Dieses Phänomen kann durch überproportional ansteigende Gehalte an dithionitlöslichen Eisenoxiden erklärt werden. Der Fe_o -Anstieg deutet möglicherweise auf einen Substratwechsel bzw. mit der Tiefe zunehmenden Anteil von Lösungsrückstand am Mineralboden hin und schließt gleichzeitig Lessivierung nicht aus.

Um diese These zu prüfen, wurden Humus und Carbonat rechnerisch vom dithionitlöslichen Eisen abgezogen und der Wert durch den Tongehalt geteilt (Abb. 29).

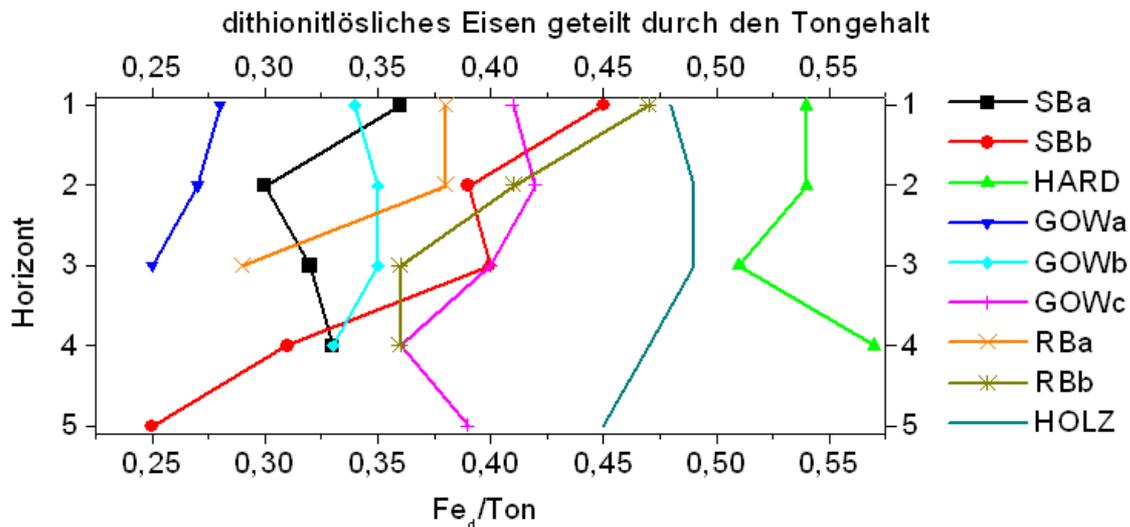


Abb. 29: Tiefenverlauf des dithionitlöslichen Eisens geteilt durch den Tongehalt aller untersuchten Peda innerhalb der Mineralbodenhorizonte

Liegt ein homogenes Ausgangsmaterial vor, sollten die horizontweise ermittelten Quotienten eines Bodens auch bei Lessivierung graphisch betrachtet stabil bleiben. Die Quotienten zeigen jedoch zum Teil deutliche Veränderungen, die wahrscheinlich auf eine Vermischung mit Lösungsrückstand zurückzuführen ist. Allerdings kann es auch durch Verwitterung zu Abweichungen vom ursprünglichen Tongehalt und dadurch zu Veränderungen kommen.

Hohe Fe_d -Gehalte sind nicht ungewöhnlich für Terra fusca und werden auf deren hohes Alter und damit einhergehend auf die Gegenwart gut kristallisierter Eisenoxide zurückgeführt (SCHWERTMANN 1964). Untersuchungen von THÖLE & MEYER (1979) zeigen aber auch, dass im nichtcarbonatischen Anteil von Kalksteinen bereits ein erheblicher Anteil dithionitlöslicher Eisenoxide vorhanden sein kann: Im Unteren Muschelkalk im Göttinger Wald wurden bis zu 48,4 g/kg Fe_d analysiert. Daher kann anhand der Fe_d -Gehalte keine Aussage zum Alter des Lösungsrückstandes eines Bodens abgeleitet werden.

Das Feinmaterial < 2 mm einiger der hier untersuchten Böden wurde ebenfalls in die Analyse mit einbezogen, allerdings ohne vorhergehende Carbonatzerstörung. Wird dieses rechnerisch entfernt, liegen die Fe_d -Gehalte auf gleichem oder etwas niedrigerem Niveau als in den tonreichsten Horizonten. Die Fe_o -Gehalte im Feinmaterial sind im Vergleich zu den tonreichsten Horizonten teilweise um mehr als die Hälfte niedriger (vgl. Kapitel 5.9, Tab. 34–42). Es stellt sich daher die Frage, aus welchen Gründen die oxalatlöslichen Gehalte der Mineralbodenhorizonte mit der Tiefe ansteigen. Möglicherweise ist dies eine Folge der Verwitterung/Verbraunung des Kalksteinlösungsrückstandes.

In Braunerden kann durch den Abzug des dithionitlöslichen Eisens vom Gesamteisen die Hauptverwitterungszone ermittelt werden. In Lessivés ist diese Differenz im Bt-Horizont am höchsten, da der verlagerte Ton in der Regel eisenreicher ist als die gröberen, nichtverlagerbaren Fraktionen (BLUME & SCHWERTMANN 1969). Da in den untersuchten Böden die Gesamteisengehalte mit der Tiefe zunehmen (Kapitel 5.5.1) und auch im Feinmaterial häufig weiter ansteigen, können Prozesse wie Tonverlagerung und Einmischung von Lösungsrückstand nicht mehr voneinander unterschieden werden. Eine Auswertung hinsichtlich Verwitterungszonen oder Nachweis von Schichtwechselln ist nicht möglich. Daher wird auf die Darstellung dieser Ergebnisse verzichtet.

Es bleibt festzuhalten, dass die pedogenen Eisenoxide und insbesondere das dithionitlösliche Eisen von vielen Faktoren beeinflusst werden, wie dem Alter der Böden, dem primären Gehalt im Ausgangsgestein, den Gesamteisengehalten und der Lessivierung. Pedogene Eisenoxide sind daher in den vorliegenden inhomogenen Böden nur eingeschränkt als Schichtungsparameter einsetzbar und zum Nachweis von Verbraunung und Differenzierung von Bodenklassen ungeeignet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ebenfalls pedogene Aluminium- und Manganoxide untersucht. Sie sind jedoch leichter löslich als Eisen und verstärkt der Auswaschung und dem Entzug durch die Vegetation unterworfen (BLUME & SCHWERTMANN 1969). Da sie keine eindeutigen Hinweise auf Schichtwechsel oder anderweitige pedogenetische Prozesse geben, wurde auf ihre Darstellung verzichtet.

5.5 Gesamtgehalte

Die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmte Elementverteilung in den neun untersuchten Böden wird genutzt, um die Böden chemisch zu charakterisieren und Schichtwechsel sowie Tonverlagerungen genauer zu erfassen. Die Mineralbodenhorizonte oberhalb des kalkhaltigen Verwitterungsschuttes wurden ohne Humus- und Kalkzerstörung analysiert. Das auf < 2 mm abgeseibte carbonathaltige Feinmaterial des Verwitterungsschuttes und Kalksteine ≥ 2 mm wurden vor der Analyse einer Carbonatzerstörung unterzogen. Das dabei gelöste Eisen wurde gemessen und mit den entsprechenden Gesamtgehalten verrechnet.

5.5.1 Gesamthöhe und Variabilität

Der Hauptbestandteil der Böden ist Silizium. Im Durchschnitt enthalten die Oberböden 62 % Siliziumoxid, wobei die flachgründigeren Peda (Göttinger Wald a und b, Hardehausen und Röhringsberg a) analog zum Quarzgehalt die niedrigsten Gehalte aufweisen (Tab. 10, Anhang Va).

Tab. 10: Mittlere prozentuale Elementgehalte der neun Peda (Angabe in Oxidform) im Ah-Horizont, im tonreichsten Horizont, im Feinmaterial < 2 mm des carbonathaltigen Verwitterungsschutts und im Kalkstein ≥ 2 mm (die beiden Letzteren wurden nach vorhergehender Carbonatzerstörung analysiert)

	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	K ₂ O [%]	CaO [%]	MgO [%]
Ah- Horizont	62	14	4,1	2,6	0,8	1,1
Min	50	10	2,3	2,0	0,4	0,7
Max	73	18	6,5	3,2	2,0	1,4
tonreichster Horizont	54	21	7,0	2,8	1,8	1,7
Min	46	18	5,2	2,0	1,0	1,4
Max	60	23	9,4	3,7	4,9	1,9
Feinmaterial < 2 mm (carbonatfrei)	55	19	7,5	3,8	0,9	2,0
Min	48	16	5,3	2,7	0,5	1,7
Max	63	21	15,0	5,1	1,6	2,6
Kalkstein (carbonatfrei)	53	18	11,1	4,8	1,4	2,2
Min	32	15	4,8	2,3	0,5	1,4
Max	66	21	23,1	6,2	5,4	2,9

Mit zunehmender Tiefe nehmen die Siliziumgehalte ab. Die niedrigsten Werte finden sich im tonreichsten Horizont oder im Feinmaterial. An den Standorten Göttinger Wald c, Röhringsberg a und b und Holzkirch weist der Lösungsrückstand des Kalksteins die niedrigsten Gehalte auf. Insgesamt fällt der Unterschied im Siliziumgehalt zwischen dem Kalkstein und den lössbeeinflussten Ah-Horizonten weniger deutlich aus als der Unterschied im Quarzgehalt. Das kann auf einen hohen Anteil an

Schichtsilikaten (relativ siliziumreich) im Lösungsrückstand der Kalksteine zurückgeführt werden. Weitere Hauptbestandteile der Mineralböden als auch der Kalksteine sind Aluminium (Al), Eisen (Fe) und Kalium (K).

Generell sollte der direkte Vergleich der Elementgehalte im Lösungsrückstand der carbonathaltigen Verwitterungshorizonte und der Bodenhorizonte immer unter Vorbehalt geschehen. Durch die schnelle Kalksteinauflösung unter Laborbedingungen können andere Elemente bzw. Elementmengen in Lösung gegangen sein als unter natürlichen Verwitterungsbedingungen.

5.5.2 An- und Abreicherungszone

Von besonderem Interesse ist die Verteilung der Elemente im Tiefenverlauf. Viele Elemente werden bei Lessivierungsprozessen zusammen mit den Tonmineralen verlagert. Silizium hingegen ist in lössreichen Böden hauptsächlich in den Quarzkörnern enthalten, der auf Grund seiner Hauptpräferenz in der Sand- und Schlufffraktion nur in geringen Mengen umverteilt wird (PÉCSI & RICHTER 1996). Dadurch wird Silizium relativ gesehen in den Al-Horizonten an- und in den Bt-Horizonten abgereichert. Um potentielle An- und Abreicherungszone innerhalb der Mineralbodenhorizonte übersichtlicher darstellen zu können, wurden die Einzelwerte eines Horizontes durch den Profildurchschnitt (Mittelwert aus allen Mineralbodenhorizonten bis zum tonreichsten Horizont) geteilt (KLINGER 1995). Liegt der Wert unter 1 liegt die Elementkonzentration unter dem Profildurchschnitt, liegt der Wert über 1 liegt sie über dem Profildurchschnitt (Tab. 11, Anhang Vb). Auch der Lösungsrückstand des Feinmaterials und des Steins wurden in diese Berechnungen mit einbezogen, allerdings sind ihre Werte nicht in den Profildurchschnitt eingeflossen. Dadurch wären die durch Tonverlagerung erzeugten An- und Abreicherungszone verwischt worden.

Tab. 11: Elementan- bzw. abreicherungshorizonte – Durchschnittswerte der untersuchten Peda (Einzelwerte geteilt durch den Profildurchschnitt der Mineralbodenhorizonte; Wert größer 1 = Elementkonzentration liegt über dem Profildurchschnitt, Wert kleiner 1 = Elementkonzentration liegt unter dem Profildurchschnitt)

	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	MnO	ZrO ₂	SrO	P ₂ O ₅	SO ₃
1. Horizont	1,0	1,2	0,8	0,8	0,9	0,8	0,7	1,0	1,0	1,0	0,9	1,4	1,6
Min	0,9	1,0	0,7	0,6	0,9	0,5	0,3	0,9	0,3	0,8	0,8	1,1	1,3
Max	1,1	1,3	0,9	0,9	1,0	0,9	1,1	1,1	1,4	1,2	1,0	1,8	2,5
2. Horizont	1,1	1,2	0,9	0,8	1,0	0,9	0,6	1,0	0,8	1,1	0,9	0,9	0,9
Min	1,0	1,0	0,8	0,6	0,9	0,6	0,3	0,9	0,3	0,9	0,9	0,5	0,6
Max	1,1	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,1	1,1	1,3	1,0	1,1	1,2
tonr. Hor.	0,9	0,6	1,2	1,4	1,0	1,3	1,7	1,0	1,2	0,9	1,2	0,9	0,8
Min	0,8	0,3	1,1	1,1	1,0	1,1	0,9	0,9	0,7	0,5	1,0	0,6	0,7
Max	1,0	1,0	1,4	1,7	1,1	1,6	2,3	1,0	2,0	1,3	1,3	1,7	1,1
Feinm. < 2	0,9	1,8	1,1	1,4	1,4	1,5	1,0	1,1	0,3	0,6	0,9	1,9	0,7
Min	0,8	0,9	1,0	1,2	1,1	1,3	0,3	0,9	0,1	0,4	0,6	0,9	0,5
Max	1,0	2,6	1,3	1,9	1,8	1,8	2,8	1,2	0,6	0,9	1,6	4,0	0,9
Kalkstein	0,9	0,8	1,1	2,2	1,8	1,6	1,7	1,0	0,5	0,4	1,3	2,7	1,5
Min	0,5	0,0	0,9	1,2	1,0	1,1	0,3	0,8	0,1	0,2	0,6	0,5	0,5
Max	1,1	1,5	1,2	4,3	2,1	2,0	6,4	1,3	3,0	1,2	4,4	6,3	4,1

Silizium zeigt seine relativen Hauptanreicherungsgebiete in den ersten zwei, bei tiefgründigen Böden auch in den ersten drei Horizonten. Wobei der zweite Horizont meist die stärkste Anreicherung zeigt, da die Siliziumgehalte im ersten Horizont durch die Humusakkumulation niedriger sind. Lediglich die Böden Göttinger Wald a und b zeigen keine deutliche Differenzierung. Der aus dem Gestein gewonnene Lösungsrückstand unterscheidet sich bis auf zwei Ausnahmen nur geringfügig in seinem Siliziumgehalt vom tonreichsten Horizont, im Pedon Holzkirch liegt er deutlich niedriger und im Pedon Hardehausen höher.

Natrium weist im Mineralboden einem dem Silizium vergleichbaren Verlauf seiner Anreicherungsgebiete auf. Da es gehäuft in der Schlufffraktion von Böden auftritt und dort vor allem in Feldspäten gebunden ist, tritt bei Lessivierung eine relative Anreicherung ein (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2002).

Im Gegensatz zu Silizium und Natrium sind Eisen, Aluminium und Magnesium im jeweils tonreichsten Horizont angereichert, wenn nur der Mineralboden betrachtet wird. Kalium und Titan zeigen nur eine geringe Differenzierung innerhalb der Mineralbodenhorizonte.

Diese Befunde deuten zunächst auf Lessivierungsvorgänge hin. Allerdings sind sich die Gehalte im tonreichsten Horizont und im Lösungsrückstand des Feinmaterials bzw. des Kalksteins in vielen Fällen sehr ähnlich, so dass auch eine reine Vermischung von Löss und Lösungsrückstand vorliegen könnte. Die nächsten Kapitel werden zeigen, welcher der beiden Prozesse im Boden abgelaufen ist.

Die Anreicherung von Schwefel und Phosphor in den Oberböden ist vermutlich nicht primär auf Lessivierung zurückzuführen. Der hohe Schwefelgehalt ist hauptsächlich

durch anthropogene atmosphärische Einträge bedingt. Phosphor, der auch im Feinmaterial und Kalkstein enthalten ist, wird wahrscheinlich über die Wurzeln aufgenommen und über die Streu dem Oberboden zugeführt („Basenpumpe“, vgl. Kapitel 5.3.3).

5.5.3 Quotienten aus Elementgehalten

Aus den Elementgehalten erstellte Quotienten können helfen, Prozesse und Schichtwechsel im Boden zu erkennen.

Zunächst werden pro Horizont die Quotienten aus dem Tongehalt und den Elementen Aluminium, Eisen bzw. Kalium gebildet (Abb. 30). Diese Elemente werden mit dem Ton verlagert (ALAILY 1984). Das Bilden von Verhältnissen hat den Vorteil, dass dadurch der Verlagerungsprozess rechnerisch eliminiert wird. Ist die Elementverteilung in den Peda (bei einheitlichem Ausgangsgestein) allein auf Lessivierung zurückzuführen, sollte der Quotient mit zunehmender Tiefe stabil bleiben und grafisch auf einer Linie liegen. Geringe Abweichungen können sich ergeben, wenn bei der Tonverlagerung bestimmte Tonminerale (Smectite) gegenüber anderen (Kaolinit) bevorzugt werden.

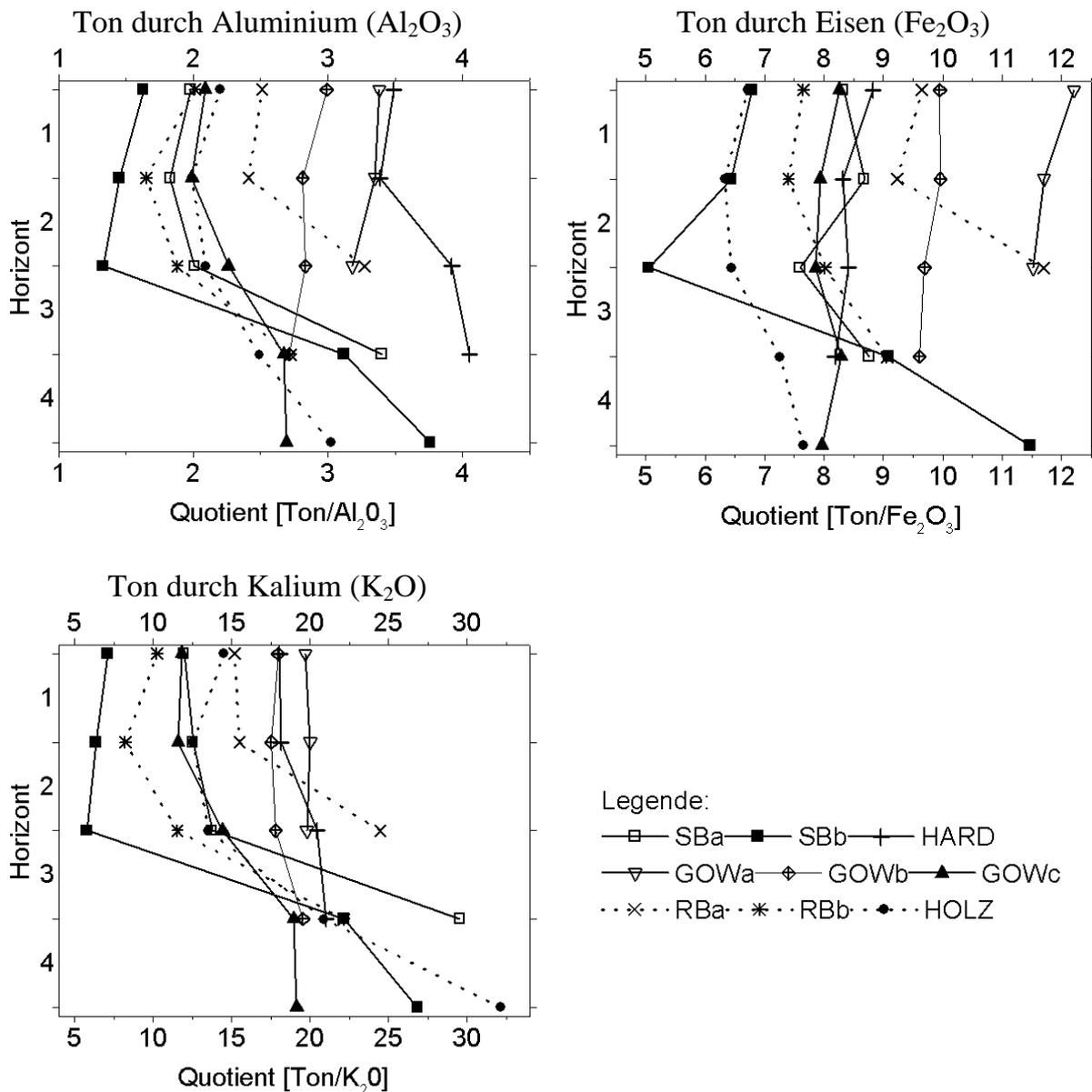


Abb. 30: Tiefenverlauf der Quotienten aus Ton durch Aluminium-, Eisen- und Kaliumoxid aller Böden innerhalb der Mineralbodenhorizonte

Besonders Aluminium ist gut als Schichtungsparameter geeignet, da es außer durch Lessivierung nur noch durch Podsolierung in größeren Mengen verlagert wird (ALAILY 1984). Letzteres konnte in keinem der untersuchten Böden festgestellt werden. Eisen hingegen wird im Boden auch noch durch die Pumpwirkung der Vegetation und Reduktions- bzw. Oxidationsvorgänge im Boden verlagert. Ähnliches gilt für Kalium, das einer stärkeren Auswaschung/Umlagerung als Eisen unterliegt (ALAILY 1984).

Trotz der unterschiedlichen Eignung der Elemente kommen alle drei Quotienten zu vergleichbaren Ergebnissen: Nur die Böden Göttinger Wald a und b zeigen einen annähernd senkrechten Verlauf, Hardehausen weicht leicht ab. Diese Böden sind eher flachgründig und zeigen bereits in den Oberböden hohe Tongehalte, die auf wenig Lösseinfluss hinweisen, so dass auch kein starker Substratwechsel stattfindet. Alle anderen zeigen Abweichungen vom senkrechten Verlauf bzw. steigende Quotienten

durch das überproportionale Ansteigen von Aluminium und Eisen im Vergleich zum Ton. Das deutet darauf hin, dass Residualton teilweise schon oberhalb des tonreichsten Horizontes in den Mineralboden eingemischt ist.

Die drei betrachteten Quotienten zeigen im weiteren Tiefenverlauf ferner deutliche Unterschiede zwischen den tonreichsten Horizonten und dem Lösungsrückstand des Feinmaterials und des Kalksteins: Im Lösungsrückstand des Feinmaterials und insbesondere im Kalkstein sind die Aluminiumquotienten meist höher als im Mineralboden, die Kalium- und Eisenquotienten sind dagegen häufig niedriger (vgl. Anhang Va). Das kann beim Aluminium hauptsächlich durch einen Schichtwechsel erklärt werden. Der Kalkstein bzw. sein Lösungsrückstand hat auf Grund seiner Zusammensetzung (Mineralbestand und Körnung) einen höheren Quotienten als Löss bzw. die lössreichen Oberbodenhorizonte. Bei Eisen und insbesondere Kalium ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass diese Elemente im Zuge der Verwitterung des Kalksteins stärker gelöst und mit dem Sickerwasser abgeführt werden als Aluminium (HUDSON 1995). Da der Lösungsrückstand des Steins und Feinmaterials durch Carbonatzerstörung unter Laborbedingungen gewonnen wurde, enthält er noch deutlich mehr Eisen und Kalium, die Quotienten sind demnach niedriger.

Besonders hilfreich für die Klärung von Schichtwechseln sind in der Regel Quotienten aus Elementen, die spezifisch für das jeweilige Gestein sind. In der Literatur werden des Öfteren das Zirkonium/Titan-Verhältnis oder die einzelnen Elemente herangezogen (z. B. GEHRT 1994, STAHR 1975, SCHLICHTING & BLUME 1961). Zu beachten ist dabei aber Folgendes: Titan kann stärker als Zirkonium durch Lessivierung verlagert werden, da es auch in der Tonfraktion auftritt. Außerdem sind Titanoxide verwitterungsanfälliger als Zirkon (ALAILY 1984). Hinzu kommt, dass sowohl Augit als auch Titanit Titan enthalten, beide Minerale sind Bestandteil der Laacher See Tephra (FRECHEN 1976) und könnten angesichts der Hauptwurfriechung zumindest an den Standorten Göttinger Wald und Röhringsberg zur Ablagerung gekommen sein.

In den untersuchten Böden zeigt Titan kaum signifikante Veränderungen im Tiefenverlauf und keine stark ausgeprägten An- oder Abreicherungszone, maximal eine leichte Anreicherung in den Horizonten oberhalb des tonreichsten Horizontes (Tab. 11). Es ist somit eher ungeeignet, um als Schichtungsparameter herangezogen zu werden. Zirkonium scheint auf den ersten Blick besser geeignet zu sein, es kommt in den Lösungsrückständen des Kalkstein und des Feinmaterials in geringeren Konzentrationen vor als in den Mineralbodenhorizonten, dort zeigt es allerdings einen sehr uneinheitlichen Verlauf: In den Böden am Sentruper Berg und in Holzkirch ist Zirkonium verstärkt in den oberen ein bis drei Horizonten oberhalb des tonreichsten Horizontes angereichert. In Hardehausen liegen die Gehalte in den Mineralbodenhorizonten auf vergleichbar niedrigem Niveau wie im Verwitterungsschutt. In den Böden im Göttinger Wald und am Röhringsberg weisen die tonreichsten Horizonte die höchsten Zirkoniumgehalte auf. Welche Prozesse hier zu einer Anreicherung führen, bleibt unklar. Ein Eintrag durch Laacher See Tephra scheint unwahrscheinlich, da sonst die Titangehalte ebenfalls ansteigen müssten, die in weitaus größeren Mengen darin enthalten sind (FRECHEN 1976).

Weitere Elemente, die in stabilen Mineralen in Böden auftreten, sind Kupfer, Barium, Blei und Strontium (STAHR & SAUER 2004). Kupfer konnte in keiner der Proben festgestellt werden. Die Gehalte an Barium liegen in den Mineralbodenhorizonten nur geringfügig höher als im Verwitterungsschutt des Kalksteins. Blei scheint durch die Analytik nicht immer erfasst worden zu sein (Bestimmungsgrenze), viele Horizonte werden mit 0 % ausgewiesen, obwohl Horizonte darüber oder darunter durchaus Blei enthalten. Strontium zeigt, ähnlich wie Barium, nur geringe Unterschiede zwischen den Gehalten im Verwitterungsschutt und den Mineralbodenhorizonten. Deshalb wird an dieser Stelle auf die Bildung weiterer Quotienten aus Elementgehalten verzichtet.

5.6 Mikromorphologie

Im Folgenden werden die Dünnschliffe verglichen und interpretiert. Fotos und detaillierte Auswertungen befinden sich in Anhang VI. Die zur eindeutigen Beschreibung benutzten Fachbegriffe wurden in Kapitel 4.6 erklärt.

Neben Tonverlagerungsmerkmalen werden auch weitere Merkmale wie Eisen- und Mangankonkretionen aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass Eisenoxide in Böden entweder in Form von Oxiden (z. B. Hämatit), Hydroxiden oder als Oxid-Hydroxid (z. B. Goethit) auftreten (CORNELL & SCHWERTMANN 2003). Da eine genauere Differenzierung an Dünnschliffen nur eingeschränkt möglich ist, werden sie zur Vereinfachung zu Eisenoxiden zusammengefasst. Neben pedogenen Eisenoxiden treten in Böden auch Manganoxide auf. Häufig sind sie nicht deutlich voneinander abgegrenzt, sondern kommen als Fe-Mn- bzw. Mn-Fe-Mischoxide vor und sind in Form von Konkretionen und Flecken in Böden aggregiert (HILLER & BRÜMMER 1995). Die Flächenanteile der in den Dünnschliffen enthaltenen Eisen- und Mangankonkretionen werden daher zusammengezogen.

5.6.1 Diskussion Sentruper Berg a

Zum besseren Verständnis der folgenden Diskussion sind in Tabelle 12 die wichtigsten Ergebnisse der Dünnschliffauswertungen des Bodens Sentruper Berg a aufgelistet. Eine ausführliche Beschreibung von jedem Schliff ist in Anhang VIa aufgeführt.

Tab. 12: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f₁₀-Verhältnisse – Pedon SBa

Hor.- Nr.	Hor.- bez.	Tiefe [cm]	TP ¹	TA ²	TB ³	V ⁴	Sum- me	Fe/Mn- Konkre- tionen	c/f ₁₀ -Verhältnis
2	Al-Bv	9-12	0,3		0,5		0,8	2,5	7,5/2,5
3	Bvt	25-28	0,7		2,5		3,2	2,0	6,5/3,5
4	IIBt-Tv	41-44	0,6	0,3	8,0	3,0	11,9	5,0	1/9 (65 %) / 8/2 (35 %)

¹Toncutane an Poren ²Toncutane an Aggregaten ³Toncutanbruchstücke ⁴Verfüllungen

Werden die drei Schliffe des zweiten bis vierten Horizontes untereinander verglichen, hebt sich besonders der Dünnschliff aus dem tonreichsten Horizont (IIBT-Tv) deutlich in Körnung und Struktur von den beiden anderen ab. Die vielen Toncutanbruchstücke und Verfüllungen im Schliff deuten auf eine starke Beanspruchung des Bodens hin. Viele Verfüllungen sind soweit zerstückelt, dass sie nur noch als Bruchstück anzusprechen sind. Viele Bruchstücke wiederum sind so stark in die Matrix eingearbeitet, dass sie sich kaum noch davon unterscheiden.

Die Fragmentierung und/oder Auflösung bzw. Reorientierung von Toncutanen kann verschiedene Gründe haben (FITZPATRICK 1993):

- die Aktivitäten wühlender Bodenorganismen (zoogene Bioturbation)
- Quellungs- und Schrumpfungsprozesse durch Befeuchtung und Austrocknung
- Wurzelwachstum (phytogene Bioturbation)
- Erdrutsche

Des Weiteren werden von vielen Autoren Frost/Tau-Wechsel insbesondere unter periglazialen Bedingungen (Kryoturbation) als Ursache für gebrochene, zerrissene oder separierte Toncutanbruchstücke aufgeführt (HUIJZER 1993).

Im vierten Horizont treten deutliche Interferenzfarben (b-fabric) auf, dies deutet auf Quellungs- und Schrumpfungsprozesse hin, auch (periglaziale) Frost/Tau-Wechsel kommen in Betracht (HUIJZER 1993, STOOPS 2003). Die zahlreichen Wurzeln und Wurzelreste (siehe Profilbeschreibung Kapitel 5.1.1) bis in den vierten Horizont lassen zudem auf eine hohe biologische Aktivität in Form von zersetzenden Bodenorganismen und phytogener Bioturbation schließen. Dies kann ebenfalls zu einer Zertrümmerung der Toncutane führen. Der Standort ist mittel geneigt und einige Bäume zeigen ein leichtes Hakenschlagen. Das zeugt von Bodenkriechen, wodurch wahrscheinlich ebenfalls ein mischender/fragmentierender Effekt erzielt wird.

Eine weitere Besonderheit des vierten Horizontes sind deutlich schluffigere Bereiche von 300 µm bis 2 mm Durchmesser. Sie bestehen hauptsächlich aus leicht eingeregelmtem Grobschluff und sind meist von einer Toncutane umgeben (Anhang VIa, Tafel 1, Fotos 7, 10). Eine Erklärung könnte das Eindringen von Löss über Grobporen und Frostrisse in bereits bestehenden Residualton sein. Der Boden SBb zeigt diese „Schlufffüllungen“ besonders deutlich, das Phänomen wird darum in Kapitel 5.6.2 näher erläutert und diskutiert.

Auch in der Art und im Umfang der Tonverlagerungsmerkmale setzt sich der vierte Horizont von den beiden anderen ab. Im zweiten und dritten Horizont sind die meisten Toncutane in den Poren leicht mikrolaminiert, ohne eine feste Abfolge der Laminae. Im vierten Horizont sind die Tonüberzüge fast durchgehend leicht staubig, schwarzbraune Laminae bzw. eine ausgeprägte Mikrolaminierung fehlen. Auch Toncutanbruchstücke sind im tonreichsten Horizont weniger stark mikrolaminiert. Es gibt mehrere mögliche Gründe:

- a) Es könnte es sich um eine ältere Tonverlagerungsphase handeln. Der Al-Horizont wurde möglicherweise abgetragen und durch kolluviales Material ersetzt, in dem eine erneute Phase der Tonverlagerung einsetzte.
- b) Der höhere Tongehalt des vierten Horizontes geht mit einer verminderten Anzahl an Grob- und Mittelporen einher (vgl. Kapitel 5.2.4). Das dadurch veränderte Strömungsverhalten des Sickerwassers könnte die unterschiedliche Ausprägung der Toncutane bewirkt haben.

c) Die Hanglage des Pedons ermöglicht lateralen Wasserabfluss. Dies kann eine horizontinterne Tonverlagerung verursachen. Da die Wasserleitfähigkeit der einzelnen Horizonte unterschiedlich ist, könnte dies zu unterschiedlich aufgebauten Toncutanen geführt haben.

d) Auch in ebenen Reliefpositionen kann es zu horizontinterner Tonverlagerung kommen. Bereits KUBIENA (1953) beschreibt, dass in der Entwicklung zur Terra fusca der Ton vollständig entkalkt, dadurch wird er peptisiert und wanderungsfähig, was zu Ausbildung von Mikro-Fließstrukturen vorwiegend in Wurzelbahnen, Regenwurmröhren und Klüften führt. Unter dem Mikroskop sind sie als doppelbrechende Schlieren zu erkennen. SCHEFFER et al. (1960) merken dazu an, dass es auf Grund der geringen Grobporenanzahl nicht zu einer Ausbildung von Tonan- bzw. abreicherungs-horizonten kommt. Dieser Prozess dürfte umso stärker zur Ausprägung kommen, je weniger Löss über dem Residualton liegt und den Sickerwasserfluss und die Entkalkung verlangsamt.

Es ist wahrscheinlich, dass mehrere der genannten Gründe für die staubigen und kaum mikrolaminierten Toncutane im vierten Horizont verantwortlich sind.

Im dritten Horizont gibt es einige wenige tonreiche Bereiche (Anhang VI, Tafel 1, Foto 6), sie stammen wahrscheinlich aus dem tonreichsten vierten Horizont. Für die Verlagerung von Bodenaggregaten aus tiefer gelegenen Horizonten in höhere Bereiche gibt es zwei wesentliche Transportmechanismen (RUSSOW & HEINRICH 2001):

- zoogene Bioturbation: wühlende Bodenorganismen wie Ameisen und Regenwürmer
- phytogene Bioturbation (Floralturbation): mechanische Auflockerung des Bodens durch Baumwurf oder beim Schwanken der Bäume im Wind. ROESCHMANN (1968) beschreibt, dass durch Baumwurf hochgerissenes polyederförmiges Bt-Material inselförmig in das A1-Horizont-Material eingemischt werden kann. Es ist sowohl unscharf als auch scharf begrenzt.

Beide Mechanismen sind grundsätzlich für den betrachteten Boden vorstellbar, hochgerissene Steine oder stark gestörte Horizonte, wie sie für junge, raumgreifende Baumwürfe typisch sind, fehlen allerdings.

5.6.2 Diskussion Sentruper Berg b

In Tabelle 13 sind die wichtigsten Ergebnisse der Dünnschliffauswertungen des Bodens Sentruper Berg b aufgelistet. Eine ausführliche Beschreibung von jedem Schliff ist in Anhang VIb aufgeführt.

Tab. 13: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schluff und c/f₁₀-Verhältnisse – Pedon SBb

Hor.-Nr.	Hor.-bez.	Tiefe [cm]	TP ¹	TA ²	TB ³	V ⁴	Summe	Fe/Mn-Konkretionen	c/f ₁₀ -Verhältnis
1	Ah	1-4			0,1		0,1	0,2	7,5/2,5 (50 %) / 8/2 (50 %)
2	Al+Btv	20-23	0,8		1,2		2,0	2,0	7,5/2,5 (85 %) / 6,5/3,5 (15 %)
3	Sw-Btv	39-42	0,8		3,0	0,3	4,1	2,5	7,5/2,5
4	IISd-Bvt-Tv	58-61	3,0	0,3	6,0	2,0	11,3	7,0	1/9 (85 %) / 7/3 (15 %)
5	Sd-Bt-Tv	65-68	3,0		4,0	4,0	11,0	6,0	1/9 (80 %) / 7/3 (20 %)

¹Toncutane an Poren ²Toncutane an Aggregaten ³Toncutanbruchstücke ⁴Verfüllungen

Das Pedon zeigt ab dem zweiten Horizont Tonverlagerungsmerkmale. Dabei dominieren Toncutanbruchstücke. Mögliche Ursachen für die Zerstörung und Deformation der Toncutane wurden bereits im vorhergehenden Kapitel aufgeführt. Eventuell sind einige dieser Gründe auch die Ursache für das geringe Auftreten von Tonauswaschungsmerkmalen. Merkmale wie von Feinmaterial freigewaschene Körner an Poren oder Kappen aus Feinmaterial auf größeren Mineralen (vgl. BULLOCK et al. 1974) fehlen weitestgehend. Möglicherweise sind diese Merkmale durch Bodenabtrag verloren gegangen. Der Standort wurde intensiv als Waldweide und als Niederwald genutzt (Kapitel 3.1). Für diese Nutzungsform sprechen auch einige Körner und tonige Aggregate im Dünn Schluff des zweiten Horizontes, sie weisen dünne Hauben aus humosem, unorientiertem Material auf und staubige, schwarze Toncutane (Anhang VIb, Tafel 2a, Foto 3). SLAGER & VAN DE WETERING (1977) beschreiben staubige, schwarze Toncutane in Zusammenhang mit zeitweiligen Entwaldungsphasen. Da die kinetische Energie von Regentropfen nicht durch Blätter oder ähnliches abgefedert wird, werden auch gröbere Komponenten als Feinton verlagert. Daher sind am Standort Phasen mit geringer Pflanzenbedeckung denkbar.

Drei Tonverlagerungsphasen sind grob unterscheidbar: Sehr staubige, braunschwarze Toncutane, die nur im zweiten Horizont vorkommen; teilweise mikrolaminierte, reine bis vorwiegend leicht staubige, gelbe bis orangefarbene Toncutane und Toncutanfragmente in allen fünf Horizonten (sie sind allerdings im vierten und fünften Horizont stärker reorientiert und redoxymorph überprägt, besonders die Bruchstücke), und hellgelbe, staubige Toncutane, die nur in den tonreichen Horizonten IISd-Bvt-Tv und Sd-Bt-Tv vorkommen. Während die erste Phase wahrscheinlich auch die jüngste ist, kann zwischen den anderen beiden keine zeitliche Reihenfolge festgelegt werden.

Eine Besonderheit bilden die in den beiden tonreichen Horizonten auftretenden Schlufffüllungen. Für deren Entstehung werden zwei Möglichkeiten angenommen: Vor der Lössanwehung waren lediglich Verwitterungsschuttdecken vorhanden, der Löss wurde darüber geweht und die Kalkauswaschung setzte ein. Sowohl der Löss als auch Teile des Kalksteinschutts wurden vollständig entkalkt. Es entstanden Wurzelgänge bis in den tonigeren Horizont hinein, die zunächst mit Schluff, eventuell in einer Phase mit Starkregenereignissen, und dann mit Ton verfüllt wurden. Unklar bleibt, warum so eine starke Sortierung in Ton und Grobschluff erfolgte.

Wahrscheinlicher ist folgende Hypothese: Schon vor der Lössanwehung war der Tv-Horizont weitestgehend ausgebildet bzw. entkalkt. Das Gebiet war während der Weichsel-Kaltzeit Periglazialgebiet. In der Auftauzone der Böden kam es zu saisonalen Frost-/Tauwechsln. Unter diesen Bedingungen haben sich vermutlich feine Risse im Residualton gebildet. Möglicherweise durch periodische Austrocknung des am Hang gelegenen Pedons und/oder durch Tieffrostkontraktion. Letztere setzt ein, wenn in einem gefrorenen Bodenkörper die Temperaturen sehr stark absinken – das Eis zieht sich zusammen und Risse entstehen (BAUMHAUER 2010). Besonders zu Beginn der Lössanwehung wurden diese Spalten und durchgängige Grobporen mit dem angewehten Löss verfüllt. Die Risse stellen bevorzugte Fließbahnen für Wasser im Boden dar (preferential flow), so dass wahrscheinlich sowohl Einwehung als auch ein Einspülen von Löss stattgefunden hat. Dass Wasser zeitweise einen großen Einfluss auf die Verteilung von Partikeln hatte, würde auch die Sortierung von Mineralkörner im dritten Horizont erklären (Anhang VIb, Tafel 2, Foto 6). Es könnte sich um eine Bänderung handeln, die durch hangabwärts fließendes Wasser entstanden ist. Auch nach der Verfüllung der Spalten und Grobporen mit Schluff wird Wasser bevorzugt durch diese porenreicheren Fließbahnen abgeflossen sein. Das hat auf Grund der Hangneigung von 14 % eventuell zu einer lateralen Abfuhr von feinerem Material zwischen dem Grobschluff geführt. Das könnte das häufige Fehlen von Feinschluff und unorientiertem Ton in den Schlufffüllungen erklären. Denkbar wäre auch die Verminderung von feineren Komponenten durch redoximorphe Prozesse (RANSOM et al. 1987). Nach der Entkalkung des überlagernden Lösses setzte Tonverlagerung ein und verfüllte sowohl den Raum zwischen den Körnern als auch zwischen der Wandung und dem Grobschluff mit orientiertem Ton. Durch die Neigung des Hanges wird sich der Boden auch weiterhin leicht hangabwärts bewegt haben, wodurch sich die Risse verformten und im Schluff als deformierte Tropfen ohne eine bevorzugte Achse erscheinen.

Eine Reihe von Autoren beschreiben ähnliche Beobachtungen: So berichten LANGOHR & PAJARES (1981) von Schluffverfüllungen, sogenannte „skeletons“, in einem Fraglossudalf in Belgien. Innerhalb vertikaler Risse wurden dort uneinheitliche Bänder von einigen Millimetern bis Zentimetern Dicke gefunden. Darin befinden sich gut sortierte Körner von 10–50 µm Größe zusammen mit Ton und/oder Fe/Mn-Cutanen. Die Autoren vermuten eine Entstehung unter periglazialen Bedingungen (Frost/Tauwechsel) durch Erosions-/Sedimentationsprozesse mit turbulentem Wasserfluss. Die Tonüberzüge scheinen ebenfalls mit diesem Prozess in Beziehung zu stehen. Sehr ähnliche Strukturen werden auch von VAN VLIET-LANOË (1998), KEMP et al. (1998) und ROSE et al. (2000) beschrieben. ROSE et al. (2000) untersuchten Lössablagerungen der letzten quartären Eiszeit in der Nähe vom Heathrow Airport, London. Sie beschreiben, dass saisonale Austrocknung unter periglazialen Bedingungen (nicht zwangsweise Permafrost) während des mittleren Devensian (Weichsel-Kaltzeit) Polygonmuster in äolischen Ablagerungen formte, die während des späten Devensian weiter mit Löss überdeckt wurden. Dieser deutlich gröbere Löss wurde dann in die Risse gespült.

Diese Beispiele zeigen, dass es sich bei den Schlufffüllungen um ein verbreitet vorkommendes Phänomen handelt. Ein weiterer durch die Auswertung der Dünnschliffe genauer beschreibbarer Prozess ist die Pseudovergleyung des Pedons. Sie ist teilweise erst nach der Tonverlagerung eingetreten, da viele Toncutane kleine Fe/Mn-Ausfällungen aufweisen. Wasserstauend wirkt sowohl der große Korngrößensprung zwischen dem dritten und vierten Horizont, als auch die Verminderung der Porendurchmesser durch den angelagerten Ton.

5.6.3 Diskussion Hardehausen

Die wichtigsten Ergebnisse der Dünnschliffauswertungen des Bodens Hardehausen sind in Tabelle 14 aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung von jedem Schluff befindet sich in Anhang VIc.

Tab. 14: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schluff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon HARD

Hor.- Nr.	Hor.- bez.	Tiefe [cm]	TP ¹	TA ²	TB ³	V ⁴	Sum- me	Fe/Mn- Konkre- tionen	c/f_{10} -Verhältnis
1	Ah	2-5					0,0	3,0	2,5/7,5
2	Al-Bv-Tv	9-12	0,1		0,3		0,4	4,2	2/8
3	Bt-Tv	22-25	0,8	1,0	2,0	3,0	6,8	1,5	0,6/9,4
4	Tv	33-36	0,2	0,2	0,1	0,1	0,6	6,0	0,8/9,2 (40 %) / 0,4/9,6 (60 %)

¹Toncutane an Poren ²Toncutane an Aggregaten ³Toncutanbruchstücke ⁴Verfüllungen

Das Pedon Hardehausen zeigt vom zweiten bis zum vierten Horizont Tonverlagerungsmerkmale, die meisten befinden sich im dritten Horizont. Die Cutane sind durchgehend staubig und meist schwach orientiert. Das lässt auf einen ähnlichen Bildungszeitpunkt schließen oder gleichbleibende Entstehungsbedingungen. Besonders der dritte Horizont besitzt neben Toncutane an Poren und Aggregaten auch viele Verfüllungen. Sie treten im vierten Horizont nicht mehr auf. Das kann mit den leicht ansteigenden Carbonatgehalten zusammenhängen, oder auch mit einer nicht repräsentativen Entnahmestelle. Durch den hohen Steinanteil ist der vierte Horizont schon auf der makroskopischen Ebene sehr inhomogen. Es fehlen Tonauswaschungsmerkmale wie z. B. helle Aggregatränder.

Eine Besonderheit bilden orientierte, tonige Bruchstücke (Anhang VIc, Tafel 3, Fotos 8, 9). Da sie Spaltflächen aufweisen, handelt es sich nicht um echte Toncutanbruchstücke. Es bestehen Ähnlichkeiten mit Biotit, allerdings fächern sich dessen Ränder in der Regel durch Verwitterung auf, das konnte bei keinem der Bruchstücke beobachtet werden (FITZPATRICK 1993). Auch zusätzlich angefertigte Dünnschliffe der Kalksteine des Bodens enthalten keine vergleichbaren Merkmale. Dennoch ist es

am wahrscheinlichsten, dass es sich um Artefakte/Tonsteinbruchstücke aus mergeligen Zwischenlagen handelt.

Die Mikromasse des Pedons ist in PPL kräftig orange gefärbt. Das deutet auf relativ viel fein verteiltes Eisen in der Mikromasse hin. In allen Tiefen finden sich in situ gebildete, runde, uniforme und konzentrische Fe-/Mn-Konkretionen, deren Durchmesser um 100 µm schwankt. Ab dem dritten Horizont nimmt deren Zahl ab, stattdessen treten vermehrt große, leicht abgerundete Konkretionen auf, die sich nach der gelblichen Farbe zu urteilen hauptsächlich aus Geothit zusammensetzen. Laut STOOPS (2003) weist Geothit, wenn er fein verteilt vorliegt, unter Auflicht eine gelbgrüne Farbe auf, Hämatit erscheint matt rot.

In den Dünnschliffen des zweiten, dritten und vierten Horizontes findet sich viele schwarze bis rotschwarze Wurzel- und Geweberesten. Als Ursache könnten Waldbrände in Frage kommen. Möglicherweise haben auch die hohen Eisengehalte des Bodens zu einer Imprägnierung von Wurzel- und Geweberesten geführt und sie so stabilisiert und dunkel gefärbt (vgl. CORNELL & SCHWERTMANN 2003). Die genaue Entstehung kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Die besonders im dritten Horizont vielfach auftretende b-fabric deutet auf eine große Beanspruchung durch Quellen und Schrumpfen hin, welches sich auch makroskopisch im Polyedergefüge widerspiegelt.

5.6.4 Diskussion Göttinger Wald a

In Tabelle 15 sind die wichtigsten Ergebnisse der Dünnschliffauswertungen des Bodens Göttinger Wald a aufgelistet. Eine ausführliche Beschreibung von jedem Schliff ist in Anhang VI d aufgeführt.

Tab. 15: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f₁₀-Verhältnisse – Pedon GOWa

Hor.- Nr.	Hor.- bez.	Tiefe [cm]	TP ¹	TA ²	TB ³	V ⁴	Sum- me	Fe/Mn- Konkre- tionen	c/f ₁₀ -Verhältnis
1	Ah	3-6					0,0	1,5	4,5/5,5
2	Ah-Bv-Tv	9-12	0,3				0,3	1,0	4/6
3	Bv-Tv	16-19	0,1				0,1	1,5	4/6

¹Toncutane an Poren ²Toncutane an Aggregaten ³Toncutanbruchstücke ⁴Verfüllungen

Tonverlagerung spielt in allen drei Horizonten nur eine untergeordnete Rolle. Das ist hauptsächlich auf die Flachgründigkeit des Standortes zurückzuführen. Durch die Nähe zum Ausgangsgestein beträgt der pH-Wert im zweiten Horizont 5,6 und im dritten bereits 6,4. Tonverlagerung findet zwischen pH 5 und 6,5 statt. Da die pH-Werte unter Wald größtenteils erst in den letzten Jahrzehnten als Folge von Übernutzung und Industrialisierung stark gesunken sind (VEERHOFF 1996), ist

anzunehmen, dass der pH-Wert bislang zu hoch für Tonverlagerung war. Alle drei Schliffe enthalten zudem viele Wurzel- und Gewebereste, ein Zeichen für viel Bioturbation. Das führt zusätzlich zu einer raschen Zerstörung von Toncutanen (vgl. Kapitel 5.6.1). Da kaum Toncutanbruchstücke vorliegen, ist eher davon auszugehen, dass so gut wie keine Tonverlagerung stattgefunden hat.

5.6.5 Diskussion Göttinger Wald b

Die wichtigsten Ergebnisse der Dünnschliffauswertungen des Bodens Göttinger Wald b sind in Tabelle 16 aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung von jedem Schliff befindet sich in Anhang VIe.

Tab. 16: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f₁₀-Verhältnisse – Pedon GOWb

Hor.-Nr.	Hor.-bez.	Tiefe [cm]	TP ¹	TA ²	TB ³	V ⁴	Summe	Fe/Mn-Konkretionen	c/f ₁₀ -Verhältnis
1	Ah	3-6					0,0	2,0	5/5
2	Al-Bv	14-17	0,8				0,8	2,0	5/5
3	Btv-Tv	24-27	0,2		1,5		1,7	2,0	5/5 (85 %) / 0,8/9,2 (15 %)
4	Bvt-Tv	35-38	0,2	0,5	6,0	6,0	12,7	5,0	1,5/8,5 (88 %) / 5/5 (12 %)

¹Toncutane an Poren ²Toncutane an Aggregaten ³Toncutanbruchstücke ⁴Verfüllungen

Im Pedon lassen sich zwei Phasen der Tonverlagerung unterscheiden. Bis in den dritten Horizont kommen braune, staubige Toncutane vor. Im vierten Horizont und in tonigeren Teilen des dritten Horizontes treten gelbliche, meist stark reorientierte, mäßig staubige Verfüllungen, Bruchstücke und auch Toncutane auf. An den beiden unteren Horizonten bzw. Dünnschliffen Btv-Tv und Bvt-Tv wird deutlich, dass Vermischungsvorgänge, teilweise in Form ganzer Aggregate, stattgefunden haben: Im dritten Horizont treten tonige Aggregate auf, die in Morphologie und Zusammensetzung dem vierten Horizont gleichen; im vierten Horizont bestehen einige Aggregate und Bereiche aus deutlich schluffigerem Material, wie es für die Horizonte eins bis drei typisch ist. Mögliche Ursachen für diese Durchmischung, wie Baumwürfe und Bioturbation, werden bereits in Kapitel 5.6.1 erläutert. Auch Hangfließen (der Hang ist schwach geneigt) könnte die Vermischung beider Materialien begünstigt haben.

Auffällig ist die leichte Häufung von Kohlestückchen im zweiten und dritten Horizont. Kohlestückchen können auf anthropogenen Einfluss oder natürliche Waldbrände hinweisen. Laut DEPPE & TROE (1956) ist der untersuchte Bereich des Göttinger Waldes nie besiedelt worden und war laut SCHEFFER et al. (1962) immer mit Laubwald bedeckt. Darum ist ein natürlicher Ursprung durch Waldbrände wahrscheinlich.

Warum sich in den tonigen Bereichen des dritten Horizontes und im vierten Horizont die Art der Toncutane ändert, kann verschiedene Gründe haben: Neben veränderten

Infiltrations- und Tonanlagerungsbedingungen auf Grund des Bodenartenwechsels kommen auch horizontinterne Tonverlagerungen in Frage (vgl. Kapitel 5.6.1). Letztere könnten, neben Bioturbation, mit ein Grund für das weitgehende Fehlen von Tonauswaschungsmerkmalen in den hangenden Horizonten sein. Fraglich bleibt der Entstehungszeitpunkt der Cutane. Es könnte bereits Residualton vor der Lössanwehung vorhanden und durchschlämmt worden sein. Die starke Reorientierung, insbesondere der Verfüllungen, deutet auf ein höheres Alter dieser Phase hin. Oder das carbonathaltige Feinmaterial des Verwitterungsschuttes ist erst nach der Lössanwehung zusammen mit dem Löss vollständig entkalkt worden. Im Anschluss wurde Residualton durch lateralen Abfluss horizontintern durchschlämmt. Auch eine Kombination mehrerer Prozesse ist nicht auszuschließen.

5.6.6 Diskussion Göttinger Wald c

In Tabelle 17 sind die wichtigsten Ergebnisse der Dünnschliffauswertungen des Bodens Göttinger Wald c aufgelistet. Eine ausführliche Beschreibung von jedem Schliff ist in Anhang VI f aufgeführt.

Tab. 17: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f₁₀-Verhältnisse – Pedon GOWc

Hor.- Nr.	Hor.- bez.	Tiefe [cm]	TP ¹	TA ²	TB ³	V ⁴	Sum- me	Fe/Mn- Konkre- tionen	c/f ₁₀ -Verhältnis
1	Ah	2-5			0,2		0,2	2,0	6/4 (93 %) / 2,5/7,5 (7 %)
2	Ah+Bv-Al	12-15	0,3		0,5		0,8	3,5	6/4
3	Bvt	26-29	0,8		4,0	1,0	5,8	4,0	5,5/4,5 (85 %) / 3/7 (15 %)
4	Bvt-Tv	35-38	2,0	1,5	6,0	7,0	16,5	3,0	5,5/4,5 (45 %) / 4/6 (40 %), 0,5/9,5 (15 %), viele Übergänge

¹Toncutane an Poren ²Toncutane an Aggregaten ³Toncutanbruchstücke ⁴Verfüllungen

Das Pedon zeigt eine mit der Tiefe zunehmende Anzahl an Tonverlagerungsmerkmalen. Grob lassen sich zwei Tonverlagerungsphasen unterscheiden. Im zweiten und dritten Horizont sind Toncutane in Poren eher selten und meist staubig und rein mikrolaminiert. Im vierten Horizont sind Toncutane in Poren häufiger und vor allem kräftiger ausgeprägt, dabei vorwiegend gelb, fast rein und nur schwach mikrolaminiert. Zusätzlich finden sich in diesem Horizont Verfüllungen und Bruchstücke aus diesem Ton. Die hohe Anzahl an Toncutanbruchstücken deutet daraufhin, dass diese Tonverlagerungsphase älter ist als die der überlagernden Horizonte. Die Herkunft des verlagerten Tones im vierten Horizont ist auch in diesem Boden nicht eindeutig zu klären (vgl. Pedon GOWb). Eine horizontinterne Verlagerung ist denkbar. Neben der abwärts gerichteten Tonverlagerung existiert auch ein aufwärts gerichteter zweiter Prozess. Die Horizonte eins bis drei enthalten zu geringen Anteilen abgerundete,

tonreiche Bereiche mit Bruchstücken, die den Toncutanen im vierten Horizont sehr ähnlich sind. Die rundliche Form und stark deformierte und stark reorientierte Bruchstücke lassen darauf schließen, dass die Aggregate vom vierten Horizont in darüber liegende Horizonte transportiert wurden. Wieder können dafür zoogene Bioturbation und Baumwürfe als auch Hangfließen in Frage kommen (vgl. 5.6.1). In diesem Pedon liegt eine ausgeprägte Vermischung von Material in zwei Richtungen vor. Das wird auch am vierten Schliff deutlich, der neben schluffreichen Aggregaten, wie sie im dritten Horizont auftreten, auch sehr tonreiche Aggregate enthält. Leider ist ein Vergleich mit dem fünften, tonreichsten Horizont nicht möglich, da kein Dünnschliff vorliegt. Es kann darin ein hoher Anteil sehr feinkörniger Bereiche vermutet werden.

5.6.7 Diskussion Röhringsberg a

Die wichtigsten Ergebnisse der Dünnschliffauswertungen des Bodens Röhringsberg a sind in Tabelle 18 aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung von jedem Schliff befindet sich in Anhang VIg.

Tab. 18: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon RBa

Hor.- Nr.	Hor.- bez.	Tiefe [cm]	TP ¹	TA ²	TB ³	V ⁴	Sum- me	Fe/Mn- Konkre- tionen	c/f_{10} -Verhältnis
1	Ah	2-5			0,1		0,1	4,0	4/6 (99 %) / 1,5/8,5 (1 %)
2	Alh-Bv	12-15	0,3		0,4		0,7	4,0	3/7 (95 %) / 1/9 (5 %)
3	IIBt-Tv	26-28	0,4	0,3	8,0	2,0	10,7	2,0	3/7 (50 %) / 1/9 (50 %)

¹Toncutane an Poren ²Toncutane an Aggregaten ³Toncutanbruchstücke ⁴Verfüllungen

Bereits im ersten Horizont bzw. Dünnschliff treten tonige Aggregate auf, deren Anteil mit der Tiefe deutlich zunimmt. Ihre Zusammensetzung ist in allen Horizonten ähnlich (c/f_{10} -Verhältnisse von 1,5/8,5 bis 1/9). Auch in diesem Boden ist folglich von einem Hochreißen bzw. Vermischen tonigerer Bereiche aus dem Unterboden mit darüber liegenden Horizonten auszugehen, wie schon in Kapitel 5.6.1 beschrieben. Da die Aggregate keine Degradationserscheinungen wie eine Tonverarmungszone am Rand aufweisen (BULLOCK et al. 1974), ist nicht von einer einfachen Tieferlegung des Bt-Horizontes durch Pedogenese auszugehen. Bis auf wenige Ausnahmen sind die Toncutane in den Poren in allen Tiefen sehr ähnlich zusammengesetzt (gräulich und staubig), so dass von einem einheitlichen Entstehungszeitraum ausgegangen werden kann. Toncutanbruchstücke heben sich auf Grund ihrer Zusammensetzung (meist gelblich und rein) und starken Reorientierung klar von den Toncutanen in den Poren ab und sind älteren Datums. Da sie in den ersten beiden Horizonten fast ausschließlich an die tonigeren Bereiche gebunden sind, wurden sie sehr wahrscheinlich im dritten

Horizont gebildet. Dort treten sie gehäuft auf und haben ganze Aggregatzwischenräume verschlossen.

5.6.8 Diskussion Röhringsberg b

In Tabelle 19 sind die wichtigsten Ergebnisse der Dünnschliffauswertungen des Bodens Röhringsberg b aufgelistet. Eine ausführliche Beschreibung von jedem Schliff ist in Anhang VIh aufgeführt.

Tab. 19: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f₁₀-Verhältnisse – Pedon RBb

Hor.- Nr.	Hor.- bez.	Tiefe [cm]	TP ¹	TA ²	TB ³	V ⁴	Sum- me	Fe/Mn- Konkretionen	c/f ₁₀ -Verhältnis
2	Al	13-16	0,1		0,5		0,6	2,5	7/3 (97 %) / 3/7 schwankt (3 %)
3	Sw-Bt	28-31	2,0	0,1	2,0	0,5	4,6	1,5	6,5/3,5 schwankt leicht (85 %) / 2,5/7,5 (15 %)
4	IISd-Bvt- Tv	49-52	3,0	4,0	1,5	10	18,5	3,5	3/7 schwankt (93 %) / 6,5/3,5 (7 %)

¹Toncutane an Poren ²Toncutane an Aggregaten ³Toncutanbruchstücke ⁴Verfüllungen

Dieser Boden enthält im Vergleich zum Anteil an Toncutanbruchstücken eine relativ hohe Anzahl an Toncutane. Dies lässt auf eine relativ gut erhaltene oder junge Tonverlagerung schließen. Zwei Verlagerungsphasen sind unterscheidbar: Durchgängig treten schlecht orientierte, staubige, dünne Cutane auf, die eventuell einer jüngeren Tonverlagerungsphase angehören. Rein und mäßig staubig mikrolaminierte Cutane nehmen mit der Tiefe zu, wobei einige Laminae besonders im dritten Horizont sehr dunkel sind. Im letzten Horizont sind sie zunehmend reiner und füllen breite Aggregatzwischenräume aus. Auch in diesem Boden kann eine horizontinterne Verlagerung nicht ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel 5.6.1), u.a. da Tonauswaschungsmerkmale in den betrachteten Dünnschliffen fehlen. Auffällig ist die etwas geringere Anzahl an Toncutanfragmenten im vierten Horizont bei gleichzeitig hohem Anteil an intakten Tonüberzügen. Er ist eventuell weniger durch Bioturbation beeinflusst worden als die darüber liegenden Horizonte.

In den oberen beiden Dünnschliffen treten tonigere Bereiche/Aggregate auf, die aus tieferen Horizonten stammen; im Schliff aus dem tonreichsten Horizont befindet sich ein Aggregat mit deutlich größerem Material. Beides sind deutliche Hinweise auf eine aufwärts wie auch abwärts gerichtete Materialvermischung (vgl. Kapitel 5.6.1). Auf Grund der geringen Hangneigung dürfte Hangkriechen nur eine untergeordnete Rolle bei der Durchmischung spielen.

5.6.9 Diskussion Holzkirch

Die wichtigsten Ergebnisse der Dünnschliffauswertungen des Bodens Holzkirch sind in Tabelle 20 aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung von jedem Schliff befindet sich in Anhang VII.

Tab. 20: Prozentuale Flächenanteile an Tonverlagerungsmerkmalen und Konkretionen am gesamten Schliff und c/f_{10} -Verhältnisse – Pedon HOLZ

Hor.- Nr.	Hor.- bez.	Tiefe [cm]	TP ¹	TA ²	TB ³	V ⁴	Sum- me	Fe/Mn- Konkre- tionen	c/f_{10} -Verhältnis
1	Ah	2-5			0,1		0,1	5,0	7/3 (97 %) / 5,5/4,5 (3 %)
2	Al-Bv	13-16	0,2		0,1		0,3	4,0	7/3 (98 %) / 6/4 (2 %)
3	Btv	27-30	0,3	0,1	3,5	0,3	4,2	5,0	6/4 (60 %) / 5/5 (40 %)
4	Bvt	45-48	5,0	2,5	1,5	1,0	10,0	3,0	4/6 schwankt
5	IIBvt-Tv	56-59	1,5	0,2	5,0	5,0	11,7	2,5	0,5/9,5 (60 %) / 5/5 (40 %)

¹Toncutane an Poren ²Toncutane an Aggregaten ³Toncutanbruchstücke ⁴Verfüllungen

Der Boden weist eine starke mit der Tiefe zunehmende Tonverlagerung auf. Sind die Toncutane im zweiten Horizont noch dünn und überwiegend staubig und grünlich, so werden sie im dritten Horizont schon etwas kräftiger und sind im vierten Horizont gelblich und deutlich mit reinen und staubigen Laminen mikrolaminiert. Die Laminen zeigen keine feste Abfolge, das deutet auf häufig wechselnde Verlagerungsbedingungen hin. Im fünften Horizont geht die Anzahl an Toncutanen in Poren wieder etwas zurück. Toncutanbruchstücke sind besonders in den ersten beiden Horizonten an tonreichere Bereiche (c/f_{10} -Verhältnisse von 5,5/4,5 bis 6/4) gebunden und oft mikrolaminiert. Erst ab dem dritten Horizont verteilen sie sich in der ganzen Grundmasse. Das spricht für eine Vermischung bzw. für ein Hochreißen von einzelnen Aggregaten in die oberen zwei Horizonte durch Baumwurf oder zoogene Bioturbation (vgl. Kapitel 5.6.1) – und gegen eine bloße Tieferlegung der Bt-Horizonte durch fortschreitende Genese. Farbe und Morphologie der Bruchstücke sind in allen Horizonten ähnlich. Die hohe Anzahl an meist reorientierten Bruchstücken und die starken Interferenzfarben deuten auf eine hohe Beanspruchung der Matrix durch Quellen und Schrumpfen (FITZPATRICK 1993) oder möglicherweise auch Gefrieren im Permafrost hin (HUIJZER 1993). Grob können zwei Phasen der Tonverlagerung unterschieden werden, wobei die dünnen und staubigen Toncutane in den ersten drei Horizonten bzw. Dünnschliffen eventuell jüngeren Datums sind.

In den oberen Horizonten fehlen die für einen Al-Horizont typischen Kappen aus Feinmaterial auf größeren Mineralen und Aggregaten (BULLOCK et al. 1974), wofür möglicherweise eine starke Bioturbation verantwortlich ist (hoher Anteil an Losung). Gegen einen Abtrag des Al-Horizontes spricht die geringe Hangneigung des Pedons.

Gerade der Dünnschliff des fünften Horizontes zeigt einige Parallelen zu den am Sentruper Berg gefundenen Schlufffüllungen, wie beispielsweise das Nebeneinander von stark unterschiedlichen Korngrößen. Allerdings fehlt in den meisten Fällen eine

Abgrenzung durch Toncutane. Auch ist die Sortierung der schluffigeren Bereiche längst nicht so stark ausgeprägt. Das lässt eher auf mechanische und biogene Vermischungsvorgänge von Lösungsrückstand mit Löss schließen.

5.6.10 Zusammenfassung Dünnschliffe

1) Tonverlagerung

Die Auswertung der Dünnschliffe ergibt, dass alle Böden, mit Ausnahme des Bodens Göttinger Wald a, Tonverlagerungsmerkmale bis in den tonreichsten Horizont hinein aufweisen. Sie nehmen in vielen Horizonten weit mehr als 1 % der Fläche des Schliffs ein, maximal 18,5 % im tonreichsten Horizont des Bodens Röhringsberg b. Oft können mehrere Tonverlagerungsphasen identifiziert werden. Anhand der Dünnschliffe kann jedoch nicht geklärt werden, ob der in die unteren Horizonte eingewaschene Ton ausschließlich aus den darüber liegenden Horizonten stammt oder teilweise horizont-intern verlagert worden ist (vgl. Punkte c und d in Kapitel 5.6.1). Auffällig ist, dass Toncutanbruchstücke und Verfüllungen weitaus häufiger auftreten als Toncutane an Poren und Aggregaten. Es stellt sich die Frage, ob die Fragmentierung der Toncutane allein durch holozäne Prozesse entstanden ist (vgl. Kapitel 5.6.1) oder ob bereits periglaziale Frost/Tau-Wechsel einen entscheidenden Einfluss hatten. Weitere durch Permafrost induzierte Merkmale wie z. B. makroskopisch sichtbare Merkmale wie Eiskeile oder ein plattiges Mikrogefüge (HUIJZER 1993, VAN VLIET-LANOË 1998) fehlen jedoch in den untersuchten Böden. HUIJZER (1993) beschreibt allerdings auch, dass durch Segregationseis erzeugte, auf mikroskopischer Ebene erkennbare Mikrostrukturen/Gefügeänderungen in tonreichen Böden schwächer ausgeprägt sind, da die Wasserleitfähigkeit eingeschränkt ist. Periglaziale Frost-/Tauwechsel und dadurch induzierte krypturbate Vermischungsvorgänge könnten neben bioturbaten Vorgängen auch ein Grund sein, warum Tonauswaschungsmerkmale, wie z. B. von Feinmaterial freigewaschene Körner an Poren (BULLOCK et al. 1974), fehlen.

2) Bioturbate Vermischung von Aggregaten

Weiterhin ist festzuhalten, dass bioturbat bedingte Vermischungsprozesse in Form ganzer Aggregate zwischen den Horizonten stattgefunden haben. Tonreiche Aggregate kommen teilweise schon in den Oberböden vor. Umgekehrt wurde auch Material aus den oberen Horizonten in die tonreichsten Horizonte eingebracht. Möglicherweise wurden dadurch Mikrostrukturen periglazialen Ursprungs wieder zerstört.

3) Beginn der Entstehung der tonreichsten Horizonte am Sentruper Berg

Die in den Böden am Sentruper Berg gefundenen Schlufffüllungen legen nahe, dass bereits vor der Lössanwehung tonreiche Böden vorhanden waren. An diesen Standorten setzte die Residualakkumulation demnach bereits weit vor dem Holozän ein.

5.7 Quantitative und qualitative Schichtungsnachweise

Die bisherigen Auswertungen zeigen, dass die Mineralbodenhorizonte zu unterschiedlichen Anteilen aus Residualton und Löss bestehen. In den folgenden Kapiteln 5.7 und 5.8 soll versucht werden, die Lage der Schichtwechsel zu lokalisieren und die Anteile der Ausgangssubstrate pro Pedon zu quantifizieren.

5.7.1 Profilbezogener Inhomogenitätsindex

Bevor die Lage des Schichtwechsels in den jeweiligen Peda analysiert wird, soll zunächst der Vergleich der Böden untereinander im Vordergrund stehen. Es wird eine Maßzahl vorgestellt, die es ermöglicht die Heterogenität der Böden zu quantifizieren und untereinander vergleichbar zu machen. Hierfür wird ein Ansatz nach ALAILY (1984) in leicht modifizierter Form verwendet.

Zunächst müssen geeignete Quotienten gefunden werden, deren Parameter zu möglichst unterschiedlichen Anteilen in den beiden Ausgangssubstraten vertreten sind. Geeignet sind Quotienten aus verwitterungs- und verlagerungsresistenten Elementen/Mineralen/Korngrößen oder aus zwei Parametern, die ähnlich stark durch Lessivierung verlagert werden. Die analytisch bedingte Varianz eines Parameters muss kleiner sein als die durch Schichtung erzeugte Varianz, sonst ist er zum Schichtungsnachweis ungeeignet. Je mehr Quotienten in die Berechnungen mit einbezogen werden, desto zuverlässiger ist das Ergebnis.

Zwei Quotienten zeigten in den vorangegangenen Kapiteln besonders deutliche Unterschiede im Tiefenverlauf der Böden: Grobschluff/Feinschluff (Kapitel 5.2.3) und Ton/Aluminium (Kapitel 5.5.3). Zusätzlich wird der Quotient Quarz/Grobschluff herangezogen. Sowohl Quarz als auch die Grobschlufffraktion sind relativ verwitterungsstabil und wenig verlagerungsfähig. Die einzelnen Parameterpaare werden nach Formel 9 horizontweise miteinander verrechnet:

$$Q = \frac{100 \times P_1}{(P_1 + P_2)} \quad (9)$$

- Q: Quotient
 P₁: Parameter 1, z. B. Grobschluffanteil in Prozent
 P₂: Parameter 2, z. B. Feinschluffanteil in Prozent

Der Quotient Q erzeugt eine Zahl zwischen 0 und 100. Dadurch werden die Quotienten untereinander besser vergleichbar. Die Berechnungen werden sowohl für die Mineralbodenhorizonte als auch für die Verwitterungshorizonte durchgeführt. Im nächsten Schritt werden pro Pedon und Quotient der Mittelwert (\bar{x}) und die Standardabweichungen (s) der betrachteten Horizonte gebildet. Die Standardabweichung wird dabei nach folgender Formel ermittelt:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \left[\sum f_i x_i^2 - \frac{(\sum f_i x_i)^2}{n} \right]} \quad (10)$$

- s: Standardabweichung
 x_i: der i-te der verschiedenen Messwerte
 f_i: die Häufigkeit des Messwertes x_i
 n=∑f_i: Stichprobenumfang

Aus dem Mittelwert und der Standardabweichung wird der Variationskoeffizient (VarK) nach Formel 11 berechnet:

$$\text{Variationskoeffizient} = \frac{s \times 100}{\bar{x}} \quad (11)$$

Die Bildung dieser drei Maßzahlen erfolgt aus den Mineralbodenhorizonten und dem Lösungsrückstand der Kalksteinfraktionen ≥ 2 mm des unmittelbar angrenzenden Verwitterungshorizontes. Die Berechnung beschränkt sich aus Gründen der Vergleichbarkeit auf diese Fraktion, da in einigen Böden das Feinmaterial < 2 mm nicht untersucht wurde. Zusätzlich werden in einem zweiten Rechengang die Maßzahlen nur für die Mineralbodenhorizonte bestimmt, um das Ausmaß der Schichtung innerhalb dieser Horizonte darzustellen. In Tabelle 21 ist die Vorgehensweise beispielhaft anhand des Bodens Sentruper Berg b dargestellt.

Tab. 21: Beispiel zur Berechnung des gemittelten Variationskoeffizienten – Boden Sentruper Berg b

Horizont	Tiefe [cm]	Q ₁	\bar{x}	s	VarK	Q ₂	\bar{x}	s	VarK	Q ₃	\bar{x}	s	VarK	MVarK
Ah	0-4	6	17	18	<u>106</u>	52	56	8	<u>14</u>	62	67	10	<u>15</u>	<u>45</u>
Al+Btv	4-30	5				52				59				
Sw-Btv	30-49	4				51				57				
IISd-Bvt-Tv	49-61	25				58				76				
Sd-Bt-Tv	61-70	45				69				79				
Stein ≥ 2 mm	70-90	79	92	83										

Q₁: 100×fU/(gU+fU)

Q₂: 100×Quarz/(Quarz+gU)

Q₃: 100×Ton/(Ton+Al₂O₃)

Die Variationskoeffizienten aller drei Quotienten werden gemittelt (MVarK). Mit diesem Wert liegt nun eine Kennzahl vor, die die Inhomogenität der Böden untereinander vergleichbar bzw. quantifizierbar macht. Tabelle 22 zeigt die gemittelten Variationskoeffizienten für die Mineralbodenhorizonte und für die Mineralbodenhorizonte inklusive des nichtcarbonatischen Rückstands der angrenzende Steinfraktion ≥ 2 mm.

Tab. 22: Gemittelte Variationskoeffizienten der untersuchten Böden als Maß der Inhomogenität

Standort	gemittelte Variationskoeffizienten	
	Mineralboden und angrenzender Kalkstein (nichtcarbonatischer Rückstand)	Mineralboden
Hardehausen	5	4
Röhringsberg a	19	6
Göttinger Wald a	28	6
Göttinger Wald b	30	1
Göttinger Wald c	30	9
Röhringsberg b	31	6
Holzkirch	32	5
Sentruper Berg a	45	27
Sentruper Berg b	51	45

In der ersten Spalte sind die Koeffizienten aufsteigend sortiert. Hardehausen zeigt den mit Abstand geringsten Wert für die Mineralbodenhorizonte einschließlich des Rückstandes des angrenzenden Kalksteins. Es folgt das flachgründige Peda Röhringsberg a. Die sich anschließenden fünf Peda besitzen Quotienten um 30. Mit deutlichem Abstand folgen die Böden am Sentruper Berg.

Um feststellen zu können, ob die Inhomogenität innerhalb des Mineralbodens oder erst im Übergang zum Stein auftritt, ist in der zweiten Spalte der mittlere Variationskoeffizient für die Mineralbodenhorizonte angegeben. An diesen Zahlen wird deutlich, dass die Böden am Sentruper Berg einen starken Schichtwechsel oberhalb des Steins aufweisen. Die Variationskoeffizienten aller anderen Böden bewegen sich im einstelligen Bereich. Besonders das Pedon Göttinger Wald b erweist sich innerhalb des Mineralbodens als relativ homogen. Mit dieser Auswertungsmethode allein kann jedoch nicht unterschieden werden, ob die Homogenität auf eine gleichmäßige Vermischung zweier Ausgangssubstrate oder Einschichtigkeit zurückzuführen ist.

Der Vergleich zwischen den beiden Spalten der Tabelle 22 zeigt, dass die mittleren Variationskoeffizienten deutlich durch die Hinzunahme des nichtcarbonatischen Rückstands der Steinfraktion erhöht werden. Dieser ausgeprägte Schichtwechsel kann mehrere Gründe haben:

1. Der aus dem Kalkstein gewonnene Lösungsrückstand ist frei von jeglicher Lössbeimengung, während eine mehr oder weniger starke Lössbeimengung für die Mineralbodenhorizonte als sehr wahrscheinlich angenommen werden kann.
2. Der verwitterte Lösungsrückstand unterscheidet sich durch Schichtungen/Diskontinuität des Kalksteins (vertikale Inhomogenität) oder Verlagerungsvorgänge wie Hangfließen/Hangrutschen von dem im Labor gewonnenen Lösungsrückstand der anstehenden Kalksteine.
3. Der Lösungsrückstand bzw. die einzelnen Kornfraktionen unterlagen im Gelände einer intensiven Verwitterung. Das hat die Korngrößen wahrscheinlich

zu Gunsten der feineren Kornfraktionen verändert und beeinflusst dadurch auch Quotienten aus verschiedenen Kornfraktionen.

4. Methodisch bedingte Unterschiede durch die Gewinnung des Lösungsrückstands unter Laborbedingungen sind ebenfalls zu berücksichtigen. Die Carbonaterstörung der Kalksteinfraktion mit Natriumacetat hat möglicherweise einzelne Elemente/Minerale stärker oder auch weniger stark in Lösung gebracht, als dies unter realen Bedingungen der Fall ist.

Punkt 1 wird im Verlauf der folgenden Kapitel eingehend behandelt werden. Welchen Anteil die einzelnen Punkte jeweils am Schichtwechsel haben, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig geklärt werden. Dazu wären weitere Untersuchungen z. B. zur Verwitterungsbeständigkeit der verschiedenen Kornfraktionen notwendig.

5.7.2 Horizontbezogener Inhomogenitätsindex

Mit Hilfe des horizontbezogenen Inhomogenitätsindex kann das Ausmaß der Schichtung zwischen den Horizonten eines Bodens abgeschätzt werden. Es werden die bereits in Kapitel 5.7.1 erwähnten Parameterpaare Grobschluff/Feinschluff, Quarz/Grobschluff und Ton/Aluminium verwendet.

Zur quantitativen Ermittlung der Inhomogenität werden im ersten Schritt die Quotienten zweier angrenzender Horizonte dividiert, wobei die höhere Zahl immer in den Zähler genommen wird. Auf diese Weise ergibt sich eine Zahl größer eins. Diese Vorgehensweise wird für alle drei Quotienten durchgeführt. Der eigentliche Inhomogenitätsindex zwischen zwei Horizonten berechnet sich nach Formel 12 (STAHR & SAUER 2004):

$$I = \frac{Q_U + Q_Q + Q_T}{3} \quad (12)$$

- I: Inhomogenitätsindex
 Q_U: Grobschluff/Feinschluff
 Q_Q: Quarz/Grobschluff
 Q_T: Ton/Aluminium

Tabelle 23 zeigt die Berechnung beispielhaft für 2 Horizonte.

Tab. 23: Ermittlung des Inhomogenitätsindex I am Beispiel zweier Horizonte des Pedons Göttinger Wald c

Tiefe [cm]	Hor.- bez.	gU/fU	Q _U	Quarz/gU	Q _Q	Ton/Al ₂ O ₃	Q _T	I	Klasse
23-30	Bvt	4,86	1,47	1,38	1,18	2,26	1,18	1,28	IV
30-40	Bvt-Tv	7,14		1,17		2,67			

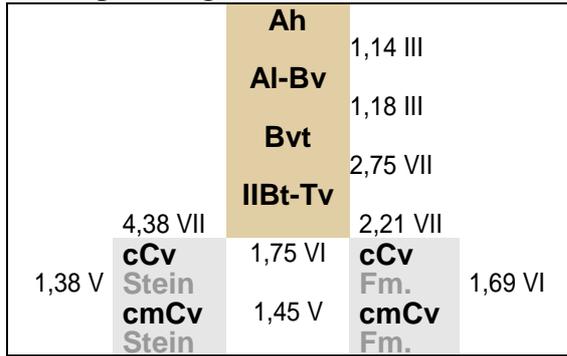
Die Klassifizierung des Inhomogenitätsindex erfolgt nach Tabelle 24.

Tab. 24: Bewertungsskala zum Ausmaß der Schichtung/Inhomogenität (STAHR & SAUER 2004)

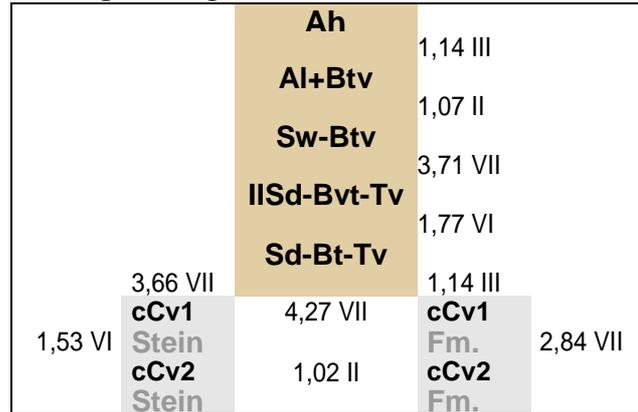
Inhomogenitätsindex I	Klasse	Bewertung
1,00	I	Inhomogenität nicht nachgewiesen
1,01–1,09	II	Inhomogenität nicht erkennbar (im Fehlerbereich der Analysenmethode)
1,10–1,19	III	Inhomogenität/Schichtung unterschiedlichen Ausmaßes vorhanden
1,20–1,34	IV	
1,35–1,49	V	
1,50–1,99	VI	hohe Inhomogenität (oberhalb jeder Fehlergrenze)
> 2,00	VII	vollständiger Substratwechsel

In Kapitel 5.9 sind die Werte aller drei Quotienten aufgeführt. Abbildung 31 zeigt die errechneten Inhomogenitätsindizes aller untersuchten Böden.

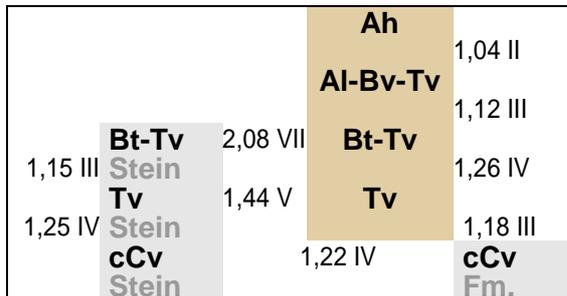
Sentruper Berg a



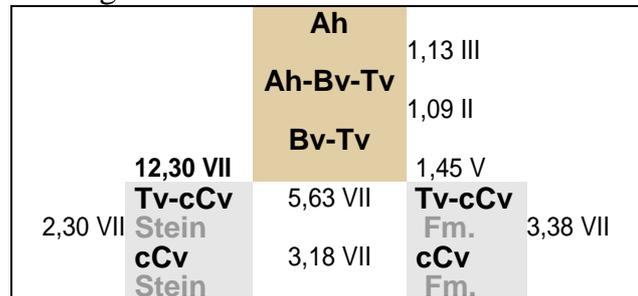
Sentruper Berg b



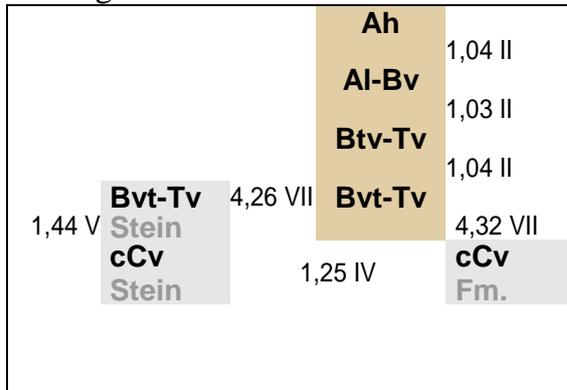
Hardehausen



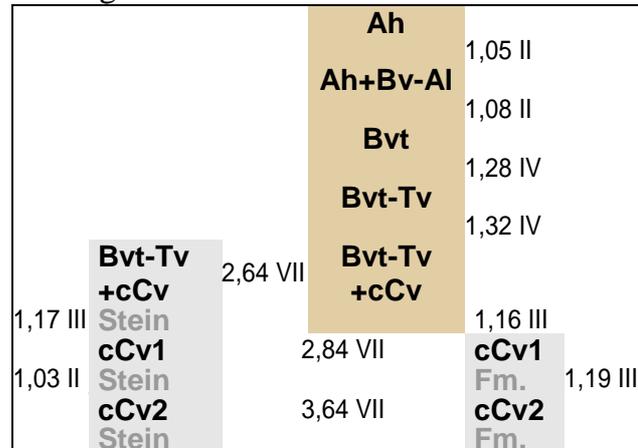
Göttinger Wald a



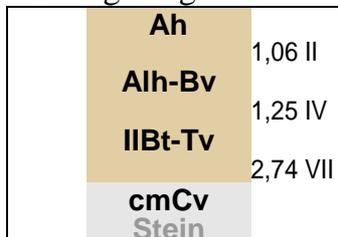
Göttinger Wald b



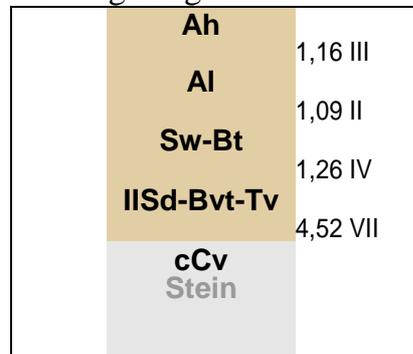
Göttinger Wald c



Röhringsberg a



Röhringsberg b



Holzkirch

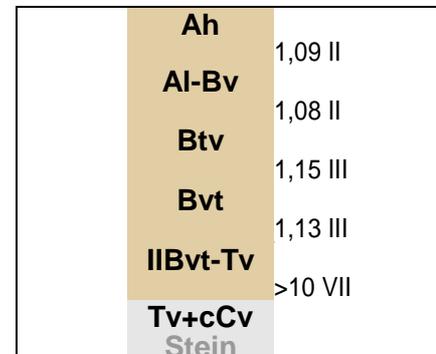


Abb. 31: Inhomogenitätsindizes aller untersuchten Böden für den kalkfrei analysierten Feinboden der Mineralbodenhorizonte (dunkel hinterlegt), den carbonathaltigen Verwitterungsschutt < 2 mm (Feinmaterial, kurz „Fm.“) und den Kalkstein ≥ 2 mm (Stein) (jeweils grau, ebenfalls kalkfrei analysiert)

Der Inhomogenitätsindex zwischen zwei Mineralbodenhorizonten ist jeweils rechts zwischen zwei Horizontbezeichnungen aufgeführt. Ebenso rechts aufgeführt sind die Indizes zwischen Feinmaterial (< 2 mm) und unterstem Mineralbodenhorizont und auch die Indizes innerhalb des Feinmaterials zweier Horizonte, sofern beprobt. Links neben der Horizontbezeichnung stehen die Indizes zwischen dem Kalkstein (≥ 2 mm) und dem Mineralboden wie auch die Indizes zwischen den Kalksteinen zweier Horizonte. Die Inhomogenitätsindizes zwischen Feinmaterial (< 2 mm) und Kalkstein (≥ 2 mm) sind mittig unterhalb der Mineralbodenhorizonte dargestellt.

Mineralbodenhorizonte

Die Böden Göttinger Wald a und b und Holzkirch zeigen innerhalb der Mineralbodenhorizonte eine relativ hohe Homogenität. Die Indizes erreichen maximal die Klasse III. Das deutet entweder auf eine starke Durchmischung der Ausgangssubstrate hin oder auf Einschichtigkeit. In den Böden Sentruper Berg a und b ist ein vollständiger Schichtwechsel (Klasse VII) zwischen dem 3. und 4. Mineralbodenhorizont vorhanden. In allen anderen Böden erreicht der Inhomogenitätsindex maximal die Klasse IV zwischen dem tonreichsten Horizont und dem darüber liegenden Horizont. Das weist bei letztgenannten auf mittelstarke Vermischungsvorgänge zwischen den beiden Ausgangssubstraten hin.

Ungewöhnlich sind die Schichtwechsel zwischen dem zweiten und dritten bzw. dritten und vierten Horizont des Bodens Hardehausen. Die hohen Tongehalte und der geringe profilbezogene Inhomogenitätsindex deuten auf einen geringen Lösseinfluss hin. Der Löss konzentriert sich vermutlich in den ersten drei Horizonten, die insgesamt nur eine Mächtigkeit von 3 dm erreichen. Eine zusätzliche vertikale Inhomogenität des Residuums muss ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Kalksteinfraktionen

Interessant ist die Betrachtung der durch Carbonatzerstörung gewonnenen Lösungsrückstände der Kalksteinfraktionen kleiner und größer 2 mm. Die Steinfraktionen ≥ 2 mm zeigen eine starke Inhomogenität zu den tonreichsten Horizonten, die Quotienten liegen weit über 2. Lediglich Hardehausen weist mit einem Index von 1,44 eine mögliche Ähnlichkeit zwischen Stein und Tv-Horizont auf. Die Unterschiede können durch mehrere Faktoren bedingt sein und sind ausführlich bereits in Kapitel 5.7.1 (Punkte 1 bis 4) aufgelistet worden.

Auch innerhalb des Gesteinsverbandes einiger Böden liegen Inhomogenitäten vor. Insbesondere die Böden Göttinger Wald a und Sentruper Berg b zeigen starke Abweichungen innerhalb der Kalksteinfraktionen (≥ 2 mm) verschiedener Horizonte. Die Ursache ist wahrscheinlich eine Gesteinsdiskontinuität.

Weiterhin zeigt das Feinmaterial < 2 mm fast immer eine größere Übereinstimmung mit dem angrenzenden tonreichsten Mineralbodenhorizont als mit der Steinfraktion ≥ 2 mm. Dies deutet darauf hin, dass der verwitterte Lösungsrückstand vorwiegend aus

dieser Fraktion hervorgeht. Warum aber weichen der Kalkstein ≥ 2 mm und das Feinmaterial eines Horizontes voneinander ab? Bereits in Kapitel 5.4.1 wurde vermutet, dass sich das Feinmaterial < 2 mm größtenteils aus mergeligen Zwischenlagen eines Kalksteinverbandes zusammensetzt und möglicherweise auch in der chemischen Zusammensetzung vom massiven Kalkstein abweicht. Zudem zeigt die Korngrößenanalyse (Kapitel 5.2.3), dass Löss bis in das Feinmaterial einiger Böden eingemischt ist.

5.7.3 Homogenisierungsprozesse und deren Ursachen

Die in den vorhergehenden Kapiteln berechneten horizontbezogenen Inhomogenitätsindizes haben Folgendes ergeben: Alle untersuchten Böden bestehen zu unterschiedlichen Anteilen aus zwei Ausgangssubstraten. Dennoch fehlt in einigen Böden ein deutlicher Schichtwechsel innerhalb des Mineralbodens. Vielmehr lassen sich häufig fließende Übergänge beobachten. In der Literatur werden verschiedene vermischend wirkende periglaziäre und holozäne Prozesse beschrieben. Sie werden im Folgenden kurz umrissen und diskutiert.

A) periglaziär bedingte Substratveränderung:

ALTERMANN et al. (2008) geben einen detaillierten Überblick über die Prozesse im periglaziären Milieu und deren Auswirkungen auf die Profilgliederung. Es werden dabei vier Prozesse unterschieden:

- Kryoklastik: mechanische Gesteinszerkleinerung bis hin zur Grobtonfraktion durch Frostwechsel (Details siehe Kapitel 5.8.1)
- Kryotranslokation: äolische und fluviatile Akkumulation von lokalen und fernen Materialien, sowie Solifluktion/Gelifluktion und Abspülungsprozesse
- Kryoperstruktion: solimixtive Prozesse in der Auftauzone. Darunter fallen Kryoturbation, das Heben (Frosthub) oder Absinken von Steinen im wasser gesättigten Bereich (erzeugt Steinanreicherungen in 2 bis 6 dm unter Geländeoberfläche) und die Kryohomogenisierung. Bei letzterer ist im Boden eine wasserstauende Schicht vorhanden, wodurch die Bodenteilchen durch Hydratation Auftrieb erhalten und sich leichter vermischen (SCHENK 1955).
- Kryopedogenese: Carbonatdynamik, Ton- und Feinschluffmigration, Aggregation, Akkumulation organischer Substanz, kryogene Verbraunung, Podsolierung und Hydromorphierung

Der im gängigen Lagenkonzept (vgl. AG BODEN 2005) eher unbeachtete Prozess der Kryoperstruktion könnte eine Ursache für die intensive Durchmischung von Löss und Lösungsrückstand sein. Darauf deuten auch die c/f_{10} -Verhältnisse der Dünnschliffe hin (vgl. Kapitel 5.6). Hätte sich der Löss nicht mit dem Lösungsrückstand vermenget oder wäre die Vermischung ausschließlich in Form ganzer Aggregate erfolgt, müsste das c/f_{10} -Verhältnis im Oberboden dem von verwittertem Löss entsprechen. Ausgehend

von den Korngrößen der in Kapitel 5.8 verwendeten Referenzlössböden (Tab. 28) können rechnerisch c/f_{10} -Verhältnisse abgeschätzt werden, indem die Ton- und Feinschlufffraktionen zu der Fraktion „fine“ ($< 10 \mu\text{m}$) addiert werden (Tab. 25).

Tab. 25: Berechnete c/f_{10} -Verhältnisse der Referenzlöss (Tab. 28) und an den Dünnschliffen der Oberböden geschätzte c/f_{10} -Verhältnisse

c/f_{10} -Verhältnisse	berechnet	an den Dünnschliffen geschätzt
Sentruper Berg	8,5/1,5	SBa: 7,5/2,5 SBb: 8/2 (50 % 7,5/2,5)
Hardehausen	8/2	HARD: 2,5/7,5
Göttinger Wald und Röhringsberg	7,5/2,5	GOWa: 4,5/5,5 GOWb: 5/5 GOWc: 6/4 (7 % 2,5/7,5) RBa: 4/6 (1 % 1,5/8,5) RBb: 7/3 (3 % 3/7)
Holzkirch	6,5/3,5	HOLZ: 7/3 (3 % 5,5/4,5)

Es zeigt sich, dass besonders die eher flachgründigen Böden GOWa, GOWb, RBa und Hardehausen ein deutlich niedrigeres Verhältnis im Oberboden aufweisen, so dass auf eine Homogenisierung auf der Ebene einzelner Bodenteilchen geschlossen werden kann. Je höher der Lössanteil, desto stärker ist das oberflächennahe Substrat von den Eigenschaften des liegenden Gesteins entkoppelt. Sowohl die als Referenz dienenden c/f_{10} -Verhältnisse, als auch die der Dünnschliffe sind nur als Näherungen zu verstehen. Dünnschliffe geben nur einen kleinen Ausschnitt des Bodens wieder.

Neben den periglaziären Überformungsprozessen kommt es auch im Holozän zu Substratveränderungen.

B) Holozäne Substratveränderung:

- Bioturbation: Unterschieden wird zwischen zoogener (Ameisen, Regenwürmer usw.) und phytogener Bioturbation (z. B. durch Baumwürfe). Insbesondere Letzteres kann ein ausgeprägtes Mikrorelief formen (SCHAETZEL et al. 1989) und zur Entstehung teils mehrgliedriger Steinlagen führen (RUSSOW & HEINRICH 2001). ROESCHMANN (1968) geht darüber hinaus darauf ein, wie durch Baumwürfe Bt-Material hochgerissen werden kann. Laut RUSSOW & HEINRICH (2001) ist Bioturbation nicht die Ursache für die Entstehung periglaziärer Lagen, kann diese aber stark überprägen. Des Weiteren beschreibt VAN VLIET-LANOË (1998), dass das Getrampeln von Säugetieren, wie Mammuts oder Elchen, sich auf den Boden ähnlich auswirkt wie Kryoturbation und leicht mit dieser verwechselt werden kann.
- Hangkriechen (Massenversatz am Hang)
- Quellung/Schrumpfung (wirkt nur kleinräumig)

- Erosionsprozesse

Insbesondere die Tätigkeiten grabender Bodentiere und Baumwürfe können zur Vermischung ganzer Aggregate führen und können die geringfügigen Anteile an tonreicheren Aggregaten in den Oberböden erklären (vgl. Tab. 25 und Kapitel 5.6).

5.8 Massenbilanzierung

5.8.1 Einflussgrößen

Die Massenbilanzierung dient der quantitativen Erfassung der Anteile der Ausgangssubstrate an der Bodenbildung und wird in den beiden folgenden Kapiteln mit Körnungsparametern durchgeführt. Das setzt Kenntnisse über die Zusammensetzung der Ausgangssubstrate voraus. Diese sind für den Kalkstein untersucht, für Löss werden Literaturwerte herangezogen. Insbesondere zwei Prozesse erschweren jedoch die korrekte Erfassung der Anteile, da sie u.a. zu einer Tonneubildung führen. Sie werden im Folgenden näher betrachtet:

- a) kryoklastische Korngrößen-Verkleinerung
- b) Transformation von Schluff-Glimmern und -Chloriten zu Tonmineralen (Tonmineralbildung)

Wichtige Merkmale und Eigenschaften dieser Prozesse sind in Tabelle 26 zusammengefasst.

Tab. 26: kryoklastische Korngrößen-Verkleinerung und Tonmineralbildung am Beispiel von Lössböden – Merkmale und Eigenschaften (zusammengestellt aus ROHDENBURG & MEYER 1966, SCHEFFER et al. 1966)

a) kryoklastische Korngrößen-Verkleinerung	b) Tonmineralbildung ²
<ul style="list-style-type: none"> ▪ mechanischer Zerfall durch Frost-Tau-Wechsel ▪ Beginn: vermutlich im Spätglazial, begünstigt die Tonmineralbildung ▪ erfasst Tiefen von bis zu 80–120 cm ▪ Zerkleinerung von Sand und Grobschluffpartikel bis hin zur Grobtonfraktion ▪ Verwitterungsanfälligkeit ist gesteinspezifisch: Quarz < Alkalifeldspäte (K-Feldspäte) < Albit-Oligoklas < Glimmerarten; betrifft aber alle Gesteinsarten ▪ das Quarz/Feldspatverhältnis kann als Maß für die kryoklastische Beanspruchung dienen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Voraussetzung: in A-Horizonten unabhängig vom Carbonatgehalt, in B-Horizonten vorhergehende Entkalkung notwendig ▪ bei pH < 4 unterbindet freigesetztes Aluminium die weitere Tonbildung (wirkt koagulierend) ▪ Ursache: zu 90 % der Umbau/Zerfall von Glimmern (Sand- und Schluffgröße) zu Dreischicht-Tonmineralen in Tongröße (überwiegend Feinton) ▪ Biotit verwittert direkt zu Tongröße, Muskovit und Chlorit zerfallen stufenweise in kleinere Fraktionen

In welchem Ausmaß insbesondere Lössböden durch die beiden Prozesse verändert werden können, zeigen zwei umfangreiche Untersuchungen an norddeutschen Lössen. ROHDENBURG & MEYER (1966) analysierten 14 nachpaudorfzeitliche Jungweichsel-

² ROHDENBURG & MEYER (1966) verwendeten hierfür den in diesem Zusammenhang nicht mehr gebräuchlichen Begriff "Lösungsverwitterung"

Lösse aus dem Leinegebiet, die durchschnittliche Korngrößenverteilung ist in Tabelle 27, Zeile 1 aufgeführt:

Tab. 27: Korngrößenverteilung (% , nichtcarbonatischer Anteil) 14 unverwitterter Jungweichsel-Lösse aus dem Leinegebiet (1) und die Korngrößenverteilung nach der Veränderung durch Tonmineralbildung (2) (verändert nach ROHDENBURG & MEYER 1966)

	> 63 µm	63-20 µm	20-2 µm	< 2 µm
1 Gehalte carbonatfreier C-Lösse aus dem Leinegebiet (Mittelwerte)	4	70	12	14
2 Veränderte Gehalte durch Glimmerverlust (Tonmineralbildung)	4	64	9	23

In maximal entwickelten Parabraunerden des Holozäns (Frellstedt, Einbeck) wurden in den A-Horizonten bis zu 75 % des Glimmers in Schluffgröße abgebaut, in B-Horizonten 50 % (ROHDENBURG & MEYER 1966). Dadurch würde der Grobschluffgehalt des Durchschnitts-C-Lösses im Höchstfall auf 64 % gesenkt und der Tongehalt auf 23 % ansteigen (Tab. 27, Zeile 2).

Aus Untersuchungen von SCHEFFER et al. (1966) an nicht vollständig entkalkten Jungweichsel-Lössen Südniedersachsens und Nordhessens ging hervor, dass durch Kryoklastik der Grobschluffanteil um über 30 Prozentpunkte (ca. 39 %) zugunsten der feineren Fraktionen vermindert wurde. Grob- und Mittelschluff wurden zusammen um 15 Prozentpunkte (ca. 17 %) erniedrigt. Der Tongehalt stieg von 13 % auf bis zu 25 %.

Fraglich bleibt, ob diese Korngrößenänderungen auf die hier untersuchten Böden übertragbar sind. Die meisten Böden befinden sich in leichten Hanglagen, so dass der Verwitterungstechnisch stark beanspruchte Oberboden einem stetigen, geringen Abtrag unterliegt bzw. unterlag. Zudem unterscheiden sich die physikalischen Eigenschaften auf Grund der Vermischung mit Residualton (geringere Wasserleitfähigkeit, dadurch evtl. langsamere Entcarbonatisierung). Daher ist anzunehmen, dass der Grobschluff in den untersuchten Böden weniger stark verwittert ist.

Neben der Tonneubildung und dem daraus resultierenden Abbau größerer Fraktionen im Verlauf der Verwitterung erschwert die Lessivierung eine Massenbilanzierung. Da durch diesen Prozess die Tonmenge im gesamten Boden erhalten bleibt, ist Lessivierung nur bei Betrachtung einzelner Horizonte zu beachten. Ebenfalls in heterogenen Böden schwer zu quantifizieren ist der Prozess des Tonabbaus, der mit zunehmendem Alter und Versauerungsgrad an Bedeutung gewinnt (BLUME 1964, VEERHOFF 1992).

Die Qualität der Ergebnisse der Massenbilanzierung wird auch stark von der Wahl der Vergleichslössböden beeinflusst. Löss weist in der Regel feinschichtige Wechsel in Korngröße und Mineralzusammensetzung auf, der auf wechselnde Anteile von Fern- und Lokallöss beruht (MEYER et al. 1962). Daher muss auch bei geringen Entfernungen zum Untersuchungsstandort mit Unterschieden in der Zusammensetzung

gerechnet werden. Ähnliches gilt für den Kalkstein. Der bereits zu Lösungsrückstand verwitterte Kalkstein könnte eine andere Zusammensetzung besessen haben als der heute anstehende Stein.

5.8.2 Tonmassenanalyse

5.8.2.1 Berechnung der maximalen Tonmasse aus Löss

Eine Möglichkeit für einen qualitativen Schichtungsnachweis ist der Vergleich von aktuell vorhandenen mit potentiell möglichen Tonmassen. Wird angenommen, dass alle Mineralbodenhorizonte oberhalb des Kalksteinverwitterungsschutts rein lössbürtig sind, kann – bei Kenntnis der Textur des Lösses – die potentielle Tonmasse berechnet werden. Geht die aktuelle Tonmasse des Pedons über diesen Wert hinaus, stammen sie aus dem Residualton. Voraussetzung dafür ist, dass kein drittes Ausgangssubstrat vorliegt.

Zur Berechnung der aktuellen Tonmasse (T_{ak}) eines Horizontes wird zunächst die Masse des Feinbodens ($< 2 \text{ mm}$, M_{Bod}) benötigt. Sie ergibt sich aus der Horizontmächtigkeit, der Dichte (d_B) und dem Anteil des Grobbodens an der Gesamtmasse in Volumenprozent (Anhang VIIa):

$$M_{Bod} [\text{kg} \times \text{m}^{-2}] = \text{Horizontm} [\text{cm}] \times d_B [\text{g} \times \text{cm}^{-3}] \times 10 \times \frac{(100 - \text{Grobboden} [\text{Vol.}\%])}{100} \quad (13)$$

Die aktuelle Tonmasse (T_{ak}) eines Horizontes berechnet sich aus der Masse des Feinbodens multipliziert mit dem Tongehalt in Prozent:

$$T_{ak} [\text{kg} \times \text{m}^{-2}] = \frac{M_{Bod} [\text{kg} \times \text{m}^{-2}] \times \text{Tongehalt} [\%]}{100} \quad (14)$$

Die Tonmassen der einzelnen Horizonte werden für den Bereich des Mineralbodens aufsummiert.

Um die potentielle Tonmasse (T_{potL}) nach Formel 13 und 14 berechnen zu können, wird der Tongehalt unbeeinflussten Lösses in der unmittelbaren Umgebung der Peda benötigt. Allerdings ist die Lössauflage an den Untersuchungsstandorten in der Regel nicht mächtig genug, um frei von lokalen Gesteinsbeimengungen zu sein. Es werden daher geeignete Korngrößenanalysen von Lössen im Umkreis von maximal 20 km vom jeweiligen Boden herangezogen, von denen angenommen werden kann, dass sie den ursprünglichen Tongehalt annähernd wiedergeben (Tab. 28). Es handelt sich um Literaturangaben oder eigene Untersuchungen.

Tab. 28: Vergleichsböden aus Löss nahe der Untersuchungsstandorte (verwendete Werte sind fettgedruckt)

Standort	Vergleichsböden												
	Tiefe [cm]	Horizont	Dichte [g/cm ³]	T [%]	fU [%]	mU [%]	gU [%]	∑U [%]	fS [%]	mS [%]	gS [%]	∑S [%]	gU/fU
Sentruper Berg	25-41	Bv-Al	1,05	8	3	14	73	89	-	-	-	3	25
	41-53	Bvt	1,35	16	2	12	68	82	-	-	-	2	32
	25-53	gew. Mittel*		12	3	13	70	86	-	-	-	3	28
	97-167	Cv	1,53	9	1	13	72	86	-	-	-	4	56
	Parabraunerde-Braunerde, Dörenberg/Georgsmarienhütte, R:3434380, H: 5784778, eigene Untersuchung, Entfernung zum Untersuchungsstandort: 5,9 km												
Harde- hausen	k.a.	Bv		16	5	17	45	67	10	7	0	17	9
	tiefgründiges Profil aus Lössfließerde mit fossilen pseudovergleyten Al- und Bt-Horizont über Verwitterungsmaterial des Mittleren Buntsandstein, Hardehausener Wald (ZEZSCHWITZ 1988), Entfernung zum Untersuchungsstandort: ca. 5 km												
Göttinger Wald	0-40	Alp	1,41	16	6	18	58	81	2,6	0,7	0,1	3	10
	40-55	Al	1,41	16	6	20	55	81	2,4	0,5	0,1	3	9
	55-75	Al-Bt	1,44	22	5	19	50	75	3,0	0,4	0,0	3	10
	75-120	Bt	1,58	23	5	19	49	73	3,6	0,3	0,0	4	9
	0-120	gew. Mittel*		20	5	19	53	77	3,1	0,5	0,0	4	10
	218-250	C		16	9	10	62	80	2,8	0,5	0,5	4	7
	Parabraunerde mit Schwarzerde-Vergangenheit, Hottenrode (Leinetalgraben) (GÄTH 1987), Entfernung zum Untersuchungsstandort: ca. 20 km												
Holzkirch	0-8	Ah	1,30	23	12	31	31	74	1,0	0,5	0,9	2	3
	8-38	Al	1,40	20	13	33	31	77	1,6	0,8	1,3	4	2
	38-51	Al-Bt	1,45	28	11	28	30	69	0,9	0,6	0,9	2	3
	0-51	gew. Mittel*		22	12	31	31	74	1,4	0,7	1,1	3	2
	Parabraunerde aus Löss bei Blaubeuren (EITELMANN 2009), Entfernung zum Untersuchungsstandort: ca. 16 km (Lagerungsdichte wurde geschätzt)												
Röhrings- berg	siehe Göttinger Wald, Entfernung zum Untersuchungsstandort: ca. 10 km												

*gewichtet nach Horizontdichte und -tiefe

Für die weiteren Berechnungen werden die Tongehalte der Bv-Horizonte der Vergleichsböden eingesetzt. Weisen die Vergleichsböden eine Lessivierung auf, wird die dadurch entstandene Tongehaltsänderung rechnerisch wieder eliminiert. Dazu wird die Tonmasse der Al- und Bt-Horizonte nach Formel 13 und 14 ermittelt, aufsummiert und deren prozentualer Anteil an der Gesamtmasse gebildet. Der Löss aus C-Horizonten ist für den Vergleich von aktuellen und potentiellen Tonmassen ungeeignet, da sich durch Tonmineralbildung und kryoklastische Korngrößenverkleinerung die Tongehalte im Laufe der Bodengenese weiter erhöht haben (vgl. Kapitel 5.8.1). Die lössbürtige potentielle Tonmasse würde mit Tongehalten aus Vergleichs-C-Löss unterschätzt werden.

Zusätzlich zu den Vergleichsböden aus Tabelle 28 wird mit minimalen und maximalen Tongehalten von 10 % und 35 % gerechnet. Diese Werte decken die Tongehaltsspanne deutscher Lösses weitestgehend ab (vgl. BLUME 1992 und WIECHMANN 2000). Laut

BLUME (1992) bewegt sich der Tongehalt von Lössen zwischen 8 und 34 %. In einer Zusammenstellung deutscher Lössen von WIECHMANN (2000) werden Tongehalte zwischen 6 und 30 % erreicht.

In Tabelle 29 sind sowohl die nach Formel 14 berechneten aktuellen, als auch die potentiellen Tonmassen aufgeführt.

Tab. 29: Aktuelle Tonmassen (T_{ak}) in den untersuchten Peda und potentielle Tonmassen (T_{potL}) bei Annahme einer reinen Lössauflage oberhalb des carbonathaltigen Verwitterungsschuttes (für die Tongehalte im Löss werden 10 % Ton, 35 % Ton und standortspezifische Tongehalte (siehe Tab. 28) angenommen)

Boden	aktuelle Tonmenge	potentielle Tonmassen					
	Masse T_{ak} [kg/m ²]	T_{potL} bei standortspez. Tongehalten [kg/m ²]	Anteil T_{potL} an T_{ak} [%]	T_{potL} bei 10 % Ton [kg/m ²]	Anteil T_{potL} an T_{ak} [%]	T_{potL} bei 35 % Ton [kg/m ²]	Anteil T_{potL} an T_{ak} [%]
SBa	251	75	30	62	25	219	87
SBb	283	118	42	98	35	343	121
HARD	216	51	24	32	15	112	52
GOW a	141	49	35	24	17	85	61
GOW b	203	76	38	38	19	133	66
GOW c	212	108	51	54	25	189	89
Rba	220	78	35	39	18	136	62
RBb	372	176	47	88	24	308	83
HOLZ	367	206	56	94	26	328	89
Mittelwert	252	104	41	59	23	206	82
Min	141	49	24	24	15	85	52
Max	372	206	56	98	35	343	121

Aktuell enthalten die Böden im Mittel 252 kg Ton pro Quadratmeter und Profiltiefe. Unter der Annahme, dass die Mineralbodenhorizonte oberhalb des Kalksteinverwitterungsschutts rein lössbürtig sind, ergeben sich bei standortspezifischen Tongehalten des Lösses durchschnittlich 104 kg Ton pro Quadratmeter. Das sind nur 41 % des aktuellen Tongehaltes. Das deutet auf einen hohen Anteil an Residualton in den Böden hin. Im Pedon Hardehausen stammt maximal 24 % des Tons vom Löss. Wie sich schon in den vorangegangenen Kapiteln andeutete, ist dieser Boden nur geringfügig durch Lössbeimengungen beeinflusst. Die tiefgründigen Profile wie Göttinger Wald c, Holzkirch und Röhringsberg b zeichnen sich durch einen hohen potentiell lössbürtigen Tonanteil zwischen 47 und 56 % aus.

Wird mit 35 % Ton im Löss gerechnet, erreicht bzw. überschreitet lediglich der Boden Sentruper Berg b die tatsächliche Tonmenge um 21 Prozentpunkte. Unter dieser Annahme würde im Durchschnitt aller Böden 82 % des Tones aus dem Löss stammen, der Rest aus dem Lösungsrückstand der Kalksteine. Für die meisten Standorte dürften 35 % Ton im Löss zu hoch angesetzt sein, dadurch lässt sich jedoch veranschaulichen, dass fast alle Böden eine ausgeprägte Residualtonkomponente aufweisen.

5.8.2.2 Berechnung des Lössanteils mittels Tonmassenanalyse

Den Berechnungen in Kapitel 5.8.2.1 wird eine rein lössbürtige Substratgenese zugrunde gelegt. Die potentiellen Tonmassen (T_{potL}) bei standortspezifischen Tongehalten stellen somit immer Maximalwerte für die Lösskomponente dar. Über ein vom Autor ausgearbeitetes iteratives Verfahren kann aus den potentiellen lössbürtigen Tonmassen der tatsächliche Lössanteil am Mineralboden annäherungsweise berechnet werden. Das Annäherungsverfahren beruht auf der schrittweisen/iterativen Anpassung der Lössmasse ($M_{\text{Löss}}$), aus der der lössbürtige Ton berechnet wird.

Am Beginn der 1. Iteration (Formeln 15 bis 18) steht folgende Überlegung: Die potentielle lössbürtige Tonmasse (T_{potL}) bei standortspezifischen Tongehalten wird nach Formel 13 und 14 unter der Annahme berechnet, dass sich der gesamte Mineralboden aus Löss aufbaut. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Masse an Löss der Masse an Mineralboden entspricht. Tatsächlich enthalten die Böden aber zusätzlich Residualton, d.h. die aktuelle Tonmasse abzüglich der potentiellen lössbürtigen Tonmasse ist nicht gleich Null, sondern stellt die minimal mögliche residuale Tonmasse (T_{res}) dar (Formel 15). Dessen Masse wird mit Formel 16 berechnet und von der Masse an Mineralboden in Abzug gebracht (Formel 17). Daraus ergibt sich die Masse an Löss im Mineralboden, aus der wiederum die neue potentielle lössbürtige Tonmasse (T_{potLneu}) berechnet werden kann (Formel 18).

$$1. \text{ Iteration: } T_{\text{res}} = T_{\text{ak}} - T_{\text{potL}} \quad (15)$$

$$\Rightarrow M_{\text{Lsg}} = \frac{T_{\text{res}} \times 100}{\%T_{\text{Res}}} \quad (16)$$

$$\Rightarrow M_{\text{Löss}} = M_{\text{Bod}} - M_{\text{Lsg}} \quad (17)$$

$$\Rightarrow T_{\text{potLneu}} = \frac{M_{\text{Löss}} \times \%T_{\text{Löss}}}{100} \quad (18)$$

$$2. \text{ Iteration: } T_{\text{res}} = T_{\text{ak}} - T_{\text{potL}} \quad (15)$$

$$\Rightarrow M_{\text{Lsg}} = \frac{T_{\text{res}} \times 100}{\%T_{\text{Res}}} \quad (16)$$

$$\Rightarrow M_{\text{Löss}} = M_{\text{Bod}} - M_{\text{Lsg}} \quad (17)$$

$$\Rightarrow T_{\text{potLneu}} = \frac{M_{\text{Löss}} \times \%T_{\text{Löss}}}{100} \quad (18)$$

3. Iteration:usw.

T_{res} :	residuale Tonmasse im Mineralboden [kg/m ²]
T_{ak} :	aktuelle Tonmasse im Mineralboden [kg/m ²]
T_{potL} :	potentielle lössbürtige Tonmasse im Mineralboden [kg/m ²] bei Annahme einer reinen Lössauflage oberhalb des carbonathaltigen Verwitterungsschuttes
$T_{potLneu}$:	potentielle lössbürtige Tonmasse im Mineralboden [kg/m ²], nähert sich mit jeder Iteration der tatsächlichen lössbürtigen Tonmasse weiter an
M_{Lsg} :	Masse Lösungsrückstand [kg/m ²]
$M_{Löss}$:	Masse Löss am Mineralboden [kg/m ²]
M_{Bod} :	Masse Mineralboden [kg/m ²]
% T_{Res} :	Tongehalt [%] des Lösungsrückstands des Kalksteins (Mittelwert)
% $T_{Löss}$:	Tongehalt [%] des Lösses (Tab. 28)

Nach der ersten Iteration liegt die Summe der potentiellen lössbürtigen Tonmasse ($T_{potLneu}$) und der residualen Tonmasse (T_{res}) noch unterhalb der aktuellen Tonmasse. Erst mit weiteren Iterationen nähert sich die Summe konvergent der aktuellen Tonmasse (T_{ak}) an: $T_{potLneu} + T_{res} \cong T_{ak}$. Gleichzeitig nähert sich die potentielle lössbürtige Tonmasse ($T_{potLneu}$) der tatsächlich lössbürtigen Tonmasse an.

Schon nach der vierten Iteration ändert sich die potentielle lössbürtige Tonmasse ($T_{potLneu}$) nur noch im Nachkommabereich. Aus diesem Grund werden für jeden Boden 10 Iterationen als ausreichend angesehen (Anhang VIIb).

In zwei weiteren Schritten wird aus der lössbürtigen Tonmasse die Masse an Löss ($M_{Löss}$) und daraus der prozentuale Lössanteil an der Gesamtmasse des Mineralbodens berechnet (% $Löss$):

$$M_{Löss} = \frac{T_{potLneu} \times 100}{\% T_{Löss}} \quad (19)$$

$$\Rightarrow \% Löss = \frac{M_{Löss} \times 100}{M_{Boden}} \quad (20)$$

% $Löss$: prozentualer Lössanteil am Mineralboden [%]

Problematisch ist die Einbeziehung des Tongehaltes des Lösungsrückstandes (% T_{Res}) in die Berechnungen (Formel 16). Der Lösungsrückstand wurde unter Laborbedingungen aus unverwittertem Kalkstein gewonnen. Im Gegensatz dazu unterlag der Lösungsrückstand im Gelände einer intensiven Verwitterung, durch die sich der Tongehalt erhöht hat (vgl. Kapitel 5.8.1). Wie stark diese Tongehaltsänderung ausfällt, kann anhand der vorliegenden Daten nicht mit Sicherheit abgeschätzt werden. Da die Schlufffraktion des Kalksteinlösungsrückstandes größtenteils aus Feinschluff besteht, wird der vollständige Zerfall der Feinschlufffraktion als maximal mögliche Tonerhöhung durch Verwitterung angenommen. Der in die Berechnung eingehende Tongehalt ergibt sich somit aus der Addition von Ton- und Feinschluffgehalt des Lösungsrückstandes (wurden in einem Pedon Kalksteine verschiedener Horizonte beprobt, wurde der Mittelwert gebildet). Durch die Berechnung erhöht sich der Tongehalt je nach Boden um 7 bis 19 Prozentpunkte, im Mittel um 15 Prozentpunkte

(vgl. Anhang VIb). In Tabelle 30 sind die Lössanteile am Mineralboden für beide Varianten, mit und ohne Verwitterung, aufgeführt.

Tab. 30: Aus Tonmassen berechnete Lössanteile am Mineralboden der untersuchten Böden mit und ohne Berücksichtigung von Tonneubildung durch Verwitterung

Boden	Masse Boden < 2 mm [kg/m ²]	Lössanteil am Mineralboden bei gegebenen Tongehalten des Lösungsrückstandes aus den Kalksteinen [%]	Lössanteil am Mineralboden bei Tonneubildung durch Verwitterung des Feinschluffs des Kalksteins [%]	Anteil Lösungs- am Mineralboden bei Tonneubildung durch Verwitterung des Feinschluffs der Kalksteine [%]
SBa	625	52	62	38
SBb	979	71	76	24
HARD	321	0	7	93
GOWa	244	32	47	53
GOWb	381	22	44	56
GOWc	541	45	62	38
RBa	390	17	41	59
RBb	880	48	63	37
HOLZ	937	74	77	23

Der Boden Hardehausen besitzt nach Tabelle 30 einen sehr geringen Lössanteil. In Holzkirch liegt er dagegen bei 74 %. Wird der Lössanteil bei gegebenen Tonanteilen im Lösungsrückstand betrachtet, überwiegt die Lösskomponente in den Böden Sentruper Berg b und Holzkirch. In Pedon Röhringsberg b und Sentruper Berg a nimmt sie etwa die Hälfte ein, in allen weiteren Böden überwiegt der Lösungsrückstand. Wird die Verwitterung des Feinschluffs des Kalksteinlösungsrückstandes mit in die Berechnung einbezogen, erhöht sich der Lössanteil am Mineralboden um 3 bis 24 Prozentpunkte. Der Anteil an Lösungsrückstand überwiegt noch in vier Böden (HARD, GOWa, GOWb und RBa).

Das relativ flachgründige und tonreiche Pedon Göttinger Wald a zeigt in den Berechnungen einen höheren Lösseinfluss als Göttinger Wald b. Das hängt mit sehr hohen Tongehalten im Lösungsrückstand der analysierten Kalksteine (≥ 2 mm) von Göttinger Wald a zusammen. Ob der ursprünglich verwitterte Stein tatsächlich diese hohen Tongehalte aufgewiesen hat, kann weder für diesen noch die anderen Standorte eindeutig rekonstruiert werden. Laterale Umlagerungen am Hang wie auch horizontale Wechsel in der Zusammensetzung der Kalksteine sind nicht auszuschließen.

Für die durchgeführten Berechnungen sind einige Unsicherheiten bezüglich der ursprünglichen Zusammensetzung der Substrate und deren verwitterungsbedingten Korngrößenänderungen in Kauf zu nehmen. Dennoch sind die Ergebnisse gut geeignet, um die Schichtigkeit der Böden aufzuzeigen und quantitativ zu beziffern. Weitere Schichtungsnachweise sollen diese Ergebnisse bestätigen.

5.8.3 Schluffmassenanalyse – Massenbilanzierung nach „Alaily“

Eine weitere Möglichkeit, die Anteile an Lösungsrückstand und Löss zu bestimmen, besteht in der Untersuchung eines möglichst verwitterungs- und verlagerungs-resistenten Elementes/Minerals oder Korngröße. Dessen Gehalte müssen sowohl in den Mineralbodenhorizonten, als auch im unveränderten Ausgangsmaterial, hier Löss und Kalkstein, bekannt sein. Während für den Kalkstein umfangreiche Untersuchungsergebnisse vorliegen, muss für den unbeeinflussten Löss auf Literaturwerte zurückgegriffen werden.

Rechenversuche zeigten, dass der Grobschluffanteil eine geeignete Eingangsgröße darstellt. Er ist zu großen Anteilen im Löss, aber nur in geringen Mengen im Lösungsrückstand enthalten. Als Nachteil ist allerdings die gegenüber Quarz erhöhte Verwitterungsanfälligkeit zu werten. Die Quarzgehalte von Löss und Residualton zeigen indessen eine geringere Differenz (vgl. Kapitel 5.4.1), ebenso untersuchte verwitterungsresistente Elemente wie Zirkonium (Kapitel 5.5.3). Zudem liegen für die Vergleichs-C-Lösse diese Analyseergebnisse häufig nicht vor.

Die zur Berechnung herangezogenen Vergleichslösse bzw. Grobschluffgehalte sind in Tabelle 28, Kapitel 5.8.2.1 aufgeführt.

Die Berechnung des Lössanteils eines Horizontes erfolgt mit Hilfe von zwei Annahmen (vgl. ALAILY 1972 und MAUS & STAHR 1977):

a) Löss (Y) und Lösungsrückstand (X) ergänzen sich in jedem Horizont zu 100 % (Formel 21).

b) Der Grobschluffgehalt im Löss (e) multipliziert mit dessen Anteil ergibt zusammen mit dem Grobschluffgehalt im Lösungsrückstand (d) und dessen Anteil den Grobschluffgehalt im betreffenden Horizont (t) multipliziert mit 100 (Formel 22).

$$\text{a) } \quad X + Y = 100 \Leftrightarrow Y = 100 - X \quad (21)$$

$$\text{b) } \quad d \times X + e \times Y = t \times 100 \quad (22)$$

$$\Rightarrow d \times X + e \times (100 - X) = t \times 100 \quad (23)$$

$$\text{a) in b) } \quad \Leftrightarrow d \times X + e \times 100 - e \times X = t \times 100$$

$$\Leftrightarrow X \times (d - e) + e \times 100 = t \times 100$$

$$\Leftrightarrow X = \frac{(t \times 100 - e \times 100)}{(d - e)}$$

Y: Löss in [%]

X: Lösungsrückstand in [%]

t: Gehalt vom Gemisch

e: Gehalt im C-Löss/Vergleichslöss

d: Gehalt im Lösungsrückstand

Der horizontweise berechnete Anteil an Lösungsrückstand bzw. Löss wird mit der Bodenmasse, berechnet nach Formel 13, gewichtet. Pro Pedon ergibt sich so der Anteil an Lösungsrückstand/Löss.

Würden einzelne Horizonte betrachtet, wären einige der ermittelten Lössanteile durch den Prozess der Lessivierung verfälscht: Durch Toneinwaschung wird der Grobschluffanteil eines Horizontes relativ gesehen geringer und entsprechend in den Al-Horizonten höher. Daher wird in Tabelle 31 der Anteil Löss pro Pedon dargestellt, die horizontbezogenen Ergebnisse werden nur im Anhang VIIa aufgeführt. Es ist denkbar, den Lessivierungsprozess mittels der in den Dünnschliffanalysen abgeschätzten verlagerten Tonmassen rechnerisch aus jedem Horizont zu eliminieren. Da jedoch pro Horizont nur ein Dünnschliff entnommen wurde, ist dieser Wert möglicherweise nicht repräsentativ. Zudem ist horizontinterne Tonverlagerung visuell nicht von externer zu trennen. Daher wird auf diese Berechnung verzichtet.

Eine Schwachstelle des Bilanzierungsverfahrens liegt im Vergleich unverwitterter C-Lösse und Lösungsrückstände mit verwitterten Mineralbodenhorizonten. Wie bereits in Kapitel 5.8.1 diskutiert, kann sich der Grobschluffgehalt im Laufe der Verwitterung verringern. In den genannten Untersuchungen wurde der Grobschluffgehalt durch Kryoklastik um 39 % erniedrigt, durch Tonmineralbildung um 9 %. Würden diese Werte auf die untersuchten Böden angewendet, lägen viele Grobschluffgehalte, insbesondere am Sentruper Berg, weit oberhalb der Grobschluffgehalte der Vergleichs-C-Lösse. Das Ausmaß des Grobschluffabbaus kann im Rahmen dieser Arbeit nicht genau ermittelt werden. Wird angenommen, dass 15 % vom ursprünglichen Grobschluffgehalt verwittert sind, ergibt sich für den Boden Sentruper Berg ein gU-Gehalt von 75 % vor der Verwitterung. Da der Vergleichs-C-Löss des Standortes nur 72 % gU enthält (eine leichte Erhöhung durch Tonverlagerung kann angenommen werden), kann die Verwitterung zumindest an diesem Standort nicht höher sein und wird auf alle weiteren Standorte übertragen. Zwar könnte es standörtliche Unterschiede in der Verwitterungsintensität geben, diese können jedoch nicht quantifiziert werden.

Für Holzkirch und Hardehausen lag kein C-Löss vor, es wird daher angenommen, dass auch hier 15 % des Grobschluffs verwittert ist und wieder dazugerechnet werden muss, um den ursprünglichen Gehalt zu erhalten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 dargestellt.

Tab. 31: Über den Grobschluffgehalt berechnete Lössanteile am Mineralboden der untersuchten Böden mit und ohne Berücksichtigung von Tonneubildung durch Verwitterung

Boden	Masse Boden < 2 mm [kg/m ²]	Lössanteil am Mineralboden ohne Berücksichtigung der Verwitterung des gU in den Mineralbodenhorizonten [%]	Lössanteil am Mineralboden bei Annahme: ursprünglicher gU - 15 % = gU aktuell [%]	Anteil Lösungs- am Mineralboden bei Annahme: ursprünglicher gU - 15 % = gU aktuell [%]
SBa	625	53	63	37
SBb	979	68	81	19
HARD	321	3	6	94
GOWa	244	28	33	67
GOWb	381	31	38	62
GOWc	541	44	56	44
RBa	390	21	26	74
RBb	880	41	50	50
HOLZ	937	60	71	29

Die Ergebnisse bestätigen die Heterogenität der Böden, wobei der Lössanteil am Mineralboden stark schwankt. Wird die Verwitterung des Grobschluffs im Mineralboden mit berücksichtigt, erhöht sich der errechnete Lössanteil im Durchschnitt um 8 Prozentpunkte und maximal um 13 Prozentpunkte (Boden Sentruper Berg b von 68 % auf 81 %).

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zu den aus Tonmassen berechneten Lössanteilen (Tab. 30). Wird die Verwitterung mit einbezogen, weichen die Ergebnisse beider Bilanzierungsmethoden im Mittel um 7 Prozentpunkte voneinander ab und maximal um 16 Prozentpunkte (Röhringsberg a).

Die Bilanzierungsmethode ließe sich optimieren, wenn Informationen über ein verwitterungsstabiles Element oder Mineral mit stark unterschiedlichen Gehalten in beiden Ausgangsgesteinen vorliegen würde. Es müsste keine Annahme für die Verwitterung des Grobschluffs getroffen werden. Der Lössanteil könnte direkt bestimmt werden und in einem weiteren Schritt die sich daraus ergebene Grobschluffmasse oder die Masse eines anderen verwitterungsanfälligen Parameters. Über den Vergleich mit dem Ist-Zustand kann dann die Intensität der Verwitterung abgeleitet werden.

5.8.4 Ursprüngliche Kalksteinmengen – Alter der Böden

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurde auf zwei Wegen der Löss- bzw. Residualtonanteil am Mineralboden berechnet. Es stellt sich die Frage, wie viel Kalkstein dafür verwittern musste? Mit Hilfe nachstehender Formel 24 wird die Masse und mit Formel 25 die Höhe des verwitterten Kalksteins rekonstruiert. Der Anteil

Lösungsrückstand am Mineralboden ($\%L_{\text{Pedon}}$) wird aus den Werten der Tabellen 30 und 31 (jeweils letzte Spalte) gemittelt, um methodische Fehler zu verringern:

$$M_{\text{Stein}} = \frac{\%L_{\text{Pedon}} \times M_{\text{Bod}}}{\%L_{\text{Stein}}} \quad (24)$$

M_{Stein} : Masse Kalkstein [kg/m^2]
 $\%L_{\text{Pedon}}$: prozentualer Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]
 M_{Bod} : Masse Mineralboden [kg/m^2]
 $\%L_{\text{Stein}}$: prozentualer Anteil Lösungsrückstand am Kalkstein [%], Mittelwert aller untersuchten Kalksteine eines Bodens

$$H_{\text{Stein}} = \frac{M_{\text{Stein}}}{\rho \times 1000} \quad (25)$$

H_{Stein} : Höhe bzw. Mächtigkeit Kalkstein [m]
 ρ : Dichte Kalkstein [g/cm^3]

Die rekonstruierte Mächtigkeit des verwitterten Kalksteins schwankt stark von Pedon zu Pedon (Tab. 32). Der Grund ist zum großen Teil in den unterschiedlichen Carbonat- bzw. Lösungsrückstandsgehalten der Kalksteine zu suchen. So müssen im Pedon Holzkirch immerhin fast 43 m Stein verwittern, um auf die berechnete Masse an Lösungsrückstand zu kommen, da der Stein nur 0,2 % nichtcarbonatischen Anteil enthält. Am Standort Sentruper Berg a reichen für eine vergleichbar große Masse an Lösungsrückstand 1,3 m.

Tab. 32: Rekonstruierte Massen und Mächtigkeiten der verwitterten Kalksteine

	1	2	3	4	5	6	7
	(M_{Bod})	($\%L_{\text{Pedon}}$)		($\%L_{\text{Stein}}$)	(M_{Stein})	(ρ)	(H_{Stein})
Peda	Masse Boden < 2 mm	Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden	Masse Lösungsrückstand im Mineralboden	Anteil Lösungsrückstand am Kalkstein	Masse Kalkstein	Dichte Kalkstein	Höhe Kalkstein
	[kg/m^2]	[%] (Mittelw. aus Tab. 30 und 31)	[kg/m^2]	[%]	[kg/m^2]	[g/cm^3]	[m]
SBa	625	37	234	7,6	3.079	2,45	1,3
SBb	979	21	210	14,1	1.486	2,46	0,6
HARD	321	93	299	5,7	5.239	2,55	2,1
GOWa	244	60	146	5,9	2.456	2,53	1,0
GOWb	381	59	225	4,8	4.695	2,57	1,8
GOWc	541	41	221	2,8	8.037	2,53	3,2
RBa	390	66	259	1,2	21.439	2,48	8,6
RBb	880	44	386	0,5	78.095	2,61	29,9
HOLZ	937	26	245	0,2	109.324	2,56	42,7

Grundsätzlich sind die in Tabelle 32 aufgeführten verwitterten Kalksteinmassen nur als grobe Anhaltswerte zu sehen. So könnte der bereits verwitterte Kalkstein einen

anderen Anteil an Lösungsrückstand als der heute anstehende Kalkstein besessen haben. Nicht- oder schwach carbonatische Zwischenlagen führen ebenfalls zu einer Überschätzung der verwitterten Kalksteinmasse. Auch könnten die Böden auf Grund unterschiedlich starker Hangneigungen und Positionen am Hang sowohl Abtrag als auch Akkumulation von Lösungsrückstand erfahren haben, wodurch sich die berechnete Kalksteinmenge ändern würde. Kritisch ist zudem ein möglicher Abtrag von Al-Horizonten zu sehen, der daraus verlagerte Ton wird dann fälschlicherweise der Residualtonbildung zugeschrieben. Dies ist besonders an Standorten mit starker Nutzung/Entwaldung im Mittelalter wie dem Röhringsberg (Kapitel 3.4) denkbar.

Aus der Rekonstruktion der verwitterten Kalksteinmengen ergibt sich automatisch auch die Frage nach dem Alter der Böden bzw. des Lösungsrückstandes. Die Kalksteinlösungsrate kann mit Hilfe einiger Annahmen grob überschlagen werden. So beträgt die Calciumcarbonatlöslichkeit in Wasser im günstigsten Fall etwa 300 mg/l (JAHN 1995). Die Sickerwassermenge wird nach dem Verfahren „Verknüpfungsregel 6.5.6“ in MÜLLER (2004) berechnet. Es werden der Niederschlag (Kapitel 3), die Hangneigung/Hangposition (Kapitel 5.1) und die potentielle Evapotranspiration über Gras nach Haude benötigt. Letzteres wird einer Karte aus DOMMERMUTH & TRAMPF (1990) entnommen und berücksichtigt die Jahre 1951 bis 1980. Aus der Multiplikation von Sickerwassermenge und Carbonatlöslichkeit ergibt sich, dass pro Jahr 52 bis 125 g Kalk/m² aufgelöst werden (Tab. 33, Spalte 4).

Tab. 33: Potentielle Rückstandsmengen aus der Kalksteinverwitterung im Spätglazial und Holozän

Pedon	1 Nieder- schlag [l/m ² ·a]	2 Sicker- wasser- menge [l/m ² ·a]	3 Löslich- keit CaCO ₃ [mg/l]	4 gelöster Kalk [g/m ² ·a]	5 Lösungs- rückstand Kalkstein [%]	6 gebildeter Lösungs- rückstand [g/m ² ·a]	7 Rückstand nach 14500 Jahren [kg/m ²]	8 Höhe Boden [cm]
SBa	890	378	300	113	7,6	9,3	122	12,2
SBb	890	378	300	113	14,1	18,7	245	24,5
HARD	862	382	300	115	5,7	6,9	91	9,1
GOWa	645	175	300	52	5,9	3,3	43	4,3
GOWb	645	186	300	56	4,8	2,8	37	3,7
GOWc	645	186	300	56	2,8	1,6	21	2,1
RBa	738	264	300	79	1,2	1,0	13	1,3
RBb	738	269	300	81	0,5	0,4	5	0,5
HOLZ	900	417	300	125	0,2	0,3	4	0,4

Unter Einbeziehung der bekannten Lösungsrückstandsanteile der Kalksteine (Spalte 5) entstehen pro Jahr zwischen 0,3 und 18,7 g Lösungsrückstand (Spalte 6). Zur Berechnung wird folgende Formel eingesetzt:

$$L_{\text{sgr}_{\text{pro}_a}} = \frac{\text{Kalk}_{\text{gelöst}} \times 100}{(100 - \%L_{\text{Stein}})} - \text{Kalk}_{\text{gelöst}} \quad (26)$$

$L_{sgr_{pro_a}}$: pro Jahr gebildeter Lösungsrückstand [$g/m^2 \cdot a$]
 $Kalk_{gelöst}$: gelöster Kalk [$g/m^2 \cdot a$]
 $\%L_{Stein}$: prozentualer Anteil Lösungsrückstand am Kalkstein [%]

Sie berücksichtigt, dass die Menge an gelöstem Kalk nicht der Menge an gelöstem Kalkstein entspricht.

Da bereits von einer Entkalkung in den Interstadialen des Spätglazials (Beginn 14500 Jahre vor heute) ausgegangen werden kann, wird mit 13100 Jahren (Holozän + Interstadiale) gerechnet (vgl. STREIF et al. 2007). Seit dem letzten Hochglazial ergeben sich demgemäss 4 bis 245 kg Lösungsrückstand pro m^2 (Spalte 7). Das ist in den meisten Fällen weit weniger als aus den Massenbilanzen berechnet wurde. Lediglich der Standort Sentruper Berg b übertrifft den in Tabelle 32, Spalte 2 errechneten Anteil an Lösungsrückstand am Mineralboden leicht. Trotz der vielen Unsicherheiten kann daher davon ausgegangen werden, dass ein größerer Teil der Kalksteinlösungsrückstände bereits in vorhergehenden Warmzeiten/Interstadialen gebildet worden ist. Insbesondere da durch die Lössanwehung zusätzlich Carbonat eingetragen und so die Geschwindigkeit der Entkalkung des Festgesteins gedrosselt wurde. Eine genauere Rekonstruktion der $CaCO_3$ -Löslichkeit und der hydrologischen Daten der letzten 14500 Jahre wäre wünschenswert, stellt aber ein eigenständiges Forschungsvorhaben dar.

Wird eine Dichte von $1 g/cm^3$ angenommen, kann daraus die Höhe des seit dem Spätglazial gebildeten Bodens berechnet werden (Spalte 8). Dadurch werden die unterschiedlichen Bildungsgeschwindigkeiten der T-Horizonte gut darstellbar.

5.9 Profilbezogene Ergebniszusammenstellung

Im Anschluss an die Betrachtung einzelner Untersuchungen und Auswertungsmethoden erfolgt in den folgenden Kapiteln eine pedonbezogene Darstellung und Bewertung der Ergebnisse sowie die Benennung der Böden.

Zuvor soll der Begriff Terra fusca definiert werden: Häufig wird mit dem Begriff Terra fusca automatisch eine tertiäre Genese, oft auch eine Entstehung unter wärmeren Klimabedingungen verbunden. In dieser Arbeit und auch nach der Definition in der AG BODEN (2005) ist dieser Bodentyp nicht an einen festen Entstehungszeitraum oder ein bestimmtes Klima gebunden. Es wird lediglich eine Entwicklung aus Carbonatgestein und ein Tv-Horizont mit mindestens 65 Masse-% Ton vorausgesetzt.

5.9.1 Sentruper Berg a

Der Boden Sentruper Berg a befindet sich am südlich ausgerichteten, mittel geneigten Oberhang des Sentruper Bergs im Teutoburger Wald. Die wichtigsten Daten zu diesem Boden sind in Tabelle 34 aufgeführt.

Tab. 34: Sentruper Berg a (SBa) – Ergebniszusammenstellung

Tab. 34a:

SBa	Tiefe [cm]	X ^d [%]	T ^e [%]	fU [%]	mU [%]	gU [%]	S [%]	gU/fU	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	pH CaCl ₂	Quarz ^f [%]	Q ^f /gU
Ah	0-3	0	24	7	16	48	4	6,5	0	3,9	3,5	63	1,3
Al-Bv Mb. ^a	3-18	0	26	6	14	50	3	8,2	0	0,8	3,7	61	1,2
Bvt	18-35	0	32	4	13	49	3	11,2	0	0,4	3,9	55	1,1
IIBt-Tv	35-50	0	67	7	7	17	1	2,2	0	0,6	4,4	29	1,8
cCv	50-69	-	78	8	7	6	1	0,7	51	0,7	7,5	20	3,6
cmCv Fm. ^b	69-88	-	74	15	6	4	1	0,3	69	0,5	7,5	23	5,7
cCv	50-69	95	70	14	11	4	0	0,3	93	-	-	25	6,5
cmCv St. ^c	69-88	98	70	17	9	3	1	0,2	92	-	-	26	9,4

^a Mineralboden; ^b carbonathaltiges Feinmaterial < 2 mm; ^c Kalkstein ≥ 2 mm; ^d Vol.-% Grob-
boden; ^e Texturanalyse nach Humuszerstörung, Carbonatzerstörung an carbonathaltigen
Proben; ^f Quarzgehalt (Q), Carbonatzerstörung an carbonathaltigen Proben, keine Humus-
zerstörung

Tab 34b:

SBa	Tiefe [cm]	Fe _o ^g	Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _d / T ^h	Tv ⁱ	SiO ₂ ^j	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	T/ Al ₂ O ₃	I ^k
		[g/kg]				[%]	[%]	[%]	[%]		
Ah	0-3	3	8	0,39	0,36	-	71	12	3	2,0	III
Al-Bv Mb. ^a	3-18	2	8	0,32	0,30	0,8	73	14	3	1,8	
Bvt	18-35	2	10	0,25	0,32	3,2	70	16	4	2,0	
IIBt-Tv	35-50	4	22	0,19	0,33	11,9	57	20	8	3,4	VII
cCv	Fm. ^b 50-69	2	8	0,19	0,21	-	57	19	7	4,1	VII
cmCv	69-88	0	3	0,14	0,15	-	58	19	6	3,9	
cCv	St. ^c 50-69	-	-	-	-	-	61	17	6	4,1	VII
cmCv	69-88	-	-	-	-	-	61	18	6	4,0	

^g pedogene Oxide ohne Humus-/Carbonatzerstörung analysiert, ^h rechnerische Elimination von Humus/Carbonat vom Fe_d-Gehalt; ⁱ Summe Tonverlagerung in Vol.-% am Schluff; ^j Elementbestimmung nach Carbonatzerstörung an der Feinmaterial- und Steinfraktion; ^k Inhomogenitätsindex: Einteilung vgl. Tab. 24

Tab. 34c:

horizontübergreifende Berechnungsergebnisse (vgl. Kapitel 5.7–5.8)	Pedon SBa
gemittelter Variationskoeffizient Mineralboden	27
Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]	37
Masse Lösungsrückstand am Mineralboden [kg/m ²]	234
geschätzte Masse Lösungsrückstand in 14.500 Jahren [kg/m ²]	122

Aus diesen Daten werden die folgenden Hinweise zum Ausgangsmaterial abgeleitet und in der Synthese zusammengeführt.

Hinweise auf Löss:

- Die Grobschluffgehalte und der Quotient gU/fU sind im Mineralboden und im Feinmaterial des ersten Cv-Horizontes höher als im Kalkstein. Das ist auf Lösseinmischung zurückzuführen (die Zusammensetzung von Löss in der näheren Umgebung des Bodens ist in Tabelle 28 aufgeführt), da Grobschluff auf Grund der niedrigen Sandanteile nicht in nennenswerten Mengen neu gebildet werden kann.
- Die Quarzgehalte sind in den ersten drei Horizonten gegenüber dem aus dem Kalkstein gewonnenen Lösungsrückstand deutlich erhöht und bewegen sich in einer für Löss typischen Größenordnung (vgl. Kapitel 5.4.1).

Hinweise auf Lessivierung:

- Die Dünnschliffe zeigen, dass Tonverlagerung vom zweiten bis zum vierten Horizont stattgefunden hat, es sind hauptsächlich Toncutanbruchstücke erhalten.
- Silizium nimmt mit zunehmender Tiefe ab, Aluminium und Eisen nehmen zu. Dies ist ein Hinweis auf Lessivierung. Da aber der Quotient Ton/Aluminium im

tonreichsten Horizont stark zunimmt, deutet der Verlauf zusätzlich auf einen Schichtwechsel hin, Lessivierung wird dadurch jedoch nicht ausgeschlossen.

Hinweise auf Residualton:

- Der tonreichste Horizont enthält Schlufffüllungen in Poren, Rissen und Aggregatzwischenräumen, die auf eine Einwaschung von Löss in den IIBt-Tv-Horizont zurückzuführen sind (vgl. Kapitel 5.6.1).
- Lessivierung allein reicht nicht aus, um einen Tongehaltssprung von 43 Prozentpunkten zwischen Oberboden und tonreichstem Horizont zu erzeugen (vgl. Kapitel 5.2.3).
- Der mit der Tiefe zunehmende Fe_o-Gehalt deutet auf einen Schichtwechsel hin. Fe_o würde in einschichtigen Braunerden und Parabraunerden abfallen (BLUME & SCHWERTMANN 1969).
- Der gemittelte Variationskoeffizient innerhalb des Mineralbodens ist der zweithöchste der neun untersuchten Böden. Der Inhomogenitätsindex zeigt einen deutlichen Schichtwechsel zwischen dem Bvt-Horizont und dem IIBt-Tv-Horizont an.

Synthese

Der Boden Sentruper Berg a weist einen deutlichen Schichtwechsel zwischen den lössdominierten oberen drei Horizonten und dem tonreichen, von Lösungsrückstand beherrschten, vierten Horizont auf. Letzterer wurde mit großer Wahrscheinlichkeit bereits vor der Lössanwehung angelegt. Die berechnete Masse an Lösungsrückstand am Mineralboden beträgt 234 kg/m², das entspricht 37 %. Auf Grund der mittleren Hangneigung des Profilstandortes ist diese Prozentangabe jedoch nur als Näherungswert zu verstehen. Soliflukationsprozesse dürften zu einer verstärkten Umlagerung von Lösungsrückstand aber auch Kalksteinverwitterungsschutt geführt haben.

Trotz des Schichtwechsels ist Lösungsrückstand auch in die oberen drei Horizonte eingemischt, dafür sprechen die im Vergleich zu einem Lössboden in der näheren Umgebung erhöhten Ton und erniedrigten Grobschluffgehalte (vgl. Tab. 28). Es handelt sich wahrscheinlich um einen überwiegend periglaziär bedingten Vermischungsprozess (vgl. Kapitel 5.7.3). Durch Tonverlagerung und Einwaschung von Schluff (gut am Grobschluffgehalt zu erkennen) wurde andererseits Lössmaterial bis in den tonreichsten Horizont eingearbeitet. Nicht zu differenzieren ist, ob ein Teil des Tons nur horizontintern verlagert wurde. Die Verzahnung beider Schichten wird durch rezente Mischungsvorgänge wie Bioturbation und in geringerem Umfang auch Bodenkriechen weiter gefördert.

Da der Schichtwechsel zwei miteinander verzahnte aber primär eigenständige Böden trennt und innerhalb von 7 dm unter Geländeoberfläche beginnt, wird ein "Boden über Boden" auskartiert. Im oberen Boden sind Verbraunung und Tonverlagerung prägende Prozesse, im unteren Boden die Residualtonbildung. Es ergibt sich folgender Bodentyp: **Braunerde-Parabraunerde über lessivierter Terra fusca**. Die Bodenform lautet: Braunerde-Parabraunerde aus periglaziärem Ton (aus Kalkstein der Oberkreide

(Turon) und Löss) über lessivierter Terra fusca aus Ton (aus Löss und Kalkstein der Oberkreide (Turon)) über Kalksteinverwitterungsschutt der Oberkreide über Kalkstein der Oberkreide.

5.9.2 Sentruper Berg b

Das Pedon Sentruper Berg b liegt ca. 38 Höhenmeter unterhalb des Pedons Sentruper Berg a und ist mittel geneigt. In Tabelle 35 sind die wichtigsten Daten zu diesem Boden zusammengestellt.

Tab. 35: Sentruper Berg b (SBb) – Ergebniszusammenstellung

Tab. 35a:

SBb	Tiefe [cm]	X ^d [%]	T ^c [%]	fU [%]	mU [%]	gU [%]	S [%]	gU/fU	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	pH CaCl ₂	Quarz ^f [%]	Q ^f /gU
Ah	0-4	0	16	4	15	60	6	16,5	0	4,2	3,4	65	1,1
Al+Btv	4-30	0	16	3	15	61	5	21,0	0	0,8	3,8	65	1,1
Sw-Btv Mb. ^a	30-49	0	16	3	13	64	4	22,4	0	0,2	3,8	66	1,0
II Sd-Bvt-Tv	49-61	0	55	8	8	25	2	3,0	0	0,5	4,1	34	1,4
Sd-Bt-Tv	61-70	0	68	10	9	12	1	1,2	0	0,6	6,3	26	2,2
cCv1 Fm. ^b	70-90	-	58	10	12	17	2	1,7	50	0,2	7,3	37	2,2
cCv2	90-120	-	71	12	11	4	1	0,4	65	0,2	7,4	27	6,1
cCv1 St. ^c	70-90	90	73	12	11	3	1	0,3	85	-	-	35	11,1
cCv2	90-120	85	67	16	11	5	1	0,3	87	-	-	30	5,5

^{a-f} siehe Erläuterungen Tab. 34a

Tab. 35b:

SBb	Tiefe [cm]	Fe _o ^g [g/kg]	Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _d / T ^h	Tv ⁱ [%]	SiO ₂ ^j [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	T/ Al ₂ O ₃	Γ ^k
Ah	0-4	3	7	0,45	0,45	0,1	73	10	2	1,6	III II VII
Al+Btv	4-30	2	6	0,35	0,39	2,0	78	11	2	1,5	
Sw-Btv Mb. ^a	30-49	2	7	0,30	0,40	4,1	76	12	3	1,3	
II Sd-Bvt-Tv	49-61	4	17	0,25	0,31	11,3	62	18	6	3,1	VI III
Sd-Bt-Tv	61-70	4	17	0,24	0,25	11,0	60	18	6	3,8	
Cv1 Fm. ^b	70-90	2	8	0,19	0,29	-	63	16	6	3,6	
Cv2	90-120	1	4	0,13	0,17	-	62	18	5	4,0	
Cv1 St. ^c	70-90	-	-	-	-	-	66	15	5	4,9	
Cv2	90-120	-	-	-	-	-	64	17	5	4,0	

^{g-k} siehe Erläuterungen Tab. 34b

Tab. 35c:

horizontübergreifende Berechnungsergebnisse (vgl. Kapitel 5.7–5.8)	Pedon SBb
gemittelter Variationskoeffizient Mineralboden	45
Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]	21
Masse Lösungsrückstand am Mineralboden [kg/m ²]	210
geschätzte Masse Lösungsrückstand in 14.500 Jahren [kg/m ²]	245

Aus diesen Daten werden die folgenden Hinweise zum Ausgangsmaterial abgeleitet und in der Synthese zusammengeführt.

Hinweise auf Löss:

- Die Grobschluffgehalte und der Quotient gU/fU sind im Mineralboden und im Feinmaterial des ersten Cv-Horizontes höher als im Kalkstein. Das ist auf Lösseinmischung zurückzuführen (die Zusammensetzung von Löss in der näheren Umgebung des Bodens ist in Tabelle 28 aufgeführt), da Grobschluff auf Grund der niedrigen Sandanteile nicht in nennenswerten Mengen neu gebildet werden kann.
- Die Quarzgehalte sind in den ersten drei Horizonten gegenüber dem aus dem Kalkstein gewonnenen Lösungsrückstand deutlich erhöht und bewegen sich in einer für Löss typischen Größenordnung (vgl. Kapitel 5.4.1).

Hinweise auf Lessivierung:

- Die Dünnschliffe zeigen, dass Tonverlagerung vom ersten bis zum fünften Horizont stattgefunden hat. Es handelt sich hauptsächlich um Toncutanbruchstücke, im vierten und fünften Horizont sind einige mit verlagertem Ton verfüllte Poren erhalten.

Hinweise auf Residualton:

- Die beiden tonreichen Horizonte IISd-Bvt-Tv und Sd-Bt-Tv enthalten Schluff-füllungen in Poren, Rissen und Aggregatzwischenräumen, die auf eine Löss-einwaschung in diese Schicht zurückzuführen sind (vgl. Kapitel 5.6.2).
- Lessivierung allein reicht nicht aus, um einen Tongehaltssprung von 52 Prozentpunkten zwischen Oberboden und tonreichstem Horizont zu erzeugen (vgl. Kapitel 5.2.3).
- Der mit der Tiefe zunehmende Fe_o-Gehalt deutet auf einen Schichtwechsel hin. Fe_o würde in einschichtigen Braunerden und Parabraunerden abfallen (BLUME & SCHWERTMANN 1969).
- Silizium nimmt mit zunehmender Tiefe ab, Aluminium und Eisen zu, das ist ein Hinweis auf Lessivierung. Da aber der Quotient Ton/Aluminium in den beiden tonreichsten Horizonten stark zunimmt, deutet dies in erster Linie auf einen Schichtwechsel hin, Lessivierung wird dadurch jedoch nicht ausgeschlossen.
- Der gemittelte Variationskoeffizient innerhalb des Mineralbodens ist mit 45 der höchste der neun untersuchten Böden und deutet ein hohes Maß an

Inhomogenität an. Der Inhomogenitätsindex belegt einen deutlichen Schichtwechsel zwischen dem dritten und vierten, tonreichen, Horizont und auch zwischen dem vierten und fünften Horizont an, sinkt aber zum Feinmaterial.

Synthese

Der Mineralboden am Sentruper Berg b besteht rechnerisch zu 21 % aus Lösungsrückstand, der eine Masse von 210 kg/m² aufweist. Der größte Teil dieser Masse verteilt sich auf die unteren beiden tonreichen Mineralbodenhorizonte IISd-Bvt-Tv und Sd-Bt-Tv. Die in den Dünnschliffen identifizierten Schlufffüllungen legen eine Entstehung dieser beiden Horizonte vor der Lössanwehung nahe. Auch wenn rein rechnerisch die Zeit seit dem Spätglazial ausgereicht hätte, die bestehende Menge an Lösungsrückstand zu bilden. Da dieser Boden am Mittelhang liegt und mittel geneigt ist, kann es durch Erosions-/Solifluktionsprozesse zu Diskrepanzen zwischen dem untersuchten Gestein und dem überlagernden Boden sowie zu Massenveränderungen gekommen sein. Die oberen drei Horizonte bestehen überwiegend aus Löss. Der große Korngrößensprung zwischen diesen Schichten führte und führt zur Ausbildung von Pseudogleymerkmalen.

Trotz des deutlichen Schichtwechsels besteht eine Verzahnung zwischen den Schichten, die durch Tonverlagerung und Einwaschung von lössbürtigem Schluff in die tonreichsten Horizonte erzeugt wird. Davon ist der IISd-Bvt-Tv-Horizont stärker betroffen als der Sd-Bt-Tv-Horizont. Nicht zu klären ist, ob ein Teil des Tons nur horizontintern verlagert wurde. Die Verzahnung wird durch rezente Mischungsvorgänge wie Bioturbation und in geringerem Umfang auch Bodenkriechen weiter gefördert. Der hohe Grobschluffgehalt im Feinmaterial des cCv1-Horizontes lässt auf eine Lössenmischung bis in den Verwitterungsschutt schließen. Dieser stammt wahrscheinlich aus einer früheren Lössanwehungsphase, bevor auf dem Kalksteinverwitterungsschutt die Bodenentwicklung einsetzte. Da in diesem Boden, wie bereits im Boden Sentruper Berg a, zwei primär eigenständige, zu unterschiedlichen Zeiten entstandene Böden vorliegen, wird ein Zweischichtprofil auskartiert: **pseudovergleyte Parabraunerde-Braunerde über pseudovergleyter lessivierter Terra fusca**. Die Bodenform lautet: pseudovergleyte Parabraunerde-Braunerde aus periglaziärem Schluff (aus Kalkstein der Oberkreide (Turon) und Löss) über pseudovergleyter lessivierter Terra fusca aus Ton (aus Löss und Kalkstein der Oberkreide (Turon)) über Kalksteinverwitterungsschutt der Oberkreide.

5.9.3 Hardehausen

Der Standort Hardehausen befindet sich an einem östlich ausgerichteten Kulminationsbereich des Hardehausener Waldes und ist schwach geneigt. Die wichtigsten Daten zu diesem Boden sind in Tabelle 36 aufgeführt.

Tab. 36: Hardehausen (HARD) – Ergebniszusammenstellung

Tab. 36a:

HARD	Tiefe [cm]	X ^d [%]	T ^e [%]	fU [%]	mU [%]	gU [%]	S [%]	gU/fU	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	pH CaCl ₂	Quarz ^f [%]	Q ^f /gU
Ah	0-5	0	57	13	16	10	4	0,7	0	7,6	4,0	29	3,0
Al-Bv-Tv	5-17	0	60	12	15	9	4	0,7	0	5,6	4,2	26	2,9
Bt-Tv	17-29	45	75	8	8	7	2	0,9	2	3,4	6,8	19	2,9
Tv	29-44	55	77	9	8	5	1	0,5	6	2,2	7,1	16	3,3
cCv	44-61	-	70	10	9	4	8	0,4	45	0,7	7,5	13	3,4
Bt-Tv	17-29	-	60	18	16	5	1	0,3	96	-	-	21	4,4
Tv	29-44	-	57	19	18	6	0	0,3	97	-	-	21	3,7
cCv	44-61	90	45	15	27	7	6	0,5	90	-	-	24	3,3

^{a-f} siehe Erläuterungen Tab. 34a

Tab. 36b:

HARD	Tiefe [cm]	Fe _o ^g [g/kg]	Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _h / T	Tv ⁱ [%]	SiO ₂ ^j [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	T/ Al ₂ O ₃	I ^k
Ah	0-5	5	27	0,20	0,54	0,0	52	16	6	3,5	II III IV III
Al-Bv-Tv	5-17	5	29	0,17	0,54	0,4	52	18	7	3,4	
Bt-Tv	17-29	3	35	0,10	0,51	6,8	48	19	9	3,9	
Tv	29-44	2	40	0,06	0,57	0,6	46	19	9	4,0	
cCv	44-61	1	33	0,02	0,89	-	48	19	15	3,7	
Bt-Tv	17-29	-	-	-	-	-	56	20	7	3,0	
Tv	29-44	-	-	-	-	-	56	20	7	2,8	
cCv	44-61	-	-	-	-	-	53	17	15	2,7	

^{g-k} siehe Erläuterungen Tab. 34b

Tab. 36c:

horizontübergreifende Berechnungsergebnisse (vgl. Kapitel 5.7–5.8)	Pedon HARD
gemittelter Variationskoeffizient Mineralboden	4
Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]	93
Masse Lösungsrückstand am Mineralboden [kg/m ²]	299
geschätzte Masse Lösungsrückstand in 14.500 Jahren [kg/m ²]	91

Aus diesen Daten werden die folgende Hinweise zum Ausgangsmaterial abgeleitet und in der Synthese zusammengeführt.

Hinweise auf Löss:

- Die Grobschluffgehalte und der Quotient gU/fU sind in den ersten beiden Mineralbodenhorizonten gegenüber dem tonreichsten Horizont und dem Kalkstein leicht erhöht, das kann auf eine Lösseinmischung aber auch auf Lessivierung hindeuten.

Hinweise auf Lessivierung:

- Tonverlagerungsmerkmale treten vermehrt im dritten Horizont auf. Es handelt sich hauptsächlich um Toncutanbruchstücke und Verfüllungen (vgl. Kapitel 5.6.3).
- Silizium nimmt mit zunehmender Tiefe ab, Aluminium und Eisen leicht zu. Dieses ist ein Hinweis auf Lessivierung. Da allerdings der Quotient Ton/Aluminium im dritten und vierten tonreichsten Horizont leicht zunimmt, wird die Veränderung der Elementgehalte wahrscheinlich auch durch einen zunehmenden Anteil von Lösungsrückstand erzeugt.

Hinweise auf Residualton:

- Bereits ab 17 cm Tiefe (dritter Horizont) steigt der kalksteinbürtige Grobbodenanteil stark an.
- Der Quotient gU/fU ist im Verhältnis zu den anderen Böden bereits im Oberboden sehr niedrig und ändert sich im Tiefenverlauf nur wenig. Die Tongehalte sind bereits im ersten Horizont mit 57 % sehr hoch, weitaus höher als für Parabraunerden typisch (vgl. WIECHMANN 2000). Bis zum tonreichsten Horizont steigen die Tongehalte um 20 Prozentpunkte auf 77 %.
- Hardehausen fällt durch niedrige Fe_o/Fe_d -Quotienten und hohe Fe_d /Ton-Quotienten auf. Bereits im Oberboden sind die Fe_d -Gehalte im Vergleich zu den anderen untersuchten Böden hoch und steigen im Grus weiter an, wenn Kalk und Humus rechnerisch eliminiert werden. Das spricht für hohe Fe_d -Gehalte im Kalkstein und eine starke Prägung aller Horizonte durch das liegende Gestein.
- Der gemittelte Variationskoeffizient zwischen Mineralboden und angrenzendem Kalkstein ist der niedrigste der untersuchten Böden (Tab. 22) und auch innerhalb des Mineralbodens (Tab. 22, Tab. 36c) ist der Quotient niedrig. Der Inhomogenitätsindex nimmt vom ersten bis zum tonreichsten Horizont stetig zu, ein vollständiger Substratwechsel tritt jedoch nicht ein.

Synthese

Der Boden Hardehausen ist bereits im Oberboden sehr tonreich. Die berechnete Masse an Lösungsrückstand am Mineralboden beträgt 299 kg/m^2 , das entspricht 93 %. Der Grobschluffanteil und der Quarzgehalt im Oberboden sprechen für eine Lössmischung bis in den dritten Horizont. Die Dünnschliffe zeigen, dass die Vermischung mit Löss auf der Ebene einzelner Minerale und nicht ganzer Aggregate stattgefunden hat. Zusätzlich treten verschiedene Tonverlagerungsmerkmale auf, die im dritten Horizont (Bt-Tv) am stärksten ausgebildet sind. Ein deutlicher Schichtwechsel innerhalb des Mineralbodens wie am Sentruper Berg fehlt. Die stark schwankenden Tongehalte im Kalkstein deuten auf eine Inhomogenität im Gestein hin.

Da ein Tv-Horizont auskartiert werden konnte, der innerhalb von 3 dm unter der Geländeoberfläche beginnt und kaum durch Löss beeinflusst ist, ergibt sich als Bodentyp eine **lessivierte Terra fusca**. Die Bodenform lautet: lessivierte Terra fusca

aus Ton (aus Löss und Kalkstein des Unteren Muschelkalks) über Kalksteinverwitterungsschutt des Unteren Muschelkalks.

5.9.4 Göttinger Wald a

Das Pedon Göttinger Wald a befindet sich am nordwestlich ausgerichteten Kulminationsbereich des Totenbergs im Göttinger Stadtwald in kleinräumig ebener Lage. In Tabelle 37 sind die wichtigsten Daten zu diesem Boden zusammengestellt.

Tab. 37: Göttinger Wald a (GOWa) – Ergebniszusammenstellung

Tab. 37a:

GOWa	Tiefe [cm]	X ^d [%]	T ^e [%]	fU [%]	mU [%]	gU [%]	S [%]	gU/fU	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	pH CaCl ₂	Quarz ^f [%]	Q ^f /gU
Ah	0-6	0,5	54	12	15	17	2	1,5	0	8,5	5,9	28	1,6
Ah-Bv-Tv Mb. ^a	6-14	0,5	57	9	15	18	1	2,0	0	5,5	5,6	31	1,7
Bv-Tv	14-23	1,0	60	7	14	18	0	2,5	0	3,8	6,4	31	1,7
Tv-cCv	23-31	-	75	6	10	9	0	1,3	32	2,4	7,3	19	2,2
cCv	31-44	-	84	8	6	2	0	0,2	64	1,1	7,4	12	6,8
Tv-cCv	23-31	61	75	15	8	1	0	0,1	94	-	-	15	11,5
cCv	31-44	82	76	16	8	0	0	0,0	94	-	-	13	31,5

^{a-f} siehe Erläuterungen Tab. 34a

Tab. 37b:

GOWa	Tiefe [cm]	Fe _o ^g [g/kg]	Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _d / T ^h	Tv ⁱ [%]	SiO ₂ ^j [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	T/ Al ₂ O ₃	I ^k
Ah	0-6	3	13	0,22	0,28	0,0	50	16	4	3,4	III II V
Ah-Bv-Tv Mb. ^a	6-14	3	14	0,20	0,27	0,3	54	17	5	3,3	
Bv-Tv	14-23	3	14	0,21	0,25	0,1	55	19	5	3,2	
Tv-cCv	23-31	2	10	0,18	0,20	-	52	20	6	3,8	
cCv	31-44	1	5	0,11	0,18	-	50	21	6	4,0	
Tv-cCv	23-31	-	-	-	-	-	54	20	7	3,7	
cCv	31-44	-	-	-	-	-	55	21	7	3,7	

^{g-k} siehe Erläuterungen Tab. 34b

Tab. 37c:

horizontübergreifende Berechnungsergebnisse (vgl. Kapitel 5.7–5.8)	Pedon GOWa
gemittelter Variationskoeffizient Mineralboden	6
Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]	60
Masse Lösungsrückstand am Mineralboden [kg/m ²]	146
geschätzte Masse Lösungsrückstand in 14.500 Jahren [kg/m ²]	43

Aus diesen Daten werden die folgende Hinweise zum Ausgangsmaterial abgeleitet und in der Synthese zusammengeführt.

Hinweise auf Löss:

- Die Grobschluffgehalte, der Quarzgehalt und der gU/fU-Quotient sind in den drei Mineralbodenhorizonten und auch noch im Feinmaterial des ersten Verwitterungshorizontes deutlich höher als im Lösungsrückstand der Steinfraktion. Das ist auf Lösseinmischung zurückzuführen (die Zusammensetzung von Löss in der näheren Umgebung des Bodens ist in Tabelle 28 aufgeführt).

Hinweise auf Lessivierung:

- Die Dünnschliffe weisen nur sehr wenige Tonverlagerungsmerkmale auf.

Hinweise auf Residualton:

- Die Tongehalte sind mit 54 % bereits im Ah-Horizont hoch, zu hoch für typische Parabraunerden (vgl. WIECHMANN 2000).
- Die Silizium-, Eisen- und Aluminiumgehalte der Lösungsrückstände der Steine und des Feinmaterials unterscheiden sich nur geringfügig von den Gehalten der Mineralbodenhorizonte.

Synthese

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Boden Göttinger Wald a trotz seiner Geringmächtigkeit aus zwei Ausgangssubstraten zusammensetzt. Die berechnete Masse an Lösungsrückstand am Mineralboden beträgt 146 kg/m², das entspricht 60 %. Löss lässt sich anhand des Grobschluffgehaltes bis in das Feinmaterial des ersten Verwitterungshorizontes nachweisen. Ein Schichtwechsel innerhalb der Mineralbodenhorizonte fehlt. Die Dünnschliffe zeigen nahezu keine Tonverlagerungsmerkmale. Der Siliziumgehalt nimmt mit der Tiefe zu, auch dies spricht gegen eine Tonverlagerung, die zu einem Anstieg des Siliziumgehaltes im Tonanreicherungs-horizont führen würde. Die ausgeprägte Vermischung beider Ausgangssubstrate erfolgte auf der Ebene einzelner Minerale und ist wahrscheinlich periglaziär bedingt. Die Dünnschliffe zeugen auch von einer ausgeprägten rezenten Bioturbation.

Der hohe Tongehalt des Feinmaterials im cCv-Horizont von 84 % belegt eine starke kryoklastische Beanspruchung des Verwitterungsschuttes. Im massiven Kalkstein des cCv-Horizontes werden nur 76 % Ton erreicht.

Der Boden ist bereits im Ah-Horizont mit 54 % Ton sehr tonreich. Die für eine Terra fusca erforderlichen 65 % Ton werden jedoch in keinem der Mineralbodenhorizonte erreicht, obwohl im Lösungsrückstand des Kalksteins bis zu 76 % Ton enthalten sind. Da der Anteil an Lösungsrückstand im Mineralboden überwiegt, wird als Bodentyp eine **Braunerde-Terra fusca** auskartiert. Die Bodenform lautet: Braunerde-Terra fusca aus periglaziärem Ton (aus Löss und Kalkstein des Unteren Muschelkalks) über Kalksteinverwitterungsschutt des Unteren Muschelkalks über tiefem Kalkstein des Unteren Muschelkalks.

5.9.5 Göttinger Wald b

Der Boden Göttinger Wald b befindet sich am nordwestlich ausgerichteten Kulminationsbereich des Totenbergs im Göttinger Stadtwald und ist schwach geneigt. Die wichtigsten Daten zu diesem Boden sind in Tabelle 38 aufgeführt.

Tab. 38: Göttinger Wald b (GOWb) – Ergebniszusammenstellung

Tab. 38a:

GOWb	Tiefe [cm]	X ^d [%]	T ^e [%]	fU [%]	mU [%]	gU [%]	S [%]	gU/fU	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	pH CaCl ₂	Quarz ^f [%]	Q ^f /gU
Ah	0-10	0	49	8	18	24	1	3,0	0	6,6	5,3	36	1,5
Al-Bv	Mb. ^a 10-21	3	50	8	18	24	1	2,9	0	3,9	5,2	38	1,6
Btv-Tv	21-30	3	52	8	16	23	1	2,9	0	3,2	6,4	34	1,5
Bvt-Tv	30-43	31	62	6	12	19	0	3,1	0	2,6	7,0	28	1,5
cCv	Fm. ^b 43-70	-	78	10	8	3	0	0,4	67	0,8	7,5	14	4,0
Bvt-Tv	St. ^c 30-43	-	63	15	16	5	0	0,4	96	-	-	23	4,3
cCv	43-70	85	62	18	17	3	0	0,2	95	-	-	21	6,1

^{a-f} siehe Erläuterungen Tab. 34a

Tab. 38b:

GOWb	Tiefe [cm]	Fe _o ^g [g/kg]	Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _d /T ^h	Tv ⁱ [%]	SiO ₂ ^j [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	T/ Al ₂ O ₃	I ^k
Ah	0-10	3	15	0,19	0,34	0,0	54	16	5	3,0	II II II VII
Al-Bv	Mb. ^a 10-21	3	16	0,16	0,35	0,8	57	18	5	2,8	
Btv-Tv	21-30	3	17	0,15	0,35	1,7	57	18	5	2,8	
Bvt-Tv	30-43	3	19	0,14	0,33	12,7	51	23	6	2,7	
cCv	Fm. ^b 43-70	0	5	0,06	0,19	-	52	21	6	3,8	
Bvt-Tv	St. ^c 30-43	-	-	-	-	-	56	20	7	3,2	
cCv	43-70	-	-	-	-	-	56	20	7	3,0	

^{g-k} siehe Erläuterungen Tab. 34b

Tab. 38c:

horizontübergreifende Berechnungsergebnisse (vgl. Kapitel 5.7–5.8)	Pedon GOWb
gemittelter Variationskoeffizient Mineralboden	1
Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]	59
Masse Lösungsrückstand am Mineralboden [kg/m ²]	225
geschätzte Masse Lösungsrückstand in 14.500 Jahren [kg/m ²]	37

Aus diesen Daten werden die folgenden Hinweise zum Ausgangsmaterial abgeleitet und in der Synthese zusammengeführt.

Hinweise auf Löss:

- Die Grobschluffgehalte und der gU/fU-Quotient sind in den vier Mineralbodenhorizonten deutlich höher als im Lösungsrückstand der Steinfraktion und des Feinmaterials. Das ist auf Lösseinmischung zurückzuführen (die Zusammensetzung von Löss in der näheren Umgebung des Bodens ist in Tabelle 28 aufgeführt).

Hinweise auf Lessivierung:

- Toncutane treten ab dem Al-Bv-Horizont auf, in diesem Horizont finden sich hauptsächlich Toncutane an Poren. Im tonreichsten Horizont sind überwiegend Toncutanbruchstücke und Verfüllungen vorhanden, die sich durch ihre Farbe und die starke Reorientierung von den Tonüberzügen im zweiten und dritten Horizont unterscheiden.
- Der Siliziumgehalt nimmt mit zunehmender Tiefe und besonders im tonreichsten Horizont ab, Aluminium und Eisen nehmen zu. Der Quotient Ton/Aluminium ist im Mineralboden relativ stabil. Beides ist typisch für Lessivierung.

Hinweise auf Residualton:

- Die Tongehalte im Oberboden sind mit 49 % etwas niedriger als im Göttinger Wald a, dennoch sind die Werte höher als für Parabraunerden typisch (vgl. WIECHMANN 2000)

Synthese

Der Mineralboden des Bodens Göttinger Wald b setzt sich wie der 22 m entfernte und etwas höher gelegene Boden Göttinger Wald a aus Löss und Lösungsrückstand zusammen. Der berechnete Anteil an Lösungsrückstand am Mineralboden beträgt 59 % und weist eine Masse von 225 kg/m² auf. Wie schon im Boden Göttinger Wald a finden sich Hinweise auf eine starke kryoklastische Beanspruchung des Verwitterungsschutts: Der Tongehalt des Feinmaterials im cCv-Horizont liegt bei 78 %, der des Kalksteins nur bei 62 %.

Die Inhomogenitätsindizes zwischen den Mineralbodenhorizonten sind niedrig und steigen erst zwischen dem tonreichsten Horizont und dem Feinmaterial des cCv-Horizontes an. Der gemittelte Variationskoeffizient innerhalb des Mineralbodens ist der niedrigste der neun untersuchten Böden. Das spricht für eine intensive Durchmischung von Löss und Lösungsrückstand innerhalb des Mineralbodens. Die Vermischung erfolgte sowohl auf der Ebene einzelner Minerale (periglaziäre Prozesse) und auch in Form ganzer Aggregate zwischen dem dritten und vierten Horizont. Dennoch beträgt der Tongehaltssprung zwischen Oberboden und tonreichstem Horizont 13 Prozentpunkte. Dieser Unterschied ist überwiegend auf Tonverlagerung zurückzuführen. Als Bodentyp ergibt sich daher eine **Parabraunerde-Terra fusca**. Die Bodenform lautet: Parabraunerde-Terra fusca aus periglaziärem Ton (aus Löss und Kalkstein des Unteren Muschelkalks) über Kalksteinverwitterungsschutt des Unteren Muschelkalks.

5.9.6 Göttinger Wald c

Der Boden Göttinger Wald c befindet sich am nordwestlich ausgerichteten Kulminationsbereich des Totenbergs im Göttinger Stadtwald und ist schwach geneigt. In Tabelle 39 sind die wichtigsten Daten zu diesem Boden zusammengestellt.

Tab. 39: Göttinger Wald c (GOWc) – Ergebniszusammenstellung

Tab. 39a:

GOWc	Tiefe	X ^d	T ^e	fU	mU	gU	S	gU/ fU	CaCO ₃	C _{org}	pH	Quarz ^f	Q ^f / gU
	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]		[%]	[%]	CaCl ₂	[%]	
Ah	0-5	0	30	8	24	37	1	4,7	0	3,0	4,1	50	1,3
Ah+Bv-Al	5-23	0	30	8	23	39	1	5,1	0	2,1	3,9	50	1,3
Bvt	Mb. ^a 23-30	0	39	7	20	33	1	4,9	0	1,3	4,4	46	1,4
Bvt-Tv	30-40	15	53	4	16	26	1	7,1	0	1,1	5,5	31	1,2
Bvt-Tv+cCv	40-60	70	55	7	13	25	1	3,8	0	1,2	6,3	27	1,1
cCv1	Fm. ^b 60-70	-	58	6	15	21	0	3,8	28	0,8	7,4	31	1,5
cCv2	70-90	-	49	6	16	28	1	4,7	30	0,7	7,4	35	1,2
Bvt-Tv+cCv	40-60	-	52	17	19	12	1	0,7	98	-	-	24	2,0
cCv1	St. ^c 60-70	58	56	15	19	10	1	0,6	97	-	-	23	2,4
cCv2	70-90	61	57	16	16	10	0	0,6	96	-	-	23	2,3

^{a-f} siehe Erläuterungen Tab. 34a

Tab. 39b:

GOWc	Tiefe	Fe _o ^g	Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _d / T ^h	Tv ⁱ	SiO ₂ ^j	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	T/ Al ₂ O ₃	I ^k
	[cm]	[g/kg]				[%]	[%]	[%]	[%]		
Ah	0-5	2	12	0,20	0,41	0,2	67	14	4	2,1	II II IV IV III
Ah+Bv-Al	5-23	2	12	0,19	0,42	0,8	68	15	4	2,0	
Bvt	Mb. ^a 23-30	2	15	0,16	0,40	5,8	64	17	5	2,3	
Bvt-Tv	30-40	3	19	0,16	0,36	16,5	59	20	6	2,7	
Bvt-Tv+cCv	40-60	3	21	0,16	0,39	-	57	20	7	2,7	
cCv1	Fm. ^b 60-70	2	13	0,13	0,31	-	59	19	6	3,0	
cCv2	70-90	1	11	0,12	0,33	-	60	18	6	2,7	
Bvt-Tv+cCv	40-60	-	-	-	-	-	57	20	8	2,7	
cCv1	St. ^c 60-70	-	-	-	-	-	53	18	12	3,1	
cCv2	70-90	-	-	-	-	-	55	19	9	3,0	

^{g-k} siehe Erläuterungen Tab. 34b

Tab. 39c:

horizontübergreifende Berechnungsergebnisse (vgl. Kapitel 5.7–5.8)	Pedon GOWc
gemittelter Variationskoeffizient Mineralboden	9
Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]	41
Masse Lösungsrückstand am Mineralboden [kg/m ²]	221
geschätzte Masse Lösungsrückstand in 14.500 Jahren [kg/m ²]	21

Aus diesen Daten werden die folgenden Hinweise zum Ausgangsmaterial abgeleitet und in der Synthese zusammengeführt.

Hinweise auf Löss:

- Die Grobschluffgehalte und der gU/fU-Quotient sind im labortechnisch gewonnenen Lösungsrückstand der Kalksteine deutlich niedriger als in den Mineralbodenhorizonten und im Feinmaterial, das zeigt eine Einmischung von Löss bis in den cCv2 an.
- Die Quarzgehalte sind insbesondere in den ersten drei Horizonten gegenüber dem aus dem Kalkstein gewonnenen Lösungsrückstand deutlich erhöht und bewegen sich in einer für Löss typischen Größenordnung (vgl. Kapitel 5.4.1).

Hinweise auf Lessivierung:

- Die Dünnschliffe zeigen Tonverlagerungsmerkmale vom ersten bis zum vierten Horizont (der fünfte wurde nicht beprobt). Mit zunehmender Tiefe steigt der Anteil an kräftigen und reinen Toncutanen.

Hinweise auf Residualton:

- Der Tongehaltssprung zwischen Oberboden und tonreichstem Horizont beträgt 25 Prozentpunkte – ungewöhnlich viel für Lessivierung.
- Der mit der Tiefe zunehmende Fe_o-Gehalt deutet auf einen Schichtwechsel hin. Fe_o würde in einschichtigen Braunerden und Parabraunerden abfallen (BLUME & SCHWERTMANN 1969).
- Der Siliziumgehalt nimmt mit zunehmender Tiefe ab, Aluminium und Eisen nehmen zu. Dies ist ein Hinweis auf Lessivierung. Da aber der Quotient Ton/Aluminium im tonreichsten Horizont zunimmt, deutet dies in erster Linie auf einen Schichtwechsel hin. Lessivierung wird dadurch jedoch nicht ausgeschlossen.

Synthese

Der Boden Göttinger Wald c ist der tiefgründigste der drei Böden im Göttinger Wald. Der berechnete Anteil an Lösungsrückstand beträgt 41 %, das ist deutlich weniger als in den vorhergehenden zwei Böden. Die berechnete Masse an Lösungsrückstand ist mit 221 kg/m² ähnlich hoch wie in Göttinger Wald b. Die Dünnschliffe zeigen, dass Löss und Lösungsrückstand auf der Ebene einzelner Minerale (periglaziäre Prozesse) und auch in Form ganzer Aggregate vermischt wurden. Die Vermischung erfasst nicht alle Horizonte im Mineralboden gleichermaßen. Der gemittelte Variationskoeffizient im Mineralboden ist mit 9 der höchste der drei Böden im Göttinger Wald. Die oberen Horizonte sind stärker lössgeprägt als die unteren. Ein deutlicher Schichtwechsel innerhalb der Mineralbodenhorizonte fehlt jedoch, der Inhomogenitätsindex erreicht maximal die Klasse IV. Der Boden weist eine starke Tonverlagerung auf, insbesondere der Bvt-Tv-Horizont zeigt eine große Anzahl kräftiger und reiner Toncutane in Poren und Aggregaten.

Die für einen Tv-Horizont erforderlichen 65 % Ton (AG BODEN 2005) werden nicht erreicht. Mögliche Gründe hierfür sind die Vermischung mit Löss, aber auch die Beschaffenheit des Kalksteins, dessen unlöslicher Rückstand nur 57 % Ton enthält. Da der Lössanteil im Mineralboden überwiegt, wird eine **Terra fusca-Parabraunerde** auskartiert. Die Bodenform lautet: Terra fusca-Parabraunerde aus periglaziärem Ton (aus Kalkstein des Unteren Muschelkalks und Löss) über Kalksteinverwitterungsschutt des Unteren Muschelkalks.

5.9.7 Röhringsberg a

Der Boden Röhringsberg a befindet sich am nordöstlichen Kulminationsbereich des Röhringsbergs unter Laubwald. Die unmittelbare Profillumgebung ist nicht geneigt. Die wichtigsten Daten zu diesem Boden sind in Tabelle 40 aufgeführt.

Tab. 40: Röhringsberg a (RBa) – Ergebniszusammenstellung

Tab. 40a:

RBa	Tiefe [cm]	X ^d [%]	T ^e [%]	fU [%]	mU [%]	gU [%]	S [%]	gU/fU	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	pH CaCl ₂	Quarz ^f [%]	Q ^f /gU
Ah	0-6	0	44	11	20	21	4	1,8	0	4,0	4,5	37	1,8
Alh-Bv Mb. ^a	6-20	0	46	11	19	20	3	1,8	0	1,8	4,2	41	2,0
IIBt-Tv	20-35	20	74	7	7	10	1	1,3	0	2,2	5,6	19	1,9
cmCv St. ^c	35-45	-	64	19	12	5	1	0,3	99	-	-	16	3,3

^{a-f} siehe Erläuterungen Tab. 34a

Tab. 40b:

RBa	Tiefe [cm]	Fe _o ^g [g/kg]	Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _d / T ^h	Tv ⁱ [%]	SiO ₂ ^j [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	T/ Al ₂ O ₃	I ^k
Ah	0-6	4	16	0,23	0,38	0,1	59	18	5	2,5	II IV VII
Alh-Bv Mb. ^a	6-20	3	17	0,20	0,38	0,7	60	19	5	2,4	
IIBt-Tv	20-35	4	21	0,19	0,29	10,7	51	23	6	3,3	
cmCv St. ^c	35-45	-	-	-	-	-	47	18	18	3,6	

^{g-k} siehe Erläuterungen Tab. 34b

Tab. 40c:

horizontübergreifende Berechnungsergebnisse (vgl. Kapitel 5.7–5.8)	Pedon RBa
gemittelter Variationskoeffizient Mineralboden	6
Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]	66
Masse Lösungsrückstand am Mineralboden [kg/m ²]	259
geschätzte Masse Lösungsrückstand in 14.500 Jahren [kg/m ²]	13

Aus diesen Daten werden die folgenden Hinweise zum Ausgangsmaterial abgeleitet und in der Synthese zusammengeführt.

Hinweise auf Löss:

- Im Mineralboden sind sowohl der Grobschluffgehalt als auch der Quarzgehalt gegenüber dem Lösungsrückstand des Kalksteins deutlich erhöht. Beides ist auf Lössmischungen zurückzuführen (die Zusammensetzung von Löss in der näheren Umgebung des Bodens ist in Tabelle 28 aufgeführt).
- Der Quotient aus gU/fU liegt im Lösungsrückstand des Kalksteins bei nur 0,3 und steigt im Mineralboden durch den zunehmenden Lössanteil kontinuierlich an.

Hinweise auf Lessivierung:

- Toncutane treten insbesondere im dritten, tonreichsten Horizont auf, der Anteil an Toncutanbruchstücken ist hier sehr hoch.

Hinweise auf Residualton:

- Der IIBt-Tv-Horizont enthält mit 74 % weitaus mehr Ton als für Parabraunerden typisch ist (vgl. WIECHMANN 2000).
- Lessivierung allein reicht nicht aus, um einen Tongehaltssprung von 28 Prozentpunkten zwischen Oberboden und tonreichstem Horizont zu erzeugen (vgl. Kapitel 5.2.3).
- Die Siliziumgehalte nehmen mit der Tiefe ab, Aluminium und Eisen zu. Das ist ein Hinweis auf Lessivierung. Da der Quotient Ton/Aluminium aber zunimmt, deutet dies auf einen durch Residualton bedingten Schichtwechsel hin, der Lessivierung jedoch nicht ausschließt.

Synthese

Der Boden Röhringsberg a ist trotz seiner Geringmächtigkeit sowohl von Lösungsrückstand als auch Löss geprägt. Der berechnete Anteil an Lösungsrückstand am Mineralboden beträgt 66 % und weist eine Masse von 259 kg/m² auf. Der Inhomogenitätsindex von IV zwischen dem zweiten und dem dritten, tonreichsten Horizont zeigt Inhomogenität, aber keinen vollständigen Substratwechsel an. Der Tongehaltssprung zwischen diesen beiden Horizonten ist mit 28 Prozentpunkten jedoch sehr hoch. Das hat dazu geführt, einen Schichtwechsel in die Horizontbezeichnung aufzunehmen.

Die Dünnschliffe zeigen, dass Löss und Lösungsrückstand auf der Ebene einzelner Minerale (periglaziäre Prozesse) und auch in Form ganzer Aggregate innerhalb des Mineralbodens vermischt wurden. Tonverlagerungsmerkmale treten überwiegend im tonreichsten Horizont auf. Es können zwei unterschiedliche Verlagerungsphasen im Boden unterschieden werden.

Da der tonreichste Horizont weit mehr als 65 % Ton aufweist und innerhalb von 3 dm unter der Geländeoberfläche beginnt, wird der Boden als **lessivierte Terra fusca**

angesprochen. Die Bodenform lautet: lessivierte Terra fusca aus periglaziärem Ton (aus Löss und Kalkstein des Unteren Muschelkalks) über Kalksteinverwitterungsschutt des Unteren Muschelkalks.

5.9.8 Röhringsberg b

Der Boden Röhringsberg b befindet sich am nordöstlichen Kulminationsbereich des Röhringsbergs unter Laubwald. Die unmittelbare Profilumgebung ist sehr schwach geneigt. In Tabelle 41 sind die wichtigsten Daten zu diesem Boden zusammengestellt.

Tab. 41: Röhringsberg b (RBb) – Ergebniszusammenstellung

Tab. 41a:

RBb	Tiefe [cm]	X ^d [%]	T ^e [%]	fU [%]	mU [%]	gU [%]	S [%]	gU/fU	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	pH CaCl ₂	Quarz ^f [%]	Q ^f /gU
Ah	0-5	0	28	11	25	34	2	3,0	0	2,5	3,9	51	1,5
Al	5-23	0	23	10	26	39	2	3,7	0	1,1	4,0	59	1,5
Sw-Bt	Mb. ^a 23-36	0	33	9	22	35	2	3,9	0	0,5	4,3	48	1,4
IISd-Bvt-Tv	36-65	0	60	6	14	19	1	2,9	0	0,8	5,0	27	1,4
cCv	St. ^c 65-75	85	63	17	15	5	0	0,3	99,5	-	-	18	3,5

^{a-f} siehe Erläuterungen Tab. 34a

Tab. 41b:

RBb	Tiefe [cm]	Fe _o ^g [g/kg]	Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _d / T ^h	Tv ⁱ [%]	SiO ₂ ^j [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	T/ Al ₂ O ₃	I ^k
Ah	0-5	3	12	0,21	0,47	-	68	14	4	2,0	III
Al	5-23	2	9	0,27	0,41	0,6	72	14	3	1,6	II
Sw-Bt	Mb. ^a 23-36	3	12	0,23	0,36	4,6	67	17	4	1,9	IV
IISd-Bvt-Tv	36-65	4	21	0,19	0,36	18,5	56	22	7	2,7	VII
cCv	St. ^c 65-75	-	-	-	-	-	50	18	15	3,4	

^{g-k} siehe Erläuterungen Tab. 34b

Tab. 41c:

horizontübergreifende Berechnungsergebnisse (vgl. Kapitel 5.7–5.8)	Pedon RBb
gemittelter Variationskoeffizient Mineralboden	6
Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]	44
Masse Lösungsrückstand am Mineralboden [kg/m ²]	386
geschätzte Masse Lösungsrückstand in 14.500 Jahren [kg/m ²]	5

Aus diesen Daten werden die folgenden Hinweise zum Ausgangsmaterial abgeleitet und in der Synthese zusammengeführt.

Hinweise auf Löss:

- Im Mineralboden sind sowohl der Grobschluffgehalt als auch der Quarzgehalt gegenüber dem Lösungsrückstand des Kalksteins deutlich erhöht. Beides ist auf Lössmischungen zurückzuführen (die Zusammensetzung von Löss in der näheren Umgebung des Bodens ist in Tabelle 28 aufgeführt).
- Der Quotient aus gU/fU ist in den Mineralbodenhorizonten deutlich höher als im Kalksteinlösungsrückstand.

Hinweise auf Lessivierung:

- Insbesondere im dritten und vierten Horizont zeugen zahlreiche Toncutane an Poren und Verfüllungen von einer starken Tonverlagerung.

Hinweise auf Residualton:

- Lessivierung allein reicht in der Regel nicht aus, um einen Tongehaltssprung von 32 Prozentpunkten zwischen Oberboden und tonreichstem Horizont zu erzeugen (vgl. Kapitel 5.2.3).
- Der Siliziumgehalt nimmt ab dem zweiten Horizont mit der Tiefe ab, Aluminium und Eisen nehmen zu. Das ist ein Hinweis auf Lessivierung. Da aber der Quotient Ton/Aluminium zunimmt, deutet dies auf einen durch Residualton bedingten Schichtwechsel hin, der Lessivierung jedoch nicht ausschließt.
- Der mit der Tiefe zunehmende Fe_o -Gehalt deutet auf einen Schichtwechsel hin. Fe_o würde in einschichtigen Braunerden und Parabraunerden abfallen (BLUME & SCHWERTMANN 1969). Eine Beeinflussung der Werte durch Pseudovergleyung ist jedoch möglich.

Synthese

Der Boden Röhringsberg b ist mit 65 cm deutlich tiefgründiger als der um einen Meter höher am Hang positionierte Boden Röhringsberg a. Dies ist sowohl auf einen höheren Lössanteil als auch eine höhere Masse an Lösungsrückstand zurückzuführen. Der berechnete Anteil an Lösungsrückstand am Mineralboden beträgt 44 % und weist eine Masse von 386 kg/m² auf. Wie im Boden Röhringsberg a besteht eine Inhomogenität (IV), aber kein vollständiger Schichtwechsel zwischen dem tonreichsten Horizont und dem darüber liegenden Horizont. Der Tongehaltssprung zwischen diesen beiden Horizonten ist mit 27 Prozentpunkten ungewöhnlich hoch und hat eine wasserstauende Wirkung, so dass der Schichtwechsel in die Horizontbezeichnung mit aufgenommen wurde (IISd-Bvt-Tv).

Tonverlagerungsmerkmale finden sich vom zweiten bis zum vierten, tonreichsten Horizont (aus dem ersten Horizont wurde kein Dünnschliff entnommen). Insbesondere der vierte Horizont enthält eine sehr hohe Anzahl an mit reinem, gut orientiertem Ton ausgekleideten Poren und verfüllten Poren und Aggregatzwischenräumen. Weiterhin kann anhand der Dünnschliffe eine aufwärts wie abwärts gerichtete Vermischung

ganzer Aggregate, aber auch eine Vermischung auf der Ebene einzelner Minerale (periglaziäre Prozesse) identifiziert werden.

Es bestehen viele Parallelen zum Boden Röhringsberg a, allerdings ist der Tongehalt sowohl im Oberboden als auch im vierten, tonreichsten Horizont etwas geringer, der eingemischte Lössanteil somit höher.

Der Boden fällt durch eine leichte Inhomogenität zwischen dem Ah- und Al-Horizont auf. Die Tongehalte im Ah-Horizont sind etwas höher und die Grobschluffgehalte sowie die Quarzgehalte niedriger als im Al-Horizont. Möglicherweise ist eine lokale, nicht näher charakterisierbare Fremdmaterialbeimengung der Grund für die Differenzen.

Da Al- und Bt-Horizont zusammen nur eine Mächtigkeit von 36 cm aufweisen und die Pseudovergleyung verhältnismäßig schwach ausgebildet ist, wird die Bezeichnung "Terra fusca" als dominierendes Merkmal nach hinten gestellt: **pseudovergleyte Parabraunerde-Terra fusca**. Die Bodenform lautet: pseudovergleyte Parabraunerde-Terra fusca aus periglaziärem Ton (aus Löss und Kalkstein des Unteren Muschelkalks) über Kalksteinverwitterungsschutt des Unteren Muschelkalks.

5.9.9 Holzkirch

Das Peda Holzkirch (HOLZ) befindet sich auf der Lonetal-Flächenalb. Die unmittelbare Profilumgebung ist eben. Die wichtigsten Daten zu diesem Boden sind in Tabelle 42 aufgeführt.

Tab. 42: Holzkirch (HOLZ) – Ergebniszusammenstellung

Tab. 42a:

HOLZ	Tiefe [cm]	X ^d [%]	T ^e [%]	fU [%]	mU [%]	gU [%]	S [%]	gU/fU	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	pH CaCl ₂	Quarz ^f [%]	Q ^f /gU
Ah	0-7	<0,5	29	11	31	26	3	2,4	0,0	2,5	4,6	49	1,9
Al-Bv	7-22	<0,5	25	10	33	28	3	2,7	0,0	1,5	4,2	55	1,9
Btv Mb. ^a	22-40	<0,5	29	11	32	26	3	2,3	0,0	0,8	4,4	52	2,0
Bvt	40-57	0	43	10	25	20	2	2,0	0,0	0,4	4,7	45	2,2
IIBvt-Tv	57-70	0	64	6	16	12	2	2,2	0,0	0,5	5,4	29	2,4
Tv+cCv St. ^c	70-80	80	89	7	2	0	2	0,0	99,8	-	-	1	>100

^{a-f} siehe Erläuterungen Tab. 34a

Tab. 42b:

HOLZ	Tiefe	Fe _o ^g	Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _d / T ^h	Tv ⁱ	SiO ₂ ^j	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	T/ Al ₂ O ₃	I ^k
	[cm]	[g/kg]				[%]	[%]	[%]	[%]		
Ah	0-7	3	13	0,21	0,48	0,1	68	13	4	2,2	
Al-Bv	Mb. ^a 7-22	3	12	0,26	0,49	0,3	71	13	4	2,0	II
Btv	22-40	3	14	0,24	0,49	4,2	70	14	4	2,1	II
Bvt	40-57	3	20	0,14	0,47	10,0	62	17	6	2,5	III
IIBvt-Tv	57-70	3	28	0,09	0,45	11,8	57	21	8	3,0	III
Tv+cCv	St. ^c 70-80	-	-	-	-	-	32	17	23	5,3	VII

^{g-k} siehe Erläuterungen Tab. 34b

Tab. 42c:

horizontübergreifende Berechnungsergebnisse (vgl. Kapitel 5.7–5.8)	Pedon HOLZ
gemittelter Variationskoeffizient Mineralboden	5
Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden [%]	26
Masse Lösungsrückstand am Mineralboden [kg/m ²]	245
geschätzte Masse Lösungsrückstand in 14500 Jahren [kg/m ²]	4

Aus diesen Daten werden die folgenden Hinweise zum Ausgangsmaterial abgeleitet und in der Synthese zusammengeführt.

Hinweise auf Löss:

- Die Grobschluffgehalte im Mineralboden, der gU/fU-Quotient und der Quarzgehalt sind gegenüber den Gehalten im unlöslichen Rückstand des Kalksteins stark erhöht. Das deutet auf einen hohen äolischen Fremdeintrag hin (die Zusammensetzung von Löss in der näheren Umgebung des Bodens ist in Tabelle 28 aufgeführt).

Hinweise auf Lessivierung:

- Tonverlagerungsmerkmale nehmen mit der Tiefe deutlich zu.
- Fe_o bleibt stabil, Fe_d steigt mit zunehmender Tiefe an, dies ist typisch für Parabraunerden (BLUME & SCHWERTMANN 1969).
- Obwohl der Tongehalt stark ansteigt, ändern sich die Quotienten gU/fU und der Inhomogenitätsindex nur wenig.

Hinweise auf Residualton:

- Der Tongehalt des tonreichsten Horizontes von 64 % und der Tongehaltsunterschied zwischen Oberboden und tonreichstem Horizont von 35 % sind zu hoch, um allein durch Lessivierung erzeugt worden zu sein (vgl. WIECHMANN 2000).
- Die Siliziumgehalte fallen bis zum tonreichsten Horizont, Aluminium und Eisen steigen an. Das ist ein Hinweis auf Lessivierung. Da der Quotient

Ton/Aluminium aber leicht zunimmt, deutet das auf einen durch Residualton bedingten Schichtwechsel hin, der Lessivierung jedoch nicht ausschließt.

Synthese

Der Boden Holzkirch weist viele Parallelen zu seinen norddeutschen Pendanten auf. Der berechnete Anteil an Lösungsrückstand am Mineralboden ist mit 26 % eher niedrig, die Masse von 245 kg/m² ist ähnlich hoch wie in den anderen untersuchten Böden. Obwohl zwischen Oberboden und tonreichstem Horizont mit 64 % Ton ein Tongehaltssprung von 35 Prozentpunkten liegt, geht der Inhomogenitätsindex nicht über III hinaus. Auf Grund des großen Tongehaltssprungs von 21 Prozentpunkten zwischen dem vierten und dem fünften tonreichsten Horizont wurde der Schichtwechsel dennoch in die Horizontbezeichnung mit aufgenommen. Dieser ist teilweise auf Tonverlagerung zurückzuführen.

Lessivierung ist ein prägendes Merkmal dieses Bodens: Im zweiten Horizont sind die Toncutane dünn und überwiegend staubig und gräulich, sie werden im 3. Horizont schon etwas kräftiger und sind im 4. Horizont gelblich und deutlich mikrolaminiert mit reinen und staubigen Laminen. Im tonreichsten Horizont dominieren Toncutanbruchstücke und Verfüllungen. Interessant sind die c/f_{10} -Verhältnisse des tonreichsten, fünften Horizontes: sie betragen zu 60 % 0,5/9,5 und zu 40 % 5/5. Da im Lösungsrückstand des Steins 89 % Ton enthalten sind, handelt es sich bei den 60 % sehr wahrscheinlich um reinen Residualton. Dennoch ist Residualton zu geringen Anteilen auch in die oberen Horizonte eingearbeitet. Die Vermischung erfolgte auf der Ebene ganzer Aggregate, diese sind in den oberen vier Horizonten jedoch nicht so tonreich wie im fünften Horizont. Eine Vermischung auf der Ebene einzelner Minerale lässt sich ebenfalls feststellen, wobei die c/f_{10} -Verhältnisse in den oberen beiden Horizonten bereits stark dem c/f_{10} -Verhältnis des in der näheren Umgebung anstehenden Lösses gleichen (vgl. Tab. 25).

Ein weiterer Nachweis für die Einmischung von Residualton bis in den Oberboden sind vereinzelt vorkommende Feuersteine von ca. 1 cm Durchmesser im ersten bis dritten Horizont und ein Bohnerz-Kügelchen im dritten Horizont. Beides sind Relikte bzw. Produkte der Kalksteinverwitterung und laut Geologischer Karte 1:25 000 auch in der weiteren Profilumgebung vorhanden (LGRB 1997, SCHALL 2002 bzw. Kapitel 3.5).

Der Carbonatgehalt des anstehenden Kalksteins ist mit 99,8 % extrem hoch, das bedingt die geringe geschätzte Masse an Lösungsrückstand von nur 4 kg/m² in 14500 Jahren. Da zudem die Profilumgebung relativ eben ist und nur wenig Akkumulation oder Abtrag erfahren haben dürfte, die das Ergebnis erheblich beeinflussen können, spricht viel für ein hohes Alter des Residualtons. Dennoch könnte das Ergebnis anders ausfallen, wird nicht der carbonatreiche Massenkalk als Berechnungsgrundlage genommen, sondern Zementmergel. Zementmergel steht in der näheren Umgebung an und liegt in der Schichtfolge über dem Massenkalk (vgl. Kapitel 3.5). Daher könnte der Lösungsrückstand im Mineralboden teilweise auch aus einer bereits verwitterten Zementmergelschicht mit höherem Nichtcarbonatanteil stammen. Das Alter des

Bodens kann daher nicht genau abgeschätzt werden, wenngleich eine Hauptbildungsphase des Lösungsrückstandes in den pleistozänen Warmzeiten sehr wahrscheinlich ist. Sowohl KÖSEL (2002) als auch HEMME (1970) nehmen dies insbesondere für die weniger lössbeeinflussten mächtigen Terra fusca auf der Flächenalb an.

Es bleibt festzuhalten, dass der Boden Holzkirch im Oberboden von Löss, im Unterboden bzw. tonreichsten Horizont von Residualton dominiert wird und in den Horizonten dazwischen die beiden Ausgangsmaterialien schrittweise ineinander übergehen. Zusätzlich weist der Boden eine starke Tonverlagerung auf, so dass sich als Bodentyp eine **verbraunte Terra fusca-Parabraunerde** ergibt. Die Bodenform lautet: verbraunte Terra fusca-Parabraunerde aus periglaziärem Ton (aus Kalkstein des Juras und Löss).

5.10 Bodensystematische Einordnung – Hilfen für die Kartierung

Die Einordnung der untersuchten Böden in die bestehende Bodensystematik erfolgte nach Abschluss aller Untersuchungen und ist im Kapitel 5.9 für jeden Boden näher erläutert. Dabei wurden Schwächen der Kartieranleitung (AG BODEN 2005) deutlich und Abwandlungen notwendig, die im Folgenden diskutiert werden.

Die tonreichsten Horizonte sind für die bodensystematische Einordnung von großer Bedeutung. Laut Kartieranleitung kann ein Boden erst dann als Normterra fusca angesprochen werden, wenn die Tongehalte im Tv-Horizont über 65 Masse-% liegen. In einigen der untersuchten Böden erreicht der unlösliche Rückstand der Kalksteine geogen bedingt diesen Tonanteil jedoch nicht (Tab. 43).

Tab. 43: Tongehalte (Masse-% Ton) des tonreichsten Horizontes (tonr. Hor.) eines Bodens und des unlöslichen Kalksteinlösungsrückstandes (Stein) des darunter liegenden Horizontes

	SBa	SBb	HARD	GOWa	GOWb	GOWc	RBa	RBb	HOLZ
tonr. Hor.	67	68	77	60	62	55	74	60	64
Stein	70	73	45	75	62	56	64	63	89

Fünf der neun untersuchten Kalksteinlösungsrückstände weisen weniger als 65 % Ton auf (grau hinterlegt). Der niedrigste Tongehalt beträgt nur 45 %. Insbesondere in diesem Fall kann bezweifelt werden, dass im Verlauf der Pedogenese durch Kryoklastik oder Tonneubildung die für eine Normterra fusca erforderlichen 65 % erreicht werden. In der Praxis bedeutet dies, dass weitgehend lössunbeeinflusste Böden aus Carbonatgestein möglicherweise nicht als Normterra fusca auskartiert werden können, weil sie den erforderlichen Tongehalt nicht erreichen. Auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse wird daher vorgeschlagen, 45 % Ton als Untergrenze zur Benennung einer Normterra fusca anzuwenden. In weiteren Untersuchungen sollte geklärt werden, ob Kalksteinlösungsrückstände unverwitterter Kalksteine noch niedrigere Tongehalte aufweisen können. In diesem Fall wäre auch ein Wegfall des Kriteriums „Tongehalt“ zu diskutieren. Beispielsweise beschreiben SCHEFFER et al. (1960) Schichtverbände aus dem Kimmeridge und dem Turon mit sandigem Lösungsrückstand, geben jedoch keine Prozentangaben an. Die Literaturrecherche ergab, dass dieses Kriterium erst mit der 3. Auflage der Kartieranleitung eingeführt wurde (AG Boden 1971, AG Boden 1982).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden des Weiteren tonreiche Horizonte mit mehr als 65 % Ton gefunden, die zusätzlich einen deutlichen Lössanteil aufwiesen. Dieser kann anhand des Grobschluffgehaltes belegt werden, der in den unlöslichen Rückständen der untersuchten Kalksteine nur in geringen Mengen vorkommt. Diese Horizonte werden in dieser Ausarbeitung als Bv-Tv oder Bt-Tv bezeichnet.

Diese Arbeit zeigt ferner, dass die bodensystematisch korrekte Ansprache der Böden auf Carbonatgestein mit Lösseinfluss über die Feldansprache nur schwer zu erreichen

ist. Dies ist auf die schwierige visuelle Unterscheidung von Kalksteinlösungsrückstand und lössbürtigen Tonanreicherungshorizonten zurückzuführen. Auch konnte kein Element oder Mineral identifiziert werden, das spezifisch für Löss oder Kalkstein bzw. Kalksteinlösungsrückstand ist. Allerdings erwies sich der Grobchluffgehalt mit seinen unterschiedlichen Anteilen im Löss bzw. Lösungsrückstand als geeignetes und relativ leicht zu messendes Unterscheidungskriterium. Daher sollten für eine präzise Ansprache dieser Böden mindestens die Ton- und Grobchluffgehalte im Mineralboden sowie im unlöslichen Rückstand der Carbonatgesteine untersucht werden. Der Grobchluffgehalt im Löss kann für viele Gebiete aus Literaturangaben entnommen werden. Zusätzlich wird die Anfertigung von Dünnschliffen empfohlen, da die Untersuchungen zeigen, dass Tonverlagerungsmerkmale häufig vorhanden, aber makroskopisch schwer zu identifizieren sind. Sie beschränken sich größtenteils auf Toncutanbruchstücke im Aggregatinnern. Einschränkend ist zu beachten, dass es nicht nur im Löss sondern auch in Terra fuscen bzw. Tv-Horizonten zu Tonverlagerung kommen kann (KUBIENA 1953). Es findet jedoch in der Regel keine Differenzierung in Al- und Bt-Horizonte statt (SCHEFFER et al. 1960).

Auf der Grundlage dieser Vorgaben wurde ein Fließschema entwickelt, das die bodensystematische Einordnung von Böden auf Carbonatgestein mit Lösseinfluss erleichtern soll (Abb. 32):

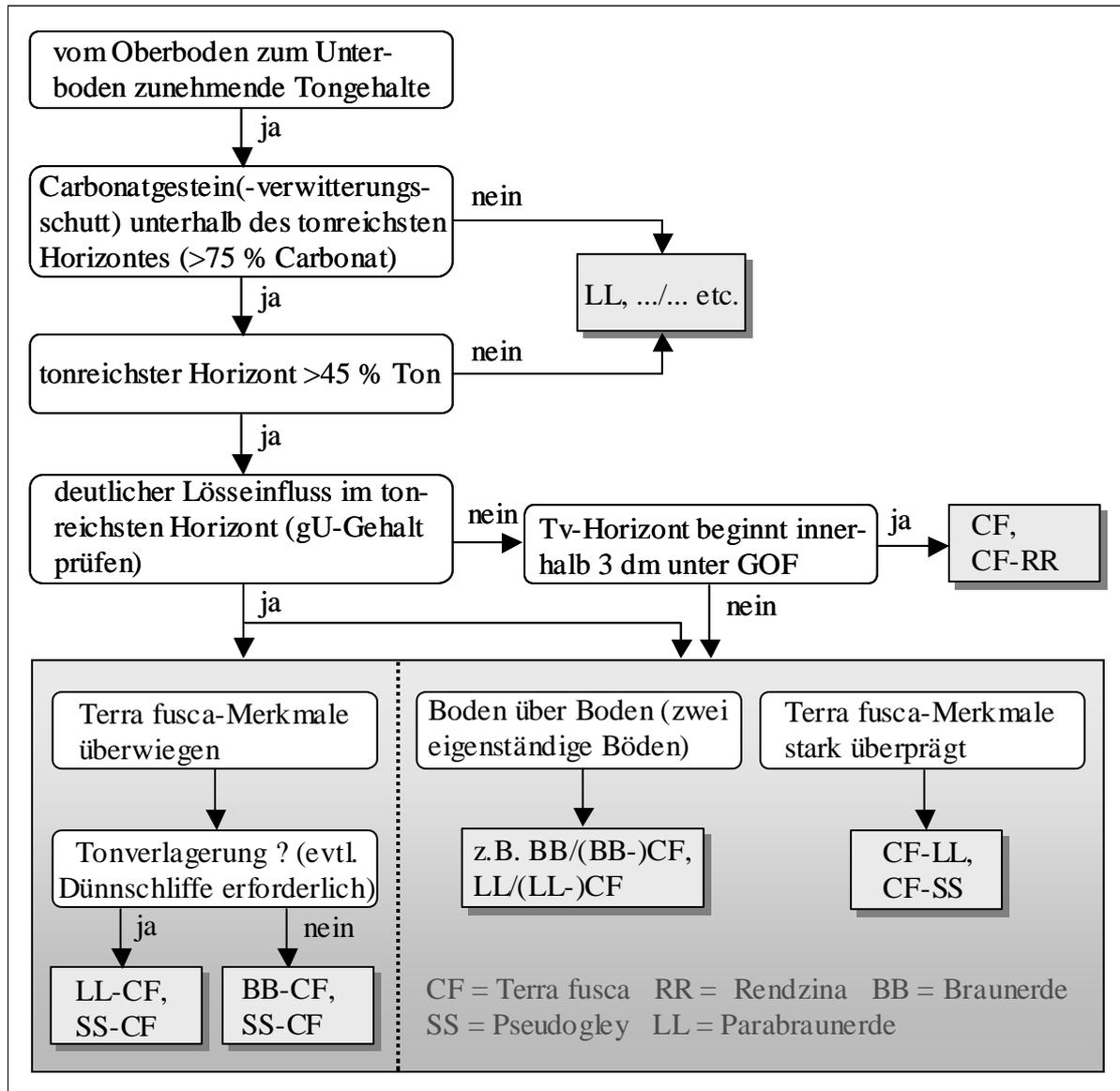


Abb. 32: Fließdiagramm zur bodensystematischen Einordnung von Böden mit tonreichen Unterbodenhorizonten auf Carbonatgestein im norddeutschen Berg- und Hügelland

Das Schema basiert auf der im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesenen Beteiligung von Löss und Kalksteinlösungsrückstand an der Pedogenese der untersuchten Böden mit tonreichen Unterbodenhorizonten. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Ergebnis auch auf weitere Standorte im norddeutschen Berg- und Hügelland übertragbar ist.

Die bodentypologische Benennung richtet sich nach dem profilprägenden Ausgangssubstrat. Bei einem hohen Lössanteil in Kombination mit einer starken Überprägung der Terra fusca-Merkmale durch Lessivierung oder Pseudovergleyung wird das „Terra fusca“ nach vorn gestellt. In Fällen, in denen sich Löss kaum mit dem liegenden Residualton vermischt hat und sich zwei relativ eigenständige Böden erhalten konnten, kann eine Überlagerung (Boden über Boden) auskartiert werden. Voraussetzung ist, dass der Tv-Horizont innerhalb von 7 dm unter Geländeoberfläche beginnt. Das

Schema stellt eine Entscheidungshilfe für den Kartierer dar, indem es die Möglichkeiten aufzeigt.

Als zusätzliches Unterscheidungskriterium zwischen Löss und Residualton kann der Steinanteil im Tv-Horizont herangezogen werden. Kalksteine deuten auf eine Residualtonbildung hin. Die untersuchten Böden zeigen häufig einen nach unten zunehmenden Steinanteil. Oft finden sich bereits mit Beginn der tonreichen Horizonte erste Kalksteine. Da große Kalksteine auf Grund ihrer geringen Oberfläche verwitterungsstabiler sind, bleiben sie am längsten im Boden erhalten und bilden unterhalb der tonreichen Horizonte manchmal eine schwache Steinsohle, z. B. Foto 2, Sentruper Berg b (Kapitel 5.1.1). Erst danach beginnt der eigentliche Verwitterungsgrus. Allerdings können Kalksteine auch durch Baumwürfe in einen ansonsten rein lössbürtigen Bt-Horizont gelangen. Daher ist dieses Kriterium nur bedingt anwendbar.

Welche Unsicherheiten und Schwierigkeiten hinsichtlich der Ansprache von Böden aus Carbonatgestein mit Lössauflage bestehen, wird anhand der Bodenkundlichen Karte im Maßstab 1:50 000 am Sentruper Berg deutlich (LBEG 2008a). Am Standort Sentruper Berg a wurde ein Pelosol auskartiert, wohl auf Grund der hohen Tongehalte der Oberböden, die jedoch die für eine Terra fusca erforderlichen 65 % Ton nicht erreichen. Am Standort Sentruper Berg b wurde eine Pseudogley-Parabraunerde angesprochen. Die Beteiligung von Lösungsrückstand der Kalksteinverwitterung an der Genese kommt nicht zum Ausdruck, obwohl dieser die hohen Tongehalte bzw. den Tongehaltssprung zwischen Ober- und Unterboden maßgeblich hervorruft. In der nach Abbildung 32 vorgenommenen Benennung der Böden wird der Residualton durch die Einbindung des Bodentyps Terra fusca kenntlich gemacht (vgl. Kapitel 5.9.1 und 5.9.2).

5.11 Kalksteinverwitterungsböden mit Lössauflage – eine zeitliche und genetische Einordnung

Aus den durchgeführten Untersuchungen an den neun Böden ergeben sich nachstehende, für eine genetische Einordnung wichtige Eigenschaften:

- Alle untersuchten Böden bestehen zu unterschiedlichen Anteilen aus Lösungsrückstand und Löss, sie sind auf Kuppen, Hochplateaus und an Oberhängen verbreitet.
- Tonverlagerung tritt in allen Böden mit Ausnahme vom flachgründigsten Peda Göttinger Wald a auf. Auch die tonreichsten Horizonte zeigen noch zahlreiche Tonverlagerungsmerkmale. Allerdings fehlen ausgeprägte Al-Horizonte.
- Die Massenbilanzierung ergibt, dass die Mineralbodenhorizonte der Peda zu 21 bis 93 % aus Lösungsrückstand der Kalksteinverwitterung bestehen. Die berechnete Masse des Rückstands bewegt sich zwischen 146 und 386 kg/m³.
- Lösungsrückstand und Löss sind durch Homogenisierungsprozesse auf der Ebene einzelner Bodenteilchen und in Form ganzer Aggregate in unterschiedlichem Ausmaß miteinander vermischt.
- Die hohen kalksteinbürtigen Rückstandsmengen lassen vermuten, dass der Lösungsrückstand teilweise bereits in vorangegangenen Interglazialen/-stadien gebildet worden ist. Die Dünnschliffauswertungen zeigen zudem, dass in den Böden am Sentruper Berg der tonreichste Horizont sehr wahrscheinlich schon vor der Lössanwehung vorhanden gewesen ist.

Aus diesen Erkenntnissen und durch Auswertungen der vorhandenen Literatur wird versucht, die Genese und die zeitliche Entwicklung der untersuchten Kalksteinverwitterungsböden in Norddeutschland zu rekonstruieren und eine auf weitere Standorte übertragbare genetische Modellvorstellung abzuleiten. Diese wird im Folgenden dargestellt.

Saale-Komplex

Für die Entstehung der untersuchten Böden sind insbesondere die letzten beiden Kalt- bzw. Warmzeiten von prägender Bedeutung. Von den Eismassen der Saale-Vereisung wurden die Böden am Sentruper Berg während des Drenthe-Stadiums vollständig überfahren, alle weiteren Standorte unterlagen ausschließlich dem Permafrost (vgl. Kapitel 3). Aus der Holstein-Warmzeit erhaltene Böden sind vermutlich entweder direkt durch das Eis oder aber durch periglaziale Solifluktionsprozesse größtenteils abgetragen worden. LIEDTKE (1981) beschreibt, dass die Solifluktion im feucht-kühlen Klima zu Beginn einer Kaltzeit am intensivsten ist und mit zunehmenden Trockenphasen eines Hochglazials abnimmt. Laut BÜDEL (1937) tritt sie noch auf flachen Hängen bis zu Neigungen von 2 Grad auf.

Oberflächennah anstehender Kalkstein konnte infolgedessen leicht physikalisch verwittern (Frostsprengung) und steinreiche Verwitterungsschuttdecken entstanden

(BETZER 2003). Während des Warthe-Stadiums setzte vermehrt Lössanwehung ein (Abb. 33). Der Löss dürfte besonders an Berghängen und Kuppen ebenfalls einem solifluidalen Abtrag bzw. einer Umlagerung unterlegen haben. Dabei wurde wahrscheinlich auch Löss in den Kalksteinverwitterungsschutt eingearbeitet. Das kann die hohen Grobschluffgehalte im carbonathaltigen Feinmaterial der Böden Sentruper Berg b und Göttinger Wald a und c erklären.

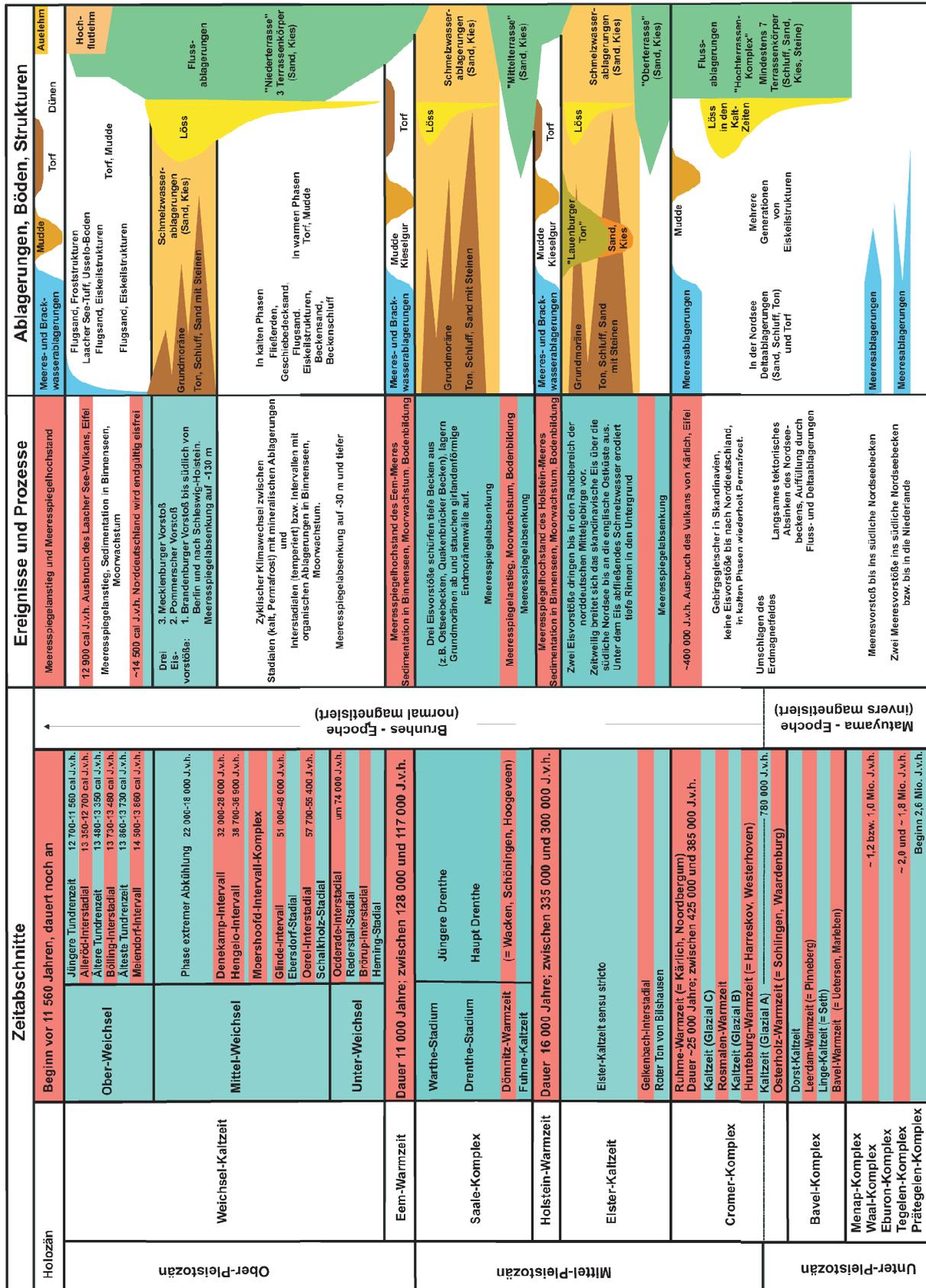


Abb. 33: Das Quartär in Niedersachsen und benachbarten Gebieten (STREIF et al. 2007)

Eem-Warmzeit

In der 11000 Jahre andauernden Eem-Warmzeit vollzog sich eine intensive Bodenbildung, die Julitemperaturen lagen im Schnitt 2 °C höher als heute und auch die Niederschläge waren vermutlich etwas ergiebiger (MENKE 1981). In Lösspaleoböden wurden kräftig entwickelte Bt-Horizonte gefunden (ROHDENBURG & MEYER 1966). Dies lässt vermuten, dass auch auf dem Kalksteinverwitterungsschutt der Kuppen und an Hängen Decken aus Lösungsrückstand entstanden. Es ist denkbar, dass stellenweise auch noch Lösungsreste aus der Kalksteinverwitterung vorangegangener Warmzeiten vorhanden waren und von der erneuten Bodenbildung absorbiert wurden. Daher wird diese Schicht im weiteren Verlauf nicht als eemzeitlich sondern als „präweichselzeitlich“ angesprochen.

Weichsel-Kaltzeit

Mit der Weichsel-Kaltzeit wurden die norddeutschen Mittelgebirge erneut Periglazialgebiet (KARTE 1987) und Solifluktuationsprozesse setzten wieder ein (EHLERS 1994). Je nach Exposition, Vernässungsgrad und Hangneigung dürfte dies an Oberhängen und Kuppen zum vollständigen Abtrag, zu Umlagerungen und an Hangfüßen auch zu Akkumulation der präweichselzeitlichen Böden geführt haben. Verwitterungsschuttdecken der Kalksteinverwitterung konnten sich in dieser Zeit in Abhängigkeit des Überdeckungsgrades weiter vertiefen und stellenweise erneut bilden (SKUPIN 2003). In den Interstadialen setzte eine geringfügige Bodenbildung ein (ROHDENBURG & MEYER 1966). Abbildung 34 zeigt den Zustand zu Beginn der Weichsel-Kaltzeit an einem idealisierten und überhöht dargestellten Schnitt durch einen Kalksteinrücken.

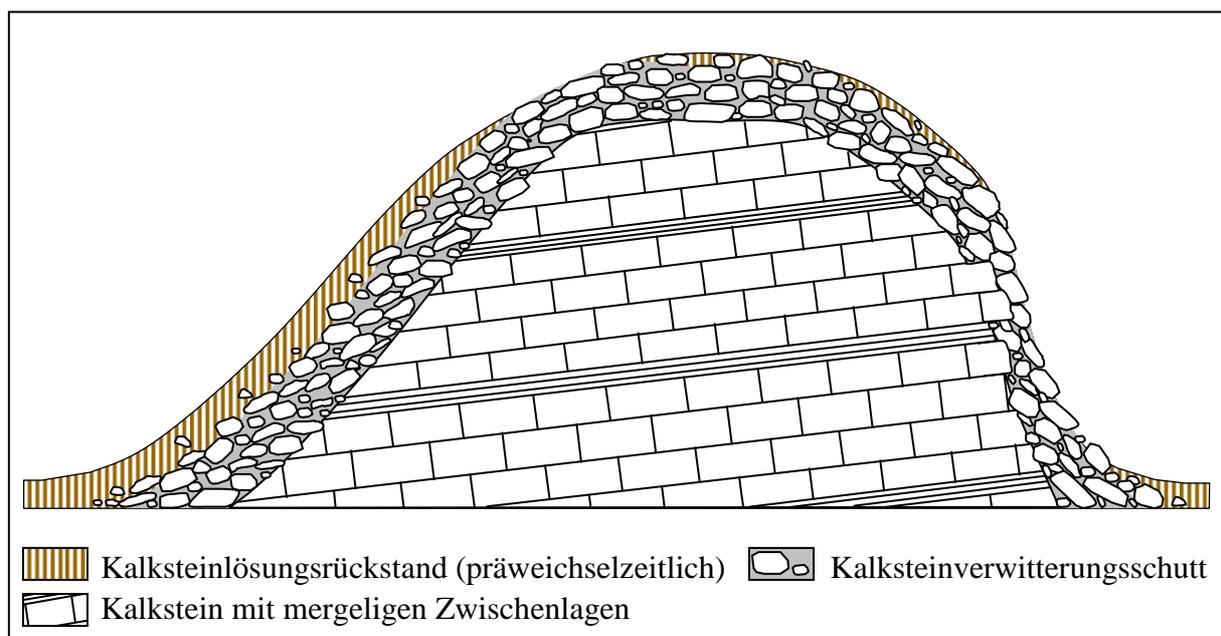


Abb. 34: Idealisierter Schnitt durch einen Kalksteinrücken zu Beginn der Weichsel-Kaltzeit

Bereits im Unter-Weichsel setzte erneut die Lössanwehung ein, die Hochphase lag jedoch erst im ausgehenden Mittel-Weichsel, das von extremer Abkühlung geprägt war (Abb. 33). In steileren Lagen der norddeutschen Mittelgebirge wurde der Löss rasch wieder solifluidal abgetragen und akkumulierte sich an flachen Hängen und Senken (SKUPIN 2003). Im Zuge dieser Vorgänge sind sehr wahrscheinlich auch die in Kapitel 5.6.2 beschriebenen Schlufffüllungen am Sentruper Berg entstanden. Der Löss drang über Spalten und Grobporen in noch vorhandene eemzeitliche Böden ein.

Die Lössanwehung kommt mit dem Einsetzen des Ober-Weichsels (Spätglazial) bzw. des Meiendorf-Interstadials weitestgehend zum Erliegen. Die Kältephasen des Spätglazials in Norddeutschland sind jedoch weiterhin von Permafrost geprägt (Abb. 33). Für den Auftaubereich des Permafrostes ("active layer") kann in Mitteleuropa eine Tiefe von maximal 40 bis 50 cm angenommen werden (VÖLKE & LEOPOLD 2001). Diese Zone unterlag einer starken kryogenen Beanspruchung, die dadurch ausgelösten Homogenisierungsprozesse wurden bereits ausführlich in Kapitel 5.7.3 beschrieben. Der active layer wird in der Literatur als Hauptlage angesprochen und ist fast flächendeckend in Mitteleuropa verbreitet (AG BODEN 2005).

Strittig ist der Entstehungszeitpunkt der Hauptlage. SEMMEL (2005) stellt die Genese in die Jüngere Tundrenzeit. Sie ist die letzte, ca. 1140 Jahre umfassende Kältephase vor dem Holozän (Abb. 33), in der sich wieder eine baumlose subarktische Steppentundra ausbreitete (LITT et al. 2003). Als Nachweis der jungtundrenzeitlichen Entstehung der Hauptlage dient die Asche des im Alleröd ausgebrochenen Laacher See-Vulkans, die sich auch bis in den Göttinger Raum hinein in geringer Mächtigkeit auffinden lässt. Sie bildet in ihrem Verbreitungsgebiet häufig das Liegende der Hauptlage oder ist in diese eingemischt (SEMMEL 2005). VÖLKE & LEOPOLD (2001) hingegen stellen mit Hilfe von im Spätglazial aufgewachsenen Moorkernen ein mindestens präalleröd-zeitliches Alter der Hauptlage fest. Nach AG BODEN (2005) erfolgt keine zeitliche Festlegung ihrer Entstehung, sondern lediglich die Anmerkung, dass, wenn Laacher-See-Bimstephra unter der Hauptlage vorkommt, dadurch die jungtundrenzeitliche Entstehung belegt wird. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse und Literaturangaben wird die Vermutung aufgestellt, dass die Hauptlage bereits im ausgehenden Mittel-Weichsel angelegt wurde. Sie wurde in den Kaltphasen des Ober-Weichsels (Spätglazial), insbesondere in der ausgedehnten Jüngeren Tundrenzeit, erneuert/intensiviert und hat stellenweise ältere Schichten vollständig überdeckt.

In Abbildung 35 sind durch Lössanwehung und Permafrost erfolgte Veränderungen im Mittel- und Ober-Weichsel am idealisierten Kalksteinrücken beispielhaft dargestellt.

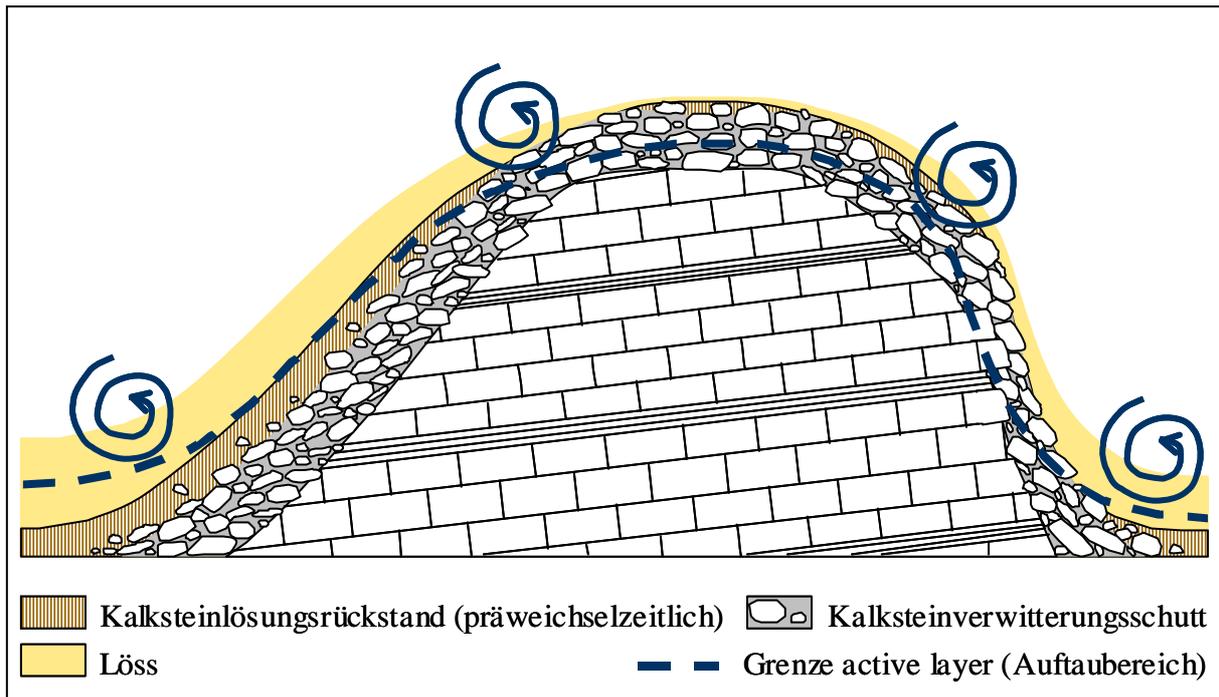


Abb. 35: Idealisierter Schnitt durch einen Kalksteinrücken gegen Ende der Weichsel-Kaltzeit

Die gestrichelte Linie stellt die Tiefe der sommerlichen Auftauschicht dar. Oberhalb dieser finden Homogenisierungs- wie auch Solifluktuionsprozesse statt (symbolisiert durch dunkelblaue Pfeile). An den flachgründigen Oberhängen liegt auch der Verwitterungsschutt in der active layer. An den Unterhängen ist die Lössüberdeckung so mächtig, dass nur ein Teil derselbigen sich in der Auftauzone befindet.

Spätglaziale Interstadiale und Holozän

Mit dem Beginn des Spätglazials vor ca. 14500 Jahren setzen erste Warmphasen/ Interstadiale (Meiendorf, Bölling, Alleröd) ein. Wälder aus Birken, im Alleröd auch Kiefern, breiteten sich jeweils aus (LITT et al. 2003). In diesen Zwischenphasen (Dauer jeweils 640, 250 und 650 Jahre) wurde der Löss bzw. das lösshaltige Material der Hauptlage entcarbonatisiert, verbrauchte teilweise und schließlich setzte auch Lessivierung ein (KÜHN 2003). Diese Tonverlagerung erstreckte sich auch auf den Kalksteinlösungsrückstand, sofern die Lössüberdeckung nicht zu mächtig war. Der Beginn der Tonverlagerung wurde in der Vergangenheit kontrovers diskutiert. KÜHN (2003) konnte jedoch an Lessivés des Norddeutschen Tieflandes eine spätglaziale Tonverlagerung nachweisen, die sich im Holozän fortsetzte. Die Frage nach der Hauptphase der Tonverlagerung bleibt jedoch offen.

Folgende Überlegungen gehen auf diese Frage ein. Wie bereits im vorherigen Abschnitt besprochen, war die Jüngere Tundrenzeit von Permafrost und Solifluktion gekennzeichnet. ZEJSCHWITZ (1988) postuliert für den Hardehausener Wald (südliches Eggegebirge), dass durch diesen letzten Kälteeinbruch an Hangpositionen

ein großer Teil der in den spätglazialen Interstadialen entstandenen Parabraunerden wieder abgetragen wurde. Wird nun angenommen, dass der solifluidale Lösslehm bzw. die Hauptlage so weit entkalkt, bzw. das pH-Optimum für die Lessivierung so weit unterschritten war, dass Tonverlagerung zwar einsetzte, aber nicht wieder zu ausgeprägten Al- und Bt-Horizonten führte, kann dies zweierlei erklären:

- Dass an keinem der untersuchten Standorte bzw. Dünnschliffe ausgeprägte Al-Merkmale/Bleichhorizonte gefunden wurden und die Dünnschliffe hauptsächlich Toncutanbruchstücke und eher wenige intakte Toncutane aufweisen.
- Und dass sich auf tiefgründigem Löss in hängigen Bereichen nur selten gut entwickelte Parabraunerden finden (dies ist am Teutoburger Wald und im Wiehengebirge zu beobachten).

In ebenen Positionen blieben die im Spätglazial entstandenen Parabraunerden weitestgehend erhalten, da die für Solifluktion oder Erosion notwendige Hangneigung nicht gegeben war.

Diese Überlegungen schließen nicht aus, dass die Parabraunerden erst bzw. erneut während der mittelalterlichen Erosionsphasen, insbesondere zu Beginn des 14. Jahrhunderts (BORK et al. 1998), erodierten. Voraussetzung ist, dass diese Standorte entwaldet oder durch intensive Nutzung stark gelichtet waren. Dies ist insbesondere für den Röhringsberg in die Überlegungen zur Genese mit einzubeziehen, da das Plateau im Mittelalter größtenteils gerodet wurde.

An Bergkuppen und steilen Oberhängen wurde der Kalksteinverwitterungsschutt bzw. der massive Kalkstein wenig oder gar nicht vom Löss der Weichsel-Kaltzeit überdeckt. Daher konnte im Spätglazial und Holozän erneut Lösungsrückstand durch Verwitterungsprozesse freigesetzt werden. Drei Faktoren bestimmen laut SCHEFFER et al. (1962) die Geschwindigkeit der Bodenentwicklung unter ansonsten gleichen klimatischen Gegebenheiten:

- Der Nichtcarbonatgehalt: Er hat den größten Einfluss.
- Die Auflösungsanfälligkeit: Sie wird durch Struktureigenschaften wie Körnung, Porosität, chemische Inhomogenität, Fossilgehalt und Kristallgröße bestimmt.
- Die Mächtigkeit und der Zerkleinerungsgrad der Frostschuttdecken, welcher durch die Bruchneigung des Gesteins bei mechanischer Beanspruchung beeinflusst wird.

Welches Stadium kann die Bodenentwicklung auf lössfreiem Kalksteinschutt oder massivem Kalkstein seit den ersten Warmphasen des Spätglazials bis heute erreicht haben? Diese Fragestellung ist von SCHEFFER et al. (1960) intensiv untersucht worden. Sie konnten zeigen, dass sich auf den Terebratelbänken des Unteren Muschelkalks maximal sogenannte Lehmrendzinen und auf den Plänerkalken des Turons Lehmrendzinen bis Rendzina-Braunlehme (Ah-B-Horizont) entwickelten. Diese Kalksteine bilden auch das Ausgangsmaterial der untersuchten norddeutschen Böden. Terra fusca finden sich z. B. auf Wabenkalken des Mittleren Muschelkalks sowie auf Flammen- und Cenomanmergel (SCHEFFER et al. 1960). Also auf Kalksteinen mit

einer erhöhten Verwitterungsanfälligkeit bzw. auf mergeligen Ausgangsgesteinen. ZEZSCHWITZ (1988) und BIERMAYER & REHFUESS (1985) beschreiben Terra fusca aus Mergelkalkstein bzw. aus feinkörnigem Schutt des Hauptdolomits der Bayerischen Kalkalpen, deren Entstehung von den Autoren ins Holozän gestellt wird. Die Böden weisen nicht die für die Benennung einer Normterra fusca notwendigen 65 % Ton nach AG BODEN (2005) auf.

Die Entwicklungsgeschwindigkeit auf Kalkstein wird nach dem Erreichen des Mullrendzina-Stadiums durch den bereits freigesetzten Lösungsrückstand stark herabgesetzt, da sich die Permeabilität für das Sickerwasser verringert (SCHEFFER et al. 1960). Eine zunehmende Lössüberdeckung über dem Kalksteinverwitterungsschutt dürfte einen vergleichbaren Effekt erzielen. Das über den Löss eingetragene Carbonat verzögert die Verwitterung des Kalksteins zusätzlich.

Auch im Holozän wirken verschiedene Prozesse homogenisierend bzw. substratdifferenzierend auf den Boden ein. Sie wurden bereits in Kapitel 5.7.3 beschrieben, daher seien hier nur zoogene Bioturbation, Baumwürfe, Bodenkriechen und Gefügebildung als Stichworte genannt. Erosionsprozesse sind in steilen Lagen und, wie bereits erwähnt, in stark übernutzten und gelichteten Wäldern von Bedeutung.

Übertragung der Modellvorstellung auf die untersuchten Böden

Die oben beschriebenen Entwicklungen wurden von den untersuchten Böden, je nach Hangposition, in unterschiedlichem Ausmaß durchlaufen. Ihre Lage im Relief wird anhand des idealisierten Schnittes durch einen Kalksteinrücken verdeutlicht (Abb. 36).

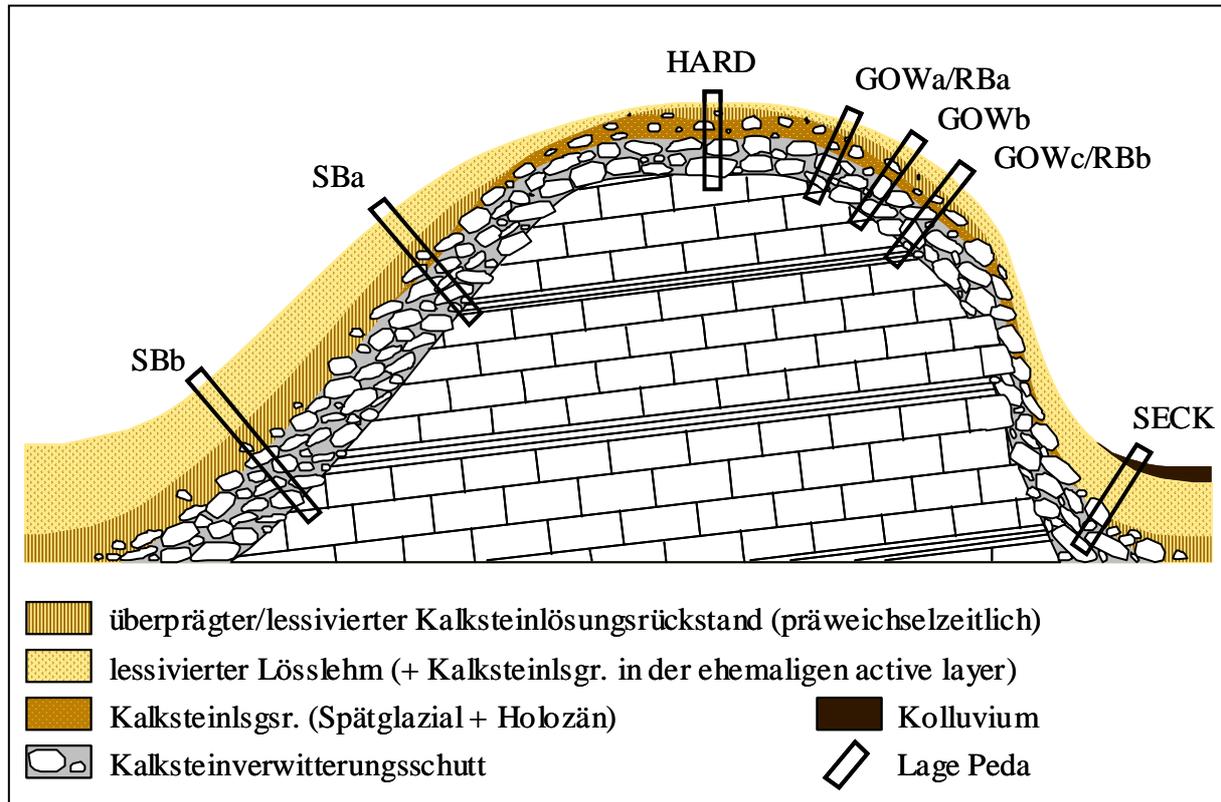


Abb. 36: Idealisierter Schnitt durch einen Kalksteinrücken mit der abstrahierten Lage der untersuchten Böden

- Auf der linken Seite der Grafik finden sich die Böden vom Sentruper Berg (Leeseite im Periglazial) wieder, hier ist die Lössüberdeckung relativ mächtig. Besonders im Boden SBb liegt ein deutlicher Schichtwechsel zwischen der stark lössbeeinflussten active layer und dem unterlagernden präweichselzeitlich geprägten Bodenmaterial vor. Diese unterlagernde Schicht kann als Mittellage angesprochen werden (AG BODEN 2005). Sie ist deutlich weniger kryogen beeinflusst worden, so dass die anhand der Dünnschliffe identifizierten Schlufffüllungen erhalten blieben. Die Tonverlagerung ist nicht nur auf lössreiche Schichten beschränkt, sondern hat auch den tonreichen Lösungsrückstand erfasst. Dies führte zur Bildung von Bt-Tv-Horizonten, die in allen untersuchten Böden mit Ausnahme von Göttinger Wald a auftreten. Ungeklärt bleibt, ob dieser Horizont bereits vor der Lössüberdeckung Tonverlagerungsmerkmale aufwies. Von Terra fuscen ist bekannt, dass sie zu Verschlammung/Tonverlagerung neigen (KUBIENA 1953), ohne dass zwangsläufig eine Ausdifferenzierung in Al- und Bt-Horizonte stattfindet (SCHEFFER et al. 1960). In einigen der untersuchten Böden ändert sich zwar die Zusammensetzung der Toncutane mit zunehmender Tiefe und Tongehalten, ob dies auf zu unterschiedlichen Zeiten gebildete Toncutane hinweist, kann nicht eindeutig geklärt werden.
- Auf der Kuppe blieb in ebenen Lagen stellenweise präweichselzeitlicher Lösungsrückstand erhalten. Löss wurde auf Grund seiner höheren Erosions-

anfälligkeit nach seiner Deposition rasch wieder abgetragen, daher unterlag die Frostschuttdecke einer intensiven holozänen Carbonatverwitterung. Diese Reliefposition kann für den Boden Hardehausen vermutet werden, dessen Massenbilanzierung nur wenige Prozent Lössanteil am Mineralboden ergab. Für diesen Boden beträgt die berechnete Masse an Lösungsrückstand am Mineralboden 299 kg/m² (vgl. Kapitel 5.9.3). Die potentielle Rückstandsmenge aus der Kalksteinverwitterung seit dem Spätglazial liegt bei nur 91 kg/m². Zudem hat dieser Boden das für Böden aus den Terebratelbänken des Unteren Muschelkalks untypisch weit fortgeschrittene Terra fusca-Stadium erreicht hat (vgl. SCHEFFER et al. 1960). Aus diesen Gründen ist von Lösungsresten aus früheren Warmzeiten auszugehen. Da die spätglaziale/holozäne Verwitterungsfront unterhalb dieser präweichselzeitlichen Kalksteinlösungsreste arbeitet bzw. fortschreitet, liegt der ältere Kalksteinlösungsrückstand über dem jüngeren.

- Auf der rechten Hangseite der Abbildung ist die Lössüberdeckung weniger mächtig, die Tiefe des Mineralbodens übersteigt nur an wenigen Stellen 50 cm. Während der Permafrostphasen der Weichsel-Kaltzeit wurden daher die Reste präweichselzeitlicher Bodenbildungen mit dem Löss in der active layer vermischt, so dass ein scharfer Schichtwechsel fehlt und die Tongehalte kontinuierlich zum Oberboden hin abnehmen. Durch die relativ geringe Überdeckung des carbonathaltigen Verwitterungsschutts konnte dieser in den spätglazialen Warmphasen und im Holozän weiter verwittern. Entlang dieses Hanges finden sich die Böden des Göttinger Waldes und des Röhringsberges wieder.
- Am rechten Mittelhang der Abbildung versteilt sich das Relief. Präweichselzeitliches Bodenmaterial und Teile des Kalksteinverwitterungsschutts wurden weitgehend abgetragen. Daher konnte sich am Übergang zum Unterhang Löss direkt auf dem Kalksteinverwitterungsschutt akkumulieren. Diese Konstellation wurde während der Suche nach geeignetem C-Löss im Göttinger Wald im Seckbornsgrund aufgefunden. Hier steht bis in circa 45 cm Tiefe ein entkalkter, wahrscheinlich kolluvial umgelagerter Lösslehm an, dann folgt kalkhaltiger Löss und schließlich Kalksteinverwitterungsschutt. Die Carbonat-gehalte waren zu hoch, um allein lössbürtig sein zu können und beim Sieben wurden Kalksteinchen sichtbar. Die Mächtigkeit der Lössüberdeckung verhinderte eine erneute Residualtonbildung. Die Position dieses Profils (SECK) ist ebenfalls in Abbildung 36 eingetragen.

Auf Grund der Untersuchungsergebnisse und der daraus abgeleiteten genetischen Modellvorstellung wird die Genese der untersuchten norddeutschen Böden ins Quartär gestellt. Auch farblich haben die Lösungsrückstände, die maximal einen dunkelrötlich-braunen Farbton aufweisen, wenig mit leuchtend rötlich gefärbten Terra rossa-Bildungen, wie sie z. B. auf tertiären Oberflächen unter wärmeren Klimabedingungen gebildet wurden (AG BODEN 2005), gemein. Dennoch soll und kann in bestimmten

Reliefpositionen ein kleiner, überprägter Anteil an tertiären Rückstandsbildungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Um die Bodenentwicklung auf Kalkstein der Norddeutschen Mittelgebirgslandschaft mit den süddeutschen Kalksteinverwitterungsböden vergleichen zu können, wurde auf der Flächenalb der Schwäbischen Alb ein weiterer Boden (Holzkirch) aus Kalksteinlösungsrückstand mit Lössauflage untersucht. Er zeigt sowohl optisch als auch analytisch viele Parallelen zu seinen norddeutschen Pendanten. Erst der Blick auf die umgebenden Böden und das großräumige Relief offenbaren Unterschiede: Die Flächenalb war im gesamten Pleistozän eisfrei und weist im Vergleich zu den kleinräumig zertalten norddeutschen Mittelgebirgen eine geringere Reliefenergie auf. Sie ist weiterhin stark verkarstet, so dass Oberflächenwasser rasch versickert und oberflächliche Abspülung reduziert wird (SCHALL 2002, WERNER 1958). Zudem beschreibt KÖSEL (2002) mehr als 1 m mächtige Residualtonhorizonte. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Böden der ebenen Flächenalb in den Kaltzeiten des Pleistozäns im Vergleich zu den Norddeutschen Mittelgebirgen einem deutlich geringeren solifluidalen Abtrag unterlagen. Dadurch blieben vermutlich auch große Teile der Bodenbildungen aus den Warmphasen des Pleistozäns erhalten. Gleichzeitig schließt diese Vorstellung auch mehrere Lössanwehungsphasen mit ein. Der Löss konnte sich in der jeweiligen active layer mit dem Lösungsrückstand vermischen, so dass heute die Tongehalte mit der Tiefe horizont- bzw. schichtweise zunehmen. In den Warmphasen trug die Bioturbation ebenfalls zu diesem Prozess bei.

Für einen aussagekräftigen Vergleich beider Untersuchungsräume und deren Entstehungsprozesse wären weitere Untersuchungsstandorte in Süddeutschland notwendig. Das vorgestellte bodengenetische Modell für die norddeutschen Mittelgebirgsböden bedarf noch der weiteren Überprüfung durch Geländebefunde und Literaturvergleiche.

6 Fazit

Die untersuchten Böden setzen sich aus zwei unterschiedlichen Ausgangsmaterialien zusammen: Löss und Lösungsrückstand der Kalksteinverwitterung. Sie wurden durch homogenisierende Prozesse insbesondere im Bereich der ehemaligen Auftauzone des Permafrostes bis hinunter auf die Ebene einzelner Bodenteilchen miteinander vermischt. Lösungsrückstand lässt sich zum Teil bis in den Oberboden und Löss häufig bis in den tonreichsten Horizont und teilweise auch bis in den Kalksteinverwitterungsschutt nachweisen. Alle Böden mit Ausnahme des Pedons Göttinger Wald a zeigen zahlreiche Tonverlagerungsmerkmale, die sich über den gesamten Unterboden bis in den tonreichsten Horizont hinein erstrecken. Es treten überwiegend Toncutane in Poren und Toncutanbruchstücke auf. Es bleibt jedoch unklar, ob die Tonverlagerung nur horizontübergreifend oder auch horizontintern abläuft. Auch bleibt offen, ob der Kalksteinlösungsrückstand bereits vor der Lössüberdeckung Tonverlagerung aufwies. Aus den Untersuchungsergebnissen wird gefolgert, dass die Dritte der in der Einführung formulierten Hypothesen zur Genese „Residualakkumulation und Lessivierung“ auf die untersuchten Böden zutrifft. Wobei der Residualakkumulation der größere Anteil an der Bildung der tonreichen Unterbodenhorizonte zukommt.

Wie in Kapitel 5.10 ausführlich erläutert, wird angeregt die bodensystematische Ansprache einer Normterra fusca dahin gehend zu ändern, dass in Zukunft ≥ 45 Masse-% Ton als neue Untergrenze angewendet wird.

7 Literatur

7.1 Schriftenverzeichnis

- AG BODEN (1971): Bodenkundliche Kartieranleitung, 2. Aufl., Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesregierung Deutschland. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Hannover, 169 S.
- AG BODEN (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. Aufl., Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesregierung Deutschland. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Hannover, 331 S.
- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl., Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesregierung Deutschland. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Hannover, 438 S.
- ALAILY, F. (1972): Entstehung von Decklehmen auf Lias α -Schichtflächen in Südwestdeutschland und deren Veränderung durch Bodenbildung. Dissertation, Universität Hohenheim, 105 S.
- ALAILY, F. (1984): Heterogene Ausgangsgesteine von Böden: Die Rekonstruktion und Bilanzierung von Böden aus heterogenen Ausgangsgesteinen. Habilitationssmonographie, Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, 25, Berlin, 236 S.
- ALTEMÜLLER, H.-J. (1974): Mikroskopie der Böden mit Hilfe von Dünnschliffen. In: Freund, H. (Hrsg.): Handbuch der Mikroskopie in der Technik, Bd. IV, Tl. 2, Umschau, Frankfurt, 309–367.
- ALTERMANN, M. (1995): Profil A 2837. Mitt. d. DBG, 77, 192–195.
- ALTERMANN, M.; JÄGER, K.-D.; KOPP, D.; KOWALKOWSKI, A.; KÜHN, D.; SCHWANECKE, W. (2008): Zur Kennzeichnung und Gliederung von periglaziär bedingten Differenzierungen in der Pedosphäre. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, Heft 6, 5–42.
- BALLAGH, T. M.; RUNGE, E. (1970): Clay-rich horizons over limestone – illuvial or residual? Soil Sci. Soc. Ameri. Proc., 34, 534–536.
- BARZEGAR, A. R.; OADES, J. M.; RENGASAMY, P.; MURRAY, R. S. (1995): Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction. Geoderma, 65, 93–108.
- BAUMHAUER, R. (2010): Physische Geographie 1: Geomorphologie. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2. Auflage, 144 S.

- BECKMANN, T. (1997): Präparation bodenkundlicher Dünnschliffe für mikromorphologische Untersuchungen. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, 40, 89–103.
- BETZER, H.-J (2003): Boden und Bodennutzung. In: Geologischer Dienst NRW [Hrsg.]: Geologie im Weser- und Osnabrücker Bergland. Krefeld, 141–152.
- BIERMAYER, G.; REHFUESS K. E. (1985): Holozäne Terra fuscae aus Carbonatgesteinen in den Nördlichen Kalkalpen. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 148, 405–416.
- BINDER, H. (1988): Zur Geologie und Flußgeschichte des Lonetals. In: Birkenfeld, H. (Hrsg.). Lone und Lonetal. Ulmer Geographische Hefte 5, Ulm, 6–28.
- BLAKEMORE, L. C.; SEARLE, P. L.; DALY, B. K. (1981). Soil Bureau Laboratory Methods. A method for chemical analysis of soils. N.Z. Soil Bureau Sci. Rep. 10A.
- BLEICH, K. E.; PAPENFUß, K. H., VAN DER PLOEG, R. R.; SCHLICHTING, E. und Mitarbeiter (1987): Exkursionsführer zur Jahrestagung 1987 in Stuttgart – Hohenheim. Mitt. der DBG, Band 54, 246 S.
- BLUM, W. E. (1968): Sedimentogene und pedogene Entwicklungsmerkmale von Böden auf Carbonatgestein – am Beispiel des südlichen Oberrheingrabens. Dissertation, Freiburger Bodenk. Abh., 1, Freiburg, 184 S.
- BLUME, H.-P. (1964): Zum Mechanismus der Tonverlagerung. Berichte 8. Int. Bodenk. Kongr. Bukarest, Vol. 5, 715–722.
- BLUME, H.-P. (1992): Böden als Naturkörper. In: Blume, H.-P. (Hrsg.). Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und -belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 2. Aufl., ecomed, Landsberg/Lech, 794 S.
- BLUME, H.-P.; SCHWERTMANN, U. (1969): Genetic Evaluation of profile distribution of aluminium, iron and manganese oxides. Soil Sci. Soc. Ameri. Proc., 33, 438–444.
- BLÜTHGEN, J.; WEISCHET, W. (1980): Allgemeine Klimageographie. 3. Aufl., De Gruyter, Berlin, 887 S.
- BÖHME, K. (2004): Eigenschaften und Ökologie typischer Böden im Ober-Eichsfeld. Diplomarbeit an der Fachhochschule Osnabrück [unveröff.].
- BORK, H.-R.; BORK, H.; DALCHOW, C.; FAUST, B.; PIORR, H.-P.; SCHATZ, T. (1998): Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Wirkungen des Menschen auf Landschaften. Klett-Perthes, Gotha, Stuttgart, 328 S.
- BOWER, C. A. (1955): Determination of exchangeable magnesium in soils containing Dolomite. Soil Sci. Soc. Am. J., 19, 40–42.
- BRICKS, W. (1993): Thüringen Kleine Landeskunde, 1.Aufl., Westermann Schulbuchverlag GmbH, Braunschweig.
- BÜDEL, J. (1937): Eiszeitliche und rezente Verwitterung und Abtragung im ehemals nicht vereisten Teil Mitteleuropas. Petermanns Geogr. Mitt., Ergänzungsheft 229, Gotha, 71 S.

- BULLOCK, P.; MILFORD, M. H.; CLINE, M. G. (1974): Degradation of Argillic Horizons in Udalf Soils of New York State. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38, 621–628.
- BGR - BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (1978): Vergleich von Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Kationenaustauschkapazität und der austauschbaren Kationen tropischer und subtropischer Böden. Berichterstatter: Grüneberg, F., Hannover, 52 S.
- CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. (2003): *The Iron Oxides – Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. 2nd Edition, WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 664 S.
- DEPPE, A.; TROE, H. (1956): *Der Göttinger Wald und seine Umgebung – Ein landschafts- und siedlungskundlicher Überblick mit Hinweisen für heimatkundliche Wanderungen*. Heinz Reise Verlag, Göttingen, 160 S.
- DIN E.V. (Hrsg.) (2000): *Handbuch der Bodenuntersuchungen*. Loseblattwerk, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich.
- DOHRMANN, R. (1997): Kationenaustauschkapazität von Tonen – Bewertung bisheriger Analyseverfahren und Vorstellung einer neuen und exakten Silber-Thioharnstoff-Methode. Dissertation, RWTH Aachen, AGB-Verlag, Nr. 26, 234 S.
- DOHRMANN R.; ECHLE, W. (1997): Statistische Untersuchungen zur quantitativen Quarzanalyse in tonigen Sedimenten. In: Wagner, J. F. (Hrsg.): *Berichte der DTTG*, Trier, 5, 63–71.
- DOHRMANN, R. (2006): Problems in CEC determination of calcareous clayey sediments using the ammonium acetate method. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 169, 330–334.
- DOHRMANN, R.; KAUFHOLD, S. (2009): Three new, quick CEC methods for determining the amounts of exchangeable calcium cations in calcareous clays. *Clays and Clay Minerals*, 57(3), 251–265.
- DOMMERMUTH, H.; TRAMPF, W. (1990): *Die Verdunstung in der Bundesrepublik Deutschland Zeitraum 1951–1980. Teil I*, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 10 S. + 11 Karten.
- DROZDEWCKSKI, G. (2003): *Weser- und Osnabrücker Bergland – Geologische Entwicklung und tektonischer Bau*. In: Geologischer Dienst NRW (Hrsg.): *Geologie im Weser- und Osnabrücker Bergland*. Krefeld, 16–30.
- DWD (2009): *Tabellarische Aufführung der mittleren Monatssummen der Niederschlagshöhen der Stationen für den Zeitraum 1961–1990 im Excel-Format*. Internetressource:
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_start&T3200039671164966383319gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadatenzentren%2FNKDZ%2Fkldaten__akt%2Fausgabe__mittelwerte__node.html__nnn%3Dtrue am 14.05.2009

- EHLERS, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie. Enke, Stuttgart, 358 S.
- EITELMANN, W.-R. (2009): Archäopedologische Analyse anthropogener Landschaftsveränderungen seit dem Neolithikum auf der Blaubeurer Alb. Diplomarbeit, Vorgelegt an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geographisches Institut. [unveröff.]
- ELBRACHT, J. (2000): Geologische Karte Blatt Nr. 4426 Ebergötzen – Bericht zur Revisionskartierung. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung – Archiv, Hannover, 20 S. [unveröff.]
- FARRENSCHON, J. (1990): Stratigraphische und tektonische Verhältnisse am Südrand des Eggegebirges. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie – Abhandlungen, Stuttgart, 181, 61–77.
- FARRENSCHON, J. (2003): Trias. In: Geologischer Dienst NRW (Hrsg.): Geologie im Weser- und Osnabrücker Bergland. Krefeld, 47–57.
- FIEDLER, K. (1984): Tektonik (Baugeschichte). In: Klassen, H. (Hrsg.): Geologie des Osnabrücker Berglandes. Stadt Osnabrück (Naturwiss. Museum), Osnabrück, 519–563.
- FIEDLER, H. J.; HOFMANN, W. (1991): Exkursion A, Teil 1 – Bodenformen über Muschelkalk im Thüringer Becken. Mitt. d. DBG, 64, 49–77.
- FITZPATRICK, E. A. (1993): Soil microscopy and micromorphology. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore. 305 p.
- FLÜGEL, E. (2009): Microfacies of Carbonate Rocks – Analysis, Interpretation and Application. 2nd ed., Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 984 p.
- FORSTAMT HEILIGENSTADT (2009): Forstgeschichte. Internetressource: <http://www.thueringen.de/de/forst/dienststellen/forstaemter/heiligenstadt/content.htm> 1 am 20.08.2009.
- FRANKE, D. (2009): Regionale Geologie von Ostdeutschland – Ein Wörterbuch. Homepage: www.regionalgeologie-ost.de (Drucklegung vorgesehen).
- FRECHEN, J. (1976): Siebengebirge am Rhein – Laacher Vulkangebiet – Maargebiet der Westeifel, vulkanologisch-petrographische Exkursionen. Sammlung Geologischer Führer, 56, 3. Aufl., Gebrüder Bornträger, Stuttgart, Berlin, 209 S.
- FREYBERG, B. VON (1960): Thüringen – Geologische Geschichte und Landschaftsbild. Schriften des Deutschen Naturkundevereins / Neue Folgen, Band 5, Verlag Hohenslohesche Buchhandlung Ferd. Rau, Oehringen, 160 S.
- FRITZE, E. (2009): Heimatkundler, schriftliche Mitteilung zur Geschichte des Röhringsberges, Wachstedt.
- GÄTH, S. (1987): Böden aus Löss in ihrer hydrologisch differenzierten Gesellschaft in Börde- und Hügellandschaften Südniedersachsens. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, 245 S.

- GEBHARDT, H. (1964): Bilanzanalytische Untersuchungen zur Silikatverwitterung und zum Stofftransport in feuchten und nassen Holozänböden aus Löß mit besonderer Berücksichtigung der Feldspatverwitterung. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, 81 S.
- GEBHARDT, H.; LÜDERS, R. (1970): Mineralogische Untersuchung einer regradierten Parabraunerde. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 127, 154–167.
- GEHRT, E. (1993): Detailkartierung am Totenberg, Göttinger Wald. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover. [unveröff.]
- GEHRT, E. (1994): Die äolischen Sedimente im Bereich der nördlichen Lössgrenze zwischen Leine und Oker und deren Einflüsse auf die Bodenentwicklung. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, 217 S.
- GEHRT, E. (2000): Nord- und mitteldeutsche Lössböden und Sandlössgebiete. In: Blume, H.-P.; Felix-Henningsen, P.; Fischer, W. R. ; Frede, H.-G.; Horn, R.; Stahr, K. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Kap. 3.4.4.4.
- GEHRT, E.; BECKMANN, T.; DULTZ, S.; HILGERS, A.; JARMER, T; RATHGEBER, A.; SCHMIDT, M. (1999): Exkursion G3 – Böden der Lößbörde und des Berglandes. Mitt. d. DBG, 90, 249–278.
- GEHRT, E.; BOESS, J. (1996): Ergebnisse der bodenkundlichen Kartierung der Testgebiete im DFG-Forschungsvorhaben "DIGI-RELIEF". In: NLFb (Hrsg): Beitrag des NLFb zum DFG-Forschungsvorhaben DIGI-RELIEF, Hannover, 50 S.
- GEMEINDEFORSTAMT WILLEBADESSEN (2009): Waldgesellschaften. Link: <http://www.gemeindeforstamt.de/index.html> am 01.06.09.
- GERLACH, V.; MEINCKE, H.; STECKHAN, D.; WOJTOWYTSCH, M. (1985): Das Eichsfeld – Landschaften Niedersachsens und ihre Probleme. Schriftenreihe der Niedersächsischen Landeszentrale für politische Bildung, Folge 4, 127 S.
- GEYER, O. F.; GWINNER, M. P. (1984): Die Schwäbische Alb und ihr Vorland. Sammlung Geologischer Führer 67, 3. Aufl., Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 275 S.
- HANTKE, R. (1978): Eiszeitalter – Die jüngste Erdgeschichte der Schweiz und ihrer Nachbargebiete, Band 1: Klima, Flora, Fauna, Mensch, Alt- und Mittel-Pleistozän, Vogesen, Schwarzwald, Schwäbische Alb, Adelegg. Ott Verlag Thun, Schweiz, 468 S.
- HARTGE, K. H.; HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. Enke Verlag, Stuttgart, 304 S.
- HÄUSLER, W. (1992): Böden aus Kalkstein in der Südlichen Frankenalb – mineralogische und chemische Eigenschaften als Ergebnis der Pedogenese. Dissertation, Universität München, 169 S.

- HÄUSLER, W.; NIEDERBUDDE, E.-A. (1992/2007): Morphologie und Alter von Böden der Südlichen Frankenalb und der nichtkarbonatische Mineralbestand der Kalksteine. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 155, 391–399.
- HELLING, C. S.; CHESTERS, G.; COREY, R. B. (1964): Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28, 517–520.
- HEMME, H. (1970): Die Stellung der "lessivierten" Terra fusca in der Bodengesellschaft der Schwäbischen Alb. Dissertation, Universität Hohenheim, 77 S.
- HENNINGSEN, D.; KATZUNG, G. (2002): Einführung in die Geologie Deutschlands. 6. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 214 S.
- HILLER, D. A.; BRÜMMER G. W. (1995): Mikrosondenuntersuchungen an unterschiedlich stark mit Schwermetallen belasteten Böden. 1. Methodische Grundlagen und Elementanalysen an pedogenen Oxiden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 158, 147–156.
- HILLER, D. A.; VEERHOFF, M.; BRÜMMER, G. W. (1993): Mikrosonden- und Röntgenbeugungs-Untersuchungen an Tonbelägen von lessivierten Böden aus Löß. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 156, 219–227.
- HINTERMAIER-ERHARD, G.; ZECH, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Enke Verlag, Stuttgart, 338 S.
- HUDSON, B. D. (1995): Reassessment of Polynov's ion mobility series. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1101–1103.
- HUIJZER, A. S. (1993): Cryogenic microfabrics and macrostructures: Interrelations, processes, and paleoenvironmental significance. Ph.D. diss. Vrije Univ., Amsterdam, the Netherlands, 245 p.
- HÜTTER, M. (1996): Der ökosystemare Stoffhaushalt unter dem Einfluß des Menschen – geoökologische Kartierung des Blattes Bad Iburg 1:25 000. Deutsche Akademie für Landeskunde, Selbstverlag, Trier, 197 S.
- JAHN, R. (1995): Ausmaß äolischer Einträge in circumsaharischen Böden und ihre Auswirkungen auf Bodenentwicklung und Standorteigenschaften. *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte*, 23, 213 S.
- JAHN, R. (2011): Schriftliche Auskunft. Professor für Bodenkunde und Bodenschutz, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- KAHLE, M.; KLEBER, M.; JAHN, R. (2002): Review of XRD-based quantitative analyses of clay minerals in soils: the suitability of mineral intensity factors. *Geoderma*, 109, 191–205.
- KARTE, J. (1987): Pleistocene periglacial conditions and geomorphology in north-central Europe. In: Boardman, J. (Editor): *Periglacial Processes and Landforms in Britain and Ireland*, Cambridge University Press, Cambridge, 67–75.

- KEMP, R. A.; MCDANIEL, P. A.; BUSACCA, A. J. (1998): Genesis and relationship of macromorphology and micromorphology to contemporary hydrological conditions of a welded Argixeroll from the Palouse in Idaho. *Geoderma*, 83, 309–329.
- KLINGER, T. (1995): Mengen- und Spurenelemente in Waldböden über unterschiedlichen Grundgesteinen des Osterzgebirges. Dissertation, Technische Universität Dresden, 291 S.
- KLOWEIT-HERRMANN, M.; ZIETZ, H.-J. (2005): Der Freeden – Naturschutzgebiet in Bad Iburg. Grote-Druck, Bad Iburg, 64 S.
- KÖHLER, W.; SCHACHTEL, G.; VOLESKE, P. (1996): Biostatistik – Einführung in die Biostatistik für Biologen und Agrarwissenschaftler. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, 285 S.
- KÖSEL, M. (2002): Residualton, Lösslehm, Böden. In: Schall, W.: Geologische Karte von Baden-Württemberg 1: 25 000 – Erläuterungen zum Blatt 7425 Lonsee. 1. Aufl., Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i. Br., 52–57.
- KOSTER V. GROOS, A. F.; GUGGENHEIM, S. (1986): Dehydration of K-exchanged montmorillonite at elevated temperatures and pressures. *Clays and Clay Minerals*, 34, 281–286.
- KÖSTER, H. M. (1979): Die chemische Silikatanalyse – Spektralphotometrische, komplexometrische und flammenspektrometrische Analysemethoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 196 S.
- KÖSTER, H. M.; SCHWERTMANN, U. (1993): Beschreibung einzelner Tonminerale. In: Tonminerale und Tone – Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt. Steinkopff Verlag, Darmstadt, 490 S.
- KUBIËNA, W. (1944): Beiträge zur Bodenentwicklungslehre: Der Kalksteinbraunlehm (Terra fusca) als Glied der Entwicklungsserie der mitteleuropäischen Rendsina. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 35, 22–45.
- KUBIËNA, W. (1948): Entwicklungslehre des Bodens. Springer-Verlag, Wien, 215 S.
- KUBIËNA, W. (1953): Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 392 S.
- KÜHN, P. (2003): Spätglaziale und holozäne Lessivégenese auf jungweichselzeitlichen Sedimenten Deutschlands. *Greifswalder Geographische Arbeiten*, 28, 167 S.
- KÜHN, P.; BILLWITZ, K.; BAURIEGEL, A.; KÜHN, D.; ECKELMANN, W. (2006): Distribution and genesis of Fahlerden (Albeluvisols) in Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 169, 420–433.
- LAGALY, G.; KÖSTER, H. M. (1993): Tone und Tonminerale. In: Tonminerale und Tone – Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt. Steinkopff Verlag, Darmstadt, 490 S.

- LANGOHR, R.; PAJARES, G. (1983): The chronosequence of pedogenic processes in Fraglossudalfs of the Belgian loess belt. In: Bullock, P.; Murphy, C. P. (eds.): Soil micromorphology. Volume 1-2, Academic Publishers, Berkhamsted, 503–510.
- LANU (LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT IN SCHLESWIG-HOLSTEIN) (2002): Stickstofffraktionen in Oberböden der Dauerbeobachtungsflächen Schleswig-Holsteins (1996 & 1999). Landesamt für Natur und Umwelt in Schleswig-Holstein [unveröff.]. In: BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G. W.; SCHWERTMANN, U.; HORN, R.; KÖGEL-KNABNER, I.; STAHR, K.; AUERSWALD, K.; BEYER, L.; HARTMANN, A.; LITZ, N.; SCHEINOST, A.; STANJEK, H.; WELP, G.; WILKE, B.-M. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- LIETDKE, H. (1981): Die nordische Vereisung in Mitteleuropa. 2. Aufl., Forschungen zur Deutschen Landeskunde, Zentralausschuß für deutsche Landeskunde, Selbstverlag, Trier, Band 204, 307 S.
- LITT, T.; SCHMICKE, H.-U.; KROMER, B. (2003): Environmental response to climatic and volcanic events in central Europe during the Weichselian Lateglacial. *Quaternary Science Reviews*, 22(1), 7–32.
- LÖNNECKER, H.-K. (2009): Revierleiter im Staatswald Amstetten, telefonische Auskunft.
- Lorz, C. (2008): Ein substratorientiertes Boden-Evolutions-Konzept für geschichtete Bodenprofile – Genese und Eigenschaften von lithologisch diskontinuierlichen Böden. *Relief Boden Paläoklima*, 23, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 195 S.
- MAUS, H.; STAHR, K. (1977): Auftreten und Verbreitung von Lösslehmbeimengungen in periglazialen Schuttdecken des Schwarzwaldwestabfalls. *Catena*, 3, 369–386.
- MCKEAGUE, J. A.; WANG, C.; ROSS, G. J.; AACTON, C. J.; SMITH, R. E.; ANDERSON, D. W.; PETTAPIECE, W. W.; LORD, T. M. (1981): Evaluation of criteria for argillic horizons (Bt) of soils in Canada. *Geoderma*, 25, 63–74.
- MEIWES, K. J.; MEESENBURG, H.; EICHHORN, J.; JACOBSEN, C.; KHANNA, P. K. (2009): Changes in C and N Contents of Soils Under Beech Forests over a Period of 35 Years. In: Brumme, R.; Khanna, P.K. (eds.): *Functioning and Management of European Beech Ecosystems*, Ecological Studies 208, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 49–63.
- MENKE, B. (1981): Vegetation, Klima und Verwitterung im Eem-Interglazial und Weichsel-Frühglazial Schleswig-Holsteins. *Verhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins in Hamburg (NF)* 24 (2), 123–132.
- MEYER, B.; KALK, E.; FÖLSTER, H. (1962): Parabraunerden aus primär carbonathaltigem Würm-Löß in Niedersachsen. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 99, Band 1, 37–54.
- MEYER, B.; JÖRGENSEN, R.; HUGENROTH, P.; AHL, C. (1985): Entwicklung und Gesellschaft der Böden aus Kalkstein im Muschelkalk – Gebiet des Göttinger Waldes. *Mitt. d. DBG*, 42, 437–453.

- MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. JR. (1997): X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, Oxford, New York, 378 p.
- MÜCKENHAUSEN (1977): Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. 2. Aufl., DLG-Verlag, Frankfurt, 300 S.
- MÜLLER, E. (1973): Die Glaserzeugung auf dem Eichsfeld im Lichte der Flurnamen. Eichsfelder Heimathefte, 13, 369–377.
- MÜLLER, U. (2004): Auswertungsmethoden im Bodenschutz – Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS®. Arbeitshefte Boden 2004/2, 7. Aufl., Hannover, 409 S.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G.; KREIS, A.; DITTMANN, E. (2001): Klimaatlas der Bundesrepublik Deutschland, Teil 2, Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- MURPHY, C. P.; KEMP, R. A. (1984): The over-estimation of clay and the under-estimation of pores in soil thin sections. European Journal of Soil Science, 35 (3), 481–495.
- NAGEL, U.; WUNDERLICH, H.-G. (1976): Geologisches Blockbild der Umgebung von Göttingen. Veröffentlichungen des Niedersächsischen Institutes für Landeskunde und Landesentwicklung an der Universität Göttingen, Reihe A: Forschung zur Landes- und Volkskunde, Band 91, 2. Aufl., Kommissionsverlag Druckhaus Göttinger Tageblatt GmbH&Co., Göttingen, Hannover, 50 S.
- NIEDERBUDE, E.-A. (1996): Tonminerale. In: Blume, H.-P.; Felix-Henningsen, P.; Fischer, W. R. ; Frede, H.-G.; Horn, R.; Stahr, K. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Kap. 2.1.4.1.
- PAPENFUß, K.-H. (1965): Der Tonmineralbestand von südwestdeutschen Kalk- und Tongesteinen und seine Veränderung durch die Bodenbildung. Mitt. d. DBG, 4, 263–270.
- PATZELT, G. (1994): Streifzüge durch die Erdgeschichte Nordwest-Thüringens: Geologischer Abriß und Exkursionsführer. Justus Perthes Verlag, Gotha, 96 S.
- PATZELT, G. (1996): Der Mittlere Wellenkalk und der Bereich der Terebratelbänke in Nordwest-Thüringen. In: Mühlhäuser Geschichts- und Denkmalpflegeverein e. V. (Hrsg.): Mühlhäuser Beiträge, Heft 19, 9–18.
- PECSI, M.; RICHTER, G. (1996): Löss: Herkunft – Gliederung – Landschaften. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband, 98, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 391 S.
- PRECHTEL, A.; SCHNEIDER, J. (2002): Versauerung unter Wald. Arbeitshefte Boden, Heft 2002/1, Hannover, 27 S.
- RANSOM, M. D.; SMECK, N. E.; BIGHAM, J. M. (1987): Micromorphology of seasonally wet soils on the Illinoian Till Plain, USA. Geoderma, 40, 83–99.
- RENGER, M. (1965): Berechnung der Austauschkapazität der organischen und anorganischen Anteile der Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 110, 10–26.

- RICHTER, M. (2010): mündliche Auskunft. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.
- RIETHMÜLLER, H. (2009): Revierförster, mündliche Auskunft zur Nutzung des Röhringsberges, Gerbershausen.
- ROESCHMANN, G. (1968): Besonderheiten der Ton- und Eisenverlagerung in Parabraunerden aus Sandlöß südwestlich von Bremen. *Mitt. d. DBG*, 8, 277–282.
- ROHDENBURG, H.; MEYER, B. (1966): Zur Feinstratigraphie und Paläopedologie des Jungpleistozäns nach Untersuchungen an Südniedersächsischen und Nordhessischen Lössprofilen. *Mitt. d. DBG*, 5, 1–137.
- ROHDENBURG, H.; MEYER, B. (1968): Zur Datierung und Bodengeschichte mitteleuropäischer Oberflächenböden (Schwarzerde, Parabraunerde, Kalksteinbraunlehm): Spätglazial oder Holozän? *Göttinger Bodenkundliche Berichte*, 6, 127–212.
- RÖHLING, H.-G.; NOLTE, L. (2002): Die Bohrung "Heiligenstädter Martinsbrunnen" – Geologie des Deckgebirges und hydrogeologische Ergebnisse. Sonderdruck aus: Verein für Eichsfeldische Heimatkunde und Heimatverein Goldene Mark (Untereichsfeld) e.V. (Hrsg.): *Eichsfeld-Jahrbuch*, Verlag Mecke Druck, Duderstadt, 10. Jahrgang, 257–282.
- ROSE, J.; LEE, J. A.; KEMP, R. A.; HARDING, P. A. (2000): Palaeoclimate, sedimentation and soil development during the Last Glacial Stage (Devensian), Heathrow Airport, London, UK. *Quaternary Science Reviews*, 19, 827–847.
- RUSSOW, F.; HEINRICH, J. (2001): Jungholozäne Überprägungen von quartären Deckschichten und Böden des Mittelgebirgsraumes durch biomechanische Prozesse in Mitteleuropa. *Geo-Öko*, 22, 37–58.
- SCHAETZEL, R. J.; BURNS S. F.; JOHNSON, D. L.; SMALL, T. W. (1989): Tree uprooting: review of impacts on forest ecology. *Vegetatio*, 79, 165–176.
- SCHALL, W. (2002): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1: 25 000 – Erläuterungen zum Blatt 7425 Lonsee, 1. Aufl., Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i. Br., 125 S.
- SCHAEFFER, F.; MEYER, B.; GEBHARDT, H. (1966): Pechochemische und kryoklastische Verlehmung (Tonbildung) in Böden aus kalkreichen Lockersedimenten (Beispiel Löß). *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, Band 114, Heft 2, 77–89.
- SCHAEFFER, F.; WELTE, E.; MEYER, B. (1960): Die Rendsinen der mitteldeutschen Berg- und Hügellandschaften (Leine-Weser-Bergland) 1. Mitteilung: Genese und Verbreitungsbedingungen der Rendsinen. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 90, 18–36.
- SCHAEFFER, F.; WELTE, E.; MEYER, B. (1962): Die Rendsinen der mitteldeutschen Berg- und Hügellandschaften (Leine-Weser-Bergland). 2. Mitteilung, Fraktur, Nicht-carbonatgehalt und spezifische Auflösungsgeschwindigkeit des Kalkgesteins als bestimmende Größen der Bodenentwicklungsgeschwindigkeit. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 98 (1), 1–17.

- SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL – BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G. W.; SCHWERTMANN, U.; HORN, R.; KÖGEL-KNABNER, I.; STAHR, K.; AUERSWALD, K.; BEYER, L.; HARTMANN, A.; LITZ, N.; SCHEINOST, A.; STANJEK, H.; WELP, G.; WILKE, B.-M. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 593 S.
- SCHENK, E. (1955): Die periglazialen Strukturbodenbildungen als Folgen der Hydratationsvorgänge im Boden. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 6, 170–184.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P. (1961): Art und Ausmaß der Veränderungen des Tonmineralbestandes typischer Böden aus jungpleistozänem Geschiebemergel und ihrer Horizonte. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 95, 227–239.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P. (1962): Art und Ausmaß der Veränderung des Bestandes mobiler Oxyde in Böden aus jungpleistozänem Geschiebemergel und ihren Horizonten. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 96, 144–156.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P.; STAHR, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum – Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler*. 2. Aufl., Pareys Studentexte 81, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 295 S.
- SCHMIDT-LORENZ, R. (1957): Ein Beitrag zur Kenntnis der Terra fusca im Südniedersächsischen Bergland. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, 106 S.
- SCHWERTMANN, U. (1961): Der Mineralbestand der Fraktion $<2\mu$ einiger Böden aus Sedimenten und seine Eigenschaften. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 95, Heft 3, 209–227.
- SCHWERTMANN, U. (1964): Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 105/3, 194–202.
- SCHWERTMANN, U.; NIEDERBUDDE, E.-A. (1993): Tonminerale in Böden. In: *Tonminerale und Tone – Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Steinkopff Verlag, Darmstadt, 490 S.
- SEEDORF, H. H.; MEYER, H.-H. (1992): *Landeskunde Niedersachsen, Natur- und Kulturgeschichte eines Bundeslandes*. Band 1. Wachholtz Verlag, Neumünster, 517 S.
- SEMMEL, A. (2005): Periglaziale Vergangenheit und bodenkundliche Gegenwart in den deutschen Mittelgebirgen. *Wald in Sachsen-Anhalt, Gernrode (Harz)*, 15/05, 35–59.
- SKUPIN, K. (2003): Quartär, Kreide. In: *Geologischer Dienst NRW [Hrsg.]. Geologie im Weser- und Osnabrücker Bergland*. Krefeld, 65–96.
- SKUPIN, K.; SPEETZEN, E.; ZANDSTRA, J. G. (2003): Die Eiszeiten in Nordost-Westfalen und angrenzenden Gebieten Niedersachsens. *Elster- und saaleeiszeitliche*

- Ablagerungen und ihre kristallinen Leitgeschiebegesellschaften. Geologischer Dienst NRW [Hrsg.], Joh. Van Acken, Krefeld, 95 S.
- SLAGER, S.; VAN DE WETERING, H. T. J. (1977): Soil formation in archaeological pits and adjacent loess soils in southern Germany. *Journal of Archaeological Science*, 4, 259–267.
- STAHR, K. (1975): Qualitative und quantitative Erfassung von Schichtgrenzen. *Mitt. d. DBG*, 22, 633–644.
- STAHR, K., SAUER, D. (2004): Gesteinsgemische und Substratabfolgen. In: Blume, H.-P.; Felix-Henningsen, P.; Fischer, W. R.; Frede, H.-G.; Horn, R.; Stahr, K. (Hrsg.): *Handbuch der Bodenkunde*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Kap. 2.1.2.4.
- STEIN, V. (1966): Der Untere Muschelkalk zwischen dem Göttinger Wald und dem Elfas. *Wiss. Arb. f. d. 2. Staatsprüf., Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung*, Hannover, 74 S.
- STEIN, V. (1968): Stratigraphische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk Südniedersachsens. *Z. Dt. Geol. Ges.*, 117, 819–828.
- STILLE, H.; MESTWERDT, A. (1935): *Geologische Karte von Preußen – Erläuterungen zu Blatt Peckelsheim*. Preußische Geologische Landesanstalt, 2. Aufl., Berlin, 29 S.
- STOOPS, G. (2003): *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*. Soil Sci. Soc. Am, Madison, Wisconsin, USA, 184 p.
- STREIF, H. mit Beiträgen von CASPERS, G.; FREUND, H.; GEYH, M. A.; KLEINMANN, A.; MERKT, J.; MEYER, K.-D.; MÜLLER, H.; ROHDE, P.; SCHWARZ, C. (2007): Das Quartär in Niedersachsen und benachbarten Gebieten – Gliederung, geologische Prozesse, Ablagerungen und Landschaftsformen. In: Heunisch, C.; Caspers, G.; Elbracht, J.; Langer, A.; Röhling, H.-G.; Schwarz, C.; Streif, H.: *Erdgeschichte von Niedersachsen – Geologie und Landschaftsentwicklung*. *GeoBerichte* 6, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, 85 S.
- THIERMANN, A. (1984): Kreide. In: Klassen, H. (Hrsg.): *Geologie des Osnabrücker Berglandes*. Stadt Osnabrück (Naturwiss. Museum), Osnabrück, 428–455.
- THÖLE, R.; MEYER, B. (1979): Bodengenetische und -ökologische Analyse eines Repräsentativ-Areals der Göttinger Muschelkalk-Scholle als Landschaftsökologische Planungsgrundlage. *Göttinger Bodenkundliche Berichte*, 59, 1–230.
- TRASK, P. D. (1932): *Origin and environment of source pediments of petroleum*. Gulf Publ. Co., Houston/Texas, 323 S.
- VAN VLIET-LANOË, B. (1998): Frost and soils: implications for paleosols, paleoclimates and stratigraphy. *Catena*, 34, 157–183.
- VDLUFA (VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGS-ANSTALTEN) (Hrsg.) (1991): *Methodenbuch Band I – Die Untersuchung von Böden*. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

- VDLUFA (VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGS-ANSTALTEN) (Hrsg.) (2002): Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (Methodenbuch). Band I.2, VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- VEERHOFF, M.(1992): Silicatverwitterung und Veränderung des Tonmineralbestandes in Waldböden als Folge von Versauerungsvorgängen. Dissertation, Universität Bonn, Bonner Bodenk. Abh., 8, 249 S.
- VEERHOFF, M.; ROSCHER, S.; BRÜMMER, G. (1996): Ausmaß und ökologische Gefahren der Versauerung von Böden unter Wald. Forschungsbericht 107 02 004/14, Berichte Umweltbundesamt, 364 S.
- VÖLKEL, J.; LEOPOLD, M. (2001): Zur zeitlichen Einordnung der jüngsten periglazialen Aktivitätsphase im Hangrelief zentraleuropäischer Mittelgebirge. Z. Geomorph. N. F., 45, 273–294.
- WEDEPOHL, K. H. (1969): Handbook of geochemistry. Springer, Berlin, 442 p.
- WERNER, J. (1958): Zur Kenntnis der Braunen Karbonatböden (Terra fusca) auf der Schwäbischen Alb. Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart, 93 S.
- WIECHMANN, H. (2000): Gesteine als Ausgangsmaterial der Bodenentwicklung. In: Blume, H.-P.; Felix-Henningsen, P.; Fischer, W. R. ; Frede, H.-G.; Horn, R.; Stahr, K. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Kap. 2.1.2.
- WOLBURG, J. (1969): Die epirogenetischen Phasen der Muschelkalk- und Keuper-Entwicklung Nordwest-Deutschlands, mit einem Rückblick auf den Buntsandstein. Geotekt. Forsch., 32, 1–65.
- WOLFF, B.; RIEK, W. (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996, Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987–1993 (BZE), Band 1. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Bonn, 186 S.
- ZEZSCHWITZ, E. VON (1988): Die Böden des Hardehausener Waldes (Forstamtsbezirk Neuenheerse). Joh. Van Acken, Krefeld, 152 S.
- ZHANG, G.; GERMAINE, J. T.; MARTIN, R. T.; ET AL. (2003): A simple sample-mounting method for random powder x-ray diffraction. Clay and Clay Minerals, 51, 218–225.

7.2 Kartenverzeichnis

- BKG – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Hrsg.) (1998): DTK 1000 – Georeferenziertes Rasterbild der Karte „Bundesrepublik Deutschland 1: 1 000 000; Frankfurt am Main.

- BKG – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Hrsg.) (2006): DTK500-V, Georeferenzierte Rasterdaten der Karte Bundesrepublik Deutschland 1: 500 000; Frankfurt am Main.
- LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.) (2008): BK25 – Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 25 000. – Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS®); Hannover.
- LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.) (2009): GK25 – Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. – Niedersächsisches Bodeninformationssystem (NIBIS®); Hannover.
- LGN – Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (Hrsg.) (2000a): DTK 50 – Digitale topographische Karte 1 : 50 000; Hannover.
- LGN – Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (Hrsg.) (2000b): DTK 100 – Digitale Topographische Karte 1 : 100 000; Hannover.
- LGN – Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (Hrsg.) (2003): ATKIS® – Amtliches topographisches Karteninformationssystem – DLM 25.1; Hannover.
- LGN – Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (Hrsg.) (2005): DTK 25 – Digitale topographische Karte 1 : 25 000; Hannover.
- LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (Hrsg.) (1997): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1 : 25 000, Blatt 7425 Lonsee; Freiburg i. Br.
- LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (Hrsg.) (2006): Bodenübersichtskarte von Baden-Württemberg 1: 200 000, Blatt CC 7918 Stuttgart-Süd; Freiburg i. Br.
- LVERMA – Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (2009): DTK 25 – Digitale topographische Karte 1 : 25 000; Bonn.
- LV-BB – Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (Hrsg.) (1989): DTK 25 – Digitale topographische Karte 1 : 25 000; Stuttgart.
- PREUBISCH GEOLOGISCHE LANDESANSTALT (Hrsg.) (1935): Geologische Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern 1: 25 000 – Blatt 4422 Peckelsheim, Berlin.
- TLUG – Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2007): Digitalisierte Geologische Karte von Thüringen 1: 25 000, Blatt 4626 (kartiert von Moesta, F. 1878 und Pröscholdt, H. und Zeise, O. 1902); Jena.
- TLUG – Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2000): Bodengeologische Konzeptkarte im Maßstab 1:50 000, Blatt L4726 Heilbad Heiligenstadt, Jena.
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (1990): CLC 1990 – Corine Land Cover – Digitale Landbedeckungsdaten.

Inhaltsverzeichnis Anhang

Anhang I – Korngrößenverteilung.....	a-b
Anhang II – Physikalische Parameter.....	c-f
Anhang III – Chemische Parameter.....	g-h
Anhang IV – Mineralogische Parameter	
IVa – Röntgendiffraktogramme der untersuchten Böden.....	i-p
IVb – Tonminerale und Quarzgehalte.....	q-t
Anhang V – Gesamtgehalte	
Va – Elementverteilung.....	u-x
Vb – Elementan- bzw. abreicherungshorizonte.....	y-z
Anhang VI – Dünnschliffauswertung	
VIa – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Sentruper Berg a.....	aa-dd
VIb – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Sentruper Berg b.....	ee-ii
VIc – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Hardehausen.....	jj-nn
VId – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Göttinger Wald a.....	oo-pp
VIe – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Göttinger Wald b.....	qq-tt
VI f – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Göttinger Wald c.....	uu-xx
VIg – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Röhringsberg a.....	yy-bbb
VIh – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Röhringsberg b.....	ccc-fff
VIi – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Holzkirch.....	ggg-kkk
Anhang VII – Massenbilanzierung	
VIIa – Berechnung der maximalen Tonmasse aus Löss und Schluffmassenanalyse.....	lll-mmm
VIIb – Berechnung des Lössanteils mittels Tonmassenanalyse.....	mmm

Anhang I – Korngrößenverteilung

Art	Tiefe [cm]	Horizont	[Gew.-%]										B.- art KA5	Car- bo- nat [%]	gU/ fU	gU/ (fU+ mU)
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	U	S					
SBa	Mb.	0-3	Ah	0,2	0,8	3,1	48	16	7	24	72	4	Ut4	0,0	6,5	2,1
		3-18	Al-Bv	0,0	0,6	2,6	50	14	6	26	71	3	Tu4	0,0	8,2	2,5
		18-35	Bvt	0,1	0,4	2,1	49	13	4	32	66	3	Tu4	0,0	11,2	2,9
		35-50	IIBt-Tv	0,0	0,2	1,3	17	7	7	67	31	1	Tt	0,0	2,2	1,1
	Fm.	50-69	cCv	0,0	0,1	0,4	6	7	8	78	21	1	Tt	50,5	0,7	0,4
		69-88	cmCv	0,0	0,1	0,7	4	6	15	74	26	1	Tt	69,3	0,3	0,2
Stein	50-69	cCv	0,0	0,0	0,5	4	11	14	70	29	0	Tt	92,5	0,3	0,2	
	69-88	cmCv	0,0	0,0	0,6	3	9	17	70	29	1	Tt	92,3	0,2	0,1	
SBb	Mb.	0-4	Ah	0,2	2,1	3,8	60	15	4	16	78	6	Ut3	0,0	16,5	3,2
		4-30	Al+Btv	0,1	1,7	3,2	61	15	3	16	79	5	Ut3	0,0	21,0	3,4
		30-49	Sw-Btv	0,1	1,1	2,5	64	13	3	16	80	4	Ut3	0,0	22,4	4,1
		49-61	IISd-Bvt-Tv	0,2	0,6	1,6	25	8	8	55	42	2	Tu2	0,0	3,0	1,5
	Fm.	61-70	Sd-Bt-Tv	0,1	0,2	0,7	12	9	10	68	30	1	Tt	0,1	1,2	0,6
		70-90	cCv1	0,2	0,5	1,2	17	12	10	58	40	2	Tu2	50,1	1,7	0,7
Stein	90-120	cCv2	0,4	0,4	0,7	4	11	12	71	28	1	Tt	65,1	0,4	0,2	
	70-90	cCv1	0,0	0,2	0,9	3	11	12	73	26	1	Tt	85,1	0,3	0,1	
HARD	Mb.	0-5	Ah	0,4	2,1	1,9	10	16	13	57	38	4	Tu2	0,0	0,7	0,3
		5-17	Al-Bv-Tv	0,5	1,9	1,7	9	15	12	60	36	4	Tu2	0,0	0,7	0,3
		17-29	Bt-Tv	0,1	1,2	0,8	7	8	8	75	23	2	Tt	1,8	0,9	0,4
		29-44	Tv	0,1	0,8	0,6	5	8	9	77	22	1	Tt	5,7	0,5	0,3
	Fm.	44-61	cCv	4,7	1,9	1,1	4	9	10	70	22	8	Tt	45,4	0,4	0,2
	Stein	17-29	Bt-Tv	0,0	0,1	0,7	5	16	18	60	39	1	Tu2	95,8	0,3	0,1
29-44		Tv	0,0	0,0	0,4	6	18	19	57	42	0	Tu2	97,3	0,3	0,2	
GOWa	Mb.	0-6	Ah	0,3	0,5	1,1	17	15	12	54	44	2	Tu2	0,0	1,5	0,7
		6-14	Ah-Bv-Tv	0,1	0,2	0,6	18	15	9	57	42	1	Tu2	0,0	2,0	0,8
		14-23	Bv-Tv	0,0	0,0	0,4	18	14	7	60	40	0	Tu2	0,1	2,5	0,8
	Fm.	23-31	Tv-cCv	0,0	0,0	0,2	9	10	6	75	25	0	Tt	32,1	1,3	0,5
		31-44	cCv	0,0	0,0	0,1	2	6	8	84	16	0	Tt	64,3	0,2	0,1
	Stein	23-31	Tv-cCv	0,0	0,0	0,2	1	8	15	75	25	0	Tt	94,4	0,1	0,1
31-44		cCv	0,0	0,0	0,1	0	8	16	76	24	0	Tt	93,7	0,0	0,0	
GOWb	Mb.	0-10	Ah	0,2	0,2	0,8	24	18	8	49	50	1	Tu2	0,0	3,0	0,9
		10-21	Al-Bv	0,1	0,2	0,7	24	18	8	50	49	1	Tu2	0,0	2,9	0,9
		21-30	Btv-Tv	0,1	0,1	0,6	23	16	8	52	47	1	Tu2	0,0	2,9	1,0
		30-43	Bvt-Tv	0,0	0,0	0,4	19	12	6	62	38	0	Tu2	0,1	3,1	1,0
	Fm.	43-70	cCv	0,0	0,0	0,1	3	8	10	78	21	0	Tt	67,3	0,4	0,2
	Stein	30-43	Bvt-Tv	0,0	0,0	0,3	5	16	15	63	37	0	Tu2	95,7	0,4	0,2
43-70		cCv	0,0	0,0	0,1	3	17	18	62	38	0	Tu2	94,7	0,2	0,1	

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	[Gew.-%]											B.- art KA5	Car- bo- nat [%]	gU/ fU	gU/ (fU+ mU)
				gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	U	S						
GOWc	Mb.	0-5	Ah	0,1	0,1	0,7	37	24	8	30	69	1	Tu4	0,0	4,7	1,2		
		5-23	Ah+Bv-Al	0,1	0,1	0,7	39	23	8	30	70	1	Tu4	0,0	5,1	1,3		
		23-30	Bvt	0,0	0,1	0,6	33	20	7	39	61	1	Tu3	0,0	4,9	1,2		
		30-40	Bvt-Tv	0,1	0,2	0,9	26	16	4	53	46	1	Tu2	0,0	7,1	1,3		
		40-60	Bvt-Tv+cCv	0,0	0,1	0,9	25	13	7	55	44	1	Tu2	0,0	3,8	1,3		
	Fm.	60-70	cCv1	0,0	0,0	0,4	21	15	6	58	41	0	Tu2	27,7	3,8	1,0		
		70-90	cCv2	0,0	0,0	0,5	28	16	6	49	50	1	Tu2	30,4	4,7	1,3		
	Stein	40-60	Bvt-Tv+cCv	0,0	0,0	0,5	12	19	17	52	48	1	Tu2	98,0	0,7	0,3		
		60-70	cCv1	0,0	0,0	0,6	10	19	15	56	43	1	Tu2	97,2	0,6	0,3		
70-90		cCv2	0,0	0,0	0,3	10	16	16	57	42	0	Tu2	96,5	0,6	0,3			
RBa	Mb.	0-6	Ah	0,1	0,3	3,5	21	20	11	44	52	4	Tu3	0,0	1,8	0,7		
		6-20	Alh-Bv	0,1	0,3	2,6	20	19	11	46	51	3	Tu2	0,0	1,8	0,7		
		20-35	IIBt-Tv	0,0	0,2	1,2	10	7	7	74	24	1	Tt	0,0	1,3	0,7		
	Stein	35-45	cmCv	0,0	0,1	0,5	5	12	19	64	36	1	Tu2	98,8	0,3	0,2		
RBb	Mb.	0-5	Ah	0,0	0,2	2,2	34	25	11	28	70	2	Tu4	0,0	3,0	0,9		
		5-23	Al	0,0	0,2	2,1	39	26	10	23	75	2	Ut4	0,0	3,7	1,1		
		23-36	Sw-Bt	0,0	0,3	2,1	35	22	9	33	65	2	Tu3	0,0	3,9	1,1		
		36-65	IISd-Bvt-Tv	0,0	0,0	0,9	19	14	6	60	39	1	Tu2	0,0	2,9	0,9		
	Stein	65-75	cCv	0,0	0,0	0,3	5	15	17	63	37	0	Tu2	99,5	0,3	0,2		
HOLZ	Mb.	0-7	Ah	0,7	0,9	1,0	26	31	11	29	68	3	Tu4	0,0	2,4	0,6		
		7-22	Al-Bv	0,8	1,0	1,1	28	33	10	25	72	3	Tu4	0,0	2,7	0,6		
		22-40	Btv	0,7	0,8	1,0	26	32	11	29	69	3	Tu4	0,0	2,3	0,6		
		40-57	Bvt	0,4	0,6	0,7	20	25	10	43	56	2	Tu3	0,0	2,0	0,6		
		57-70	IIBvt-Tv	0,3	0,5	1,0	12	16	6	64	34	2	Tu2	0,0	2,2	0,6		
	Stein	70-80	Tv+cCv	0,0	1,0	1,2	0	2	7	89	8	2	Tt	99,8	0,0	0,0		

Abkürzungen:

gS Grobsand, mS Mittelsand, fS Feinsand, gU Grobschluff, mU Mittelschluff, fU Feinschluff, T Ton, U Schluff, S Sand, Mb. Mineralboden, Fm. Feinmaterial (carbonathaltiger Verwitterungsschutt < 2 mm), Stein Kalkstein \geq 2 mm

Anhang II – Physikalische Parameter (graue Werte = geschätzt)

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	Grobboden ≥ 2mm			Mineralboden											kf [m/s]	Stufe		
				Skelett [Vol.-%]	X/Gr [g/cm³]	Dichte [g/cm³]	dB	dF	pF 1,8	pF 2,5	pF 4,2	mP	gP	LK	GPV	nFK	nFKWe [mm]				
SBa	Mb.	0-3	Ah				1,25	2,60										27			
		3-18	Al-Bv				1,25	2,60	34	30	16	15	22	18	52	18		79		1,47·10 ⁻⁰⁵	5
	Fm.	18-35	Bvt				1,25	2,60										18			
		35-50	IIBt-Tv				1,25	2,68	42	39	34	5	14	11	53	8		79		3,68·10 ⁻⁰⁶	3
	Stein	50-69	cCv				1,25	2,68										8			
		69-88	cmCv				1,25	2,68										8			
SBb	Mb.	0-4	Ah				1,37	2,70										28			
		4-30	Al+Btv				1,37	2,70	35	25	9	16	24	14	49	26		173		1,00·10 ⁻⁰⁵	4
	Fm.	30-49	Sw-Btv				1,52	2,67	36	29	9	20	14	7	43	27		173		3,15·10 ⁻⁰⁶	3
		49-61	IISd-Bvt-Tv				1,31	2,79	49	46	26	20	7	4	53	22		173		2,85·10 ⁻⁰⁸	1
	Stein	61-70	Sd-Bt-Tv				1,35	2,70	52	50	33	17	2	0	52	19		173		1,64·10 ⁻⁰⁸	1
		70-90	cCv1				1,35	2,70										19			
	Stein	90-120	cCv2				1,35	2,70										19			
70-90		cCv1	90	60/30	2,45																
Stein	90-120	cCv2	85	10/75	2,46																
	HARD	Mb.	0-5	Ah				0,89	2,69	50	46	6	40	21	17	67	44		95		2,59·10 ⁻⁰⁴
5-17			Al-Bv-Tv				0,97	2,75	44	42	6	36	23	20	65	39		95		5,24·10 ⁻⁰⁴	6
Fm.		17-29	Bt-Tv				1,20	2,75										20			
		29-44	Tv				1,20	2,75										20			
Stein		44-61	cCv				1,20	2,75													
		17-29	Bt-Tv	45	10/35	2,55															
	29-44	Tv	55	5/50	2,52																
44-61	cCv	90	2/88	2,58																	

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	Grobboden $\geq 2\text{mm}$			Mineralboden											Stufe		
				Skelett [Vol.-%]	X/Gr [g/cm ³]	Dichte [g/cm ³]	dB [g/cm ³]	dF [g/cm ³]	pF 1,8	pF 2,5	pF 4,2 [Vol.-%]		mP	gP	LK	GPV	nFK		nFKWe [mm]	kf [m/s]
GOWa	Mb.	0-6	Ah				0,91	2,59	56	52	38	14	13	8	65	19		$1,80 \cdot 10^{-04}$	6	
		6-14	Ah-Bv-Tv				1,09	2,65	50	46	30	17	13	9	59	20		$4,64 \cdot 10^{-07}$	2	
		14-23	Bv-Tv	0,5	0/0,5	2,51	1,16	2,67	48	45	33	12	12	9	57	15	41	$4,31 \cdot 10^{-07}$	2	
	Fm.	23-31	Tv-cCv	0,5	0/0,5	2,51	1,16	2,67												
		31-44	cCv	1,0	0/1,0	2,51	1,16	2,67												
	Stein	23-31	Tv-cCv	61	0/61	2,51														
31-44		cCv	82	0/82	2,54															
GOWb	Mb.	0-10	Ah				0,86	2,71	50	46	31	15	22	18	68	19		$1,05 \cdot 10^{-04}$	6	
		10-21	Al-Bv				0,93	2,83	43	40	27	12	27	24	67	16		$1,16 \cdot 10^{-04}$	6	
		21-30	Btv-Tv				1,11	2,78	41	39	29	10	21	19	60	13	63	$1,48 \cdot 10^{-04}$	6	
	Fm.	30-43	Bvt-Tv	3	2/1	2,56	1,11	2,78								18				
		43-70	cCv	3	2/1	2,56	1,11	2,78												
	Stein	30-43	Bvt-Tv	31	30/1	2,56														
43-70		cCv	85	15/70	2,58															
GOWc	Mb.	0-5	Ah				1,03	2,60	47	41	29	13	19	14	60	18		$1,08 \cdot 10^{-04}$	6	
		5-23	Ah+Bv-Al				1,21	2,63	42	36	22	15	18	13	54	20		$7,53 \cdot 10^{-06}$	4	
		23-30	Bvt				1,34	2,65	39	37	33	3	13	10	49	6	88	$6,21 \cdot 10^{-07}$	2	
	Fm.	30-40	Bvt-Tv				1,23	2,64	44	42	36	6	12	10	53	8		$7,73 \cdot 10^{-08}$	1	
		40-60	Bvt-Tv+cCv				1,23	2,64								18				
	Stein	60-70	cCv1				1,23	2,64												
		70-90	cCv2	15	10/5	2,54	1,23	2,64												
	Stein	40-60	Bvt-Tv+cCv	70	40/30	2,54														
60-70		cCv1	58	3/55	2,54															
70-90		cCv2	61	16/45	2,52															

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	Grobboden \geq 2mm			Mineralboden											kf [m/s]	Stufe	
				Skelett [Vol.-%]	X/Gr [g/cm ³]	Dichte [g/cm ³]	dB [g/cm ³]	dF [g/cm ³]	pF 1,8	pF 2,5	pF 4,2 [Vol.-%]	mP	gP	LK	GPV	nFK	nFKWe [mm]			
RBa	Mb.	0-6	Ah				1,20	2,69									29			
		6-20	Alh-Bv				1,20	2,69	44	40	30	10	15	11	55	14			$3,03 \cdot 10^{-06}$	3
		20-35	IIBt-Tv	20	10/10	2,48	1,24	2,73	41	40	31	9	15	14	55	10	49		$2,89 \cdot 10^{-06}$	3
	Stein	35-45	cmCv	100	98/2	2,48														
RBb	Mb.	0-5	Ah				1,31	2,67									16			
		5-23	Al				1,31	2,67	42	37	17	20	14	9	51	25			$9,15 \cdot 10^{-06}$	4
		23-36	Sw-Bt				1,32	2,70	36	33	15	18	18	15	51	21	91		$2,66 \cdot 10^{-05}$	5
		36-65	IISd-Bvt-Tv				1,41	2,73	38	36	35	1	12	10	49	3			$2,98 \cdot 10^{-06}$	3
	Stein	65-75	cCv	85	45/40	2,61	1,41	2,73								3				
HOLZ	Mb.	0-7	Ah				1,11	2,76	40	34	18	16	26	19	60	22			$7,81 \cdot 10^{-05}$	6
		7-22	Al-Bv				1,14	2,74	36	32	16	16	27	22	58	21			$1,53 \cdot 10^{-04}$	6
		22-40	Btv				1,32	2,71	35	32	20	11	20	16	51	15	102		$4,86 \cdot 10^{-05}$	6
		40-57	Bvt				1,54	2,77	39	37	28	9	8	6	44	10			$1,39 \cdot 10^{-07}$	2
		57-70	IIBvt-Tv				1,45	2,78	44	42	36	6	5	4	48	7			$1,09 \cdot 10^{-08}$	1
	Stein	70-80	Tv+cCv	80	60/20	2,56	1,45	2,78								7				

Abkürzungen:

X kantige Steine, Gr Grus, dB Lagerungsdichte, dF Dichte der Festsubstanz, pF Wasserspannung (pF 4,2 = Feinporen), mP Mittelporen, gP Grobporen, LK Luftkapazität, GPV Gesamtporenvolumen, nFK nutzbare Feldkapazität, nFKWe nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, kf gesättigte Wasserleitfähigkeit, Mb. Mineralboden, Fm. Feinmaterial (carbonathaltiger Verwitterungsschutt < 2 mm), Stein Kalkstein \geq 2 mm

Art	Tiefe [cm]	Horizont	Carbo- nat	C _t	C _{org}	Hu- mus	N _t	C/N	pH			Farbe Rückst.	
									KCl	CaCl ₂	H ₂ O	Munsell	
GOWc	Mb.	0-5	Ah	0,0	3,04	3,04	5,2	0,22	14	3,7	4,1	4,8	
		5-23	Ah+Bv-Al	0,0	2,07	2,07	3,6	0,16	13	3,6	3,9	4,5	
		23-30	Bvt	0,0	1,35	1,34	2,3	0,11	12	3,9	4,4	5,3	
		30-40	Bvt-Tv	0,0	1,12	1,12	1,9	0,11	10	4,9	5,5	6,2	
		40-60	Bvt-Tv+cCv	0,0	1,17	1,17	2,0	0,13	9	5,9	6,3	7,0	
	Fm.	60-70	cCv1	27,7	4,11	0,79	1,4	0,08	11	7,1	7,4	7,9	10YR 4/4
		70-90	cCv2	30,4	4,37	0,72	1,2	0,06	12	7,1	7,4	8,0	10YR 4/4
	Stein	40-60	Bvt-Tv+cCv	98,0									2.5Y 4/3
		60-70	cCv1	97,2									2.5Y 4/3
		70-90	cCv2	96,5									2.5Y 4/2
RBa	Mb.	0-6	Ah	0,0	3,99	3,99	6,9	0,35	11	4,1	4,5	5,0	
		6-20	Alh-Bv	0,0	1,84	1,84	3,2	0,15	12	3,8	4,2	4,8	
		20-35	IIBt-Tv	0,0	2,17	2,17	3,7	0,20	11	4,9	5,6	6,1	
	Stein	35-45	cmCv	98,8									2.5Y 4/4
RBb	Mb.	0-5	Ah	0,0	2,52	2,52	4,3	0,20	12	3,7	3,9	4,3	
		5-23	Al	0,0	1,09	1,09	1,9	0,07	15	3,9	4,0	4,4	
		23-36	Sw-Bt	0,0	0,49	0,49	0,8	0,05	10	3,9	4,3	4,9	
		36-65	IISd-Bvt-Tv	0,0	0,80	0,79	1,4	0,10	8	4,2	5,0	5,7	
	Stein	65-75	cCv	99,5									2.5Y 4/2
HOLZ	Mb.	0-7	Ah	0,0	2,53	2,52	4,4	0,21	12	4,2	4,6	5,3	
		7-22	Al-Bv	0,0	1,47	1,47	2,5	0,14	11	3,8	4,2	5,0	
		22-40	Btv	0,0	0,79	0,79	1,4	0,08	9	3,9	4,4	5,2	
		40-57	Bvt	0,0	0,45	0,45	0,8	0,06	7	4,0	4,7	5,6	
		57-70	IIBvt-Tv	0,0	0,51	0,51	0,9	0,07	7	4,7	5,4	5,9	2.5Y 4/3
	Stein	70-80	Tv+cCv	99,8					14				

Abkürzungen:

C_t Kohlenstoff, C_{org} organischer Kohlenstoff, N_t Stickstoff, Farbe Rückst. Farbe des labor-technisch gewonnenen Lösungsrückstands nach Munsell-Farbtabelle, Mb. Mineralboden, Fm. Feinmaterial (carbonathaltiger Verwitterungsschutt < 2 mm), Stein Kalkstein ≥ 2 mm

Anhang IV – Mineralogische Untersuchungen
IVa – Röntgendiffraktogramme der untersuchten Böden
(Pulverdiagramme der gemahlene Feinerde)

Zur übersichtlicheren Darstellung sind die einzelnen Röntgendiffraktogramme gegeneinander verschoben, die auf der Y-Achse aufgetragene Intensität ist daher nur als relative Angabe zu verstehen. Der Netzebenenabstand d ist in Ångström angegeben ($1\text{Å}=0,1\text{ nm}$), Die d_{001} Reflexe der Tonminerale bei 1,42 nm, 1,0 nm und 0,72 nm wurden in den grau hinterlegten Bereichen ausgemessen. Die mit Glycerin belegten Präparate sind ebenfalls aufgeführt.

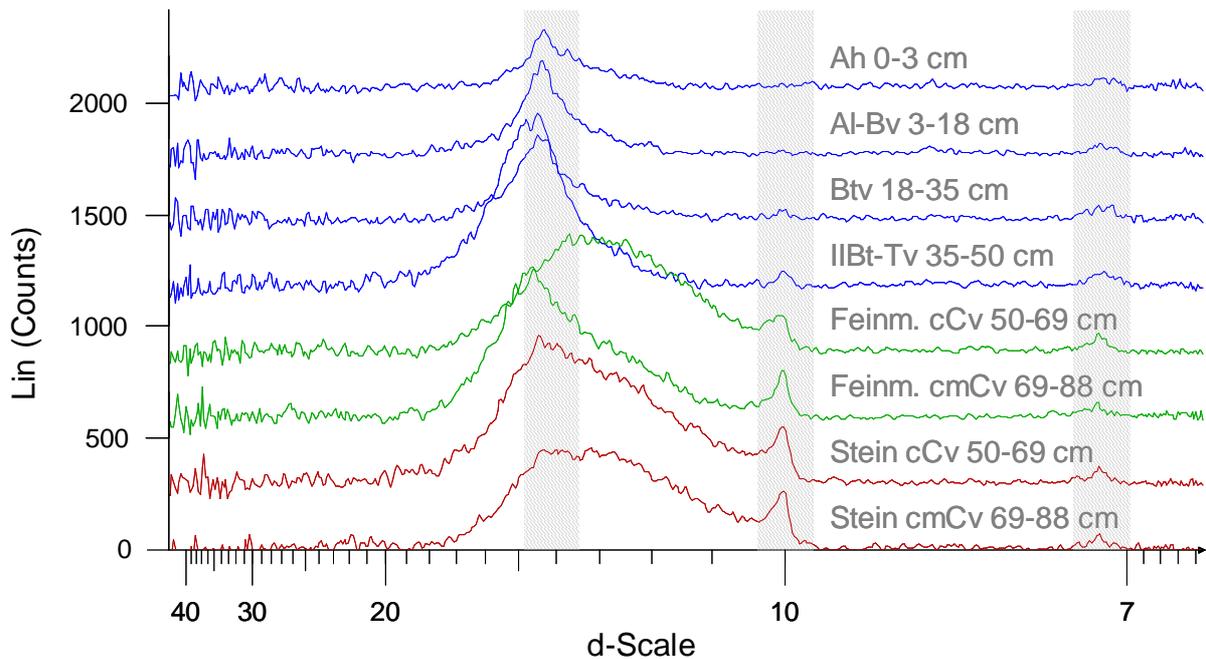


Abb. IVa-1: Röntgendiffraktogramme Standort Sentruper Berg a (SBa)

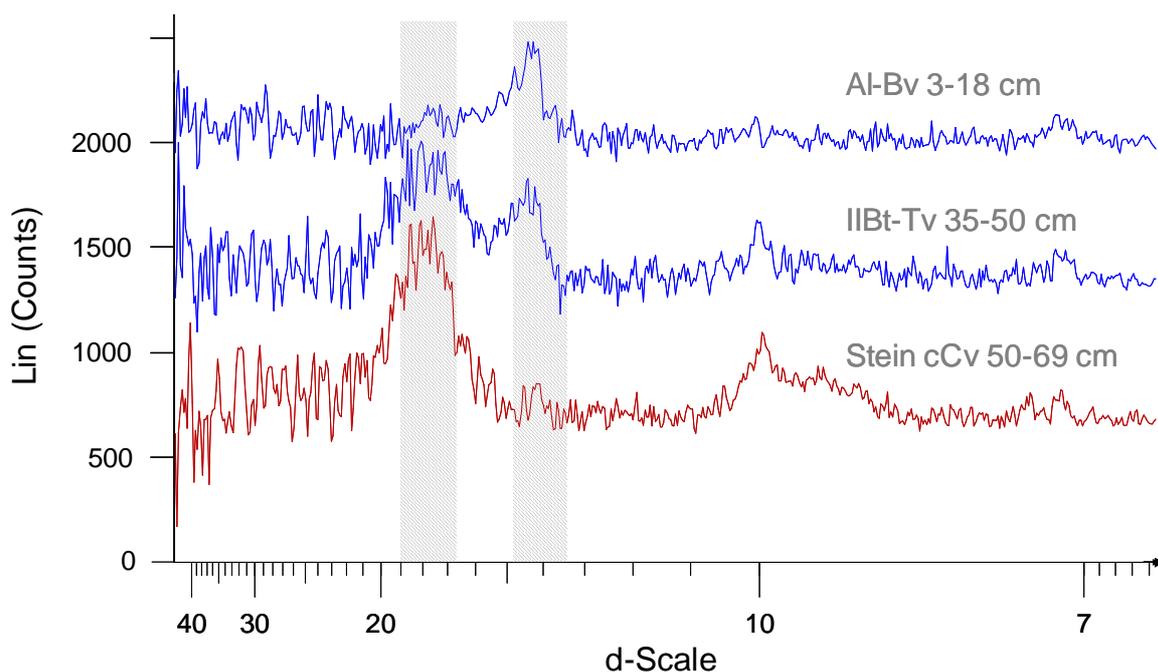


Abb. IVa-2: mit Glycerin belegte Röntgendiffraktogramme Sentruper Berg a (SBa)

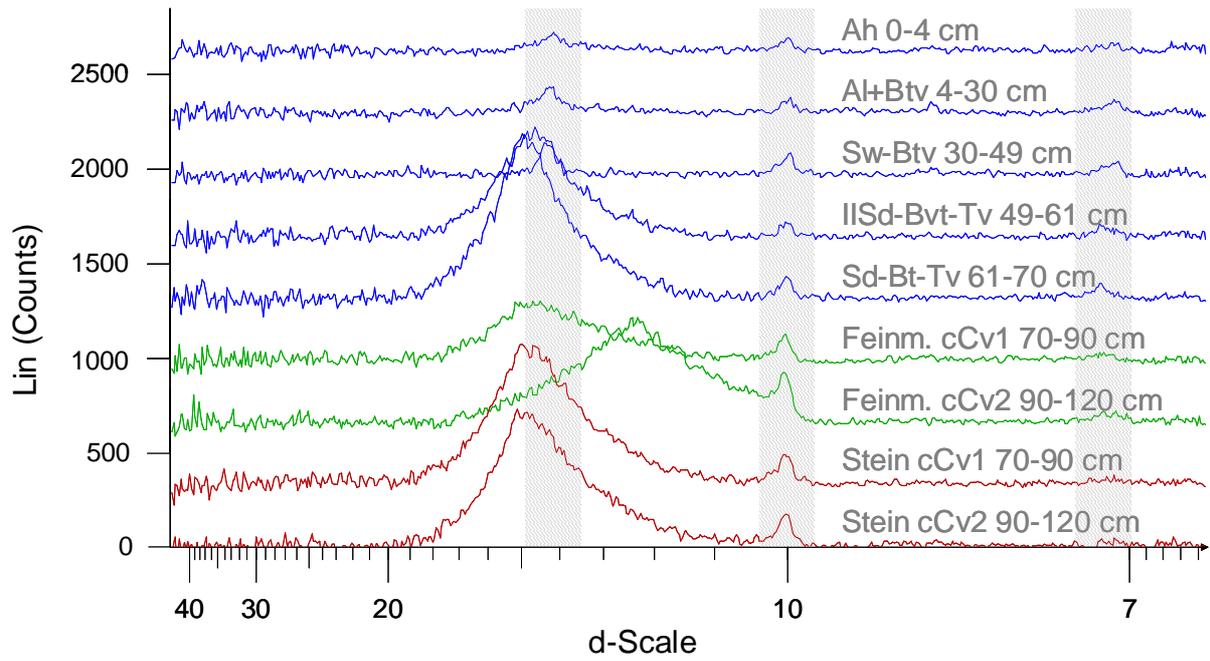


Abb. IVa-3: Röntgendiffraktogramm Standort Sentruper Berg b (SBb)

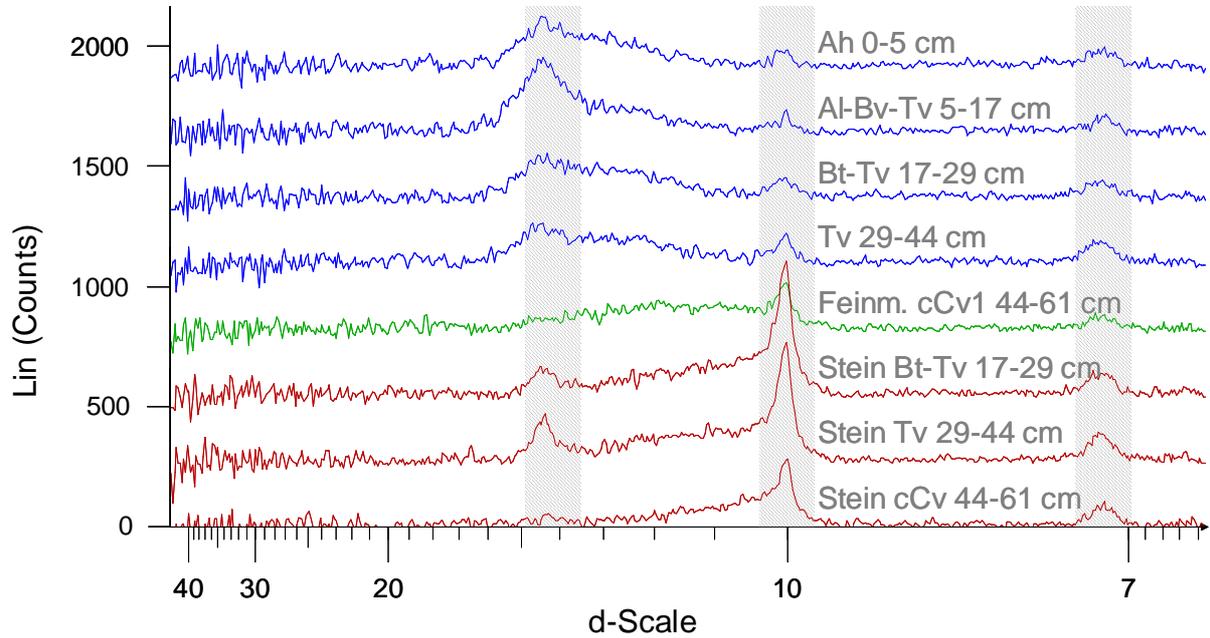


Abb. IVa-4: Röntgendiffraktogramm Standort Hardehausen (HARD)

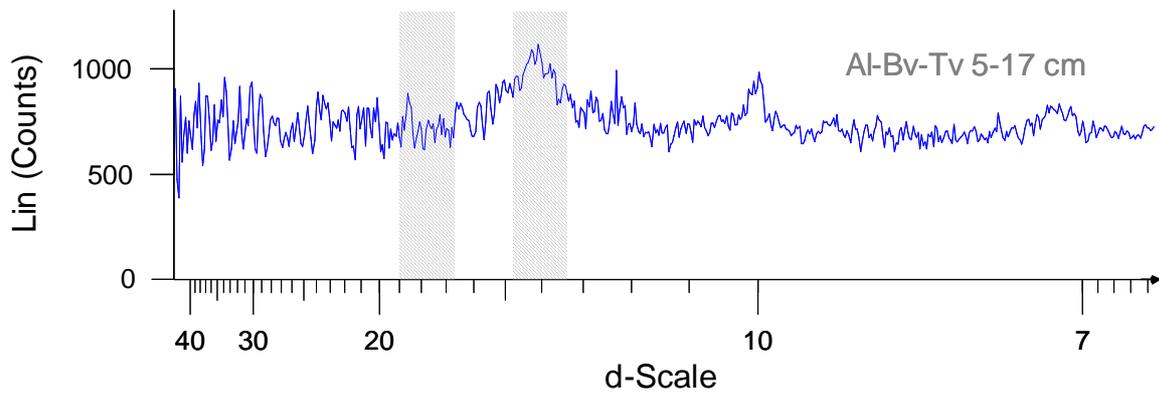


Abb. IVa-5: mit Glycerin belegtes Röntgendiffraktogramm Hardehausen (HARD)

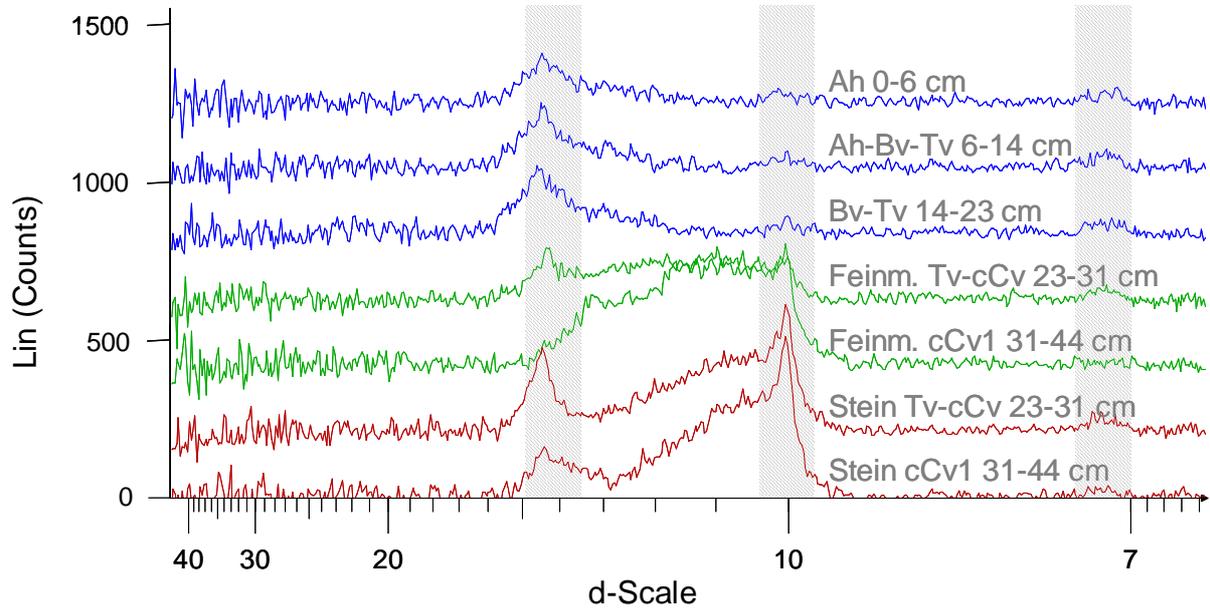


Abb. IVa-6: Röntgendiffraktogramm Standort Göttinger Wald a (GOWa)

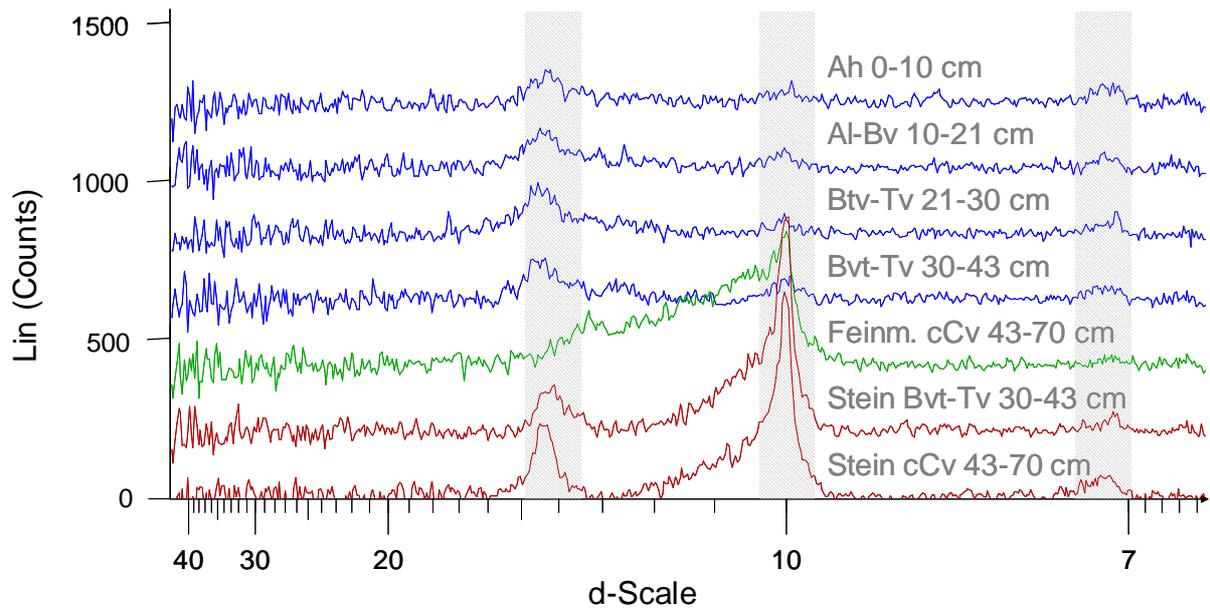


Abb. IVa-7: Röntgendiffraktogramm Standort Göttinger Wald b (GOWb)

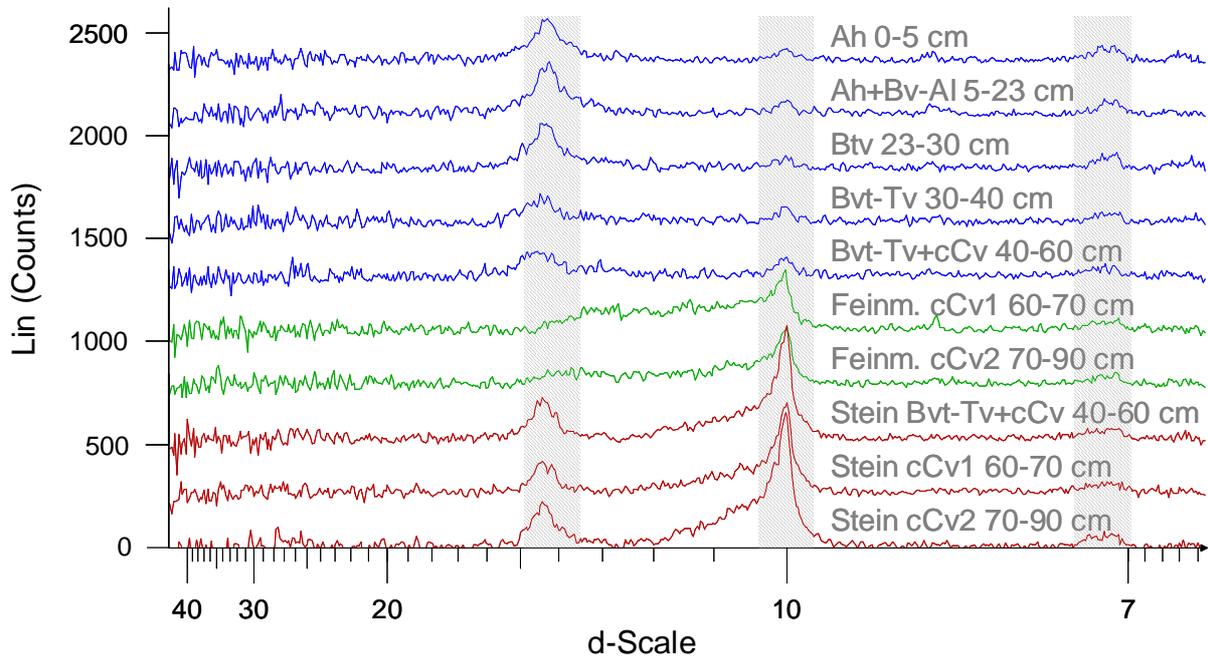


Abb. IVa-8: Röntgendiffraktogramm Standort Göttinger Wald c (GOWc)

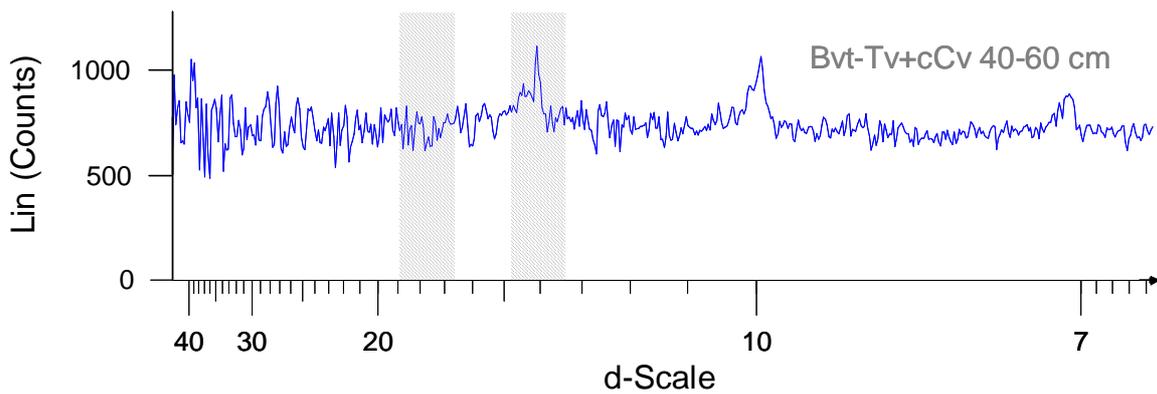


Abb. IVa-9: mit Glycerin belegtes Röntgendiffraktogramm Göttinger Wald c (GOWc)

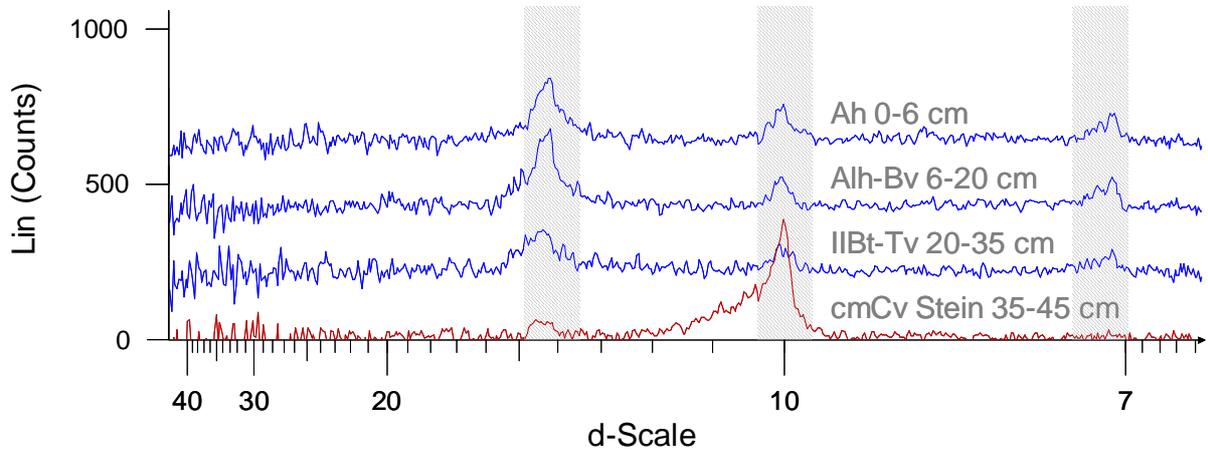


Abb. IVa-10: Röntgendiffraktogramm Standort Röhringsberg a (RBa)

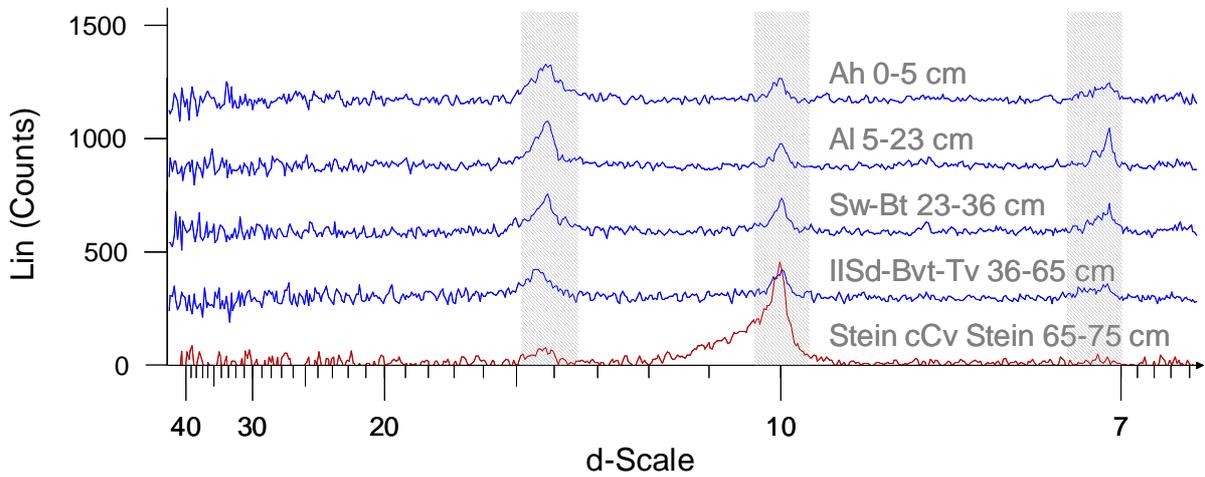


Abb. IVa-11: Röntgendiffraktogramm Standort Röhringsberg b (RBb)

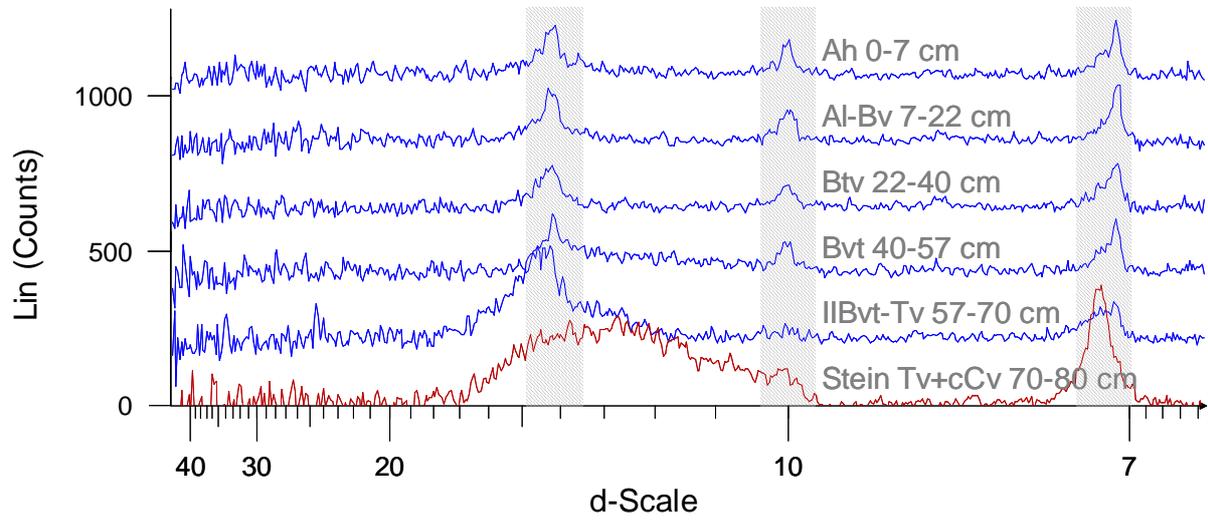


Abb. IVa-12: Röntgendiffraktogramm Standort Holzkirch (HOLZ)

IVb – Tonminerale und Quarzgehalte

Art	Tiefe [cm]	Horizont	bereinigte Tonmineralintensitäten			Mengenverteilung der drei Tonmineralgruppen			Quarz [%]	
			1,42 nm	1,0 nm	0,72 nm	1,42 nm	1,0 nm	0,72 nm		
SBa	Mb.	0-3	Ah	0,45	0,03	0,06	0,14	0,03	0,03	63
		3-18	Al-Bv	0,75	0,02	0,05	0,22	0,02	0,03	61
	Fm.	18-35	Bvt	0,83	0,05	0,10	0,25	0,05	0,05	55
		35-50	IIBt-Tv	1,85	0,06	0,09	0,56	0,06	0,05	29
		50-69	cCv	1,48	0,32	0,10	0,44	0,32	0,05	20
	Stein	69-88	cmCv	1,76	0,26	0,08	0,53	0,26	0,04	23
		50-69	cCv	1,88	0,39	0,08	0,57	0,39	0,04	25
		69-88	cmCv	1,31	0,40	0,08	0,39	0,40	0,04	26
SBb	Mb.	0-4	Ah	0,13	0,06	0,05	0,04	0,06	0,02	65
		4-30	Al+Btv	0,21	0,08	0,09	0,06	0,08	0,04	65
	Fm.	30-49	Sw-Btv	0,19	0,11	0,08	0,06	0,11	0,04	66
		49-61	IISd-Bvt-Tv	1,44	0,08	0,08	0,43	0,08	0,04	34
		61-70	Sd-Bt-Tv	1,93	0,12	0,10	0,58	0,12	0,05	26
	Stein	70-90	cCv1	0,86	0,13	0,06	0,26	0,13	0,03	37
		90-120	cCv2	0,73	0,39	0,09	0,22	0,39	0,04	27
		70-90	cCv1	1,88	0,18	0,06	0,56	0,18	0,03	35
	90-120	cCv2	1,84	0,19	0,03	0,55	0,19	0,02	30	
HARD	Mb.	0-5	Ah	0,46	0,08	0,12	0,14	0,08	0,06	29
		5-17	Al-Bv-Tv	0,73	0,09	0,10	0,22	0,09	0,05	26
	Fm.	17-29	Bt-Tv	0,49	0,14	0,14	0,15	0,14	0,07	19
		29-44	Tv	0,46	0,18	0,20	0,14	0,18	0,10	16
		44-61	cCv	0,16	0,35	0,11	0,05	0,35	0,05	13
	Stein	17-29	Bt-Tv	0,20	0,77	0,16	0,06	0,77	0,08	21
		29-44	Tv	0,29	0,69	0,19	0,09	0,69	0,09	21
		44-61	cCv	0,09	0,49	0,16	0,03	0,49	0,08	24
GOWa	Mb.	0-6	Ah	0,28	0,06	0,06	0,08	0,06	0,03	28
		6-14	Ah-Bv-Tv	0,37	0,07	0,08	0,11	0,07	0,04	31
		14-23	Bv-Tv	0,44	0,07	0,08	0,13	0,07	0,04	31
	Fm.	23-31	Tv-cCv	0,34	0,26	0,07	0,10	0,26	0,03	19
		31-44	cCv	0,21	0,68	0,03	0,06	0,68	0,01	12
	Stein	23-31	Tv-cCv	0,42	0,70	0,09	0,13	0,70	0,04	15
	31-44	cCv	0,35	0,91	0,05	0,11	0,91	0,02	13	
GOWb	Mb.	0-10	Ah	0,18	0,08	0,09	0,05	0,08	0,05	36
		10-21	Al-Bv	0,24	0,09	0,06	0,07	0,09	0,03	38
		21-30	Btv-Tv	0,29	0,08	0,08	0,09	0,08	0,04	34
		30-43	Bvt-Tv	0,28	0,12	0,09	0,08	0,12	0,05	28
	Fm.	43-70	cCv	0,18	0,77	0,04	0,05	0,77	0,02	14
	Stein	30-43	Bvt-Tv	0,28	1,08	0,08	0,08	1,08	0,04	23
		43-70	cCv	0,35	0,89	0,12	0,10	0,89	0,06	21

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	bereinigte Tonmineralintensitäten			Mengenverteilung der drei Tonmineralgruppen			Quarz [%]
				1,42 nm	1,0 nm	0,72 nm	1,42 nm	1,0 nm	0,72 nm	
GOWc	Mb.	0-5	Ah	0,36	0,07	0,11	0,11	0,07	0,05	50
		5-23	Ah+Bv-Al	0,47	0,09	0,10	0,14	0,09	0,05	50
		23-30	Bvt	0,41	0,07	0,10	0,12	0,07	0,05	46
		30-40	Bvt-Tv	0,20	0,08	0,07	0,06	0,08	0,03	31
		40-60	Bvt-Tv+cCv	0,28	0,13	0,10	0,08	0,13	0,05	27
	Fm.	60-70	cCv1	0,09	0,42	0,09	0,03	0,42	0,04	31
		70-90	cCv2	0,13	0,39	0,08	0,04	0,39	0,04	35
	Stein	40-60	Bvt-Tv+cCv	0,29	0,71	0,09	0,09	0,71	0,05	24
		60-70	cCv1	0,25	0,67	0,11	0,07	0,67	0,05	23
70-90		cCv2	0,37	1,00	0,12	0,11	1,00	0,06	23	
RBa	Mb.	0-6	Ah	0,32	0,14	0,11	0,10	0,14	0,06	37
		6-20	Alh-Bv	0,39	0,09	0,12	0,12	0,09	0,06	41
		20-35	IIBt-Tv	0,27	0,12	0,10	0,08	0,12	0,05	19
	Stein	35-45	cmCv	0,11	0,71	0,03	0,03	0,71	0,01	16
RBb	Mb.	0-5	Ah	0,26	0,09	0,11	0,08	0,09	0,05	51
		5-23	Al	0,24	0,08	0,12	0,07	0,08	0,06	59
		23-36	Sw-Bt	0,21	0,14	0,12	0,06	0,14	0,06	48
		36-65	IISd-Bvt-Tv	0,21	0,15	0,09	0,06	0,15	0,04	27
	Stein	65-75	cCv	0,12	0,77	0,03	0,04	0,77	0,01	18
HOLZ	Mb.	0-7	Ah	0,20	0,10	0,16	0,06	0,10	0,08	49
		7-22	Al-Bv	0,21	0,10	0,17	0,06	0,10	0,09	55
		22-40	Btv	0,20	0,09	0,17	0,06	0,09	0,09	52
		40-57	Bvt	0,29	0,13	0,18	0,09	0,13	0,09	45
		57-70	IIBvt-Tv	0,69	0,06	0,22	0,21	0,06	0,11	29
	Stein	70-80	Tv+cCv	0,85	0,29	0,80	0,25	0,29	0,40	1

Abkürzungen:

Mb. Mineralboden, Fm. Feinmaterial (carbonathaltiger Verwitterungsschutt < 2 mm),
Stein Kalkstein \geq 2 mm

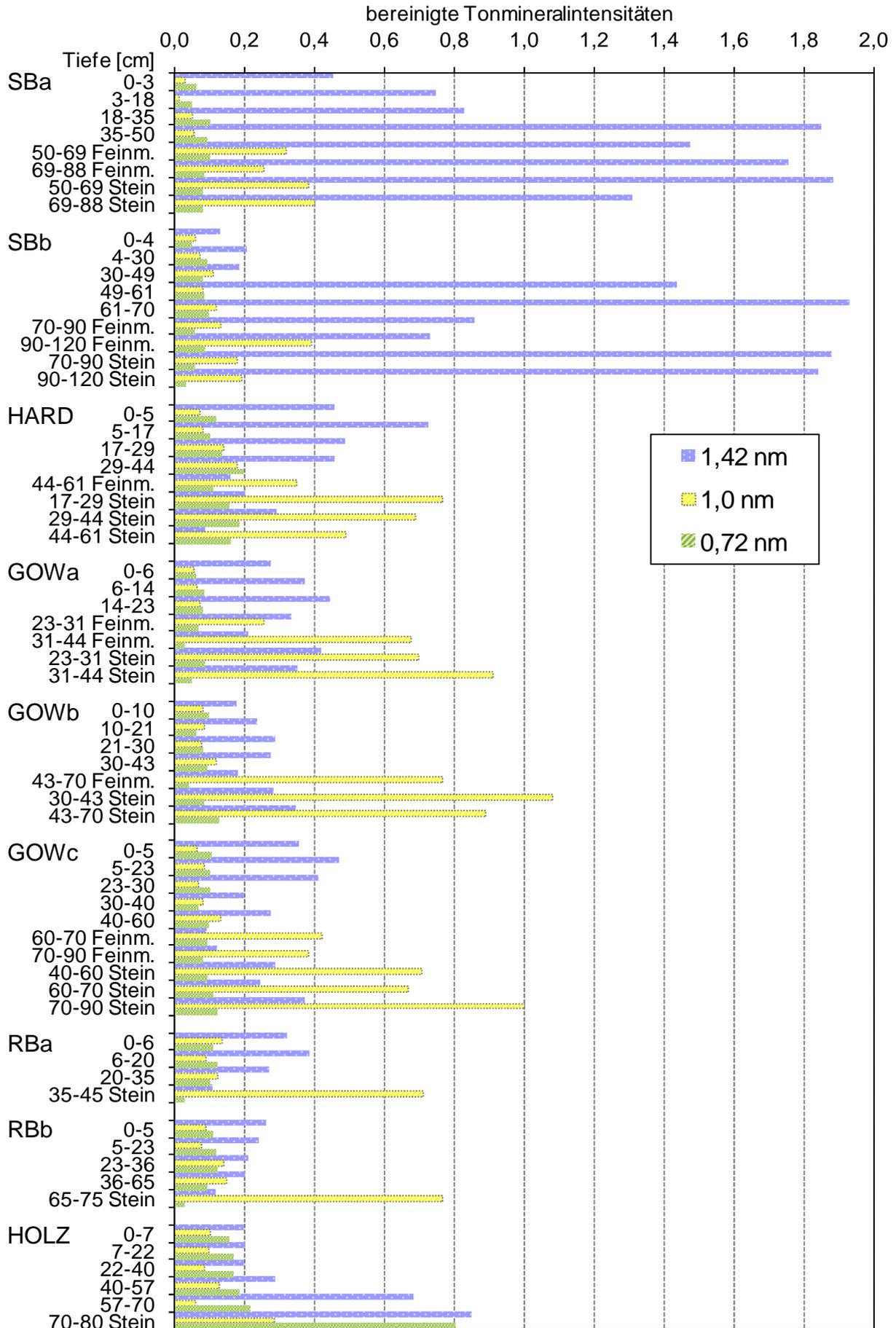


Abb. IVb-1: bereinigte Intensitäten der Tonmineralreflexe bei 1,42, 1,0 und 0,72 nm

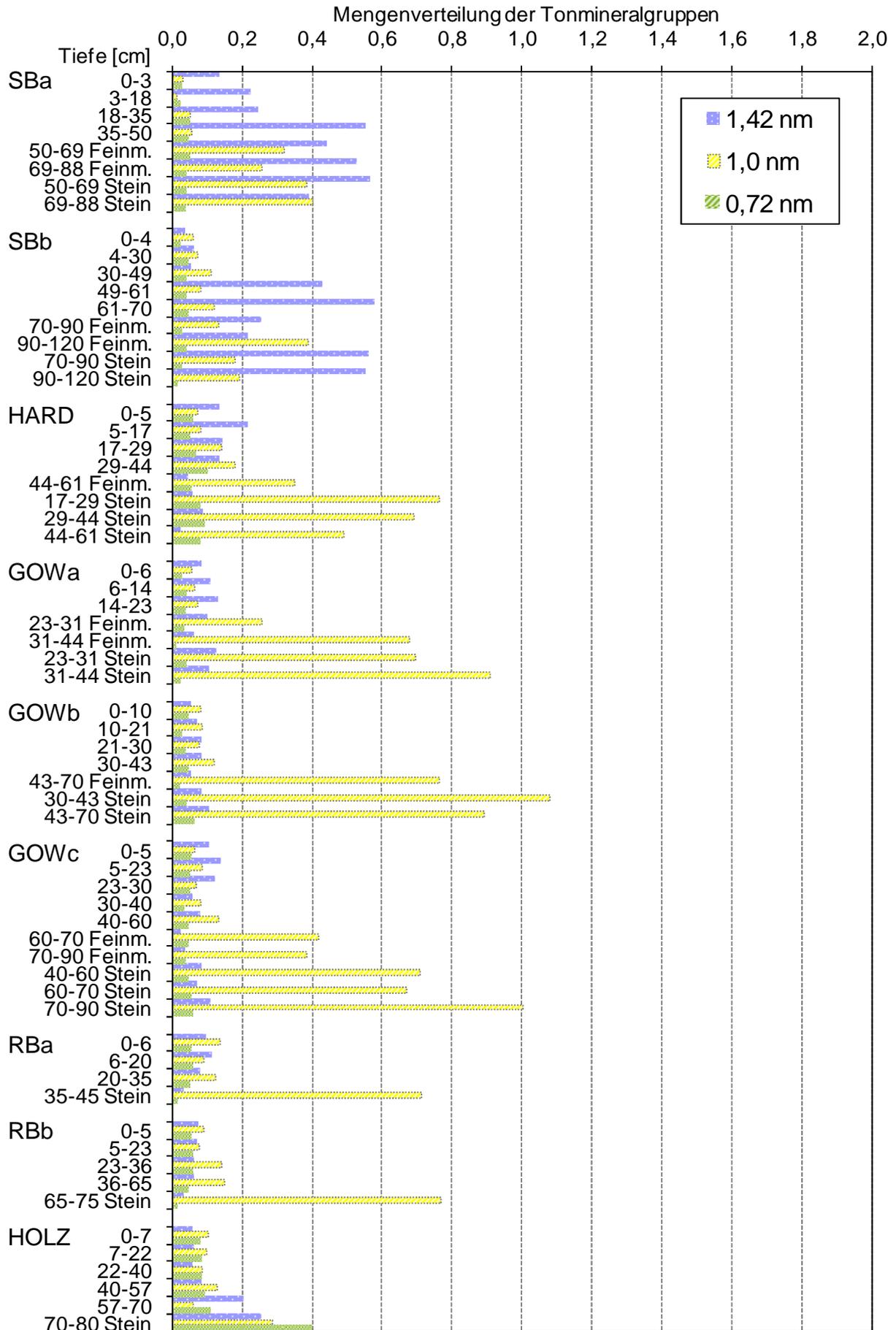


Abb. IVb-2: Mengenverteilung der Tonmineralgruppen bei 1,42, 1,0 und 0,72 nm

**Anhang V – Gesamtgehalte
Va – Elementverteilung**

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	T/K ₂ O	T/Al ₂ O ₃	T/Fe ₂ O ₃
				[%]									
SBa	Mb.	0-3	Ah	70,7	0,6	12,1	2,9	2,0	0,9	0,4	12	2,0	8,3
		3-18	Al-Bv	72,9	0,6	14,3	3,0	2,1	1,0	0,4	13	1,8	8,7
		18-35	Bvt	70,1	0,6	15,7	4,2	2,3	1,2	0,4	14	2,0	7,6
		35-50	IIBt-Tv	57,3	0,2	20,0	7,7	2,3	1,9	1,2	30	3,4	8,8
	Fm.	50-69	cCv	56,9	1,0	19,3	6,8	2,7	1,8	1,0	29	4,1	11,5
		69-88	cmCv	58,1	0,5	18,8	5,6	3,2	1,9	1,6	23	3,9	13,1
	Stein	50-69	cCv	60,8	0,3	17,3	6,3	3,1	2,0	1,6	23	4,1	11,2
69-88		cmCv	60,8	0,5	17,7	6,1	3,1	2,0	1,4	22	4,0	11,5	
SBb	Mb.	0-4	Ah	73,2	0,8	9,7	2,3	2,2	0,7	0,4	7	1,6	6,8
		4-30	Al+Btv	77,6	0,9	10,9	2,5	2,5	0,7	0,4	6	1,5	6,4
		30-49	Sw-Btv	75,5	0,9	12,4	3,3	2,8	0,9	0,4	6	1,3	5,0
		49-61	IISd-Bvt-Tv	62,3	0,3	17,8	6,1	2,5	1,8	0,9	22	3,1	9,1
		61-70	Sd-Bt-Tv	59,7	0,2	18,2	6,0	2,6	1,9	1,8	27	3,8	11,5
	Fm.	70-90	cCv1	63,3	0,6	16,5	5,7	2,7	1,7	1,3	21	3,6	10,3
		90-120	cCv2	61,6	1,0	17,7	5,3	3,0	1,9	1,1	23	4,0	13,4
	Stein	70-90	cCv1	66,2	0,4	14,8	5,0	2,3	1,9	1,5	32	4,9	14,5
90-120		cCv2	63,7	0,5	16,8	4,8	2,7	2,0	1,5	25	4,0	13,9	
HARD	Mb.	0-5	Ah	51,5	0,2	16,4	6,5	3,2	1,4	0,6	18	3,5	8,8
		5-17	Al-Bv-Tv	52,2	0,2	17,6	7,2	3,3	1,5	0,8	18	3,4	8,3
		17-29	Bt-Tv	47,7	0,1	19,2	9,0	3,7	1,8	3,0	20	3,9	8,4
		29-44	Tv	46,1	0,1	19,0	9,4	3,7	1,7	4,9	21	4,0	8,2
	Fm.	44-61	cCv	47,7	0,3	18,9	15,0	4,3	2,1	0,8	16	3,7	4,7
	Stein	17-29	Bt-Tv	55,8	0,2	20,1	6,7	5,7	2,2	0,7	11	3,0	8,9
		29-44	Tv	56,2	0,3	20,1	6,7	5,8	2,1	0,8	10	2,8	8,6
GOWa	Mb.	0-6	Ah	50,2	0,4	16,1	4,5	2,8	1,4	2,0	20	3,4	12,2
		6-14	Ah-Bv-Tv	53,9	0,4	17,1	4,9	2,9	1,4	1,7	20	3,3	11,7
		14-23	Bv-Tv	54,9	0,4	18,8	5,2	3,0	1,6	1,9	20	3,2	11,5
	Fm.	23-31	Tv-cCv	52,2	0,5	19,9	5,9	3,8	2,0	1,1	20	3,8	12,8
		31-44	cCv	50,5	0,9	20,9	6,5	4,8	2,4	0,6	18	4,0	13,0
	Stein	23-31	Tv-cCv	54,0	0,3	20,4	7,1	6,0	2,8	0,7	13	3,7	10,6
31-44		cCv	54,9	0,5	20,5	6,8	6,2	2,9	0,5	12	3,7	11,2	
GOWb	Mb.	0-10	Ah	53,9	0,4	16,3	4,9	2,7	1,3	1,4	18	3,0	10,0
		10-21	Al-Bv	57,1	0,4	17,7	5,0	2,8	1,4	1,3	18	2,8	10,0
		21-30	Btv-Tv	56,9	0,4	18,3	5,4	2,9	1,4	1,5	18	2,8	9,7
		30-43	Bvt-Tv	51,3	0,2	22,9	6,5	3,2	1,6	1,3	20	2,7	9,6
	Fm.	43-70	cCv	51,8	0,7	20,6	6,2	5,1	2,6	0,7	15	3,8	12,5
	Stein	30-43	Bvt-Tv	55,8	0,4	20,1	7,3	5,9	2,5	0,6	11	3,2	8,7
43-70		cCv	55,5	0,3	20,4	7,1	5,9	2,6	0,6	10	3,0	8,7	

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	T/K ₂ O	T/Al ₂ O ₃	T/Fe ₂ O ₃
				[%]									
GOWc	Mb.	0-5	Ah	66,7	0,7	14,3	3,6	2,5	1,0	0,6	12	2,1	8,3
		5-23	Ah+Bv-Al	68,0	0,7	14,9	3,7	2,6	1,0	0,5	12	2,0	7,9
		23-30	Bvt	64,3	0,6	17,1	4,9	2,7	1,2	0,7	14	2,3	7,9
		30-40	Bvt-Tv	59,2	0,4	19,9	6,4	2,8	1,4	1,2	19	2,7	8,3
		40-60	Bvt-Tv+cCv	57,2	0,4	20,4	6,9	2,9	1,5	1,5	19	2,7	8,0
	Fm.	60-70	cCv1	58,8	1,1	19,4	6,2	3,5	1,8	0,5	17	3,0	9,3
		70-90	cCv2	60,4	0,9	18,4	6,1	3,6	1,7	0,7	14	2,7	8,0
	Stein	40-60	Bvt-Tv+cCv	56,7	0,4	19,6	7,5	5,8	2,3	0,7	9	2,7	6,9
		60-70	cCv1	52,9	0,4	18,3	12,0	5,3	2,3	0,7	11	3,1	4,7
70-90		cCv2	55,3	0,3	19,1	8,8	5,8	2,3	0,7	10	3,0	6,5	
RBa	Mb.	0-6	Ah	58,8	0,5	17,5	4,6	2,9	1,2	0,7	15	2,5	9,7
		6-20	Alh-Bv	60,3	0,4	19,2	5,0	3,0	1,3	0,5	16	2,4	9,2
		20-35	IIBt-Tv	50,9	0,2	22,7	6,3	3,0	1,6	1,3	24	3,3	11,7
	Stein	35-45	cmCv	46,8	0,3	17,9	17,6	4,9	2,2	0,7	13	3,6	3,6
RBb	Mb.	0-5	Ah	68,1	0,7	13,8	3,6	2,7	0,9	0,4	10	2,0	7,7
		5-23	Al	72,4	0,8	13,7	3,1	2,7	0,9	0,3	8	1,6	7,4
		23-36	Sw-Bt	67,2	0,7	17,3	4,1	2,8	1,1	0,4	12	1,9	8,0
		36-65	IISd-Bvt-Tv	55,5	0,4	22,1	6,6	2,7	1,4	1,0	22	2,7	9,1
	Stein	65-75	cCv	49,8	0,2	18,3	14,8	5,4	2,2	0,8	12	3,4	4,2
HOLZ	Mb.	0-7	Ah	68,0	0,8	13,1	4,3	2,0	1,1	0,7	14	2,2	6,7
		7-22	Al-Bv	70,9	0,8	12,8	4,0	2,0	1,1	0,6	13	2,0	6,3
		22-40	Btv	70,4	0,8	13,7	4,5	2,1	1,2	0,6	14	2,1	6,4
		40-57	Bvt	62,1	0,6	17,1	5,9	2,0	1,4	0,9	21	2,5	7,3
		57-70	IIBvt-Tv	57,3	0,4	21,3	8,4	2,0	1,6	1,4	32	3,0	7,6
	Stein	70-80	Tv+cCv	32,0	0,0	16,9	23,1	3,9	1,4	5,4	23	5,3	3,9

Abkürzungen:

Mb. Mineralboden, Fm. Feinmaterial (carbonathaltiger Verwitterungsschutt < 2 mm),

Stein Kalkstein ≥ 2 mm

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	MnO	TiO ₂	ZrO ₂	SrO	P ₂ O ₅ [%]	SO ₃	CuO	BaO	PbO
SBa	Mb.	0-3	Ah	0,16	0,80	0,08	0,01	0,23	0,20	0	0,05	0,02
		3-18	Al-Bv	0,06	0,80	0,08	0,01	0,08	0,08	0	0,04	0,00
		18-35	Bvt	0,06	0,77	0,08	0,01	0,09	0,06	0	0,05	0,00
		35-50	IIBt-Tv	0,18	0,74	0,04	0,01	0,12	0,07	0	0,05	0,01
	Fm.	50-69	cCv	0,03	0,83	0,03	0,01	0,42	0,10	0	0,04	0,00
		69-88	cmCv	0,02	0,89	0,03	0,02	0,53	0,07	0	0,03	0,00
	Stein	50-69	cCv	0,01	0,73	0,02	0,01	0,61	0,05	0	0,04	0,00
		69-88	cmCv	0,01	0,68	0,02	0,01	0,52	0,05	0	0,03	0,00
SBb	Mb.	0-4	Ah	0,03	0,68	0,09	0,01	0,33	0,31	0	0,04	0,01
		4-30	Al+Btv	0,04	0,71	0,09	0,01	0,10	0,08	0	0,04	0,00
		30-49	Sw-Btv	0,05	0,71	0,10	0,01	0,13	0,09	0	0,06	0,00
		49-61	IISd-Bvt-Tv	0,23	0,82	0,05	0,01	0,08	0,06	0	0,00	0,01
		61-70	Sd-Bt-Tv	0,23	0,77	0,03	0,01	0,34	0,08	0	0,04	0,00
	Fm.	70-90	cCv1	0,06	0,77	0,04	0,02	0,58	0,06	0	0,03	0,00
		90-120	cCv2	0,01	0,90	0,03	0,02	0,63	0,07	0	0,04	0,00
	Stein	70-90	cCv1	0,01	0,65	0,02	0,02	0,69	0,06	0	0,02	0,00
90-120		cCv2	0,01	0,73	0,02	0,02	0,68	0,06	0	0,02	0,00	
HARD	Mb.	0-5	Ah	0,06	0,89	0,03	0,03	0,33	0,24	0	0,04	0,02
		5-17	Al-Bv-Tv	0,07	0,91	0,03	0,03	0,31	0,20	0	0,04	0,01
		17-29	Bt-Tv	0,11	0,76	0,02	0,04	0,33	0,16	0	0,05	0,01
		29-44	Tv	0,11	0,77	0,02	0,04	0,23	0,12	0	0,04	0,01
	Fm.	44-61	cCv	0,06	0,81	0,02	0,02	0,29	0,11	0	0,04	0,01
	Stein	17-29	Bt-Tv	0,02	0,82	0,02	0,03	0,33	0,22	0	0,05	0,00
		29-44	Tv	0,02	0,78	0,02	0,03	0,37	0,20	0	0,05	0,00
		44-61	cCv	0,02	0,78	0,03	0,01	0,32	0,14	0	0,05	0,00
GOWa	Mb.	0-6	Ah	0,17	0,71	0,07	0,02	0,33	0,40	0	0,04	0,01
		6-14	Ah-Bv-Tv	0,18	0,85	0,07	0,02	0,31	0,29	0	0,04	0,01
		14-23	Bv-Tv	0,17	0,82	0,08	0,02	0,28	0,24	0	0,05	0,01
	Fm.	23-31	Tv-cCv	0,08	0,73	0,06	0,01	0,31	0,22	0	0,04	0,01
		31-44	cCv	0,03	0,84	0,04	0,01	0,30	0,20	0	0,03	0,00
	Stein	23-31	Tv-cCv	0,02	0,80	0,02	0,01	0,17	0,19	0	0,03	0,00
	31-44	cCv	0,02	0,87	0,02	0,01	0,13	0,16	0	0,03	0,00	
GOWb	Mb.	0-10	Ah	0,20	0,75	0,08	0,01	0,37	0,40	0	0,05	0,01
		10-21	Al-Bv	0,20	0,82	0,08	0,01	0,35	0,26	0	0,05	0,01
		21-30	Btv-Tv	0,18	0,84	0,09	0,02	0,32	0,22	0	0,05	0,01
		30-43	Bvt-Tv	0,15	0,77	0,13	0,02	0,21	0,17	0	0,05	0,01
	Fm.	43-70	cCv	0,03	0,93	0,03	0,01	0,27	0,17	0	0,03	0,00
	Stein	30-43	Bvt-Tv	0,02	0,80	0,02	0,01	0,32	0,19	0	0,05	0,00
		43-70	cCv	0,02	0,83	0,02	0,01	0,30	0,16	0	0,05	0,00

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	MnO	TiO ₂	ZrO ₂	SrO	P ₂ O ₅ [%]	SO ₃	CuO	BaO	PbO
GOWc	Mb.	0-5	Ah	0,12	0,86	0,09	0,01	0,24	0,21	0	0,04	0,01
		5-23	Ah+Bv-Al	0,09	0,79	0,09	0,01	0,18	0,17	0	0,05	0,01
		23-30	Bvt	0,15	0,88	0,10	0,01	0,14	0,11	0	0,06	0,01
		30-40	Bvt-Tv	0,17	0,85	0,10	0,02	0,13	0,11	0	0,05	0,01
		40-60	Bvt-Tv+cCv	0,15	0,82	0,09	0,02	0,16	0,12	0	0,06	0,00
	Fm.	60-70	cCv1	0,04	0,81	0,07	0,01	0,30	0,10	0	0,05	0,00
		70-90	cCv2	0,04	0,84	0,07	0,01	0,26	0,12	0	0,04	0,00
	Stein	40-60	Bvt-Tv+cCv	0,02	0,73	0,03	0,01	0,42	0,15	0	0,05	0,01
		60-70	cCv1	0,02	0,77	0,03	0,01	0,46	0,27	0	0,04	0,01
	70-90	cCv2	0,02	0,82	0,03	0,01	0,36	0,24	0	0,05	0,01	
RBa	Mb.	0-6	Ah	0,22	0,88	0,10	0,01	0,32	0,24	0	0,05	0,01
		6-20	Alh-Bv	0,14	0,99	0,12	0,01	0,21	0,13	0	0,05	0,01
		20-35	IIBt-Tv	0,15	0,77	0,12	0,02	0,21	0,18	0	0,05	0,01
	Stein	35-45	cmCv	0,03	0,66	0,02	0,01	0,44	0,33	0	0,04	0,01
RBb	Mb.	0-5	Ah	0,16	0,81	0,09	0,01	0,21	0,19	0	0,05	0,01
		5-23	Al	0,09	0,89	0,10	0,01	0,11	0,10	0	0,06	0,00
		23-36	Sw-Bt	0,12	0,83	0,12	0,01	0,08	0,11	0	0,05	0,00
		36-65	IISd-Bvt-Tv	0,15	0,71	0,12	0,02	0,11	0,15	0	0,06	0,01
	Stein	65-75	cCv	0,03	0,68	0,02	0,01	0,45	0,33	0	0,05	0,01
HOLZ	Mb.	0-7	Ah	0,18	0,84	0,07	0,01	0,41	0,15	0	0,05	0,00
		7-22	Al-Bv	0,16	0,97	0,07	0,01	0,39	0,10	0	0,04	0,00
		22-40	Btv	0,18	0,97	0,07	0,01	0,39	0,07	0	0,05	0,00
		40-57	Bvt	0,13	0,88	0,05	0,01	0,37	0,05	0	0,05	0,00
		57-70	IIBvt-Tv	0,10	0,88	0,04	0,01	0,23	0,07	0	0,05	0,00
	Stein	70-80	Tv+cCv	0,45	1,22	0,08	0,04	2,24	0,35	0	0,00	0,00

Abkürzungen:

Mb. Mineralboden, Fm. Feinmaterial (carbonathaltiger Verwitterungsschutt < 2 mm),

Stein Kalkstein ≥ 2 mm

Vb – Elementan- bzw. abreicherungshorizonte

Durchschnittswerte der untersuchten Peda (Einzelwerte geteilt durch den Profildurchschnitt der Mineralbodenhorizonte; Wert größer 1 = Elementkonzentration liegt über dem Profildurchschnitt, Wert kleiner 1 = Elementkonzentration liegt unter dem Profildurchschnitt)

Art	Tiefe [cm]	Horizont	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	TiO ₂	ZrO ₂	SrO	P ₂ O ₅	SO ₃	BaO	PbO	
SBa	Mb.	0-3	Ah	1,0	1,2	0,8	0,7	0,9	0,7	0,6	1,4	1,0	1,1	1,0	1,8	1,9	1,0	3,1
		3-18	Al-Bv	1,1	1,3	0,9	0,7	1,0	0,8	0,6	0,5	1,0	1,2	1,0	0,6	0,8	0,9	0,0
		18-35	Bvt	1,0	1,2	1,0	0,9	1,1	1,0	0,8	0,6	1,0	1,1	1,0	0,7	0,6	1,1	0,0
		35-50	IIBt-Tv	0,8	0,4	1,3	1,7	1,1	1,5	2,0	1,5	1,0	0,6	1,1	0,9	0,7	1,1	0,9
	Fm.	50-69	cCv	0,8	2,0	1,2	1,5	1,2	1,4	1,7	0,3	1,1	0,4	1,3	3,2	0,9	0,7	0,0
		69-88	cmCv	0,9	0,9	1,2	1,3	1,5	1,5	2,8	0,1	1,1	0,4	1,5	4,0	0,7	0,7	0,0
Stein	50-88		0,9	0,8	1,1	1,4	1,4	1,6	2,6	0,1	0,9	0,3	1,3	4,3	0,5	0,7	0,0	
SBb	Mb.	0-4	Ah	1,1	1,3	0,7	0,6	0,9	0,5	0,6	0,3	0,9	1,2	0,9	1,7	2,5	1,1	3,3
		4-30	Al+Btv	1,1	1,5	0,8	0,6	1,0	0,6	0,5	0,3	1,0	1,3	0,9	0,5	0,6	1,3	0,0
		30-49	Sw-Btv	1,1	1,5	0,9	0,8	1,1	0,8	0,5	0,4	1,0	1,4	1,0	0,6	0,8	1,6	0,0
		49-61	IISd-Bvt-Tv	0,9	0,4	1,3	1,5	1,0	1,5	1,1	2,0	1,1	0,7	1,0	0,4	0,5	0,0	1,7
		61-70	Sd-Bt-Tv	0,9	0,3	1,3	1,5	1,0	1,6	2,3	2,0	1,0	0,5	1,2	1,7	0,7	1,1	0,0
	Fm.	70-90	cCv1	0,9	1,0	1,2	1,4	1,1	1,4	1,6	0,5	1,0	0,5	1,5	3,0	0,5	0,9	1,1
	90-120	cCv2	0,9	1,8	1,3	1,3	1,2	1,5	1,4	0,1	1,2	0,4	1,6	3,2	0,5	1,1	0,0	
Stein	70-120		0,9	0,7	1,1	1,2	1,0	1,6	2,0	0,1	0,9	0,3	1,7	3,5	0,5	0,7	0,0	
HARD	Mb.	0-5	Ah	1,0	1,2	0,9	0,8	0,9	0,8	0,3	0,7	1,1	1,2	0,8	1,1	1,3	1,0	1,4
		5-17	Al-Bv-Tv	1,1	1,2	1,0	0,9	1,0	0,9	0,3	0,8	1,1	1,1	0,9	1,0	1,1	0,9	1,0
		17-29	Bt-Tv	1,0	0,7	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,3	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	1,1	0,8
		29-44	Tv	0,9	0,9	1,1	1,2	1,1	1,1	2,1	1,3	0,9	0,8	1,2	0,8	0,7	0,9	0,8
	Fm.	44-61	cCv	1,0	2,0	1,0	1,9	1,3	1,3	0,3	0,6	1,0	0,9	0,6	1,0	0,6	0,9	0,3
Stein	17-61		1,1	1,5	1,1	1,2	1,6	1,3	0,3	0,2	1,0	0,9	0,8	1,1	1,0	1,2	0,0	
GOWa	Mb.	0-6	Ah	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	1,1	1,0	0,9	0,9	1,0	1,1	1,3	1,0	1,2
		6-14	Ah-Bv-Tv	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0
		14-23	Bv-Tv	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	0,9	0,8	1,0	0,8
	Fm.	23-31	Tv-cCv	1,0	1,5	1,1	1,2	1,3	1,3	0,6	0,5	0,9	0,8	0,7	1,0	0,7	1,0	0,6
		31-44	cCv	1,0	2,6	1,2	1,3	1,7	1,6	0,3	0,2	1,1	0,6	0,6	1,0	0,6	0,7	0,0
Stein	23-44		1,0	1,2	1,2	1,4	2,1	1,9	0,3	0,1	1,1	0,3	0,6	0,5	0,6	0,7	0,0	
GOWb	Mb.	0-10	Ah	1,0	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	0,9	0,8	0,8	1,2	1,5	1,0	1,3
		10-21	Al-Bv	1,0	1,2	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	1,1	1,0	0,9	0,9	1,1	1,0	1,0	1,2
		21-30	Btv-Tv	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	0,9	1,0	1,0	0,8	0,9	0,7
		30-43	Bvt-Tv	0,9	0,6	1,2	1,2	1,1	1,1	0,9	0,8	1,0	1,3	1,3	0,7	0,7	1,0	0,9
	Fm.	43-70	cCv	0,9	2,0	1,1	1,2	1,8	1,8	0,5	0,1	1,2	0,4	0,7	0,9	0,6	0,6	0,0
Stein	30-70		1,0	1,0	1,1	1,3	2,0	1,8	0,4	0,1	1,0	0,3	0,8	1,0	0,7	1,1	0,0	

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	TiO ₂	ZrO ₂	SrO	P ₂ O ₅	SO ₃	BaO	PbO
GOWc	Mb.	0-5	Ah	1,1	1,2	0,8	0,7	0,9	0,8	0,6	0,9	1,0	0,9	0,9	1,4	1,5	0,8	1,1
		5-23	Ah+Bv-Al	1,1	1,3	0,9	0,7	0,9	0,8	0,5	0,7	0,9	1,0	0,9	1,1	1,2	1,0	1,2
		23-30	Bvt	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	1,1	1,4
		30-40	Bvt-Tv	0,9	0,8	1,1	1,3	1,0	1,1	1,4	1,2	1,0	1,1	1,1	0,8	0,7	1,0	1,3
		40-60	Bvt-Tv+cCv	0,9	0,7	1,2	1,3	1,1	1,3	1,7	1,1	1,0	1,0	1,2	1,0	0,9	1,1	0,0
	Fm.	60-70	cCv1	0,9	2,0	1,1	1,2	1,3	1,5	0,6	0,3	1,0	0,7	0,8	1,7	0,7	0,9	0,0
		70-90	cCv2	1,0	1,7	1,1	1,2	1,3	1,4	0,8	0,3	1,0	0,7	0,8	1,5	0,8	0,8	0,0
Stein	40-90		0,9	0,7	1,1	1,8	2,1	1,9	0,8	0,2	0,9	0,3	0,8	2,4	1,5	0,9	1,1	
RBa	Mb.	0-6	Ah	1,0	1,2	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	1,3	1,0	0,9	0,8	1,3	1,3	1,0	1,3
		6-20	Alh-Bv	1,1	1,2	1,0	0,9	1,0	0,9	0,6	0,8	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	1,0	0,9
		20-35	IIBt-Tv	0,9	0,6	1,1	1,2	1,0	1,2	1,6	0,9	0,9	1,1	1,3	0,9	1,0	1,0	0,8
	Stein	35-45	cmCv	0,8	0,7	0,9	3,3	1,7	1,6	0,9	0,2	0,8	0,2	0,6	1,8	1,8	0,8	0,9
RBb	Mb.	0-5	Ah	1,0	1,1	0,8	0,8	1,0	0,9	0,8	1,2	1,0	0,8	0,9	1,7	1,4	0,9	1,9
		5-23	Al	1,1	1,3	0,8	0,7	1,0	0,8	0,6	0,7	1,1	0,9	0,9	0,9	0,7	1,1	1,0
		23-36	Sw-Bt	1,0	1,1	1,0	0,9	1,0	1,0	0,8	0,9	1,0	1,1	1,0	0,6	0,8	1,0	0,0
		36-65	IISd-Bvt-Tv	0,8	0,6	1,3	1,5	1,0	1,3	1,8	1,1	0,9	1,1	1,2	0,9	1,1	1,0	1,1
	Stein	65-75	cCv	0,8	0,3	1,1	3,4	2,0	2,0	1,4	0,2	0,8	0,2	0,7	3,5	2,4	0,9	1,3
HOLZ	Mb.	0-7	Ah	1,0	1,2	0,8	0,8	1,0	0,9	0,9	1,2	0,9	1,1	1,0	1,1	1,7	1,0	0,0
		7-22	Al-Bv	1,1	1,2	0,8	0,7	1,0	0,9	0,7	1,1	1,1	1,2	1,0	1,1	1,1	0,8	0,0
		22-40	Btv	1,1	1,2	0,9	0,8	1,0	0,9	0,7	1,2	1,1	1,2	1,0	1,1	0,8	1,0	0,0
		40-57	Bvt	0,9	0,9	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0	0,8	1,0	0,9	1,0	1,0	0,5	1,0	5,0
		57-70	IIBvt-Tv	0,9	0,5	1,4	1,6	1,0	1,3	1,7	0,7	1,0	0,7	1,0	0,6	0,8	1,1	0,0
	Stein	70-80	Tv+cCv	0,5	0,0	1,1	4,3	1,9	1,1	6,4	3,0	1,3	1,2	4,4	6,3	4,1	0,0	0,0

Abkürzungen:

Mb. Mineralboden, Fm. Feinmaterial (carbonathaltiger Verwitterungsschutt < 2 mm),

Stein Kalkstein ≥ 2 mm

Anhang VI – Dünnschliffauswertungen

Via – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Sentruper Berg a

Der erste Horizont dieses Pedons konnte aufgrund seiner geringen Mächtigkeit nicht beprobt werden.

Al-Bv-Horizont

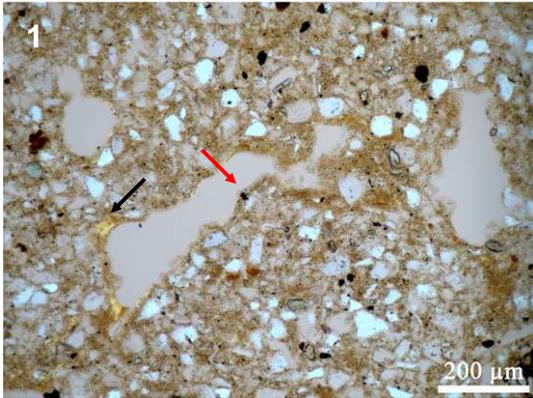
Im Dünnschliff des zweiten Horizontes ist das Mikrogefüge nur schwach entwickelt und besteht hauptsächlich aus Röhren (Röhrengefüge – channel microstructure). Das c/f_{10} -Verhältnis beträgt 7,5/2,5 mit Schluff als dominierende Korngröße (siehe auch Tab. 12). Die b-fabric ist stellenweise leicht punktförmig gesprenkelt, viele Körner sind leicht granostriated. Tonverlagerungsmerkmale treten mit 0,8 % Flächenanteil eher selten auf. Es finden sich vereinzelt dünne Tonüberzüge (um 30 μm) in Poren (Tafel 1, Foto 1): Sie sind gelb bis braun und rein bis mittel staubig, häufig leicht mikrolaminiert und die Extinktionslinien sind mäßig deutlich. Toncutanbruchstücke (Tafel 1, Foto 2) treten etwas häufiger auf und sind etwas größer als die Toncutane in Poren, sonst aber sehr ähnlich aufgebaut und teilweise leicht reorientiert. Ein Bereich im Schliff zeigt Fe/Mn-Ausfällungen, die sich sowohl am Rand als auch innerhalb der Matrix befinden. Des Weiteren treten Fe/Mn-Konkretionen von ca. 50 bis 250 μm Größe auf. Sie sind hauptsächlich in situ gebildet worden, da sie ähnliche Minerale wie ihre Umgebung beinhalten und nicht scharf abgegrenzt sind. Fe/Mn-Konkretionen finden sich in unterschiedlicher Größe in allen untersuchten Böden und werden darum im Folgenden nur noch erwähnt, wenn sie gehäuft oder ungewöhnlich gestaltet auftreten. Neben Losung von ca. 150 μm Durchmesser und 1 % Flächenanteil enthält der Schliff ca. 2 % Gewebe- und Wurzelreste.

Bvt-Horizont

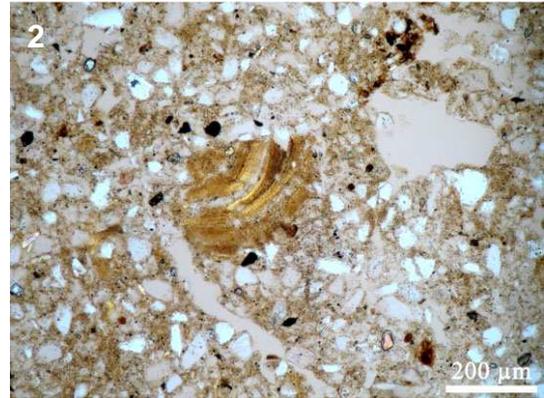
Der Schliff aus dem dritten Horizont ist reich an Röhren (channel microstructure), das Mikroaggregatgefüge ist nur schwach entwickelt. Die Mikromasse ist punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, viele Körner sind granostriated und das c/f_{10} -Verhältnis ist ca. 6,5/3,5. Einige wenige Bereiche (1 %) von 800 μm Durchmesser und weniger zeigen eine deutlich tonigere Mikromasse mit ausgeprägten Interferenzfarben und reorientierten Bruchstücken (Tafel 1, Foto 6). Dieser Schliff weist mit 3,2 % Flächenanteil mehr Tonverlagerungsmerkmale auf als der Vorhergehende. Tonhäutchen in Poren (Tafel 1, Fotos 3, 4) sind wiederum nur um 30 μm breit und oft an der Unterseite einer Pore besonders deutlich ausgeprägt: Sie sind leicht mikrolaminiert, gelb bis gelbbraun/orangebraun, teilweise sogar schwarzbraun und rein bis überwiegend leicht staubig mit deutlichen bis mäßig deutlichen Extinktionslinien. Die oft schon stark deformierten Toncutanbruchstücke ähneln im Aufbau der Toncutane an Poren, sie treten etwas häufiger auf. Die Extinktionslinien sind mäßig bis deutlich sichtbar und teilweise leicht reorientiert. Einige Poren zeigen Fe/Mn-Ausfällungen, die meist 100 bis 300 μm des Porenrandes erfassen (sog. „hypocoatings“) (Tafel 1, Foto 5). Auch in diesem Schliff kommen einige Organ- und Wurzelreste, aber kaum noch Losung vor.

IIBt-Tv-Horizont

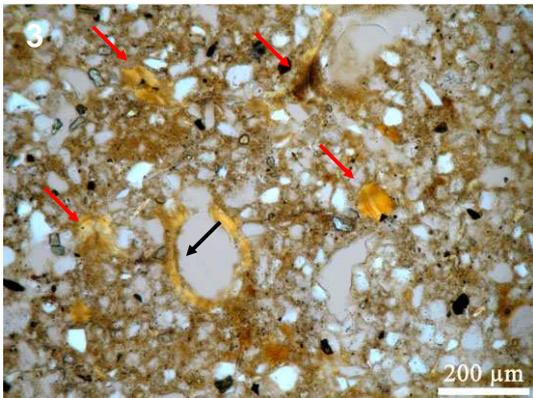
Der Dünnschliff des vierten Horizontes weist ein polyedrisches Mikrogefüge (angular blocky microstructure) mit deutlicher Aggregatausbildung auf. Die Matrix ist stark punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt und auch cross striated, sehr viele Minerale und Konkretionen sind granostriated und einige Poren porostriated. Es gibt eine Zweiteilung (teilweise auch Übergänge) in sehr tonige Bereiche mit einem c/f_{10} -Verhältnis von 1/9 und rundliche Bereiche von 300 μm bis 2 mm Durchmesser mit vorwiegend größeren Mineralen (Grobschluff) und einem c/f_{10} -Verhältnis von 8/2 mit einem Anteil von 35 % an der Bodenmasse (vergleiche Tafel 1, Fotos 7, 10). Die Schluffkörner der gröberen Bereiche sind fast alle porostriated und wirken eingeregelt, so dass sich ein leicht quadratisches Muster ergibt (Tafel 1, Fotos 7, 8), der dazwischenlagernde Ton ist unterschiedlich stark orientiert. Teilweise sind die gröberen Bereiche von einer leicht staubigen Toncutane umgeben. Der Schliff weist mit insgesamt 12 % Flächenanteil viele Tonverlagerungsmerkmale auf, die auf Grund der tonigen Grundmasse aber häufig nur schwer davon zu unterscheiden sind. Die dünnen und eher wenigen Toncutane in den Poren (Tafel 1, Foto 9) sind ockergelb gefärbt, leicht staubig, ohne starke Mikrolaminierung und die Extinktionslinien sind nur mäßig gut zu erkennen. Auch einige Aggregate zeigen solche Toncutane. Besonders häufig finden sich mit 8 % Toncutanfragmente und etwas seltener Verfüllungen: Sie sind gelborange, sehr schwach mikrolaminiert und rein bis sehr leicht staubig, stark reorientiert und die Extinktionslinien dadurch nur mäßig gut zu erkennen. Teile der Grundmasse sind gebleicht bzw. bestehen aus hellem Ton (Tafel 1, Fotos 7, 10). Mit 5 % der Schlifffläche treten in und an Aggregaten mehr rundliche bis unscharf begrenzte Fe/Mn-Konkrete auf als im vorhergehenden Schliff (Tafel 1, Foto 9). Vereinzelt treten Wurzelreste auf.



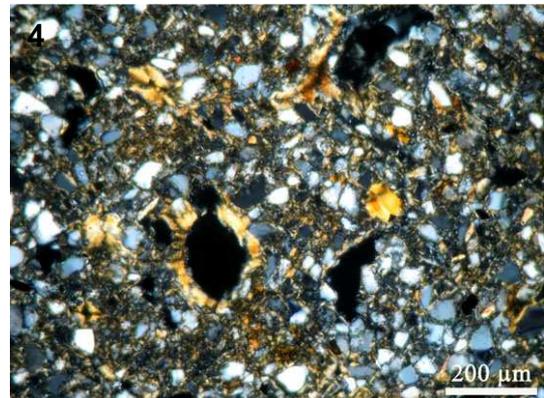
SBa, 2. Horizont (9–12 cm): PPL teilweise mikrolaminierte Toncutane mit fast reinen, gelben (schwarzer Pfeil) und staubigen, grau-gelben Laminen (roter Pfeil), beides mit deutlichen Extinktionslinien



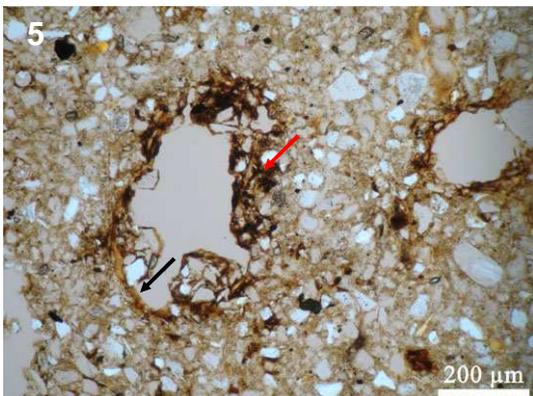
SBa, 2. Horizont (9–12 cm): PPL mikrolaminiertes Toncutanbruchstück aus fast reinen, gelblichen und hauptsächlich staubigen, braunen Laminen



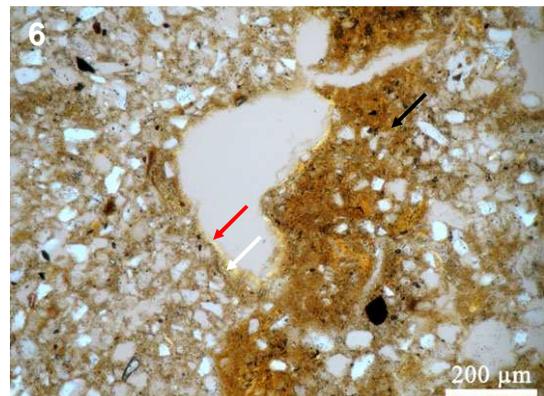
SBa, 3. Horizont (25–28 cm): PPL rein und staubig mikrolaminierte Toncutane (schwarzer Pfeil), mikrolaminierte Toncutanbruchstücke teilweise mit dunkelbraunen Laminen (rote Pfeile), alle mit deutlichen Extinktionslinien



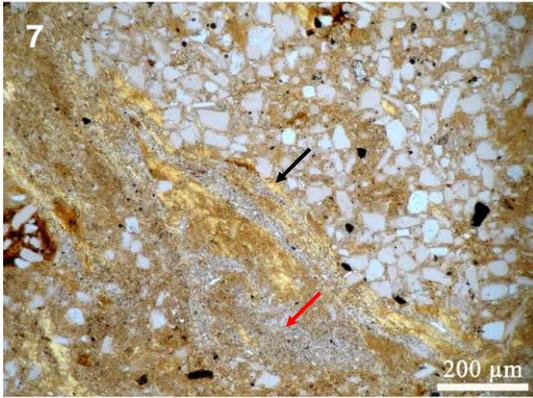
SBa, 3. Horizont (25–28 cm): XPL dito



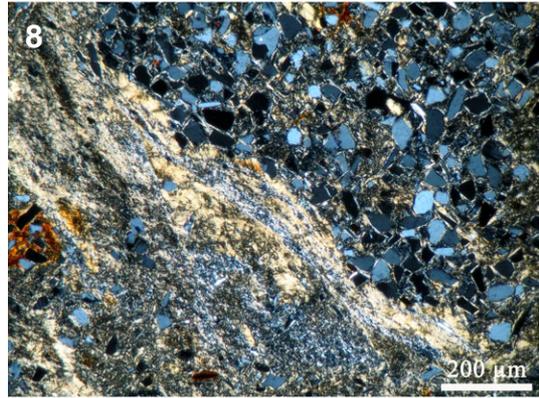
SBa, 3. Horizont (25–28 cm): PPL Fe/Mn- Ausfällungen (roter Pfeil) an einer Pore mit dünner Toncutane (schwarzer Pfeil)



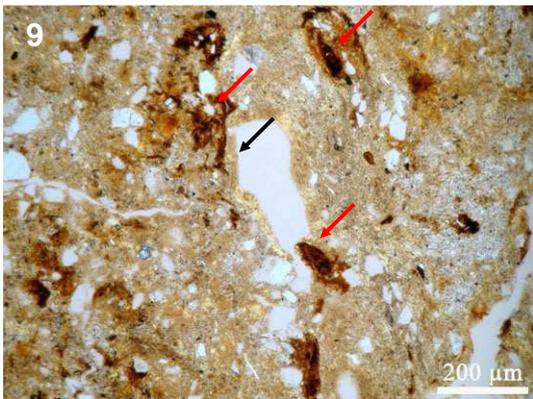
SBa, 3. Horizont (25–28 cm): PPL toniger Bereich (schwarzer Pfeil) und 2-phasige Toncutane an einer Pore (roter Pfeil reine Lamine, weißer Pfeil staubige Lamine)



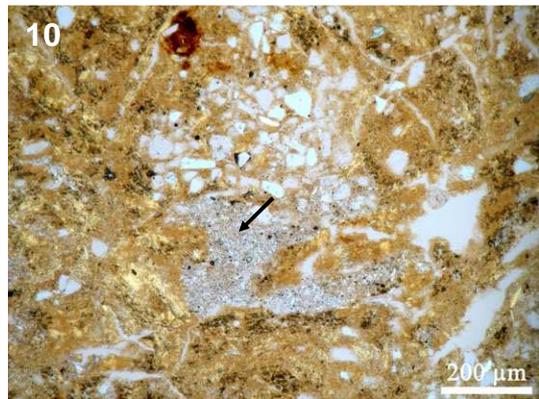
SBa, 4. Horizont (41–44 cm): PPL schluffige (rechte Seite des Bildes) und tonige Bereiche (linke Seite) getrennt durch eine schwach staubige Toncutane (schwarzer Pfeil), daneben gebleichte Bereiche (roter Pfeil)



SBa, 4. Horizont (41–44 cm): XPL dito



SBa, 4. Horizont (41–44 cm): PPL leicht staubige Toncutane mit mäßig deutlichen Extinktionslinien (schwarzer Pfeil), Fe/Mn-Konkretionen (rote Pfeile)



SBa, 4. Horizont (41–44 cm): PPL schluffige Minerale umgeben von stark orientiertem Ton, auffällig ist ein heller toniger Bereich (schwarzer Pfeil)

Tafel 1b: Dünnschliffaufnahmen SBa

VIIb – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Sentruper Berg b

Ah-Horizont

Der Dünnschliff aus dem Ah-Horizont des Pedons SBb weist ein krümeliges Mikroaggregatgefüge (crumb microstructure) mit kugelförmigen porösen Aggregaten von ca. 2 mm Durchmesser und einem c/f_{10} -Verhältnis von 7,5/2,5 auf. Die abgerundete Form der Aggregate ist wahrscheinlich auf zoogene Bioturbation zurückzuführen. Durch Humus verbundene Mineralpartikel (double spaced equal enaulic) mit einem c/f_{10} -Verhältnis von 8/2 füllen den Raum zwischen den Aggregaten teilweise aus. Organ- und Gewebereste nehmen insgesamt 10 % der Fläche am Schliff ein. Die Mikromasse ist bis auf wenige Bereiche frei von Interferenzfarben. In Aggregaten treten mit 0,1 % Flächenanteil (siehe auch Tab. 13) vereinzelt orangefarbene, maximal 100 µm große, schwach staubige Toncutanbruchstücke mit deutlichen Extinktionslinien auf (Tafel 2, Foto 1).

Al+Btv-Horizont

Der Dünnschliff aus dem zweiten Horizont (Al+Btv) ist hohlraumärmer. Das Mikrogefüge ist nur wenig entwickelt und besteht hauptsächlich aus Röhren und Gängen (channel microstructure). Die Mikromasse ist auch hier meist undifferenziert mit einem c/f_{10} -Verhältnis von 7,5/2,5. Circa 15 % am Schliff bestehen aus etwas tonigeren, wenig separierten Aggregaten bzw. Bereichen mit einem c/f_{10} -Verhältnis von 6,5/3,5. Sie sind punktförmig gesprenkelt und einige Minerale besitzen eine granostriated b-fabric. In diesem Schliff nehmen Wurzelreste und Wurzeln 3 % Flächenanteil ein, rundliche Losung 0,5 %. Es finden sich sowohl einige Toncutane an Poren, als auch Toncutanbruchstücke in der Matrix mit insgesamt 2 % Flächenanteil. Beide weisen meist eine schwache Mikrolaminierung auf, wobei sich reine, gelbe mit eher bräunlichen, schwach staubigen Laminen abwechseln (Tafel 2, Foto 2). Eine feste Abfolge in der Mikrolaminierung der Tonhäutchen lässt sich nicht feststellen. Einige Poren sind ausschließlich mit reiner oder staubiger Cutane ausgekleidet. Die Extinktionslinien sind in der Regel deutlich erkennbar, Toncutanbruchstücke sind aber oft schon leicht reorientiert. Stellenweise treten staubige, schwarze Toncutane mit mäßig deutlichen Extinktionslinien vorwiegend an den Porenunterseiten auf (Tafel 2, Foto 3). Einige Körner und tonige Aggregate weisen dünne Hauben aus humosem, unorientiertem Material auf.

Sw-Btv-Horizont

Das Mikroaggregatgefüge im Dünnschliff des dritten Horizontes ist ebenfalls geprägt durch Röhren und Risse (channel microstructure). Die Grundmasse ist meist undifferenziert mit dem gleichen c/f_{10} -Verhältnis von ca. 7,5/2,5 wie im Schliff zuvor. Einige Stellen im Schliff sind leicht punktförmig gesprenkelt und enthalten Minerale mit einer granostriated b-fabric. Tonverlagerungsmerkmale treten mit 4,1 % häufiger auf als im Horizont zuvor, besonders Toncutanfragmente nehmen zu. Sie ähneln im Aufbau sehr den Tonüberzügen und Bruchstücken im zweiten Horizont (Tafel 2, Foto 4), schwarze Cutane treten nicht mehr auf. Wie schon im vorigen Horizont lässt sich

keine feste Abfolge in der Mikrolaminierung erkennen. Einige der eher staubigen Toncutanfragmente sind stark reorientiert. Auf manchen Tonüberzügen finden sich Fe/Mn-Oxidausfällungen (Tafel 2, Foto 5). Sie sind nachträglich auf diesen entstanden und weisen auf eine Pseudovergleyung hin, die auch im Gelände anhand von Rostflecken an der Profilwand erkennbar ist. Einige Toncutane befinden sich am Rand von runden, wenig separierten Aggregaten mit der gleichen Zusammensetzung wie die restliche Grundmasse. Es handelt sich wahrscheinlich um „passage features“ (STOOPS 2003): wieder verfüllte Tiergänge, die am Rand bevorzugte Fließbahnen für das Sickerwasser aufweisen. Auffallend sind außerdem leicht sortierte, gestreifte Bereiche, die von Südwest nach Nordost im unteren Bereich des Schliffes verlaufen (Tafel 2, Foto 6). Hier ist das Material besonders feinputtelarm und besteht hauptsächlich aus Grobschluff. Im Schliff findet sich ein Holzkohlestückchen, welches z. B. durch einen Waldbrand dorthin gelangt sein könnte. Wurzel und Wurzelreste steigen auf Grund einer großen Wurzel auf 4 % an.

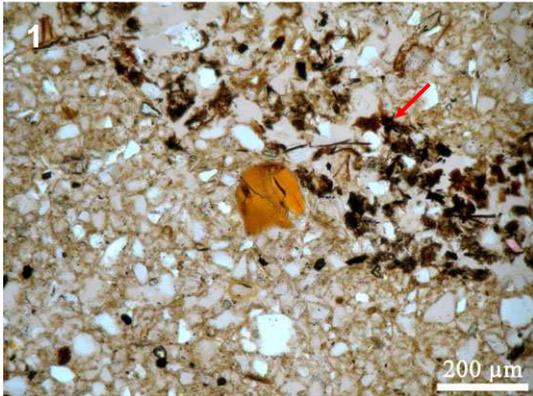
IISd-Bvt-Tv-Horizont

Im Dünnschliff des vierten Horizontes verändert sich das Mikroaggregatgefüge zu einem mittelmäßig gut entwickelten Polyedergefüge mit vielen Röhren innerhalb der Aggregate (angular blocky und channel microstructure). Das c/f_{10} -Verhältnis beträgt nur noch 1/9. Fast die gesamte schwach gelbgrau gefärbte Mikromasse ist punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, wobei sich teilweise dünne Streifen orientierten Tons kreuzen (cross striated). Circa 15 % des Schliffes bestehen aus meist rundlichen Bereichen mit Körnern fast ausschließlich im Grobschluffbereich, die im Folgenden als „Schlufffüllungen“ bezeichnet werden. Das c/f_{10} -Verhältnis darin schwankt um 7/3 (Tafel 2, Fotos 7, 8). Oft befinden sich an deren Rand Toncutane aus gelben bis orangefarbenem, schwach staubigem Ton. Er ist schwach mikrolaminieren und weist mäßig deutliche Extinktionslinien auf, die häufig reorientiert sind. Dieser Ton verfüllt häufig auch die Räume zwischen den Schluffkörnern im Innern der Schlufffüllungen, so dass es unter XPL teilweise so aussieht, als wären die Minerale granostriated. Auch Toncutanbruchstücke und Verfüllungen, die 8 % an der Schlifffläche einnehmen und einige Tonüberzüge in Poren sind ähnlich zusammengesetzt, teilweise aber gräulich gebleicht und stärker reorientiert. Die restlichen Toncutane in Poren bestehen aus graugelben, mittelmäßig staubigen, mäßig deutlich orientiertem Ton. Sie erstrecken sich in wenigen Fällen auch entlang von Aggregaträndern und sind nur selten mikrolaminieren. Auffällig ist die Zunahme an Fe/Mn-Konkretionen auf 7 % Flächenanteil. Sie kommen als feinverteilte Kügelchen von etwa 30 μm Durchmesser in der Grundmasse vor, aber auch als etwas größere Konkretionen um etwa 400 μm und als Überzüge auf Toncutanen. Der Anteil an Wurzel- und Organresten liegt bei 1,5 %.

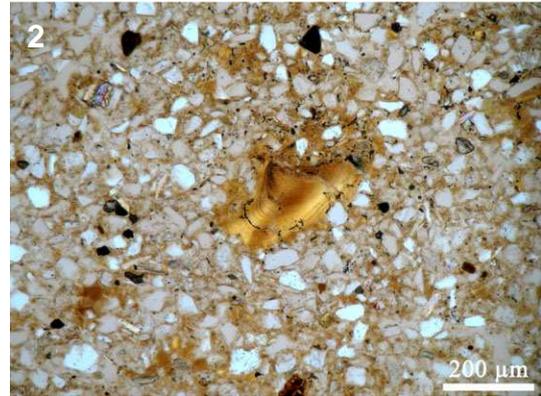
Sd-Bt-Tv-Horizont

Das Mikrogefüge im Dünnschliff des fünften Horizontes ist nur schwach entwickelt und wird dominiert von Poren (channel microstructure). Das c/f_{10} -Verhältnis beträgt 1/9 und wieder bestehen ca. 20 % des Schliffs aus Schlufffüllungen mit einem c/f_{10} -Verhältnis von circa 7/3. Die Mikromasse ist stark punktförmig bis mosaikförmig

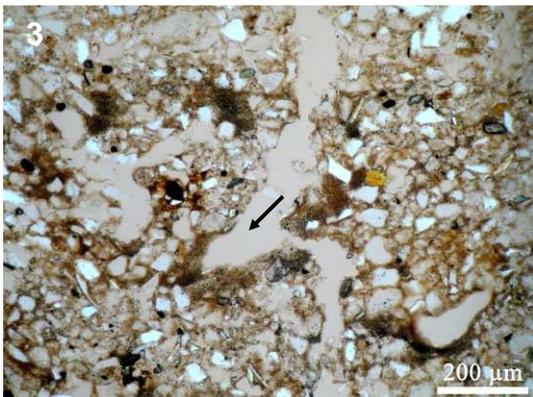
gesprenkelt. Auch hier sind die eher länglich geformten Schlufffüllungen wie im vierten Horizont von gelbem bis orangefarbenem Ton umgeben (Tafel 2, Foto 9). Er kleidet sowohl Poren im Innern wie auch außerhalb der Schlufffüllungen aus. Die Zwischenräume der Grobschluffpartikel sind ebenfalls mit diesem Ton verfüllt. Auch Toncutanfragmente sind sehr ähnlich zusammengesetzt aber teilweise stark reorientiert und durch kleine Eisenkonkretionen oder Bleichflecken überprägt, ähnlich wie im vierten Horizont. Wiederum treten auch Tonüberzüge in Poren aus graugelbem, sehr staubigem, selten mikrolaminiertem Ton auf (Tafel 2, Foto 10). Sie lassen sich nur schwer von der Grundmasse unterscheiden. Insgesamt liegt der Anteil an Tonverlagerungsmerkmalen bei 11 %. Auch hier finden sich etliche runde bis unscharf begrenzte Fe/Mn-Konkretionen von 15–200 µm Durchmesser in der Grundmasse und zum Teil auf den Tonüberzügen wieder. Gewebereste sind nur noch mit 1 % Flächenanteil vertreten.



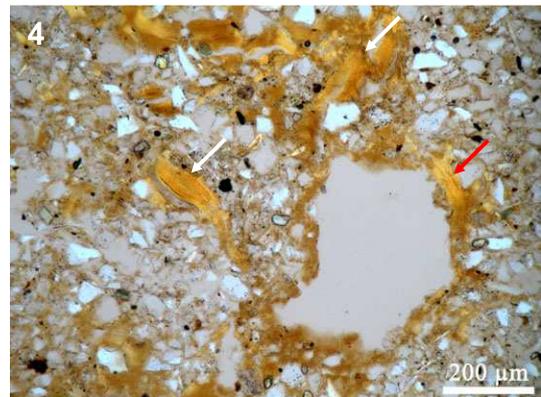
SBb, 1. Horizont (1–4 cm): PPL leicht staubiges Toncutanfragment mit deutlichen Extinktionslinien, Aggregatzwischenräume (Pfeil) bestehen aus durch organisches Material verbundenen Mineralpartikeln.



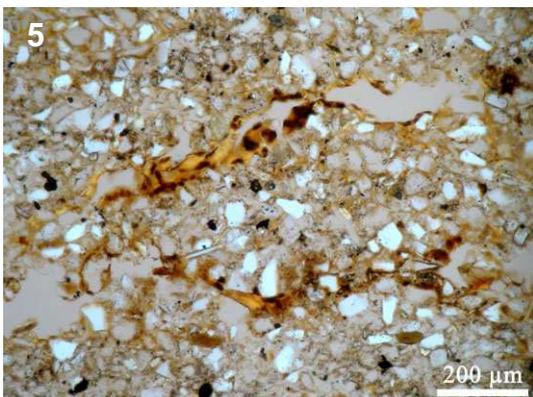
SBb, 2. Horizont (20–23 cm): PPL schwach mikrolaminiertes Toncutanfragment mit deutlichen Extinktionslinien



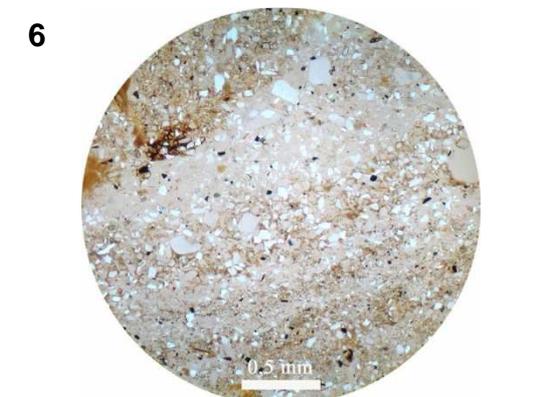
SBb, 2. Horizont (20–23 cm): PPL staubige braun-schwarze, gut orientierte Toncutane



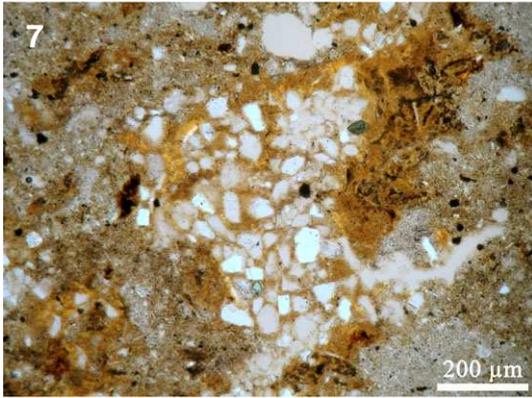
SBb, 3. Horizont (39–42 cm): PPL Toncutane (roter Pfeil) und Toncutanfragmente (weiße Pfeile) mit leichter Mikrolaminierung aus abwechselnd gelben und bräunlichen, schwach staubigen Laminae



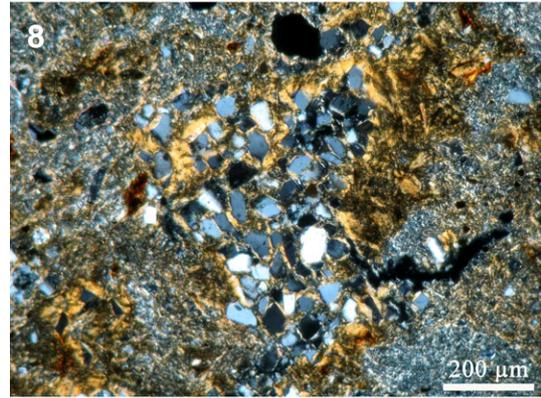
SBb, 3. Horizont (39–42 cm): PPL Fe/Mn-Ausfällung auf Toncutane



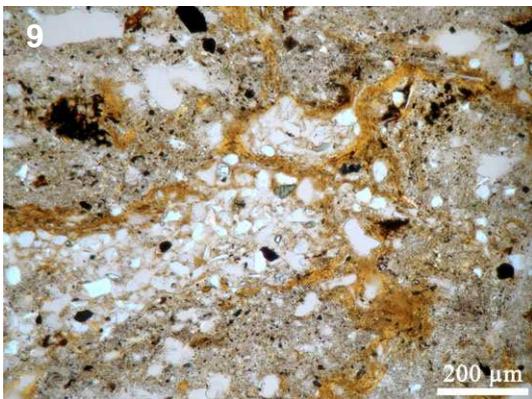
SBb, 3. Horizont (39–42 cm): PPL schwach sortierte, gestreifte Bereiche



SBb, 4. Horizont (58–61 cm): PPL
vorwiegend mit Grobschluff gefüllter
und teilweise von Toncutanen umge-
bener Bereich („Schlufffüllung“)



SBb, 4. Horizont (58–61 cm): XPL
dito



SBb, 5. Horizont (65–68 cm):PPL
Schlufffüllung, teilweise umgeben von
Toncutanen



SBb, 5. Horizont (65–68 cm):PPL
gelbliche, schwach staubige Toncutane
(schwarzer Pfeil) und gelblich-graue,
stark staubige Toncutane (roter Pfeil)

Tafel 2b: Dünnschliffaufnahmen SBb

Vic – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Hardehausen

Ah-Horizont

Der Ah-Horizont zeigt im Dünnschliff eine deutlich ausgeprägte Mikroaggregatstruktur bestehend aus Krümeln und Subpolyedern (crumb microstructure partly subangular) (Tafel 3, Foto 1). Das c/f_{10} -Verhältnis ist durchgängig 2,5/7,5 (siehe auch Tab. 14). Die Mikromasse ist zu ca. 70 % undifferenziert bis leicht punktförmig gesprenkelt. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Bereiche mit Krümelgefüge, das im Durchlicht auch durch eine dunkelbraune Farbe hervortritt. Die restliche orangebraune Mikromasse ist stark gesprenkelt und von Mineralen mit einer granostriated b-fabric durchsetzt. Wurzel- und Gewebereste machen ca. 4 % am Schliff aus, Lösung sogar 20 %. Es sind keine Tonverlagerungsmerkmale zu erkennen.

Al-Bv-Tv-Horizont

Der Dünnschliff des zweiten Horizontes besitzt ein mittelmäßig bis stark ausgeprägtes subpolyedrisches Mikroaggregatgefüge. Die Mikromasse ist punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, das c/f_{10} -Verhältnis beträgt 2/8. Viele Körner und Konkretionen sind deutlich granostriated, einige Poren porostriated und stellenweise tritt eine cross striated b-fabric auf. Toncutane und Bruchstücke machen insgesamt nur 0,4 % am Schliff aus. Die im Schliff verteilten orangefarbenen Toncutanbruchstücke sind meist leicht staubig, teilweise schwach mikrolaminiert und unterschiedlich gut orientiert bis reorientiert. Die wenigen Toncutane in Poren unterscheiden sich in Korngröße und Farbe nur geringfügig von der restlichen Mikromasse: Sie sind meist staubig und selten mikrolaminiert, die Extinktionslinien sind nur mäßig gut ausgebildet. Eine Ausnahme bildet eine orangefarbene, mit sehr leicht staubigem, stark orientiertem Ton verfüllte Wurzel (Tafel 3, Foto 2). Es handelt sich um eine junge Tonverlagerung, die aufgrund der gut erhaltenen Wurzelreste höchstens einige hundert Jahre alt sein kann. Wurzel- und Gewebereste, unter anderem Sklerotien (Pilzhyphen), machen insgesamt ca. 3,5 % am Schliff aus. Viele kleine Gewebereste sind sowohl unter PPL, XPL und OIL schwarz bis rotschwarz und treten auch in den folgenden Horizonten immer wieder auf (Tafel 3, Fotos 5, 6, 7). Auffällig ist die mit 4,2 % erhöhte Anzahl an rundlichen, meist in situ gebildeten und unter PPL rötlich bis schwarz gefärbten Fe- und Mn-Konkretionen.

Bt-Tv-Horizont

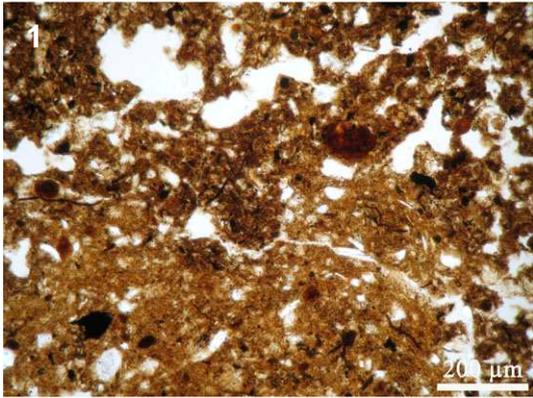
Der Dünnschliff des dritten Horizontes besitzt eine mittelmäßig ausgebildete, subpolyedrische Mikroaggregatstruktur. Das c/f_{10} -Verhältnis verschiebt sich mit 0,6/9,4 zunehmend in Richtung Tonfraktion. Die Mikromasse zeigt ein reiches Muster an Interferenzfarben: Sie ist punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, teilweise cross striated, viele Minerale und Konkretionen sind granostriated und einige Poren porostriated. Auffallend ist die im Millimeterbereich wechselnde, gleichmäßige Verteilung von eher rötlichem und hellem Ton (Tafel 3, Foto 4). Das weist auf eine leichte Pseudovergleyung hin, die makroskopisch im Gelände nicht zu erkennen war. Tonverlagerungsmerkmale treten mit 6,8 % deutlich stärker auf als im vorhergehenden

Horizont. Sie sind extrem schwierig von der stark mit b-fabric durchsetzten Grundmasse zu unterscheiden, die eine sehr ähnliche Zusammensetzung aufweist. Eine Mehrzahl der Poren und Aggregate besitzt Tonüberzüge, sie sind wie bereits im zweiten Horizont staubig, orange bis ockergelb, mit deutlichen bis undeutlichen Extinktionslinien und zum Teil einer leichten Mikrolaminierung (Tafel 3, Foto 3). An einigen Poren ist noch zu erkennen, dass durch Wurzeln geschaffene Poren im Nachhinein mit Tonüberzügen ausgekleidet wurden. Toncutanbruchstücke und Verfüllungen (Tafel 3, Foto 3, sie sind teilweise schon wieder von neuen Poren durchzogen) nehmen 5 % Flächenanteil ein und sind in der Regel den Tonüberzügen in den Poren sehr ähnlich aber deutlich stärker reorientiert. Auffällig sind einige optisch anisotrope Bruchstücke von 300 µm Durchmesser und ca. 0,6 % Flächenanteil mit schwachem und vorwiegend flächigem Auslöschungsmuster. Sie sind schwach staubig, mikrolaminieren, gelb bis orange gefärbt und weisen sehr breite Auslöschungsbänder auf, die auch bei Rotation des Drehtisches nie ganz verschwinden (vgl. Tafel 3, Fotos 8, 9). Im Unterschied zu den normalen Toncutanfragmenten zeigen die Bruchstücke Spaltflächen. Eine weitere Besonderheit bilden einige bis zu 1 mm große Konkretionen mit 0,8 % Flächenanteil im Schliff: Sie enthalten kaum Material aus der Matrix, sind matt, braunrot in PPL und XPL, aber gelb in OIL (Tafel 3, Fotos 5, 6, 7). Normale Konkretionen nehmen nur noch 0,5 % Flächenanteil ein. Der Schliff enthält mit 4,5 % ungewöhnlich viele gut erhaltene Wurzeln und Gewebereste und auch ein passage feature ist gut zu erkennen.

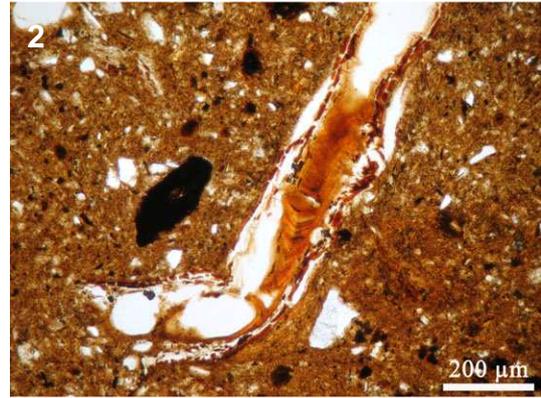
Tv-Horizont

Der Schliff des vierten Horizontes weist ein polyedrisches Mikrogefüge (angular blocky microstructure) mit deutlicher Aggregatausbildung auf. Das c/f_{10} -Verhältnis und auch die b-fabric ähneln zu 60 % dem vorhergehenden Schliff. 40 % enthalten allerdings mit einem c/f_{10} -Verhältnis von 0,8/9,2 mehr Minerale in Schluffgröße und auch die Mikromasse ist weniger stark punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt. Durch Redoximorphie hervorgerufene Farbwechsel sind in diesem Schliff nur sehr schwach ausgebildet. Toncutane finden sich an Aggregaten (Tafel 3, Foto 10) und in Poren (insgesamt 0,4 %), sie heben sich kaum von der Matrix ab. Die Cutane sind dünner als zuvor, staubig und besitzen auf Grund der mäßig guten Orientierung des Tons undeutliche Extinktionslinien. Verfüllungen und gut von der Matrix differenzierbare Toncutanbruchstücke sind nur sehr selten aufzufinden. Wiederum treten, wie schon im dritten Horizont, einige besonders große Bruchstücke (0,8 % Flächenanteil) bis 800 µm auf (Tafel 3, Fotos 8, 9). Die Kanten sind wenig abgerundet, ein Hinweis darauf, dass sie nicht sehr weit verlagert wurden. Dieser Schliff enthält mit 5,5 % Flächenanteil viele sehr große Konkretionen, die unter OIL eine gelbe und stellenweise leicht rötliche Farbe aufweisen (vgl. dritter Horizont). In situ entstandene typische Konkretionen nehmen circa 0,5 % ein. Neben zahlreichen gut erhaltenen Wurzeln und Wurzelresten, finden sich viele kleinere, unter PPL, XPL und OIL schwarze, hohlraumarme Gewebereste, deren ursprüngliche Gestalt kaum noch erhalten ist (vgl. Tafel 3, Fotos 5, 6, 7).

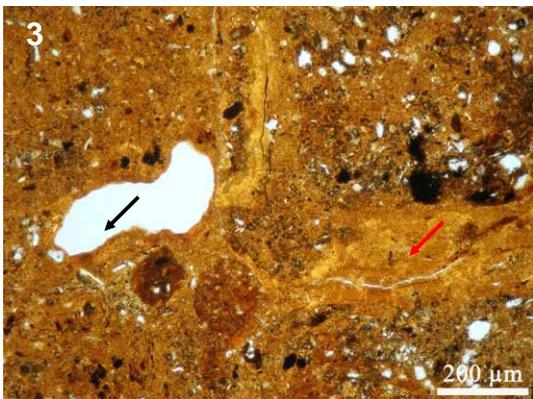
In den Horizonten zwei bis vier wurde von je einem massiven Kalkstein ein Dünnschliff angefertigt. Mit diesen Schliffen soll überprüft werden, ob bestimmte Artefakte in den Bodenhorizonte eventuell kalksteinbürtig sind. Sie beinhalten aber außer einigen Eisen- und im vierten Horizont auch Mangananreicherungen keine Besonderheiten.



HARD, 1. Horizont (2–5 cm): PPL krümeliges Mikrogefüge in der oberen Bildhälfte, subpolyedrisches in der unteren



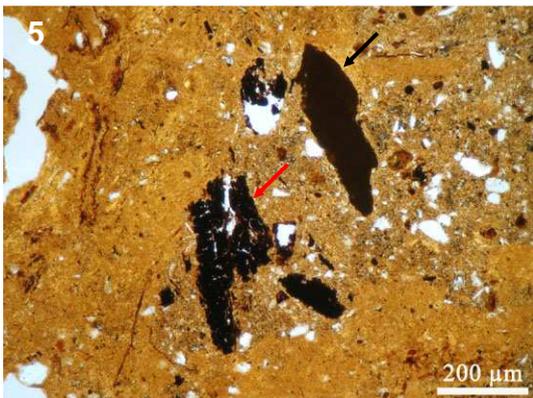
HARD, 2. Horizont (9–12 cm): PPL mit leicht staubigem, gut orientiertem Ton verfüllte Wurzel



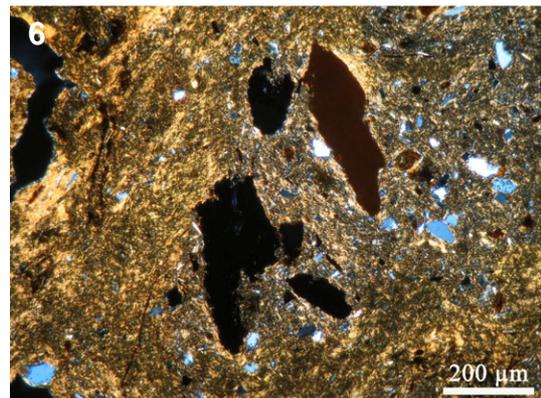
HARD, 3. Horizont (22–25 cm): PPL staubige Toncutane in Pore (schwarzer Pfeil), staubige, leicht reorientierte Verfüllung (roter Pfeil)



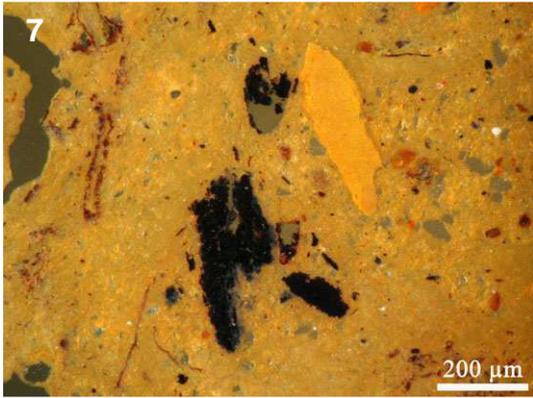
HARD, 3. Horizont (22–25 cm): PPL Aggregate mit Tonüberzug (schwarzer Pfeil), starke Farbunterschiede in der Matrix (roter Pfeil)



HARD, 3. Horizont (22–25 cm): PPL schwarz gefärbte Gewebereste (roter Pfeil), keine Farbveränderung bei XPL (6) und OIL (7), schwarzrote Fe/Mn-Konkretion (schwarzer Pfeil), wahrscheinlich Geothit, unter XPL (6) etwas rötlicher, unter OIL (7) gelb gefärbt



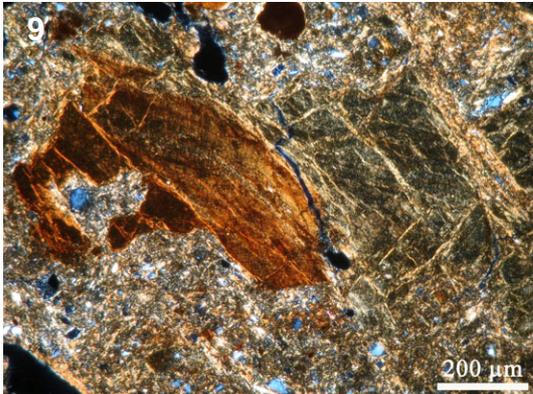
HARD, 3. Horizont (22–25 cm): XPL dito



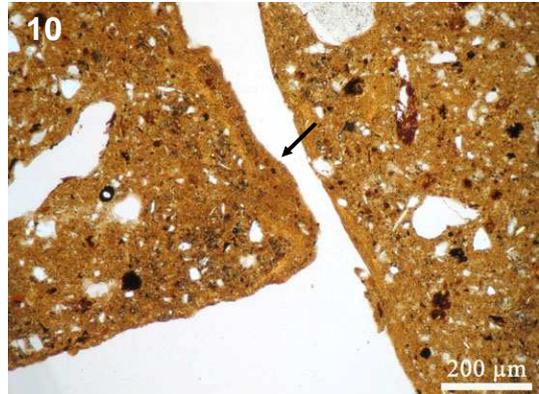
HARD, 3. Horizont (22–25 cm): OIL
dito



HARD, 4. Horizont (33–36 cm): PPL
staubige, mikrolaminierte Bruchstücke,
die unter XPL (9) ein flächiges, schwach
ausgeprägtes Auslöschungsmuster und
Spaltrisse zeigen



HARD, 4. Horizont (33–36 cm): XPL
dito



HARD, 4. Horizont (33–36 cm): PPL
staubige Toncutane an Aggregaten

Tafel 3b: Dünnschliffaufnahmen HARD

VId – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Göttinger Wald a

Ah-Horizont

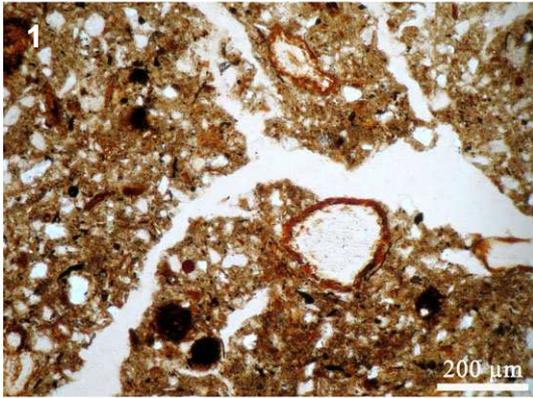
Der Dünnschliff des Ah-Horizontes weist ein subpolyedrisches Mikrogefüge auf, dessen großes Porenvolumen hauptsächlich auf Aggregatzwischenräume zurückgeht (Tafel 4, Foto 1). Das c/f_{10} -Verhältnis liegt bei 4,5/5,5 (siehe auch Tab. 15) und die Matrix ist sehr leicht punktförmig gesprenkelt. Wurzeln und Wurzelreste machen ca. 15 % am Schliff aus. Es finden sich keinerlei Tonverlagerungsmerkmale, dafür aber ein Kohlestückchen.

Ah-Bv-Tv-Horizont

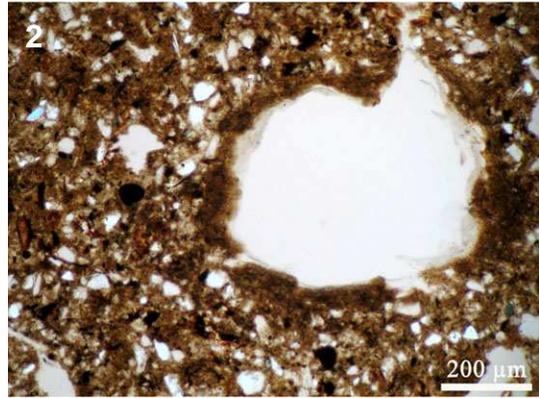
Im Dünnschliff des zweiten Horizontes ist das Mikroaggregatgefüge mäßig bis deutlich ausgebildet und besteht hauptsächlich aus hohlraumreichen Subpolyedern und Polyedern. Die Matrix ist stark punktförmig gesprenkelt, einige Minerale sind granostriated. Das c/f_{10} -Verhältnis verlagert sich leicht zugunsten der feineren Fraktion zu 4/6. Die Zahl der Wurzeln und Wurzelreste geht auf 3,5 % zurück. Die einzigen Tonverlagerungsmerkmale sind wenige, meist braune, staubige Toncutane in Poren mit schwach ausgeprägten Extinktionslinien (Tafel 4, Fotos 2, 3). In zwei Fällen sind die Überzüge rein und staubig mikrolaminiert (Tafel 4, Foto 4). Auch in diesem Horizont sind einige wenige Holzkohlereste vorhanden.

Bv-Tv-Horizont

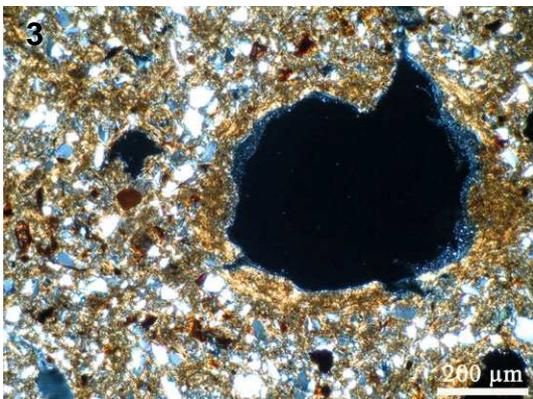
Der Schliff des dritten Horizontes weist ein mäßig gut entwickeltes subpolyederisches Mikroaggregatgefüge auf. Die Matrix ist fast überall punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, viele Minerale und auch einige Sklerotien sind granostriated, wenige Poren porostriated, es finden sich einige unregelmäßige, streifenförmige (random striated) b-fabrics. Das c/f_{10} -Verhältnis ist 4/6, in wenigen tonigeren Bereichen ist es etwas weiter. Nur sehr wenige Poren zeigen eine leichte Toneinwaschung. Die Toncutane sind wieder braun und staubig. Circa 20 % des Schliffs wird von einer großen Wurzel eingenommen (Tafel 4, Fotos 5, 6) und in der Grundmasse finden sich etliche weitere Wurzel- und Gewebereste.



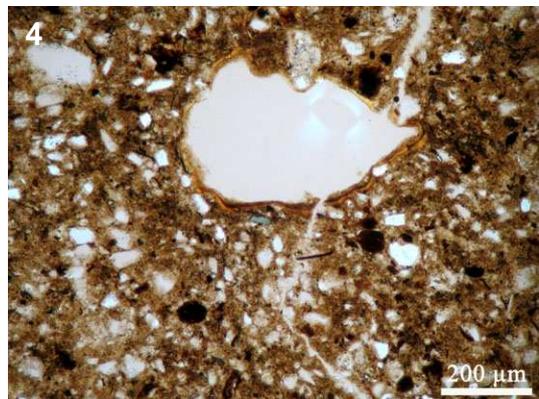
GOWa, 1. Horizont (3–6 cm): PPL
subpolyedrisches Mikroaggregatgefüge,
Grundmasse enthält viele Wurzeln und
Wurzelreste



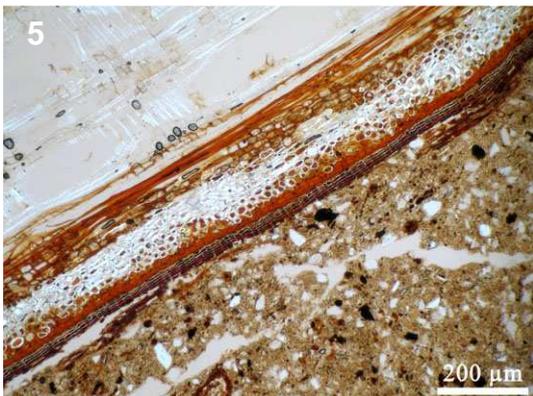
GOWa, 2. Horizont (9–12 cm): PPL
braune, staubige Toncutane



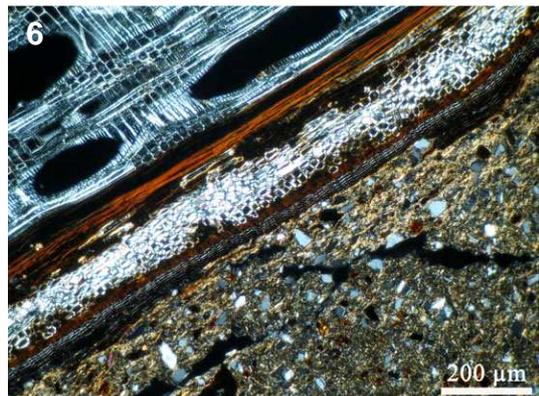
GOWa, 2. Horizont (9–12 cm): XPL
dito, undeutlich orientiert



GOWa, 2. Horizont (9–12 cm): PPL
2-phasige Toncutane mit äußerer gelber,
fast reiner Lamine und innerer brauner,
mäßig staubiger Lamine



GOWa, 3. Horizont (16–19 cm): PPL
Wurzel



GOWa, 3. Horizont (16–19 cm): XPL
einige Bereiche nah an der Wurzel
weisen eine leichte Toneinregelung auf

Tafel 4: Dünnschliffaufnahmen GOWa

VIe – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Göttinger Wald b

Ah-Horizont

Der Dünnschliff des ersten Horizontes weist ein stark entwickeltes, krümeliges Mikroaggregatgefüge mit Übergängen zum Subpolyedergefüge auf. Es lassen sich weder Tonein- noch auswaschungsmerkmale feststellen. Die Mikromasse ist sehr leicht punktförmig gesprenkelt, größere Körner und einige Konkretionen sind granostriated. Das c/f_{10} -Verhältnis beträgt 5/5 (siehe auch Tab. 16). Es finden sich viele Wurzelreste, die ca. 8 % des Schliffs ausmachen, und 0,5 % rundliche Losung von 150 μm Durchmesser.

Al-Bv-Horizont

Der Dünnschliff des zweiten Horizontes zeigt eine mittelmäßig entwickelte, subpolyedrische, hohlraumreiche Mikroaggregatstruktur. Die Mikromasse ist mittelstark punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, teilweise monostriated. Einige Poren sind porostriated und viele Minerale granostriated. Tonverlagerung findet sich lediglich in Form von Toncutanen in einigen Poren, aber nicht an Aggregatoberflächen. Sie macht 0,8 % des Schliffs aus. In den meisten Fällen ist die Cutane stark staubig, etwas bräunlicher als die Matrix und die Extinktionslinien sind mäßig gut zu erkennen bis diffus (Tafel 5, Fotos 1, 2). Nur eine Pore weist eine gut orientierte Toncutane mit einer gelben, reinen, äußeren Lamine und einer staubigen, inneren Lamine auf. Die Anzahl an Wurzeln, Wurzelresten und Sklerotien geht zurück auf 3,5 %. Allerdings finden sich ein kleines Knochenstück und einige Kohlestückchen (Tafel 5, Foto 3).

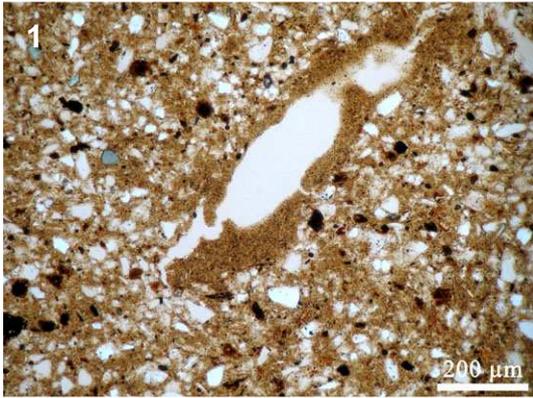
Btv-Tv-Horizont

Das Mikroaggregatgefüge im Schliff des dritten Horizontes ist gut entwickelt und besteht hauptsächlich aus Krümeln und Subpolyedern. Circa 85 % der Mikromasse sind wie im vorhergehenden Schliff mittelstark punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt. Viele Körner und Konkretionen sind granostriated, einige Bereiche sind teilweise porostriated und monostriated. Das c/f_{10} -Verhältnis beträgt erneut 5/5. In den restlichen 15 % des Schliffs sind die Aggregate bzw. rundlichen, 1 bis 2 mm großen Bereiche deutlich toniger mit einem c/f_{10} -Verhältnis um 0,8/9,2. Deren Mikromasse ist sehr stark punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt und deutlich granostriated. Die meisten Toncutanbruchstücke – insgesamt enthält der Schliff 1,5 % – sind an diese Bereiche gebunden. Sie sind stark deformiert und reorientiert, aber im Gegensatz zu den Tonüberzügen in Poren gelborange, rein bis maximal leicht staubig und zum Teil leicht mikrolaminiert (Tafel 5, Fotos 5, 6). Die in der restlichen Matrix enthaltenen Tonüberzüge in Poren ähneln denen des zweiten Horizontes und sind braun, dünn und staubig (Tafel 5, Foto 4). Der Schliff ist in dieser Tiefe mit 3,5 % reich an Wurzel- und Geweberesten. Die abgerundeten Aggregate deuten auf eine starke Bioturbation hin. Auch hier finden sich wenige kleine Holzkohlestückchen. Außergewöhnlich ist ein metamorphes Gesteinsfragment, das im Kalkstein nicht vorkommt; die Herkunft

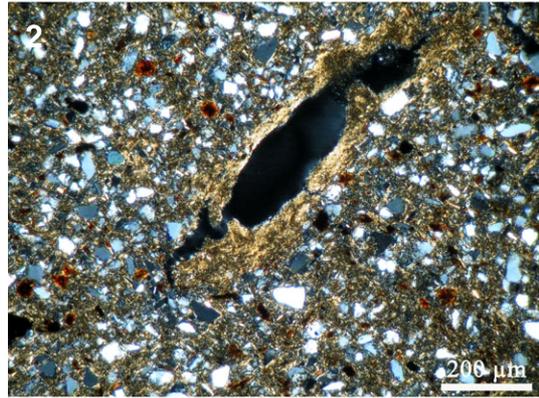
bleibt ungeklärt. Insgesamt wirkt der Boden gestört, eventuell handelt es sich um eine alte Wurzelverfüllung.

Bvt-Tv-Horizont

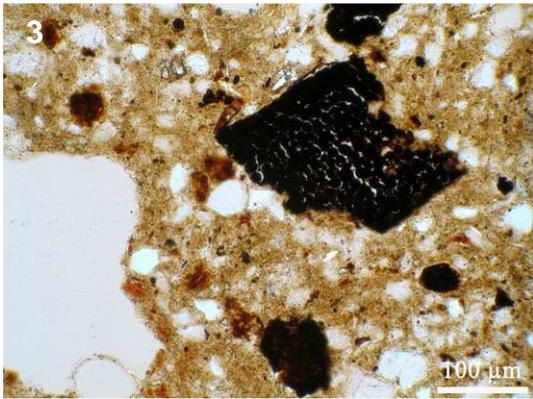
Die Mikroaggregatstruktur im Dünnschliff des vierten Horizontes ist gut entwickelt, die Subpolyeder und Polyeder sind aber nur mittelmäßig gut separiert, da Ton einige Aggregatzwischenräume durchflossen und teilweise verschlossen hat (Tafel 5, Fotos 7, 8). Die Mikromasse ist stark punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, viele Minerale sind granostriated und einige Bereiche cross striated. Einige Poren und wenige Aggregatränder sind porostriated. Das c/f_{10} -Verhältnis schwankt um 1,5/8,5 und wechselt kleinflächig. Circa 12 % des Schliffs weisen ein deutlich gröberes c/f_{10} -Verhältnis auf und ähneln in Morphologie und Zusammensetzung sehr der Grundmasse im dritten Horizont. In einem Fall handelt es sich um eine halb verfüllte Pore, wahrscheinlich eine Regenwurmröhre oder ein Wurzelgang, da zusätzlich viele Gewebereste enthalten sind. Verfüllungen und Bruchstücke nehmen mit circa 12 % einen großen Flächenanteil am Schliff ein. Sie ähneln im Aufbau den Toncutanfragmenten des dritten Horizontes. Gerade die Verfüllungen umgeben oft ganze Aggregate und bilden ein Muster aus Fließstrukturen (Tafel 5, Fotos 7, 8). Teilweise sind sie so stark in die Matrix eingearbeitet und reorientiert, dass sie sich kaum noch von der restlichen Grundmasse unterscheiden. Sie wurden dann flächenmäßig nicht mit erfasst. Toncutane an Poren und Aggregaten treten nur selten auf und sind parallel zum vorhergehenden Schliff dünn und mäßig staubig, teilweise aber gelber gefärbt und ähneln den Verfüllungen (Tafel 5, Fotos 9, 10). Fe/Mn-Konkretionen nehmen 5 % Flächenanteil ein, in den vorhergehenden Schliffen waren es jeweils nur 2 %. Wurzel- und Gewebereste gehen auf 0,5 % Flächenanteil zurück.



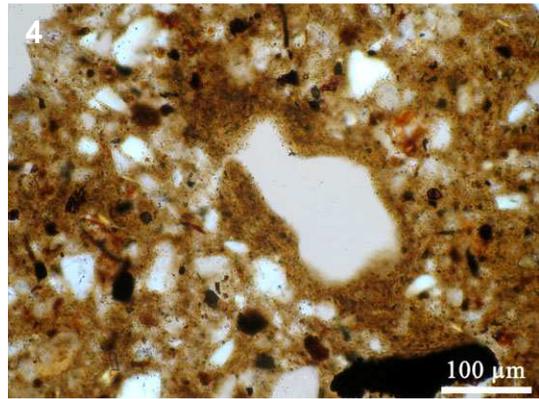
GOWb, 2. Horizont (14–17 cm): PPL
staubige, braune Toncutane in einer Pore



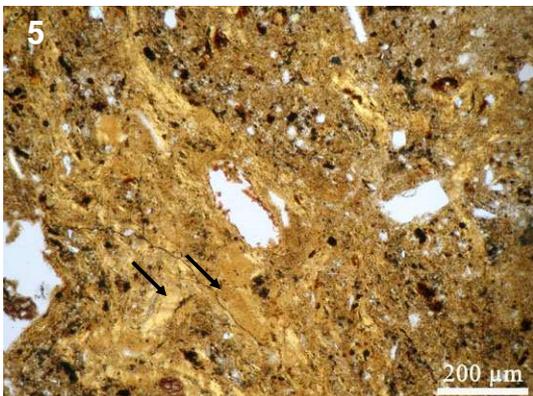
GOWb, 2. Horizont (14–17 cm): XPL
dito, mäßig gut orientiert



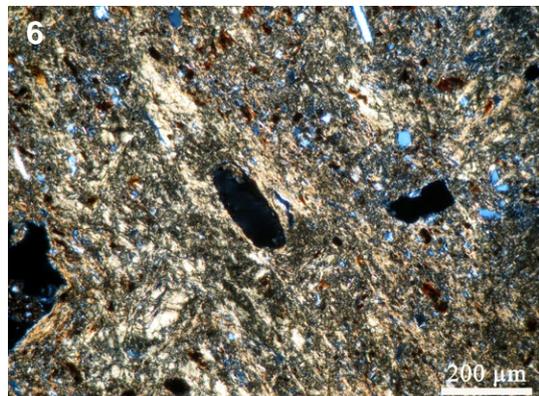
GOWb, 2. Horizont (14–17 cm): PPL
Holzkohle



GOWb, 3. Horizont (24–27 cm): PPL
staubige, braune Toncutane, mäßig gut orientiert

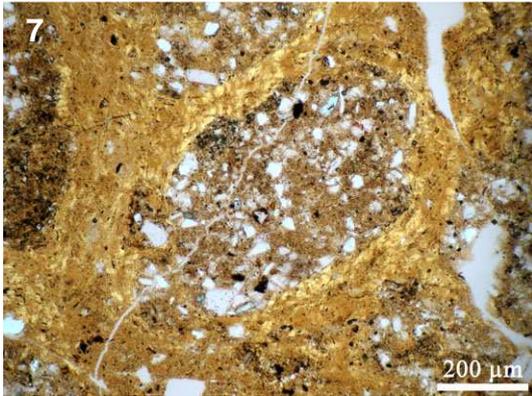


GOWb, 3. Horizont (24–27 cm): PPL
gelbe, rein bis maximal leicht staubige,
stark reorientierte Toncutanbruchstücke
(schwarze Pfeile) in stark toniger Mikro-
masse

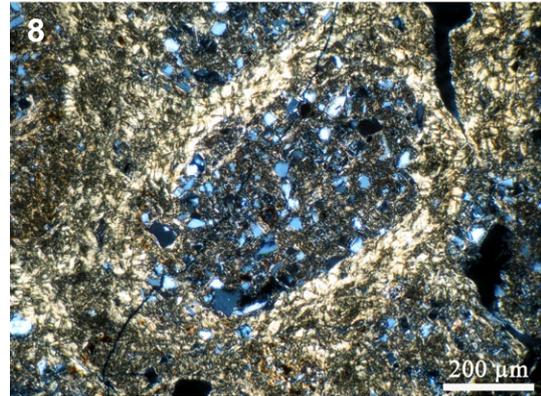


GOWb, 3. Horizont (24–27 cm): XPL
dito

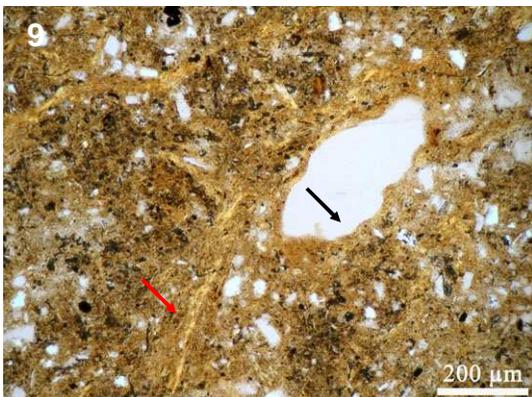
Tafel 5a: Dünnschliffaufnahmen GOWb



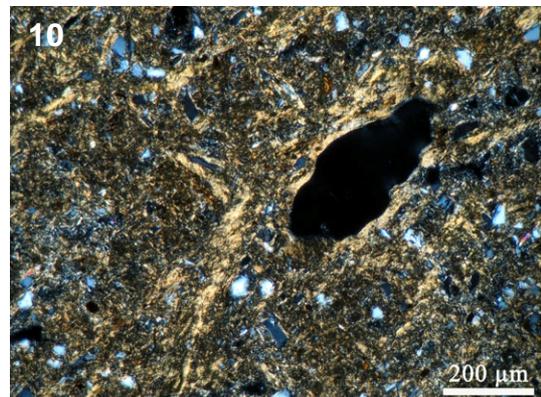
GOWb, 4. Horizont (35–38 cm): PPL
Aggregat umschlossen von verlagertem
leicht staubigem, gelblich- bis orange-
farbigem Ton



GOWb, 4. Horizont (35–38 cm): XPL
dito, Ton stark reorientiert



GOWb, 4. Horizont (35–38 cm): PPL
schwach ausgeprägte gelblich-staubige
Toncutane (schwarzer Pfeil) und schmale
Verfüllungen aus gelbem, mäßig
staubigem Ton (roter Pfeil), stark
reorientiert



GOWb, 4. Horizont (35–38 cm): XPL
dito

Tafel 5b: Dünnschliffaufnahmen GOWb

Vif – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Göttinger Wald c

Das Pedon GOWc besitzt fünf Mineralbodenhorizonte, aus den ersten vier Horizonten wurden Dünnschliffproben entnommen (siehe auch Tab. 17).

Ah-Horizont

Der erste Horizont zeigt ein mäßig gut entwickeltes Mikroaggregatgefüge aus Krümeln und Subpolyedern. Das c/f_{10} -Verhältnis liegt bei 6/4 und die Mikromasse ist undifferenziert (Tafel 6, Foto 1). Allerdings weisen 7 % des Schliffs rundliche bis längliche Aggregate von ca. 1 mm Durchmesser und einem c/f_{10} -Verhältnis von ca. 2,5/7,5 auf (Tafel 6, Fotos 2, 3). Sie sind häufig von sehr schmalen Aggregatzwischenräumen umgeben. Diese tonigen Bereiche sind stark punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt und die größeren Minerale sind oft granostriated. Stellenweise enthalten sie Fe/Mn-Oxidüberzüge auf dem Ton. Innerhalb der tonigen Aggregate befinden sich einige deformierte und teilweise reorientierte Toncutanbruchstücke: Sie sind orange bis gelb, rein bis schwach staubig, teilweise mikrolaminiert und besitzen deutliche bis undulöse Auslöschungsbänder. Toncutane in Poren sind nicht vorhanden. Der Schliff enthält ca. 4 % Wurzeln und Gewebereste und ca. 12 % rundliche Losung um 100 μm Durchmesser (Tafel 6, Foto 1). Auch in diesem Pedon finden sich wieder bis in den dritten Horizont hinein kleine Holzkohlestückchen.

Ah+Bv-Al-Horizont

Im Dünnschliff des zweiten Horizontes ist das Mikroaggregatgefüge nur schwach entwickelt, Hohlräume werden hauptsächlich von Röhren gebildet. Die Grundmasse weist ein c/f_{10} -Verhältnis von 6/4 auf und ist undifferenziert. Auch in diesem Horizont treten tonigere Bereiche mit einem ähnlichen c/f_{10} -Verhältnis wie im ersten Horizont auf. Sie sind mit durchschnittlich 300 μm Durchmesser aber kleiner und nehmen nur 1,5 % Flächenanteil ein (Tafel 6, Foto 4). Toncutanbruchstücke treten in der gesamten Matrix auf, deren Aussehen gleicht den Bruchstücken im ersten Horizont. Es finden sich nur wenige Toncutane in Poren: Sie sind entweder dunkelbraun, sehr staubig und zeigen mäßig deutliche Extinktionslinien, oder sie sind fast rein, gelb und besitzen deutliche Auslöschungsbänder. Einige Poren sind mit diesen beiden Phasen mikrolaminiert (Tafel 6, Foto 5), ohne dass sich eine feste Abfolge ableiten lässt. Stellenweise tritt noch Losung auf und ca. 2 % Wurzeln und Wurzelreste.

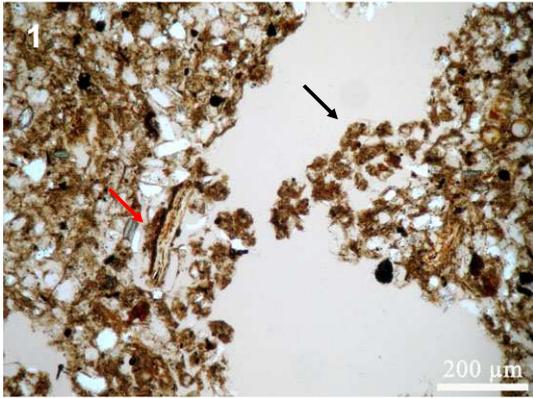
Bvt-Horizont

Das Mikrogefüge im Dünnschliff des dritten Horizontes ist schwach entwickelt und ein Gemisch aus Subpolyeder- und Röhrengefüge. Die Mikromasse besteht zu ca. 85 % aus etwas tonreicherem Material verglichen mit den vorigen Horizonten. Das c/f_{10} -Verhältnis beträgt 5,5/4,5; der Horizont weist zudem eine leicht punktförmig gesprenkelte b-fabric auf. Die restlichen 15 % bestehen wiederum aus tonreichen, runden Bereichen von ca. 2 mm Durchmesser und einem c/f_{10} -Verhältnis von 3/7 (Tafel 6, Fotos 6, 7). Sie sind punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt und granostriated. Die Übergänge zwischen den beiden Korngrößenbereichen sind wesentlich fließender

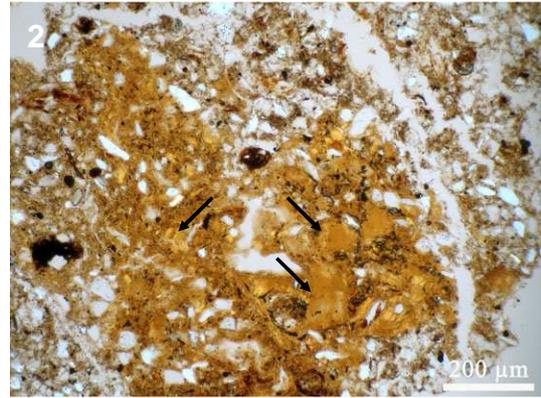
als in den vorhergehenden beiden Schliffen. Die Anzahl an Toncutanen in Poren steigt auf 0,8 % Flächenanteil. Wie bereits im vorhergehenden Schliff sind sie entweder staubig/dunkelbraun oder rein/gelb oder vorzugsweise mit diesen beiden Überzügen mikrolaminiert (Tafel 6, Foto 6). Die Extinktionslinien sind deutlich zu erkennen, teilweise sogar scharf. Toncutanfragmente und Verfüllungen treten mit 5 % im ganzen Schliff, besonders aber in den tonreichen Aggregaten auf. Sie sind teilweise stark mikrolaminiert wie die Toncutane in Poren oder schwach wie in den tonreichen Aggregaten des ersten und zweiten Horizontes. Toncutanbruchstücke sind besonders in den tonreicheren Bereichen stärker reorientiert und undulös auslöschend. Es treten vermehrt Fe/Mn-Konkretionen in der Matrix auf und einige Toncutanbruchstücken und Verfüllungen weisen Fe/Mn-Oxid-Überzüge auf (Tafel 6, Foto 7). Wurzeln und Wurzelreste gehen deutlich zurück.

Bvt-Tv-Horizont

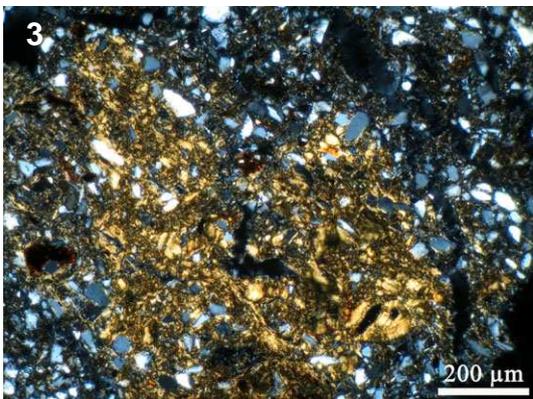
Die Mikroaggregatstruktur im Dünnschliff des vierten Horizontes ist gut entwickelt und besteht aus Subpolyedern und Polyedern bei einer mittleren Separierung. Etliche Aggregatzwischenräume sind durch eingespülten Ton verschlossen worden (Tafel 6, Fotos 8, 9, 10). Dieser Ton ist meist stark orientiert und wird als Verfüllung angesprochen. Die Grundmasse hat nur noch zu 45 % ein c/f_{10} -Verhältnis von 5,5/4,5, alle weiteren Bereiche sind feinkörniger bis hin zu einem c/f_{10} -Verhältnis von 0,5/9,5. Mit steigendem Tonanteil wechselt auch die b-fabric von leicht punktförmig gesprenkelt bis hin zu stark punktförmig und mosaikförmig gesprenkelt. Viele Minerale sind granostriated und an einigen Stellen ist die Matrix cross striated. Toncutane in Poren treten relativ häufig und kräftig ausgebildet auf (Tafel 6, Foto 10). In tonigeren Bereichen sind sie leicht mikrolaminiert, rein bis leicht staubig, gelb und nur selten braun mit deutlichen bis scharfen Extinktionslinien. Auch Verfüllungen, Toncutane an Aggregaten und viele Bruchstücke sind so aufgebaut, allerdings durch einsetzende Reorientierung häufig eher undulös auslöschend. In den schluffigeren Bereichen sind die Tonüberzüge in Poren etwas seltener und vom Aufbau identisch mit den im zweiten und dritten Horizont beschriebenen Tonüberzügen in Poren. Auf mehreren Verfüllungen sind Fe/Mn-Oxid-Überzüge vorhanden. Wurzelreste nehmen nur einen geringen Flächenanteil ein.



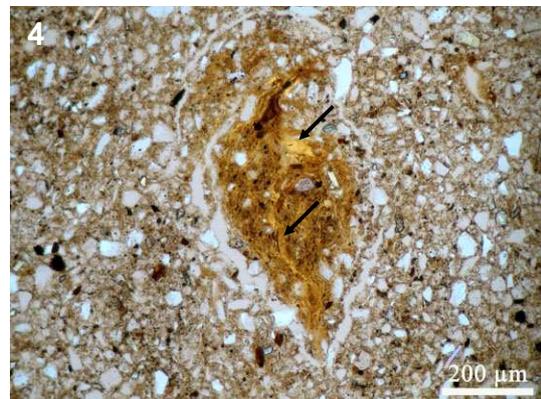
GOWc, 1. Horizont (2–4 cm): PPL
rundliche Losung in Hohlraum
(schwarzer Pfeil), humose Grundmasse
mit Wurzelresten (roter Pfeil)



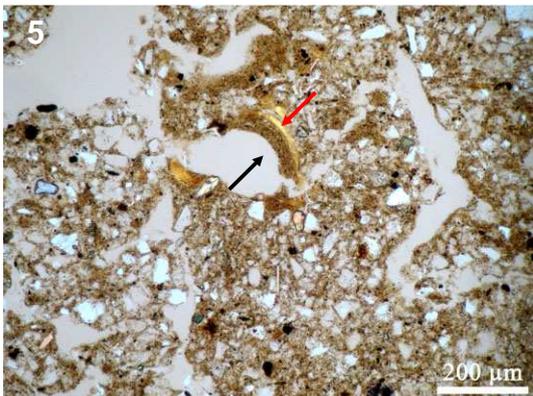
GOWc, 1. Horizont (2–4 cm): PPL
toniges Aggregat mit rein und schwach
staubig mikrolaminierten Toncutanfrag-
menten (Pfeile)



GOWc, 1. Horizont (2–4 cm): XPL
dito, undulöses Auslöschungsmuster
durch starke Reorientierung des Tons



GOWc, 2. Horizont (12–15 cm): PPL
tonreiches Aggregat mit Toncutanbruch-
stücken (Pfeile)

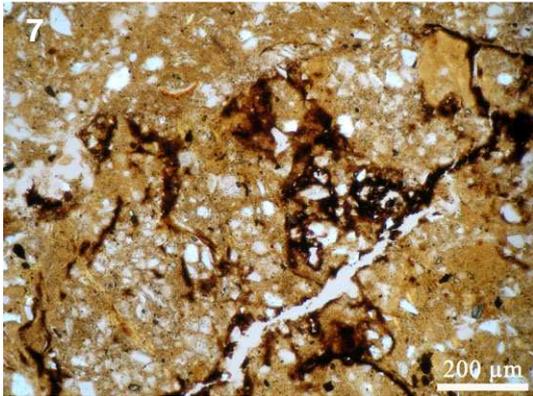


GOWc, 2. Horizont (12–15 cm): PPL
2-phasige Toncutane mit reiner, gelber,
stark orientierter Lamine (roter Pfeil) und
stark staubiger, brauner, mäßig gut orien-
tierter Lamine (schwarzer Pfeil)

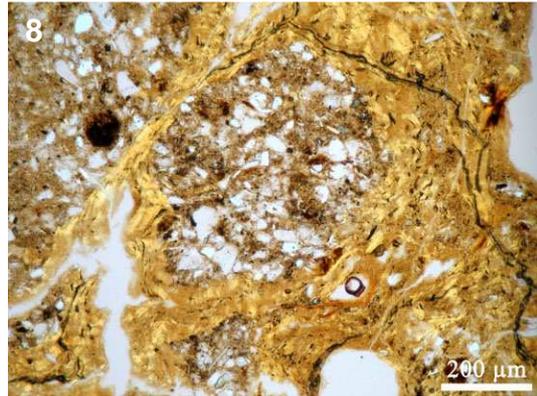


GOWc, 3. Horizont (26–29 cm): PPL
mikrolaminierte Toncutane aus gelben
und braunen, staubigen Laminen
(schwarzer Pfeil), tonreiches Aggregat
(roter Pfeil)

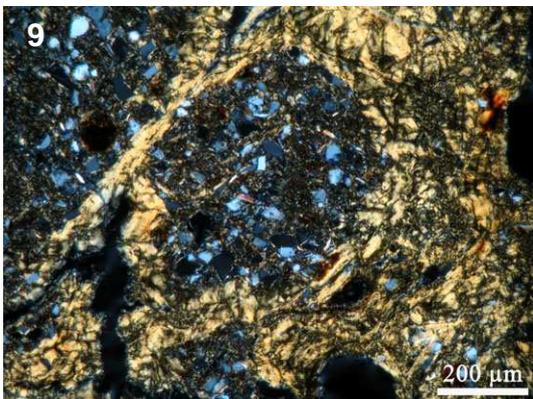
Tafel 6a: Dünnschliffaufnahmen GOWc



GOWc, 3. Horizont (26–29 cm): PPL toniger Bereich mit Fe/Mn-Oxid-Überzügen an und auf den Toncutanfragmenten

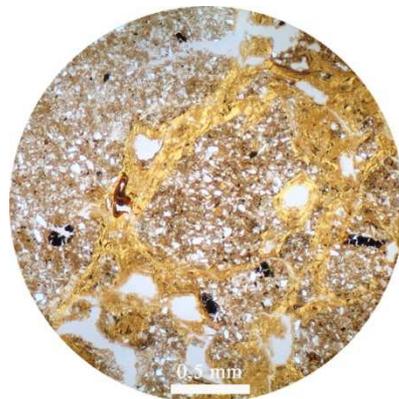


GOWc, 4. Horizont (35–38 cm): PPL von fast reinem, gelbem, leicht mikrolaminiertem Ton umflossenes Aggregat



GOWc, 4. Horizont (35–38 cm): XPL dito, der Ton ist leicht reorientiert

10



GOWc, 4. Horizont (35–38 cm): PPL von Ton verfüllte Aggregatzwischenräume, kräftige, fast reine Toncutane in Poren

Tafel 6b: Dünnschliffaufnahmen GOWc

VIg – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Röhringsberg a

Ah-Horizont

Der Ah-Horizont des Pedons RBa zeigt im Dünnschliff eine mittelmäßig ausgebildete, subpolyedrische Mikroaggregatstruktur. Die Matrix ist größtenteils frei von Interferenzfarben, einige Minerale sind granostriated, sehr wenige Poren porostriated. Das c/f_{10} -Verhältnis beträgt 4/6 (siehe auch Tab. 18; Tafel 7, Foto 1). Es finden sich kaum Anzeichen von Tonverlagerung. Lediglich eine etwas tonigere Stelle im Schliff von 2 mm Durchmesser und 1 % Flächenanteil enthält gelbliche, reine und auch leicht staubige Toncutanbruchstücke mit deutlichen Extinktionslinien und einer starken Reorientierung (Tafel 7, Foto 2). Der Schliff lässt eine hohe biologische Aktivität des Horizontes erwarten: Mit ca. 15 % sind rundlich geformte Losung von etwa 50 μm Durchmesser stark vertreten (Tafel 7, Foto 1), Gewebe- und Wurzelreste sowie Sklerotien machen 4 % am Schliff aus. Ebenso häufig finden sich in situ gebildete Fe/Mn-Konkretion.

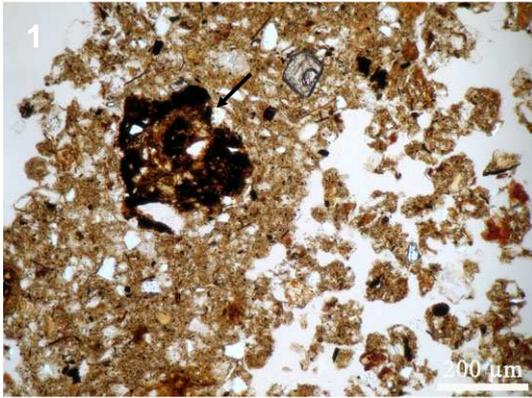
Alh-Bv-Horizont

Der Dünnschliff des zweiten Horizontes hat ein mäßig gut entwickeltes Mikroaggregatgefüge, es dominieren Poren (subangular to channel microstructure). Die Matrix ist meist undifferenziert bis leicht punktförmig gesprenkelt mit einem c/f_{10} -Verhältnis von 3/7. Einige Körner sind granostriated. Circa 5 % der Schlifffläche besteht aus tonigeren, teilweise stark abgerundeten Bereichen von 0,5 bis 4 mm Durchmesser mit einem c/f_{10} -Verhältnis von 1/9 (Tafel 7, Fotos 3, 4). Sie sind stark punktförmig gesprenkelt und enthalten den größten Teil der insgesamt 0,4 % Toncutanfragmente. Sie sind gelblich, rein und gelegentlich leicht mikrolaminiert, mit mäßig bis gut erkennbaren Extinktionslinien und einer starken Reorientierung. Tonhäutchen an Poren treten mit 0,3 % sehr selten auf. Sie sind hauptsächlich gräulich, staubig und besitzen undeutliche Auslöschungsbänder (Tafel 7, Foto 5). Nur wenige sind gelb, rein oder rein bis staubig mikrolaminiert und zeigen deutliche Extinktionslinien. Der Anteil an Losung und Geweberesten geht im Vergleich zum vorhergehenden Schliff deutlich zurück. Fe/Mn-Konkretionen nehmen 4 % Flächenanteil ein.

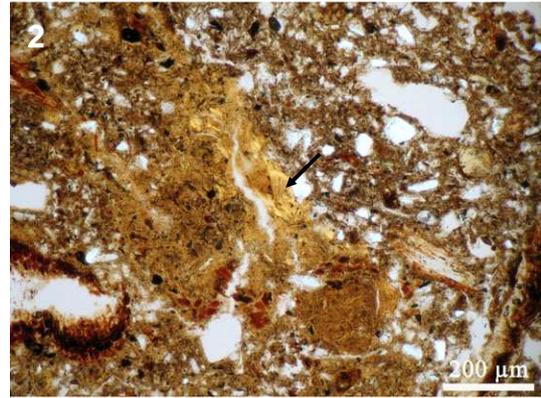
IIBt-Tv-Horizont

Der Dünnschliff des dritten Horizontes hat eine sehr gut entwickelte Gefügestruktur, die sich zwischen Subpolyeder- und Polyedermikrogefüge bewegt. Die Aggregate zeigen zum Teil starke Unterschiede in der Korngröße. Circa 50 % weisen ein c/f_{10} -Verhältnis von 3/7 auf, mit einem undifferenzierten bis leicht punktförmig gesprenkelten Muster. Die restlichen Bereiche zeigen ein c/f_{10} -Verhältnis von 1/9, sie sind punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt. Viele Körner und Fe-/Mn-Konkretionen darin sind granostriated, Poren z.T. porostriated, außerdem finden sich mono- und cross-striated fabrics in der Matrix. Die häufigsten Tonverlagerungsmerkmale sind Toncutanbruchstücke und Verfüllungen mit 10 %. Sie kommen vorwiegend in den tonigeren Bereichen vor, sind rein bis leicht staubig und teilweise schwach mikrolaminiert. Die Farbe variiert von gelb bis orange. Das undulöse Auslöschungsmuster

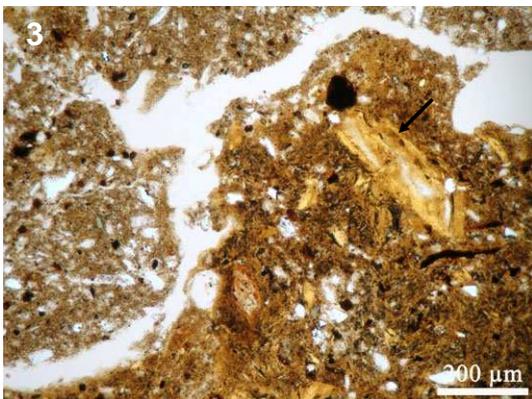
verweist auf die starke Reorientierung des Tons. Die schwierige Differenzierung zwischen Bruchstücken und Mikromasse erschwert die Quantifizierung. Stellenweise bildet der Ton Fließstrukturen und hat ehemalige Aggregatzwischenräume komplett ausgefüllt, allerdings sind diese Bereiche auch schon wieder stark in die Matrix eingearbeitet (Tafel 7, Fotos 6, 7). Tonüberzüge in Poren sind selten und meist staubig, graubraun (z.T. dunkler als die umgebende Mikromasse), selten mikrolaminiert und mit undeutlichen Extinktionslinien (Tafel 7, Fotos 8, 9). Von ähnlichem Aussehen und ebenso selten sind Toncutane an Aggregaten. Stellenweise finden sich Kohlestücke.



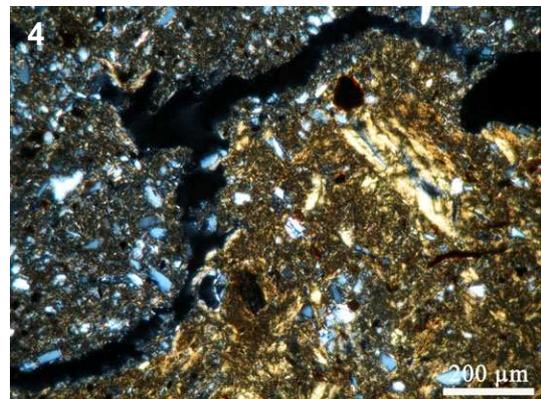
RBa, 1. Horizont (2–5 cm): PPL
rundliche Losung innerhalb einer Pore
(rechte Bildhälfte), leicht konzentrische
Fe/Mn-Konkretion (Pfeil)



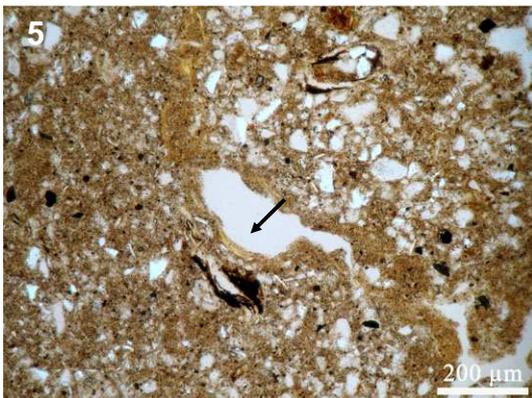
RBa, 1. Horizont (2–5 cm): PPL
toniger Bereich mit Toncutanbruchstück
(Pfeil)



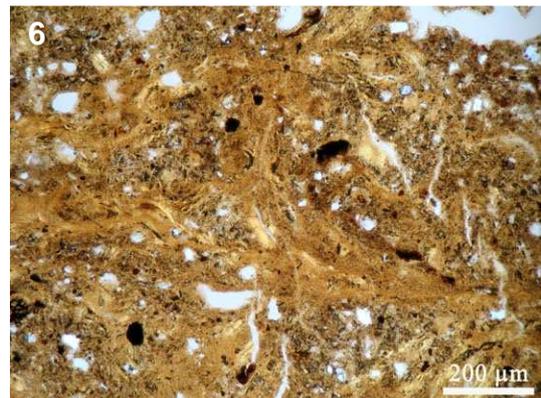
RBa, 2. Horizont (12–15 cm): PPL
Toncutanbruchstück (Pfeil) mit undu-
löser Auslöschung in tonigem Aggregat
(rechte Bildhälfte)



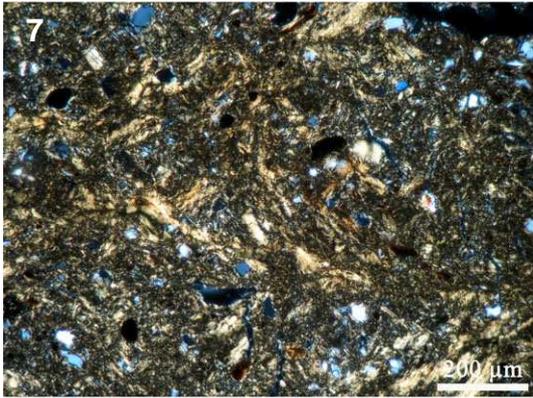
RBa, 2. Horizont (12–15 cm): XPL
dito



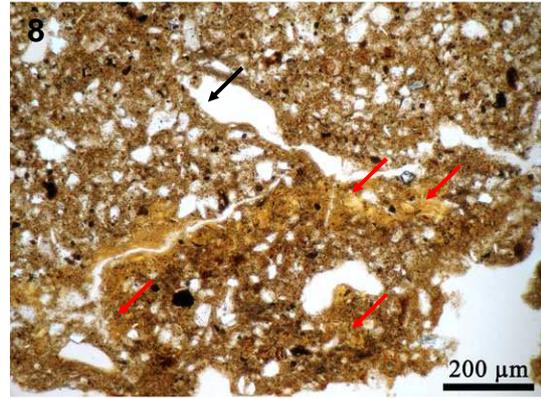
RBa, 2. Horizont (12–15 cm): PPL
hauptsächlich staubig ausgebildete,
graugelbe Toncutane (Pfeil)



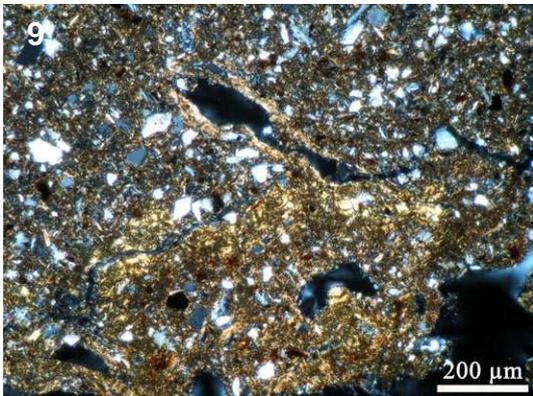
RBa, 3. Horizont (26–28 cm): PPL
Verfüllungen und Toncutanbruchstücke,
stark reorientiert, bilden fließstruktur-
ähnliche Muster



RBa, 3. Horizont (26–28 cm): XPL
dito



RBa, 3. Horizont (26–28 cm): PPL
staubige grau-braune Toncutane
(schwarzer Pfeil) mit diffusen Extink-
tionslinien und stark reorientierten Ton-
cutanbruchstücken (rote Pfeile)



RBa, 3. Horizont (26–28 cm): XPL
dito

Tafel 7b: Dünnschliffaufnahmen RBa

VIIh – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Röhringsberg b

Vom Boden RBb liegen Dünnschliffe aus dem zweiten bis vierten Horizont vor.

Al-Horizont

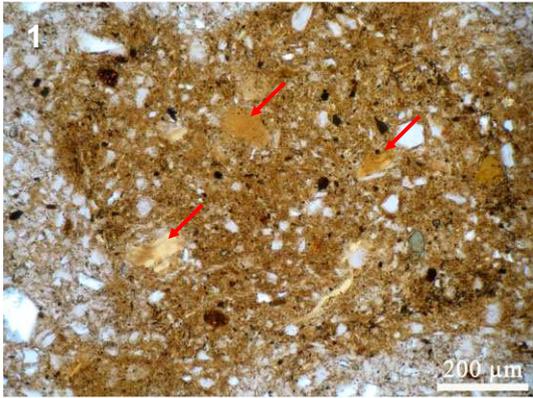
Der zweite Horizont weist ein schwach entwickeltes Mikroaggregatgefüge auf. Den größten Teil des Porenvolumens nehmen Röhren (channel microstructure) ein. Die Mikromasse ist, bis auf ca. 3 % tonigere und etwa 1 mm breite Bereiche (Tafel 8, Foto 1), frei von Interferenzfarben. Die tonigeren Bereiche sind punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt und zum Teil von Aggregatzwischenräumen umgeben. Etliche Körner darin zeigen eine granostriated b-fabric. Die Grundmasse hat zu 97 % ein c/f_{10} -Verhältnis von 7/3, die tonigeren Bereiche schwanken um 3/7 (siehe auch Tab. 19). Toncutanbruchstücke nehmen 0,5 % der Fläche des Schliffs ein und befinden sich vorwiegend in den tonigeren Bereichen. Sie sind rein und mäßig staubig mikrolaminiert oder nur rein und besitzen mehrheitlich deutliche Extinktionslinien. Tonhäutchen an Poren sind sehr selten und dünn. Sie sind entweder gelb, rein und haben deutlich erkennbare Extinktionslinien oder sie bestehen aus sehr staubigem, graubraunem, schlecht orientiertem Material. An einigen Stellen im Dünnschliff finden sich rundliche, etwa 150 μm große Losungen. Wurzel- und Gewebereste wie auch Sklerotien machen ca. 2 % aus. Fe/Mn-Konkretionen sind wahrscheinlich in situ gebildet worden und besitzen einen Flächenanteil von 2,5 %.

Sw-Bt-Horizont

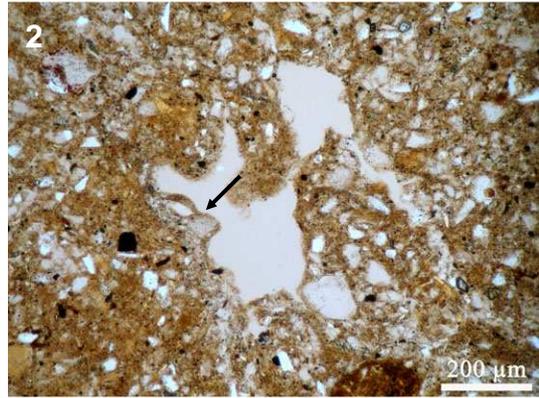
Der Dünnschliff des dritten Horizontes ist mit 35 % Porenanteil hohlraumreich, wobei Röhren dominieren und sich stellenweise Subpolyeder entwickelt haben (channel microstructure). Die Matrix ist in den meisten Bereichen punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, besonders ausgeprägt ist dies in etwas tonigeren Bereichen bzw. Aggregaten. Diese machen 15 % des Schliffs aus und haben ein c/f_{10} -Verhältnis von 2,5/7,5. Im restlichen Schliff schwankt das c/f_{10} -Verhältnis um 6,5/3,5. Viele Körner sind granostriated, einige Bereiche sind monostriated. Der Schliff enthält über die gesamte Matrix verteilt Toncutanbruchstücke (2 %, Tafel 8, Fotos 3, 4) und auch einige sehr ähnlich aufgebaute Verfüllungen (0,5 %). Sie sind entweder staubig oder staubig bis rein mikrolaminiert, gut orientiert mit deutlichen Extinktionslinien, kaum reorientiert und von gelber bis orangefarbener bzw. dunkelbrauner Farbe. Die Mehrzahl der Poren weist ausgeprägte Tonüberzüge besonders an den Porenunterseiten auf (2 %). Sie sind rein bis mittel staubig mikrolaminiert, orange bis braunschwarz gefärbt und zeigen deutliche bis scharfe Extinktionslinien, da der Ton eine sehr starke Orientierung erfahren hat. Teilweise sind sie um den Rand von alten passage features herum verteilt. In einigen Poren und Aggregaten sind die Überzüge nur schwach ausgeprägt und sehr staubig, teilweise unrein, mit mäßig gut zu erkennenden Extinktionslinien (Tafel 8, Foto 2). Der Anteil der organischen Bestandteile (Wurzeln/Wurzelreste) und Konkretionen geht im Vergleich zum vorhergehenden Schliff leicht zurück.

IISd-Bvt-Tv-Horizont

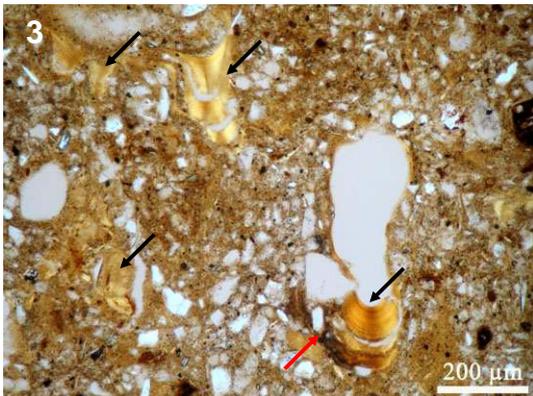
Der Schliff aus dem vierten Horizont besitzt viele Röhren und Risse aber kaum Aggregate (fissure microstructure). Ehemalige Aggregatzwischenräume sind fast vollständig mit Ton verfüllt. Die Mikromasse ist punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, viele Körner sind granostriated und Bereiche in der Mitte des Schliffs sind parallel striated. Das c/f_{10} -Verhältnis schwankt um 3/7. Ein rundliches Aggregat mit 5 mm Durchmesser enthält Material, das, nach dem c/f_{10} -Verhältnis und der sonstigen Zusammensetzung zu urteilen, aus dem darüber liegendem Horizont stammt. Es ist von der restlichen Matrix durch einen Aggregatzwischenraum getrennt, der mit orientiertem Ton stark ausgekleidet ist. Das flächenmäßig dominierende Tonverlagerungsmerkmal (10 % des Schliffs) bilden mit orientiertem Ton verfüllte Aggregatzwischenräume (Tafel 8, Fotos 5, 6). Sie sind an einigen Stellen aufgerissen und häufig schon wieder leicht reorientiert (Tafel 8, Foto 7). Verfüllungen bzw. Toncutane an Aggregaten (4 % Flächenanteil) und Toncutane an Poren (3 %, Tafel 8, Fotos 9, 10) weisen einen vergleichbaren Aufbau auf: Sie sind rein bis mäßig staubig mikrolaminiert, gelb bis braun und die Extinktionslinien sind scharf bis deutlich. Nur in sehr wenigen Poren sind sie dünn, staubig und braun bei mäßig gut zu erkennenden Extinktionslinien. Toncutanbruchstücke machen nur 1,5 % des Schliffs aus. Sie sind stark reorientiert, ähneln den Verfüllungen und sind verstärkt im Aggregat mit dem c/f_{10} -Verhältnis von 6,5/3,5 vertreten. An mehreren Stellen finden sich Fe/Mn-Überzüge auf der Toncutane (Tafel 8, Foto 8), aber auch fein verteilte Konkretionen in der Grundmasse. Auch auf makroskopischer Ebene zeigt der Horizont redoximorphe Merkmale. Organische Bestandteile treten nur noch selten in Form von Geweberesten auf.



RBb, 2. Horizont. (13–16 cm): PPL toniger Bereich mit Toncutanfragmenten (Pfeile)



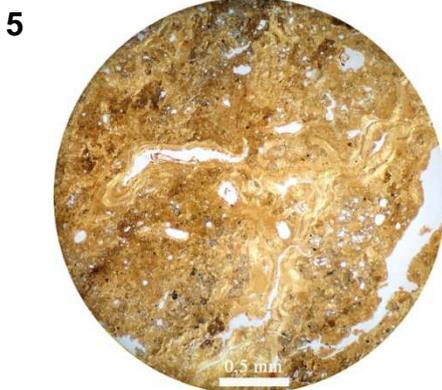
RBb, 2. Horizont. (13–16 cm): PPL staubige, braune, schlecht orientierte Toncutane (Pfeil)



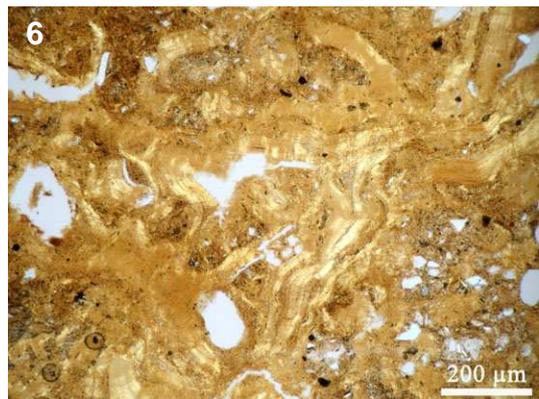
RBb, 3. Horizont. (28–31 cm): PPL rein und schwach staubig mikrolamierte Toncutane bzw. Bruchstücke (schwarze Pfeile) mit scharfen Extinktionslinien (vergleiche Foto 4); staubige, braunschwarze, undulös auslöschende Lamine (roter Pfeil)



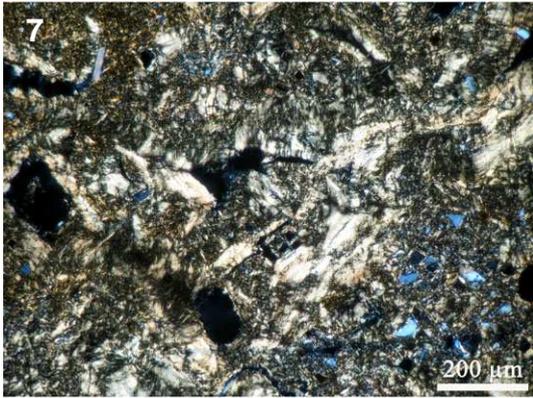
RBb, 3. Horizont. (28–31 cm): XPL dito



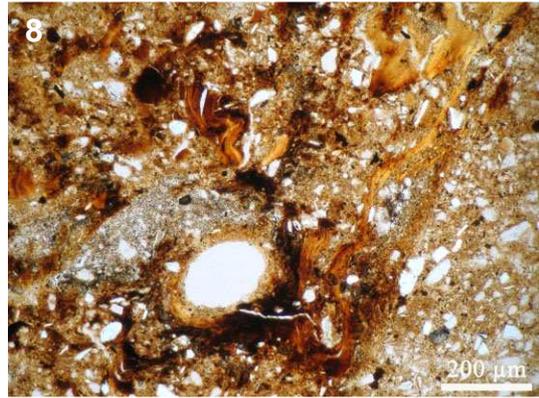
RBb, 4. Horizont (49–52 cm): PPL mit orientiertem Ton verfüllte/durchflossene Aggregatzwischenräume, rein bis leicht staubig mikrolaminiert



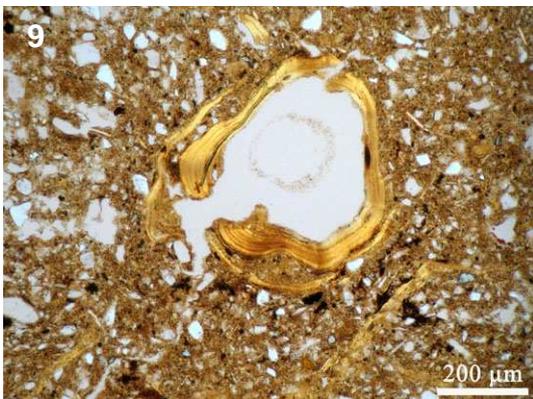
RBb, 4. Horizont (49–52 cm): PPL Ausschnitt aus Foto 5



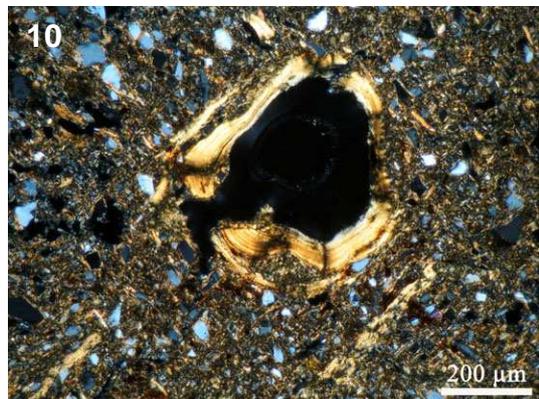
RBb, 4. Horizont (49–52 cm): XPL
dito, teilweise undulöse Auslöschungsmuster durch die Reorientierung des Tons



RBb, 4. Horizont (49–52 cm): PPL
Fe/Mn-Ausfällungen auf Toncutane



RBb, 4. Horizont (49–52 cm): PPL
rein und schwach staubig mikrolami-
nierte Toncutane



RBb, 4. Horizont (49–52 cm): XPL
dito, Extinktionslinien sind deutlich zu
erkennen

Tafel 8b: Dünnschliffaufnahmen RBb

Vii – Auswertung der Dünnschliffe des Pedons Holzkirch

Ah-Horizont

Der Ah-Horizont weist im Dünnschliff ein sehr hohlraumreiches, gut entwickeltes, subpolyedrisches bis krümeliges Mikroaggregatgefüge (subangular blocky to crumb microstructure) auf. Die Mikromasse ist bis auf wenige Aggregate frei von Interferenzfarben und das c/f_{10} -Verhältnis beträgt $7/3$ (siehe auch Tab. 20). Etwa 3 % der Fläche wird allerdings von tonreicheren Aggregaten von bis zu 1 mm Durchmesser eingenommen. Sie sind punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt mit einem c/f_{10} -Verhältnis von $5,5/4,5$ (Tafel 9, Foto 1). Es finden sich keine Tonüberzüge an Poren und mit 0,1 % Flächenanteil nur sehr wenige Toncutanbruchstücke in den tonreicheren Bereichen. Sie sind orange bis braun und rein bis leicht staubig mikrolaminiert mit mäßig deutlichen Auslöschungsbändern. Der Schliff ist reich an rundlicher Losung (7 %) und besteht zu 4 % aus gut erhaltenen Organ- und Zellresten (Tafel 9, Foto 2). Deutlich ausgeprägte, rotschwarze, meist in situ gebildete, rundliche Fe/Mn-Konkretionen treten zu ca. 5 % auf.

Al-Bv-Horizont

Der Dünnschliff des zweiten Horizontes zeigt ein schwach entwickeltes Mikroaggregatgefüge. Die wenigen Hohlräume bestehen vorwiegend aus Röhren (channel microstructure). Die Mikromasse hat ein c/f_{10} -Verhältnis von $7/3$ und ist frei von Interferenzfarben mit Ausnahme weniger Bereiche. Diese haben einen Durchmesser von 200 μm bis 1,5 mm, nehmen 2 % des Schliffs ein und zeigen eine eher unscharfe Abgrenzung zur restlichen Matrix. Das c/f_{10} -Verhältnis beträgt $6/4$ (Tafel 9, Foto 4). In diesem Horizont treten erste Tonüberzüge an Poren (0,2 %) auf. Sie sind sehr dünn, staubig und graugelb bis braungrau, die Extinktionslinien sind nur mäßig deutlich (Tafel 9, Foto 3). Ebenso selten vertreten sind Toncutanbruchstücke, sie befinden sich vornehmlich in den tonreicheren Bereichen. Sie sind rein bis leicht staubig und oft mikrolaminiert. Die Extinktionslinien sind nur mäßig deutlich und zeigen Reorientierungsmerkmale. Auch in diesem Horizont treten einige Fe/Mn-Konkretionen auf. Losung und Organ- und Gewebereste nehmen etwas ab. Ein Kohlestückchen ist im Schliff vorhanden.

Btv-Horizont

Der dritte Horizont weist ein gut entwickeltes polyedrisches bis subpolyedrisches Mikroaggregatgefüge im Dünnschliff auf. Die Mikromasse besitzt zu ca. 60 % ein c/f_{10} -Verhältnis von $6/4$ mit wenigen Interferenzfarben (Tafel 9, Foto 5). Die restliche Mikromasse ist punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt mit einem schwankenden c/f_{10} -Verhältnis um $5/5$, einige Körner sind granostriated. Tonverlagerungsmerkmale nehmen insgesamt 4,2 % Flächenanteil ein. Am häufigsten vertreten sind über die gesamte Matrix verteilte Toncutanbruchstücke (Tafel 9, Foto 6). Sie sind meist staubig, aber auch rein und größtenteils mikrolaminiert. Die Extinktionslinien sind deutlich zu erkennen, teilweise hat bereits eine Reorientierung des Tons eingesetzt. Tonüberzüge an Poren und Aggregaten treten hingegen sehr selten auf (Tafel 9, Foto

6). Sie sind dünn (teilweise schon etwas breiter/kräftiger als im Schliff zuvor), meist stark staubig, nur mäßig gut orientiert und selten mikrolaminiert. Verfüllungen ähneln im Aufbau den Toncutanbruchstücken. Zu geringen Anteilen treten auch in diesem Schliff noch Losung, Organ- und Gewebereste sowie ein Kohlestückchen auf. Anteil und Aussehen der Fe/Mn-Konkretionen sind in etwa gleich geblieben.

Bvt-Horizont

Die Mikroaggregatstruktur im Dünnschliff des vierten Horizontes ist mäßig gut entwickelt, aber nur mäßig bis schlecht separiert, da einige Aggregatoberflächen starke Tonbeläge aufweisen. Es dominieren Subpolyeder mit Tendenz zu Polyedern. Beinahe die gesamte Mikromasse ist stark mosaikförmig gesprenkelt. Viele Körner und auch Konkretionen sind granostriated und einige Bereiche leicht cross striated. Das c/f_{10} -Verhältnis schwankt leicht und liegt im Durchschnitt bei 4/6. Tonverlagerungsmerkmale nehmen insgesamt 10 % am Schliff ein, wobei Toncutane an Poren deutlich dominieren. Circa 60 % der Poren zeigen gut ausgebildete, kräftige, gelbliche Tonhäutchen (Tafel 9, Foto 7): Sie sind rein bis staubig, in der Regel mikrolaminiert und zeigen deutliche Extinktionslinien, wobei etliche Poren schon wieder leicht deformiert und zum Teil auch reorientiert sind. Toncutane an Aggregatoberflächen treten seltener auf und sind dünner als in den Poren. Toncutanbruchstücke sind ebenfalls rein bis leicht staubig mikrolaminiert und besitzen deutliche Extinktionslinien, vereinzelt treten Laminen mit erhöhtem Schluffanteil auf. Die selten auftretenden Verfüllungen zeigen einen ähnlichen Aufbau wie die Toncutanbruchstücke (Tafel 9, Foto 8), sind aber meist stärker reorientiert. An einigen Poren finden sich Toncutane mit Fe-/Mn-Überzügen. Der Anteil an Fe/Mn-Konkretionen geht mit 3 % leicht zurück. Organische Reste sind nur noch selten vertreten.

IIBv-Tv-Horizont

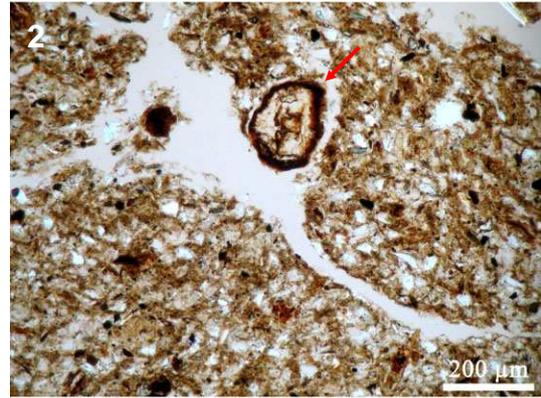
Das Gefüge im Dünnschliff des fünften Horizontes ist identisch mit dem Gefüge im Dünnschliff des vierten Horizontes. Im Schliff wechseln die Korngrößen kleinräumig sehr stark und sind meist deutlich voneinander abgegrenzt (Tafel 9, Fotos 9, 10). Die Mikromasse ist zu ca. 40 % nicht oder nur schwach punktförmig gesprenkelt bei einem c/f_{10} -Verhältnis von 5/5. Die restliche Mikromasse ist sehr stark punktförmig bis mosaikförmig gesprenkelt, viele Körner und Konkretionen sind granostriated, einige Bereiche cross striated. Das c/f_{10} -Verhältnis ist mit circa 0,5/9,5 sehr feinputtelreich und enthält viele Toncutanbruchstücke. Einige Bereiche nehmen c/f_{10} -Verhältnisse zwischen diesen beiden Extremen ein. Verlagerter, orientierter Ton macht circa 12 % des Schliffs aus, wobei Bruchstücke und Verfüllungen dominieren: Sie sind rein bis mäßig staubig und meist leicht mikrolaminiert. Die Extinktionslinien sind undulös. Durch den hohen Grad an Reorientierung fällt es schwer, zwischen Grundmasse und Bruchstück zu unterscheiden. Circa 50 % der Poren zeigen Toncutane sowohl in sehr tonigen als auch in Bereichen mit größeren Korngrößen: Sie sind rein bis staubig, gelb, meist mikrolaminiert und die Extinktionslinien sind eher undeutlich. Auch Tonüberzüge an Aggregaten zeigen diesen Aufbau. Eine Besonderheit bilden mehrere sehr große wellenförmige Toncutane (Tafel 9, Fotos 11, 12). Sie sind rein bis mittel

staubig, deutlich mikrolaminiert, mit gut zu erkennenden aber leicht flächenhaften, netzartigen Extinktionslinien. Die Auslöschungsbänder bewegen sich bei einer Drehung des Dünnschliffes im Uhrzeigersinn aufeinander zu, verschmelzen und verschwinden dann ganz. Das ist typisch für Ton, der gut orientiert ist, aber auf welligem Untergrund abgelegt wurde (FITZPATRICK 1993). Trotz der Größe scheint es sich um verlagerten, orientierten Ton zu handeln. Für ein Relikt aus dem Kalkstein ist die Cutane zu gut erhalten. Fe/Mn-Konkretionen machen noch 2,5 % aus. Gewebereste spielen nur eine untergeordnete Rolle.

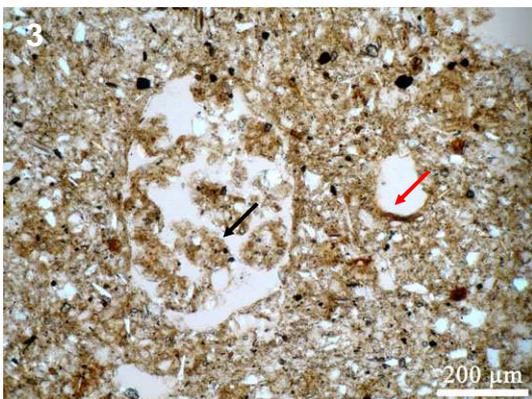
Von diesem Pedon wurde ein Dünnschliff von einem der Kalksteine angefertigt. Neben der aus Carbonat bestehenden Grundmasse sind darin viele Calcitkristalle enthalten. An einigen Stellen treten aggregierte, kleine, feinverteilte Fe/Mn-Konkretionen auf. Weitere Besonderheiten finden sich nicht.



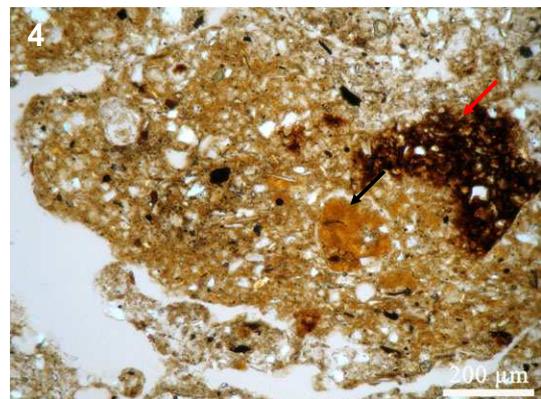
HOLZ, 1. Horizont (2–5 cm): PPL tonreiches Aggregat mit mikrolaminiertem Toncutanbruchstück (Pfeil)



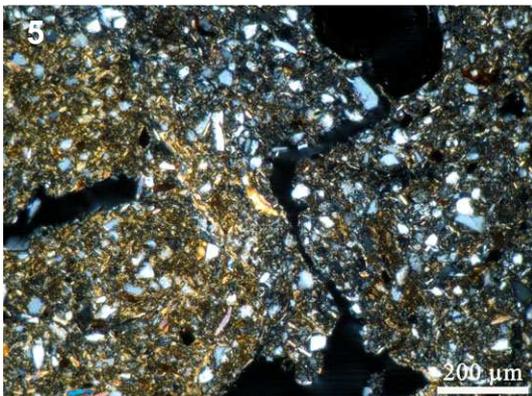
HOLZ, 1. Horizont (2–5 cm): PPL Grundmasse mit Wurzelrest (Pfeil)



HOLZ, 2. Horizont (13–16 cm): PPL dünne, staubige Toncutane in Pore (roter Pfeil), mit Losung verfüllte Pore (schwarzer Pfeil)



HOLZ, 2. Horizont (13–16 cm): PPL tonigeres Aggregat mit reorientiertem Bruchstück (schwarzer Pfeil) und einer Fe/Mn-Konkretion (roter Pfeil)



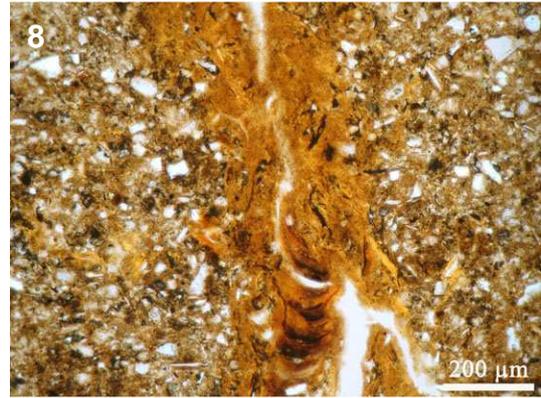
HOLZ, 3. Hor. (27–30 cm): XPL Mikromasse mit (linke Seite) und ohne (rechte Seite) Interferenzfarben



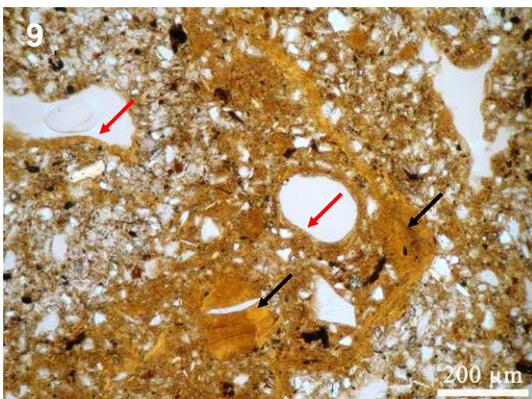
HOLZ, 3. Hor. (27–30 cm): PPL staubige Toncutane (schwarzer Pfeil) und rein bis staubig mikrolaminiertes Bruchstück (roter Pfeil)



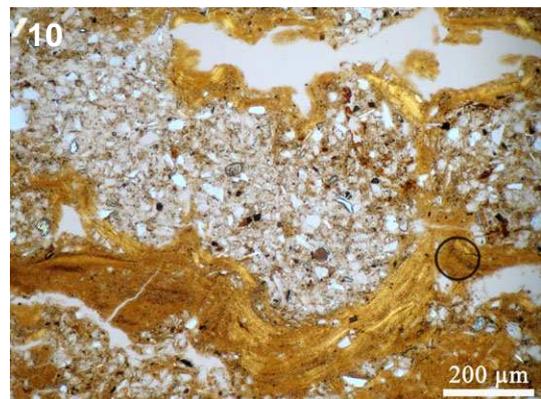
HOLZ, 4. Horizont (45–48 cm): PPL rein und schwach staubig mikrolaminierte Toncutane



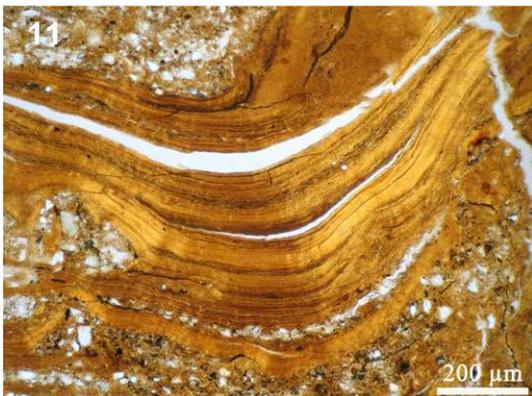
HOLZ, 4. Horizont (45–48 cm): PPL verfüllte Pore, unter XPL zeigt der Ton Reorientierungsmerkmale



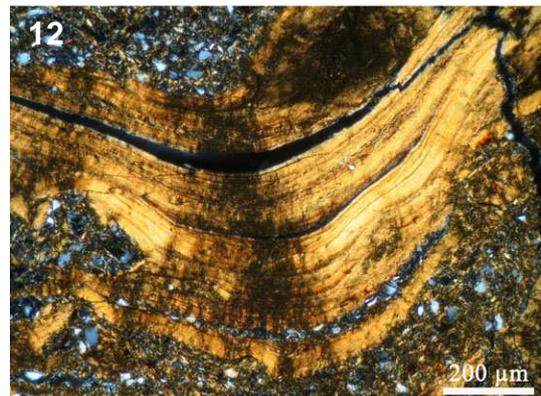
HOLZ, 5. Horizont (56–58 cm): PPL stark wechselnde c/f_{10} -Verhältnisse, Toncutanbruchstücke im tonigeren Bereich (schwarze Pfeile), staubige gelbe Toncutane in Poren (rote Pfeile)



HOLZ, 5. Horizont (56–58 cm): PPL mikrolaminierte Toncutane, umgibt Bereich mit hohem Schluffanteil



HOLZ, 5. Horizont (56–58 cm): PPL extrem kräftige Toncutane mit deutlicher Mikrolaminierung



HOLZ, 5. Horizont (56–58 cm): XPL dito, leicht netzartiges, breites Auslöschungsband

Tafel 9b: Dünnschliffaufnahmen HOLZ

Anhang VII – Massenbilanzierung
VIIa – Berechnung der maximalen Tonmasse aus Löss und Schluffmassenanalyse

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	M_{Bod}	T_{ak} [kg/m ²]	T_{potL}	t	e	d	X	X [kg/m ²]
SBa	Mb.	0-3	Ah	37	9	4	57	72	3	22	8
		3-18	Al-Bv	187	49	22	59	72	3	18	35
		18-35	Bvt	212	67	25	57	72	3	21	45
		35-50	IIBt-Tv	188	126	23	20	72	3	76	143
		Summe		625	251	75					231
	Anteil Lösungsrückstand [%]										37
SBb	Mb.	0-4	Ah	55	9	7	70	72	4	3	2
		4-30	Al+Btv	357	57	43	72	72	4	0	0
		30-49	Sw-Btv	289	48	35	75	72	4	-5	-15
		49-61	IISd-Bvt-Tv	157	87	19	30	72	4	62	98
		61-70	Sd-Bt-Tv	122	83	15	14	72	4	86	104
	Summe		979	283	118					189	
	Anteil Lösungsrückstand [%]										19
HARD	Mb.	0-5	Ah	44	25	7	11	53	6	89	39
		5-17	Al-Bv-Tv	116	69	19	11	53	6	90	104
		17-29	Bt-Tv	79	60	13	8	53	6	96	76
		29-44	Tv	81	62	13	6	53	6	100	81
	Summe		321	216	51					300	
	Anteil Lösungsrückstand [%]										94
GOWa	Mb.	0-6	Ah	55	30	11	20	62	1	68	37
		6-14	Ah-Bv-Tv	86	49	17	21	62	1	67	58
		14-23	Bv-Tv	103	62	21	21	62	1	66	68
	Summe		244	141	49					163	
	Anteil Lösungsrückstand [%]										67
GOWb	Mb.	0-10	Ah	86	42	17	28	62	4	59	51
		10-21	Al-Bv	99	49	20	28	62	4	59	59
		21-30	Btv-Tv	97	50	19	27	62	4	60	58
		30-43	Bvt-Tv	99	61	20	22	62	4	69	68
	Summe		381	203	76					236	
	Anteil Lösungsrückstand [%]										62
GOWc	Mb.	0-5	Ah	51	15	10	44	62	11	35	18
		5-23	Ah+Bv-Al	217	64	43	46	62	11	32	69
		23-30	Bvt	94	36	19	39	62	11	44	42
		30-40	Bvt-Tv	105	56	21	31	62	11	60	63
		40-60	Bvt-Tv+cCv	74	41	15	29	62	11	64	47
	Summe		541	212	108					239	
	Anteil Lösungsrückstand [%]										44
RBa	Mb.	0-6	Ah	72	32	14	24	62	5	66	47
		6-20	Alh-Bv	169	78	34	24	62	5	67	112
		20-35	IIBt-Tv	149	110	30	12	62	5	87	130
	Summe		390	220	78					290	
	Anteil Lösungsrückstand [%]										74

	Art	Tiefe [cm]	Horizont	M_{Bod}	T_{ak} [kg/m ²]	T_{potL}	t	e	d	X	X
RBb	Mb.	0-5	Ah	65	18	13	40	62	5	39	25
		5-23	Al	235	53	47	45	62	5	29	69
	23-36	Sw-Bt	171	56	34	41	62	5	38	64	
	36-65	IISd-Bvt-Tv	407	245	81	22	62	5	70	285	
	Summe			880	372	176					443

Anteil Lösungsrückstand [%]											50
HOLZ	Mb.	0-7	Ah	77	22	17	31	36	0	15	11
		7-22	Al-Bv	171	44	38	33	36	0	9	16
	22-40	Btv	238	68	52	30	36	0	17	41	
	40-57	Bvt	262	112	58	24	36	0	34	90	
	57-70	IIBvt-Tv	189	122	42	14	36	0	60	114	
Summe			937	367	206					272	

Anteil Lösungsrückstand [%]											29

VIIb – Berechnung des Lössanteils mittels Tonmassenanalyse

	T_{ak} [kg/m ²]	T_{potL}	% T_{Res} [%]	M_{Bod} [kg/m ²]	% $T_{\text{Löss}}$ [%]	1. Iteration			2. Iteration			10. Iteration		
						T_{potLneu} [kg/m ²]	% $L_{\text{öss}}$ [%]	% L_{Sgr}	T_{potLneu} [kg/m ²]	% $L_{\text{öss}}$ [%]	% L_{Sgr}	T_{potLneu} [kg/m ²]	% $L_{\text{öss}}$ [%]	% L_{Sgr}
SBa	251	75	86	625	12	50,5	67,3	32,7	47,0	62,7	37,3	46,5	62,0	38,0
SBb	283	118	84	979	12	93,8	79,8	20,2	90,4	76,9	23,1	89,8	76,4	23,6
HARD	216	51	72	321	16	14,3	28,0	72,0	6,1	11,9	88,1	3,7	7,2	92,8
GOWa	141	49	91	244	20	28,6	58,7	41,3	24,2	49,6	50,4	23,0	47,1	52,9
GOWb	203	76	79	381	20	44,1	57,9	42,1	36,0	47,3	52,7	33,3	43,7	56,3
GOWc	212	108	71	541	20	78,9	73,0	27,0	70,7	65,3	34,7	67,5	62,4	37,6
RBa	220	78	82	390	20	43,4	55,7	44,3	35,0	44,9	55,1	32,3	41,4	58,6
RBb	372	176	80	880	20	126,7	72,0	28,0	114,4	65,0	35,0	110,2	62,7	37,3
HOLZ	367	206	96	937	22	169,3	82,1	17,9	160,9	78,1	21,9	158,4	76,8	23,2

Abkürzungen:

M_{Bod} Masse Mineralboden [kg/m²]

T_{ak} aktuelle Tonmasse im Mineralboden

T_{potL} potentielle lössbürtige Tonmasse im Mineralboden [kg/m²] bei Annahme einer reinen Lössauflage oberhalb des carbonathaltigen Verwitterungsschuttes

t Gehalt gU im Gemisch (+15 % um den vermuteten ursprünglichen gU-Gehalt zu erhalten)

e Gehalt gU im C-Löss/Vergleichslöss (Tab. 28)

d Gehalt gU im Lösungsrückstand (Mittelwert)

X Anteil Lösungsrückstand im Mineralboden

% T_{Res} Tongehalt [%] des Lösungsrückstands des Kalksteins (Mittelwert) inklusive Tonneubildung durch Verwitterung des Feinschluffs

% $T_{\text{Löss}}$ Tongehalt [%] des Lösses (Tab. 28)

T_{potLneu} potentielle lössbürtige Tonmasse im Mineralboden [kg/m²], nähert sich mit jeder Iteration der tatsächlichen lössbürtigen Tonmasse weiter an

% $L_{\text{öss}}$ prozentualer Lössanteil am Mineralboden

% L_{Sgr} prozentualer Anteil Lösungsrückstand am Mineralboden

Danksagung

Diese Arbeit ist aus dem von der DFG-geförderten Forschungsprojekt „Entstehung, Eigenschaften und Bewertung tonreicher Unterbodenhorizonte in Böden auf Carbonatgestein in norddeutschen Berg- und Hügelländern“ an der Fachhochschule Osnabrück in Kooperation mit der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Naturwissenschaftlichen Fakultät III heraus entstanden. Für die finanzielle Förderung danke ich der DFG und der Fachhochschule Osnabrück.

Bei Herrn Professor Dr. Jahn, der diese Arbeit betreute, möchte ich mich sehr herzlich für seine Unterstützung und das Vertrauen in meine Fähigkeiten bei der Bearbeitung des Themas bedanken sowie für die vielen fachlichen Hinweise, Verbesserungsvorschläge und Diskussionen. Herr Professor Dr. Mueller fördert und begleitet mein berufliches Fortkommen seit dem Studium. Ich möchte ihm für die Überlassung des Themas und die fachliche und menschliche Unterstützung bei der Umsetzung dieser Arbeit herzlich danken. Besonders dankbar bin ich zudem für seine hervorragenden bodenkundlichen Vorlesungen und zahlreichen Exkursionen, die mir viel Wissen und vor allem viel Freude an der Bodenkunde vermittelt haben.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Gregor von Held für die Vorarbeiten, durch die das Projekt initiiert werden konnte. Bei Herrn Dr. Ernst Gehrt möchte ich mich für die Unterstützung des Forschungsantrages, die Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Standorte, die Bereitstellung von Daten- und Kartenmaterial sowie die kritischen Diskussionen bedanken. Ein großer Dank gilt Herrn Dr. Rainer Dohrmann und seinen Mitarbeitern für die Unterstützung bei Tonmineral- und Quarzanalysen und im Besonderen für die fachlichen Ratschläge. Bei Frau PD Dr. Daniela Sauer und Herrn Dr. Peter Kühn möchte ich mich für die Einführung in die Mikromorphologie und die Hilfestellung bei der Auswertung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt den vielen Mitarbeitern der Fachhochschule Osnabrück und der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, die mich bei den zahlreichen Laboruntersuchungen unterstützt haben, ganz besonders Elke Nagel.

Allen Teilnehmern des FOSEBO sei für das gemeinsame "beackern" von Problemen und das Entwickeln von Lösungsstrategien gedankt. Ein besonderer Dank gilt Dr. Stefan Hinck für die gegenseitige Unterstützung, Freundschaft und die bereichernde gemeinsame Promotionszeit.

Ein inniger Dank gilt Anja Berning, Anika Meyer und Peter Kruse für das Lektorat der Arbeit. Meiner Familie und ganz besonders Peter möchte ich für die große Geduld und vielerlei Unterstützung danken.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Hannover, 23. Dezember 2011

Annegret Fier

Werdegang

Annegret Fier

geboren am 30.09.1978 in Coesfeld, Nordrhein-Westfalen

- seit 2008 Technische Mitarbeiterin am Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, im Bereich Boden- und Grundwassermonitoring
- 2004 - 2007 Wissenschaftliche Angestellte an der Fachhochschule Osnabrück im DFG-Projekt „Entstehung, Eigenschaften und Bewertung tonreicher Unterbodenhorizonte in Böden auf Carbonatgestein in norddeutschen Berg- und Hügelländern“
- Doktorandin an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Naturwissenschaftlichen Fakultät III
- 2003 - 2004 Technische Angestellte am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung im Rahmen des Projektes “GIS-gestützte Abschätzung des potenziellen partikulären P-Eintrages in Oberflächengewässer“
- 1999 - 2003 Studium an der Fachhochschule Osnabrück, Studiengang Bodenkunde
- Abschluss: Diplom-Ingenieurin (FH)
 - Diplomarbeit: GIS-gestützte Abschätzung der partikulären Phosphorverlagerung durch Wassererosion – Diplomarbeit wurde ausgezeichnet mit dem StudyUp Award 2003
 - Praxissemester bei der australischen Forschungseinrichtung CSIRO Land & Water in Canberra, Australien
- 1998 Abitur an der Bischöflichen Canisiusschule Ahaus