

**Stoffliche Veränderungen im Mikro- und
Submikrobereich von Mineralkörnern und Bildung
neuer Phasen bei Verwitterung und Bodenbildung in
Löß**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten
der Georg-August-Universität zu Göttingen

von

Andreas Glasow

aus Reutlingen

Göttingen 2000

D7

Referent: Prof. Dr. H. Ruppert

Korreferent: PD Dr. H. Heinrichs

Tag der mündlichen Prüfung: 22.6.2000

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	9
1 Einleitung, Forschungsstand und Zielsetzung	11
2 Probenmaterial	16
2.1 Lößprofil bei Reinhausen bei Göttingen	16
2.2 Sollingprofil (F1)	17
3 Methodik	19
3.1 Pauschalchemische Untersuchungen	19
3.1.1 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	19
3.1.2 Kohlenstoff-Bestimmung	20
3.1.3 Boden-pH	20
3.1.4 Chemische Extraktionsverfahren und effektive Kationenaustauschka- pazität	20
3.1.5 Gleichgewichtsbodenlösung und Porenlösung	22
3.2 Korngrößenspezifische Untersuchungen der Tonfraktion	23
3.2.1 Korngrößentrennung und Präparation für chemische und phasenana- lytische Untersuchungen	23
3.2.2 Tonmineralogische Phasenanalyse der Tonfraktionen am Röntgendif- fraktometer	24
3.2.3 Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Tonfraktionen an der Elektronenstrahl-Mikrosonde	24
3.3 Mikromorphologische und mikroanalytische Untersuchungen	25
3.3.1 Präparation der Bodenproben	25
3.3.2 Mikromorphologische und mikroanalytische Untersuchungsverfahren	26
4 Ergebnisse und Diskussion	28
4.1 Morphologische Merkmale der Bodenbildung und Mineralverwitterung . . .	28
4.1.1 Lößprofil Reinhausen	29
4.1.2 Bodenprofil im Solling	35
4.2 Auswirkungen von Bodenbildung und Mineralverwitterung auf die chemi- sche Zusammensetzung	37

4.2.1	Gesamtgehalte der Hauptelemente und Boden-pH im Lößprofil Reinhausen	37
4.2.2	Gesamtgehalte der Hauptelemente und Boden-pH im Bodenprofil im Solling	43
4.2.3	Chemische Bindungsformen der Hauptelemente	45
4.2.4	Effektive Kationenaustauschkapazität im Lößprofil Reinhausen	52
4.2.5	Effektive Kationenaustauschkapazität im Bodenprofil im Solling	54
4.2.6	Gleichgewichtsbodenlösung und Porenlösung	54
4.3	Chemische und mineralogische Charakterisierung des Stoffbestandes im Mikrobereich	57
4.3.1	K- und Al-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen	60
4.3.2	K- und Al-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling	62
4.3.3	Ca- und Al-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen	64
4.3.4	Ca- und Al-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling	65
4.3.5	Mg- und Al-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen	66
4.3.6	Mg- und Al-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling	67
4.3.7	Fe- und Al-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen	67
4.3.8	Fe- und Al-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling	69
4.3.9	Fe- und Mn-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen	69
4.3.10	Fe- und Mn-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling	71
4.3.11	Zusammenfassende Betrachtung der Mikrobereichsanalytik an Bodenanschliffen	71
4.4	Auswirkungen der Bodenbildungsprozesse auf den Stoffbestand der Grob-, Mittel- und Feintonfraktion	73
4.4.1	Veränderungen des Mineralbestandes in den Tonfraktionen des Lößprofils Reinhausen	73
4.4.2	Veränderungen des Mineralbestandes in den Tonfraktionen des Bodenprofils im Solling	79
4.4.3	Veränderungen des chemischen Stoffbestandes in den Tonfraktionen des Lößprofils Reinhausen	79
4.4.4	Veränderungen des chemischen Stoffbestandes in den Tonfraktionen des Bodenprofils im Solling	82
5	Zusammenfassung	83
	Literaturverzeichnis	86
	Anhang	94
	Danksagung	107
	Lebenslauf	108

Abbildungsverzeichnis

2.1	Probennahmepunkte	16
2.2	Freilegung ungestörter Bodenproben am Lößprofil Reinhausen	17
3.1	Volumetrische Bestimmung der Phasen-Zusammensetzung im Boden anhand von REM-Aufnahmen	27
4.1	Mineralbestand und Mikrogefüge des Bodenmaterials im Profilverlauf (REM-Aufnahmen von Boden-Anschliffen im Lößprofil Reinhausen)	29
4.2	„Größere“ Mineralkörner, die von einer feinkörnigen Matrix überzogen und zu Aggregaten verkittet werden (REM-Aufnahme, Lößprofil Reinhausen; Bv-Horizont, 165–170 cm Tiefe)	30
4.3	REM-Aufnahmen von blättrigen Tonmineralen in der feinkörnigen Matrix (Lößprofil Reinhausen)	30
4.4	Tiefenverlauf der relativen Volumenanteile der Bodenkomponenten (Vol.-%) nach Auswertung der REM-Histogramme im Lößprofil Reinhausen	31
4.5	REM-Aufnahmen von Grobporen im Lößprofil Reinhausen	31
4.6	REM-Aufnahmen von Quarz im Lößprofil Reinhausen	32
4.7	Splitterspuren an einem Quarzkorn aus 5–10 cm Tiefe im Lößprofil Reinhausen	33
4.8	Chemische Verwitterung von Kalifeldspat (REM-Aufnahmen, Lößprofil Reinhausen)	33
4.9	Glimmerverwitterung im Lößprofil Reinhausen (REM-Aufnahmen)	34
4.10	Schwerminerale im Lößprofil Reinhausen (REM-Aufnahmen)	35
4.11	Kompakte Bodenaggregate (a: 5–10 cm Tiefe, b: 40–50 cm Tiefe) im Bodenprofil im Solling (REM-Aufnahmen von Boden-Anschliffen)	35
4.12	Kompakte Bodenaggregate mit erkennbaren Glimmer- und Tonmineralkomponenten (SBv-Horizont, 20–30 cm Tiefe) im Bodenprofil im Solling (REM-Aufnahmen von Streupräparaten)	36
4.13	(a) Quarzkorn mit stufenartigem, schnellem Flächenwachstum, (b) Gesteinsbruchstück aus wachsendem Quarz und stark angeätztem Feldspat im Bodenprofil im Solling (REM-Aufnahmen, Ahe-Horizont, 0–2 cm Tiefe)	36
4.14	Tiefenverläufe der pH (H ₂ O)-Werte und der Gesamtgehalte an Si, C sowie der Summe der Hauptelement-Oxide (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen	37
4.15	Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an Ti und Zr (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen	38

4.16	Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an Al, Fe, Mg und Mn (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen	39
4.17	Bilanzierung der Tonverlagerung anhand des Tiefenverlaufes der Gesamt-Al-Konzentrationen (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen	39
4.18	Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an Na, Ca, Sr und P (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen	40
4.19	Vergrößerte Darstellung des Tiefenverlaufes der Gesamt-Ca-Konzentrationen (Gew.-%) bis 0,6 Gew.-% im Lößprofil Reinhausen	40
4.20	Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an K (Gew.-%) und der Verhältnisse der Gesamtgehalte von K zu Al im Lößprofil Reinhausen	41
4.21	Tiefenverläufe der Verhältnisse der Gesamtgehalte von Fe/Al und Fe/Ti im Lößprofil Reinhausen. Als Referenz sind die Werte für die obere kontinentale Kruste (OKK) eingezeichnet (WEDEPOHL, 1984)	41
4.22	Tiefenverläufe der pH (CaCl ₂)-Werte und der Gesamtgehalte an Si, C und der Summe der Hauptelement-Oxide (Gew.-%) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)	43
4.23	Tiefenverlauf der Gesamtgehalte an Ti (Gew.-%) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)	44
4.24	Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an Al, Fe, Mg und Mn (Gew.-%) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)	44
4.25	Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an K, Ca, Na und P (Gew.-%) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)	45
4.26	Tiefenverläufe der Konzentrationen von Fe, Mg, Al und K (Gew.-%) in den Dithionit-Extrakten und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten im Lößprofil Reinhausen	46
4.27	Tiefenverlauf des Al/Fe-Verhältnisses in den Dithionit-Extrakten im Lößprofil Reinhausen	47
4.28	Tiefenverläufe der Konzentrationen von Ti (Gew.-%) und Zr (mg/kg) in den Dithionit-Extrakten und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten (orange; in %; untere Skala) im Lößprofil Reinhausen	47
4.29	Tiefenverläufe der Konzentrationen von Fe und Al (Gew.-%) und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten sowie des Al/Fe-Verhältnisses in den Oxalat-Extrakten im Lößprofil Reinhausen	48
4.30	Tiefenverläufe der Konzentrationen von Si, Ti (Gew.-%) und Zr (mg/kg) in den Oxalat-Extrakten und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten im Lößprofil Reinhausen	48
4.31	Tiefenverläufe der Konzentrationen der untersuchten Hauptelemente (Gew.-%) in den Tiron-Extrakten und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten sowie des Al/Fe-Verhältnisses im Lößprofil Reinhausen	49
4.32	Vergleich der Verteilung von Fe und Al (Gew.-%) in den untersuchten Extrakten im Lößprofil Reinhausen (die dargestellten Gehalte sind nicht gestapelt)	51

4.33	Tiefenverläufe der effektiven Kationenaustauschkapazität (mval/kg), der Basensättigung (%) und der Konzentrationen der austauschbar gebundenen Elemente (g/kg) im Lößprofil Reinhausen	53
4.34	Tiefenverläufe der effektiven Kationenaustauschkapazität (mval/kg), der Basensättigung (%) und der Konzentrationen der austauschbar gebundenen Elemente (g/kg) im Bodenprofil im Solling	54
4.35	Bodenlösungen des Lößprofils Reinhausen und des Bodenprofils im Solling in Gleichgewichts-Diagrammen für $\log(K^+) - \text{pH}$ gegen $\log(H_4SiO_4)$	55
4.36	Bodenlösungen des Lößprofils Reinhausen und des Bodenprofils im Solling in Gleichgewichts-Diagrammen für $\log(Na^+) - \text{pH}$ gegen $\log(H_4SiO_4)$ und $\log(Ca^{2+}) - \text{pH}$ gegen $\log(H_4SiO_4)$	55
4.37	Scattergramme ausgewählter Elementgehalte (Gew.-%) der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in 55–60 cm Tiefe des Lößprofils Reinhausen	58
4.38	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an K und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen	61
4.39	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an K und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling	62
4.40	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Ca und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen	64
4.41	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Ca und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling	65
4.42	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Mg und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen	66
4.43	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Mg und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling	67
4.44	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Fe und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen	68
4.45	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Fe und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling	69
4.46	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Fe und Mn (in logarithmischer Darstellung) in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen	70
4.47	Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Fe und Mn (in logarithmischer Darstellung) in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling	71

4.48	Röntgendiffraktogramme der Korngrößenfraktion 0,6–2,0 μm im Lößprofil Reinhausen mit der Angabe diagnostisch wichtiger Netzebenen-Abstände .	74
4.49	Röntgendiffraktogramme der Korngrößenfraktion 0,2–0,6 μm im Lößprofil Reinhausen mit der Angabe diagnostisch wichtiger Netzebenen-Abstände .	76
4.50	Röntgendiffraktogramme der Korngrößenfraktion $< 0,2 \mu\text{m}$ im Lößprofil Reinhausen mit der Angabe diagnostisch wichtiger Netzebenen-Abstände	78
4.51	Tiefenverläufe der chemischen Zusammensetzungen (Gew.-%) der einzelnen Tonfraktionen im Lößprofil Reinhausen	80
4.52	Tiefenverläufe der chemischen Zusammensetzungen (Gew.-%) und des Glühverlustes bei der Veraschung (LOI) der einzelnen Tonfraktionen im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)	82
6.1	Tiefenverläufe der Gesamtgehalte der Hauptelemente (Gew.-%) und der Nebenelemente (mg/kg) sowie der pH(H ₂ O)-Werte im Lößprofil Reinhausen .	96
6.2	Zusammenstellung der Tiefenverläufe der Gesamtgehalte und der mit Dithionit, Oxalat bzw. Tiron extrahierbaren Anteile wichtiger Elemente (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen	100
6.3	Tiefenverläufe der Gesamtgehalte der Hauptelemente (Gew.-%) im Feinboden und in den Tonfraktionen sowie der pH(CaCl ₂)-Werte im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)	106

Tabellenverzeichnis

2.1	Aufbau des Lößprofils Reinhausen	16
2.2	Horizontabfolge und stoffbestandlicher Aufbau des Bodenprofils im Solling (F1)	18
3.1	Relative Standardabweichungen (%) bei 22 RFA-Messungen des Tonschiefer-Hausstandards („TW“) aus unterschiedlichen Präparationsgängen	20
3.2	Nachweisgrenzen bei der Messung der Lösungen aus der Dithionit-, der Oxalat- und der Tiron-Extraktion sowie der Lösungen zur Bestimmung der KAK_{eff} am ICP-OES (als Gew.-% auf die Probeneinwaage bezogen) . . .	22
3.3	Nachweisgrenzen (mg/kg) bei der Messung der Bodenlösungen am ICP-OES	22
4.1	Chemische Summenformeln der Referenzpunkte in den Scattergrammen der Mikrosonden-Analysen	58
4.2	Mikrosonden-Analysen (Gew.-%, auf 100 % normiert) an Meßpunkten mit hohen Anteilen spezifischer Phasen sowie typischer Matrix-Zusammensetzungen im Lößprofil Reinhausen	59
4.3	Mikrosonden-Analysen (Gew.-%, auf 100 % normiert) an Meßpunkten mit hohen Anteilen spezifischer Phasen sowie typischer Matrix-Zusammensetzungen im Bodenprofil im Solling	62
4.4	Basisabstände (Å) von Tonmineralen nach unterschiedlichen Vorbehandlungen	73
6.1	Gesamtgehalte der Hauptelemente (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen . . .	94
6.2	Gesamtgehalte der Nebenelemente (mg/kg) im Lößprofil Reinhausen	95
6.3	Dithionit-extrahierbare Anteile im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)	97
6.4	Oxalat-extrahierbare Anteile im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)	98
6.5	Tiron-extrahierbare Anteile im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)	99
6.6	Effektiv austauschbar gebundene Kationen im Lößprofil Reinhausen (mval/kg bzw. pH)	101
6.7	Chemische Zusammensetzung der Grobtonfraktion (0,6–2,0 μm) im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)	102
6.8	Chemische Zusammensetzung der Mitteltonfraktion (0,2–0,6 μm) im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)	102

6.9	Chemische Zusammensetzung der Feintonfraktion ($< 0,2 \mu\text{m}$) im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)	103
6.10	Gesamtgehalte der Hauptelemente (Gew.-%) und Glühverlust (LOI) des Feinbodens ($< 2 \text{mm}$) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999) . .	104
6.11	Chemische Zusammensetzung (Gew.-%) und Glühverlust (LOI) der Gesamtonfraktion ($< 2,0 \mu\text{m}$) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999) .	104
6.12	Chemische Zusammensetzung (Gew.-%) und Glühverlust (LOI) der Feintonfraktion ($< 0,2 \mu\text{m}$) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999) .	105
6.13	Chemische Zusammensetzung (Gew.-%) und Glühverlust (LOI) der Grobtonfraktion ($0,2\text{--}2,0 \mu\text{m}$) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)	105

Kapitel 1

Einleitung, Forschungsstand und Zielsetzung

Böden bilden die Grundlage für die Existenz höher entwickelten Lebens an Land. Bei der Entstehung und Entwicklung von Böden spielt die Verwitterung des primären Gesteinsmaterials eine zentrale Rolle. Durch physikalische und chemische Verwitterungsprozesse werden Säureeinträge aus dem Regenwasser kompensiert, Nährstoffe für Organismen aus den Mineralen freigesetzt und ein feinkörniges Substrat gebildet. Als offene Systeme liegen Böden im Kontaktbereich zwischen der Atmosphäre und der festen Erde und sind den sehr wechselhaften chemischen, mechanischen und thermischen Einflüssen von Klima sowie Flora und Fauna ausgesetzt. Damit befinden sie sich weit entfernt von einem chemischen Gleichgewicht und gehören zu den komplexesten Untersuchungsobjekten der Geowissenschaften. Böden stellen ein sehr dynamisches System dar, das aufgrund der enormen inneren Oberfläche des feinkörnigen Materials innerhalb geologisch kurzer Zeiträume auf sich verändernde äußere Bedingungen reagieren kann. Übersteigt die Säurebelastung aus atmosphärischen und biologischen Quellen allerdings die momentane Pufferkapazität von Böden, so kommt es zu einer ökologisch ungünstigen Versauerung des Bodens bis hin zur Freisetzung toxischer Al-Ionen (z.B. JACKSON (1963A); HEINRICHS ET AL. (1986)). Von weitreichender und sehr aktueller Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch die Entwicklung von Böden unter dem Einfluß anthropogener Säure- und Schwermetalleinträge (BRÜMMER, 1981; HILLER, 1991; DEUTSCHMANN, 1994). Ziel der vorliegenden Arbeit ist die detaillierte morphologische und chemische Charakterisierung des Stoffbestandes im Mikrobereich von natürlichem Probenmaterial, um Verwitterungsprozesse im Boden in gemäßigt humidem Klima zu ermitteln. Da Beobachtungen bei vereinfachten Laborsimulationen oft erheblich von denen natürlicher Verwitterungsvorgänge abweichen, ist schließlich angestrebt, die Ergebnisse aus Laborversuchen durch eine detaillierte Kenntnis des natürlichen Probenmaterials auf die tatsächlichen Vorgänge zu übertragen.

Verwitterungsprodukte in Löß

Wegen seiner weiten Verbreitung an nicht erosiven Standorten in den Deckschichtsedimenten im periglazialen Bereich ist Löß wichtiger Bestandteil der heutigen Böden. Die

eiszeitliche Produktion fein zerriebenen Gesteinsmaterials durch Gletscher, der weite äolische Transport und die Deposition unter trocken-kalten Bedingungen bewirken, daß frischer Löß sowohl in sich als auch weltweit sehr homogen zusammengesetzt ist und aus vergleichsweise schwach verwittertem Gesteinsmaterial besteht. Unter der Annahme, daß die pH-Stabilisierung des Sickerwassers durch Kalzit, der in allen bekannten frischen Lössen enthalten ist, eine Verwitterung der übrigen Minerale minimiert, bildet sich aufgrund der allmählichen Verlagerung der Kalkgrenze in größere Profiltiefen eine Sequenz mit von unten nach oben immer stärker verwittertem Material, das sich für eine Untersuchung der fortschreitenden Verwitterung eignen sollte. Das perkolierende Sickerwasser wird hierbei auf einer Distanz von wenigen Zentimetern mit gelöstem Kalzit gesättigt, so daß die Kalkgrenze im Lößprofil sehr scharf ausgeprägt ist.

Allerdings wird die Untersuchung der Verwitterung im Holozän durch die Vorverwitterung des Lößmaterials erschwert (SCHEFFER ET AL., 1958), obwohl manche Autoren berichten, daß die chemische Vorverwitterung nur einen vergleichsweise geringen Anteil hat (TAYLOR ET AL., 1983; SCHNETGER, 1992). Zum einen werden vom Gletscher Minerale aus reifen Sedimenten, die bereits aus Material früherer Bodenbildungen zusammengesetzt sind, freigelegt bzw. aufbereitet und transportiert (Beispiele: Kaolinit, aber auch Illit), zum anderen ist anzunehmen, daß auch Material aus früheren, eiszeitlichen Lößablagerungen, z.T. sicherlich auch nach interglazialen Bodenbildungsphasen, mit ausgeblasen wurde. Auf diese Weise können im Löß auch Verwitterungsprodukte enthalten sein, die Klimabedingungen anzeigen, wie sie lokal im Holozän nicht herrschten.

Die fein- bis mikrokristallinen Mineralphasen der Tonfraktion spielen wegen ihrer großen Oberfläche und ihrer Reaktivität eine wesentliche Rolle sowohl für Fruchtbarkeit und Konsistenz des Bodens als auch für die Qualität des Grundwassers. Diese Phasen bestehen einerseits aus ursprünglichen, im Ausblasungsgebiet befindlichen Verwitterungsprodukten, andererseits aus während der Bodenbildung entstandenen primären und sekundären Verwitterungsprodukten und bilden mit organischen Stoffen eine Matrix, die größere Körner überzieht und für die Aggregatbildung verantwortlich ist (DREVER, 1994). Laboruntersuchungen zufolge beeinflußt bereits allein die Chemisorption von Metallionen (z.B. Al, Fe, Mg, Ca etc.) an Silikat-Oberflächen die Auflösungsrate durch die Bildung schlechtlöslicher Silikat-Überzüge erheblich (KRAUSKOPF, 1959; LEWIN, 1961; JONES & HANDRECK, 1963; BECKWITH & REEVE, 1963; LIDSTROM, 1968).

Tonminerale im Boden

Die Tonfraktion, die wegen ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften im Boden generell von besonderer Bedeutung ist, ist in primärem Löß wegen ihrer leichten äolischen Verlagerbarkeit bereits zu ca. 10–20 Gew.-% vertreten. Die geringe Korngröße bewirkt ein großes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und damit eine große Oberflächenreaktivität, die z.B. die Kationenaustauschkapazität, die katalytische Fähigkeit z.B. für Reaktionen von Huminstoffen im Boden (BIRKEL & NIEMEYER, 1998, 1999), das Speichervermögen für Wasser und das plastische Verhalten in feuchtem Zustand bedingt. Physikalische Zerkleinerungsprozesse (v.a. Zerreibung, Sprengung durch Frost oder durch Pflanzenwurzeln, Zerbrechen bzw. Absplittern bei fluviatilem oder äolischem Transport) grober Mineral-

phasen (v.a. Quarz und Feldspäte) werden im Korngrößenbereich $< 10 \mu\text{m}$ sehr ineffektiv. Aus diesem Grunde ändert sich die mineralische Zusammensetzung hier erheblich: Zu kleineren Kornfraktionen hin nimmt der Anteil mechanisch zerkleinerter Minerale rapide ab, das Material setzt sich vor allem aus Produkten chemischer Verwitterung bzw. aus Phasen-Neubildungen zusammen (BRONGER ET AL., 1976). Die mit Abstand häufigsten Komponenten sind hierbei Chlorit, Illit, Kaolinit, Smektit, Vermikulit und deren Wechselagerungsminerale sowie Oxidhydroxide vor allem von Al, Fe und Mn. Während Oxidhydroxide in erster Linie Ausfällungen bzw. Abscheidungen sind, kristallisieren Tonminerale in gemäßigt humidem Klima nur gelegentlich aus der Bodenlösung aus (z.B. GLASMANN (1982): Montmorillonitneubildung bei lokal hohen Mg-Konzentrationen durch geringe Bewegung im Bodenwasser). Besonders für Illit und verwandte Tonminerale im Boden wird die Herkunft aus chemischer Verwitterung von Glimmern evtl. in Kombination mit mechanischer Zerkleinerung diskutiert. Zahlreiche Autoren nehmen hier eine Entwicklungsreihe Glimmer (evtl. Chlorit)–Illit–Vermikulit–Smektit (mit Übergangsstadien aufweitbarer Illite (JACKSON, 1963A) und Illit-Vermikulit- bzw. Illit-Smektit-Wechselagerungen) an. Diese Abfolge ist der diagenetischen Rekristallisation zu Illit in vergrabenen Sedimenten genau entgegengesetzt. Während die teilweise Wegfuhr von K aus den Zwischenschichten von Glimmern durchaus plausibel ist, scheint die Vorstellung eines gleichzeitig erfolgenden teilweisen Ersatzes von Al durch Si in den Tetraederschichten ohne Zerstörung des Kristallgitters (KOMARNENI ET AL., 1985) allerdings problematisch. Die weitverbreitete Abnahme bzw. das Verschwinden von Smektiten im Oberboden deutet GLENN (1960) bei fortschreitender Versauerung als beginnende Silikatzerstörung, die zunächst quellfähige Tonminerale erfaßt. Demgegenüber wird die Abnahme des Smektit/Illit-Verhältnisses mit

- einer Illit-Bildung durch Glimmerverwitterung mit einer relativen Zunahme von Illiten (GEBHARD ET AL., 1967; SCHEFFER & GEBHARD, 1977),
- einer körnungsselektiven Tonverlagerung (SCHLICHTING & BLUME, 1961; FÖLSTER ET AL., 1963; BLUME, 1964) bzw. einer bevorzugten Verlagerung von Smektit aufgrund seiner leichteren Dispergierbarkeit (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1992) oder aber
- einer Illitbildung aus Smektiten unter K-Zufuhr aus der Silikat- (besonders Glimmer-) Verwitterung (NIEDERBUDE & KUSSMAUL, 1978)

begründet.

Mit Rücksicht auf die geringe K-Konzentration im Sickerwasser unseres Klimabereiches und die thermodynamischen Stabilitätsbereiche von Glimmer, Illit und Smektit ist allerdings unwahrscheinlich, daß Illit auf Kosten von Glimmer und Smektit gebildet wird, wie NIEDERBUDE & KUSSMAUL (1978) fordern.

Als Folge von Entkalkungs-, Entbasungs- und Versauerungsprozessen stellt VEERHOFF (1992) in Anlehnung an BRÜMMER (1981) ein Modell der Umwandlung glimmerbürtiger Dreischichttonminerale am Beispiel des Illits über aufweitbare Dreischichttonminerale

(Smekтите, Vermikulite) zu Al-Chloriten („Boden-Chloriten“) vor, die im Zuge der anschließenden Dechloritisierung (Herauslösen der eingelagerten Al-Hydroxo-Komplexe aus den Zwischenschichten) wiederum über ein Stadium aufweitbarer Tonminerale zu amorphen Abbauprodukten zerfallen.

Im Boden-Milieu tritt „Illit“ sicher nicht als chemisch und strukturell exakt definierbares Mineral auf, vielmehr ist die Bezeichnung „illitisches Material“ angebracht. Von den möglichen Mischungsreihen und Übergangsformen zu Wechsellagerungsmineralen, die Illit dabei eingehen kann, sind Kombinationen mit Smektit und Vermikulit sicher die häufigsten, doch auch Chlorit oder evtl. Kaolinit können hierfür in Frage kommen. Umstritten ist die Einlagerung von H_3O^+ in die Zwischenschichten illitisch-smektitischen Materials: LOUCKS (1991) fordert das verbreitete Auftreten von H_3O^+ in den Zwischenschichten, während JIANG ET AL. (1994) dies nur bei niedrigen pH-Werten für möglich halten. In fast reiner Form tritt Smektit wesentlich häufiger auf als Illit, z.B. in Verwitterungsprodukten vulkanischer Tuffe (Bentonit-Lagerstätten). Im Boden hat die Smektitkomponente aufgrund ihrer Quellfähigkeit eine besondere Bedeutung, da die mögliche Einlagerung von Kationen in die aufgeweiteten Zwischenschichten eine wesentlich höhere Kationenaustauschkapazität bedingt als die nicht quellfähiger Tonminerale.

Mikrobiologische Einflüsse

Die Bedeutung mikrobiologischer Aktivität für Verwitterungsprozesse in Böden wurde lange Zeit unterschätzt. Erst seit einigen Jahren findet die nahezu vollständige Besiedelung von Gesteinsoberflächen (einschließlich Rissen im Gestein) vor allem durch Bakterien, die als autotrophe Lebensformen ohne Zufuhr organischen Materials unter hohen Temperaturen (bis über $100^\circ C$) und in großen Tiefen (bis 2,8 km unter der Erdoberfläche) überleben können (FREDRICKSON & ONSTOTT, 1996; GHIORSE, 1997), zunehmende Beachtung. Im Vergleich zu höheren Lebensformen wie Pflanzen, die z.B. durch Abgabe von Oxalsäure aus ihren Wurzeln ebenfalls den chemischen Abbau der mineralischen Substanz forcieren, haben Bakterien, Algen und Pilze eine weit größere Verbreitung. Robuste, z.T. speziell angepasste Lebensformen sind unter extremen Bedingungen zu finden (FRIEDMANN & OCAMPO, 1976; FRIEDMANN ET AL., 1981; KRUMBEIN & JENS, 1981; FRIEDMANN, 1982; DANIN & GARTY, 1983; BÜDEL & WESSELS, 1991; FELDMANN ET AL., 1997), doch je günstiger die Lebensbedingungen sind (feuchtes, gemäßigtes bis warmes Klima), desto höher ist auch der anzunehmende Materialumsatz. Durch den Einsatz organischer Säuren und/oder Komplexbildner wird die Auflösung des primären Gesteins forciert, um anorganische Nährstoffe freizusetzen, bei endolithischen Lebensformen (z.B. Flechten) auch, um das Habitat zu erweitern (POHL, 2000). Einige der biologisch essentiellen Elemente (z.B. Ca, Si) sind in natürlichen Wässern meist ausreichend vorhanden (DE VRIND-DE JONG & DE VRIND, 1997), andere (z.B. Fe, K, P) müssen jedoch künstlich verfügbar gemacht werden. Der grundlegendste Prozeß ist nach BANFIELD ET AL. (1999) die Säureproduktion, doch auch Komplexbildner („organische Liganden“, z.B. für Fe) und elektrochemische Reagenzien („Elektronen-Shuttle“) kommen zum Einsatz (STONE, 1997). Die Abscheidung langkettiger, organischer Polymere (Bildung von Schleimschichten durch extrazelluläre Polysaccharide) verlängert die Berührungszeit zwischen Wasser und Mineraloberfläche und

unterstützt den diffusiven Abtransport von Ionen (BANFIELD ET AL., 1999). Organischer Detritus und extrazelluläre Polymere bilden mit lebenden Zellen und feinkörnigem anorganischem Material (Tonmineralen etc.) komplexe Mischungen, die als „Biofilme“ Mineral- bzw. Gesteinsoberflächen überziehen und im Boden die physikalischen Eigenschaften (Speichervermögen für Wasser, Porosität und Permeabilität) verändern (DREVER, 1994).

Andererseits unterstützen Bakterien bzw. Algen die Ausfällung oder Anlagerung anorganischer Substanz an ihren Zellwänden, z.B. zu ihrer mechanischen Stabilisierung (Cyanobakterien, Kieselalgen, Kalkalgen). Doch können Überzüge silikatischer Phasen (amorphe Phasen bis Tonminerale) noch weitere Vorteile für Bakterienzellen haben:

- Tonminerale stellen eine Quelle bzw. einen Speicher austauschbarer, anorganischer Nährstoffe dar (STROTZKY & REM, 1966; TAZAKI ET AL., 1994)
- Tonminerale wie Montmorillonit können den pH-Wert puffern und so lokal eine für die Zellatmung günstige Mikro-Umgebung stabilisieren (STROTZKY & REM, 1966)
- der Überzug mit einer mineralischen Matrix kann die Bakterienzellen vor den Toxinen anderer Mikroorganismen schützen (HABTE & BARRION, 1984)
- die Überzüge bieten des weiteren Schutz vor weidenden Protozoen (HEIJNEN ET AL., 1988, 1991, 1992; HEIJNEN & VAN VEEN, 1991)

Im Anschluß an eine durch Bakterien initiierte Biomineralisation kann das Mineralwachstum bzw. die -ausfällung aufgrund der durch die feinen Körner vergrößerten freien Oberfläche autokatalytisch und abiotisch verlaufen (BANFIELD & HAMERS, 1997). Nach der Ostwald'schen Stufenregel bilden sich hierbei wegen der geringeren Oberflächenenergien und der daraus resultierenden höheren Abscheidungsgeschwindigkeit zunächst bevorzugt amorphe Festphasen im Gegensatz zu den stabileren, kristallinen Phasen (STEEFEL & VAN CAPELLEN, 1990). Unter Verwendung von Transmissions-Elektronen-Mikroskopen (TEM) haben verschiedene Autoren die Ausfällung von Fe-Al-Silikaten an Bakterienzellen in Frischwasser-Umgebung beobachtet (FERRIS ET AL., 1987; KONHAUSER ET AL., 1993, 1994; TAZAKI, 1997; KONHAUSER ET AL., 1998). Im Flußmilieu beginnt die authigene Tonmineral-Bildung an Bakterien mit der Ausfällung amorpher Fe-Oxidhydroxide, die mit gelöstem Si und Al zu einer amorphen, Tonmineral-ähnlichen Phase weiterreagieren (KONHAUSER & URRUTIA, 1999). Durch Dehydratation und Kristallisation können sich hieraus Tonminerale mit Zusammensetzungen ähnlich dem Chamosit bis hin zu Muskovit oder Illit entwickeln.

Kapitel 2

Probenmaterial



Abb. 2.1: *Probennahmepunkte*
in Abb. 2.1 eingezeichnet.

Für die angestrebte Differenzierung des Verwitterungsverlaufs bei konstanten äußeren Bedingungen sollte das Bodenprofil eine möglichst homogene Ausgangszusammensetzung haben. Am besten geeignet in unseren Klimaten erscheinen mächtige Lößablagerungen. Ein störender Einfluß von Stauwasser kann hier wegen der hohen Wasserdurchlässigkeit ausgeschlossen werden. Zum Studium des Ausgangsmaterials der Bodenbildung sollte das Profil bis deutlich unter die Kalkgrenze reichen. Die Lokalitäten der für diese Arbeit beprobten Löß-Standorte sind

2.1 Lößprofil bei Reinhausen bei Göttingen

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. B. Meyer (Institut für Bodenwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen) wurde ein Bodenprofil aus einem mehr als 5 m mächtigen Lößpaket auf Buntsandstein unter Buchen-Fichten-Mischwald bei Reinhausen nahe Göttingen ausgewählt. Der Bodentyp ist eine Parabraunerde.

Tiefe (cm)	Horizont
0 - 5	Ah
5 - 50	Al
50 - 150	Bt
150 - 270	Bv
>270	Cv

Tab. 2.1: *Aufbau des Lößprofils Reinhausen*

Bei der Betrachtung im Gelände erscheint das Profil homogen. Durch eine unregelmäßige, leichte Einmischung des lokal anstehenden Buntsandsteins (während der Ablagerungsphase des Lösses) ist das Profil jedoch im cm-Bereich schwach rötlich lamelliert. Das Lößpaket ist hier bis in ca. 270 cm Tiefe entkalkt, darunter befindet sich schwach entkalkter Löß (Cv). Der Bv-Horizont (150–270 cm Tiefe) ist durch eine vollständige Entkalkung gekennzeichnet und durch eine scharfe Grenze vom Cv-Horizont getrennt (Salzsäuretest). Die Tonverlagerung über das Sickerwasser führte hier zur Ausbildung des Tonauswaschungshorizontes (Al: 5–50 cm) und des Tonaanreicherungs-

horizontes (Bt: 50–150 cm), der erwartungsgemäß wesentlich dichter und tonreicher als die übrigen Profilabschnitte ist. Der humose, stark verwitterte Ah-Horizont (0–5 cm) schließt das Profil nach oben hin ab.

Für die Untersuchungsverfahren, für die kein ungestörter Kornverband des Bodenmaterials notwendig war (Röntgenfluoreszenzanalyse, chemische Extraktionen, Gewinnung der Bodenlösung, Kolloid- und Tonseparation etc.),

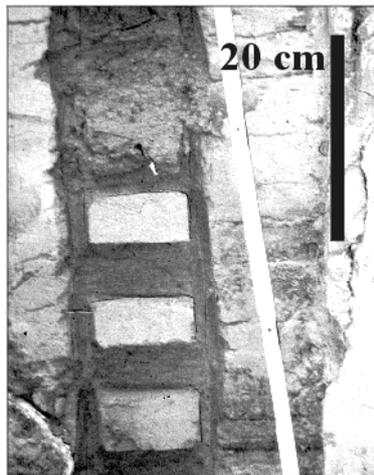


Abb. 2.2: Freilegung ungestörter Bodenproben am Lößprofil Reinhausen

nung der Bodenlösung, Kolloid- und Tonseparation etc.), wurden an dem Reinhäuser Lößprofil in 5 cm-Abschnitten jeweils ca. 300–600 g Probe mit Schaufeln aus Perlon (6-Polyamid) entnommen (s. Abb. 2.2), in handelsübliche Polyethylentüten abgefüllt und luftdicht verschlossen. Die Proben für die Röntgenfluoreszenzanalyse trockneten gleich nach der Probenahme bei 40°C im Trockenschrank. Parallel wurden feldfeuchte Proben für die Extraktionsverfahren und für die Gewinnung von Bodenlösung im Kühlraum (dunkel) bei 4°C gelagert.

Ungestörte Proben wurden sorgsam mit Hilfe eines Messers unter Erhalt des Aggregatgefüges aus dem Bodenverband herausgebrochen und in PE-Dosen (Fotodosen) aufbewahrt. Proben, die für die Untersuchung am REM bzw. an der Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMS) später in Kunstharz eingebettet wurden, trockneten an der Luft.

2.2 Sollingprofil (F1)

Der Solling ist ein ca. 60–70 km südsüdwestlich von Hannover gelegenes, waldreiches Buntsandstein-Plateau, das mit seinen ausgedehnten Hochflächen eine Höhe von maximal 527 m ü.M. erreicht. In Lagen mit geringer Erosionsanfälligkeit liegen flächenhaft Deckschichten mit variabler Lößlehmeteiligung auf dem Gestein.

Das hier bearbeitete Profil liegt in der „Hauptprobefläche Fichten-Baumholz F1“ des „Sollingprojektes“ (ELLENBERG ET AL., 1986). Seit den siebziger Jahren durchgeführte Elementflußmessungen in Poren- und Sickerwässern sowie die bereits erfolgte umfangreiche Charakterisierung (einschließlich Austauschkapazitäten, Korngröße und Phasenanalyse) des Profils (ELLENBERG ET AL., 1986; DEUTSCHMANN, 1994; SCHLABACH, 1996; BARNEKOW, 1996; GROSSKURTH, 1999) ermöglichen erste Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der Mineraloberflächen.

Tiefe (cm)	Horizont	Stoffbestand
-3 - 0	L + O	Lößlehm-Fließerde
0 - 5	Ahe	
5 - 15	Bsv	
15 - 57	SBv	
57 - 73	SBtv	
73 - 90	I-IIBtv	Sandstein-Lößlehm-Fließerde
90 - 132	IIBvCv	siltige Tonsteine
>132	IICv	

Tab. 2.2: Horizontabfolge und stoffbestandlicher Aufbau des Bodenprofils im Solling (F1)

Solling (F1), die Vegetation besteht aus Fichten. Die Proben wurden an der senkrechten Wand eines frisch angelegten Schurfes horizontbezogen entnommen, wobei sich je nach Horizontmächtigkeit verschiedene Probenintervalle ergaben. Die Vorbehandlung der Proben erfolgte wie am Reinhäuser Lößprofil.

Der Bodentyp ist eine stauwasserbeeinflusste, podsolige Braunerde über Ton-/Schluffstein mit nach unten stark zunehmenden Skelettanteilen bei abnehmendem Lößgehalt. „Dominierendes Ausgangsmaterial der Bodenbildung ist Löß bis zu einer Tiefe von ca. 75 cm“ (DEUTSCHMANN, 1994).

Das Profil liegt über Buntsandstein der Solling-Folge im

Kapitel 3

Methodik

Neben einer umfassenden Beobachtung und Charakterisierung der Materialbeschaffenheit sowie der Prozesse im Mikrobereich (mit REM, Mikrosonde etc.) sind auch klassische pauschalchemische bzw. bodenkundliche Analysen (konventionelle geochemische Analysen, selektive Extraktionsverfahren, pH-Wert, Kationenaustauschkapazität, Analyse der Bodenlösung und Röntgendiffraktometrie) vonnöten. Diese vermitteln Trends im Makrobereich und lassen auf die Tragweite von Transportprozessen, Stoffumsätzen und Reaktionen im Mikrobereich rückschließen, die bei rein mikroskopischer Betrachtung leicht verschleiert blieben.

3.1 Pauschalchemische Untersuchungen

Unter der Bezeichnung *pauschalchemische Untersuchungen* sind die chemischen Analyseverfahren aufgeführt, die nicht unmittelbar auf Korngröße bzw. Struktur des Probenmaterials Rücksicht nehmen. Dem stehen die *mikroanalytischen* (vgl. S. 25) und *korngrößen-spezifischen* (vgl. Abschn. 3.2, S. 23) Verfahren gegenüber.

3.1.1 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Für die Schmelztabletten wurden jeweils 600 mg des luftgetrockneten Probenmaterials zusammen mit 3600 mg trockenem „Spektroflux[®]“ ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) als Schmelzmittel sowie 500 mg Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) als Oxidationsmittel für organische Komponenten in Platintiegeln aufgeschlossen, wobei sich das von vornherein „analysenfeine“ Lößmaterial problemlos auflöste. Die Messungen der Elemente Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P, Nb, Zr, Y, Sr, Rb, Pb, Ga, Zn, Ni, Co, Cr, V, Ba und Sc fanden an einem Philips-Röntgenfluoreszenzspektrometer „PW 1480 X-ray Spectrometer“ statt.

Für die Sollingproben konnte auf frühere, mit dem gleichen Spektrometer gemessene Daten von BARNEKOW (1996) und GROSSKURTH (1999) zurückgegriffen werden.

Element	rel. Standardabw.	Element	rel. Standardabw.
Al	1	P	3
Ba	2	Pb	5
Ca	1	Rb	1
Co	11	Sc	14
Cr	3	Si	<1
Fe	1	Sr	2
Ga	5	Ti	1
K	1	V	2
Mg	1	Y	3
Mn	1	Zn	5
Nb	6	Zr	2
Ni	4		

Tab. 3.1: Relative Standardabweichungen (%) bei 22 RFA-Messungen des Tonschiefer-Hausstandards („TW“) aus unterschiedlichen Präparationsgängen

Mögliche Fehler bei der RFA liegen in erster Linie bei der Präparation, die Reproduzierbarkeit von Meßdaten bei Wiederholungsmessungen derselben Schmelztabletten ist sehr gut. Zur Fehlerabschätzung sind die relativen Standardabweichungen tabellarisch aufgeführt, die aus 22 Bestimmungen eines Tonschiefer-Hausstandards nach der Präparation durch verschiedene Personen ermittelt wurden.

3.1.2 Kohlenstoff-Bestimmung

Die Bestimmung des Gesamt-C-Gehaltes der 40°C-getrockneten Proben erfolgt als CO₂ nach der Dissoziation bzw. Oxidation der C-haltigen Phasen im Sauerstoffstrom mit dem Infrarot-Detektor im CS-Analysator „ELTRA METALYT CS 100/1000 RF“. Die Nachweisgrenzen liegen für dieses Verfahren im 10er-ppm-Bereich, die Reproduzierbarkeit bei 1–2 Gew.-%.

Für die Sollingproben kann auf Daten aus der Literatur (GROSSKURTH, 1999) zurückgegriffen werden.

3.1.3 Boden-pH

Nach einstündigem Rühren von 10 g Probe in 25 ml demineralisierten Wassers wurden die pH-Werte mit Hilfe einer pH-Glaselektrode (Fa. Krannich) bestimmt, die im karbonatfreien Bereich (bis 280 cm Profiltiefe) auf den Meßbereich pH 4–7, im karbonathaltigen Bereich auf den Meßbereich pH 7–10 geeicht war.

Die pH(CaCl₂)-Werte für das Bodenprofil im Solling wurden aus der Literatur übernommen (GROSSKURTH, 1999).

3.1.4 Chemische Extraktionsverfahren und effektive Kationenaustauschkapazität

Extraktion der nichtsilikatischen Fe-Phasen mit Natriumdithionit und -Citrat

Oxide und Oxidhydroxide von Fe wurden mit Natriumcitrat/Natriumdithionit nach HOLMGREN (1967) in Lösung gebracht (1 g Probe + 1 g Na-Dithionit + 10 g Na-Citrat + 50 ml

demin. Wasser) und durch Zentrifugation (10 min bei ca. 3000 G) und Dekantation abgetrennt. Nach Verdünnung der Lösung mit demineralisiertem Wasser auf das 10-fache Volumen folgte die Messung der gelösten Elemente an dem optischen Emissions-Spektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) „Fisons Maxim I 109“.

Extraktion der „amorphen, freien“ Oxidhydroxide von Al und Fe mit Ammoniumoxalat/Oxalsäure

Mit je 50 ml einer Extraktionslösung nach DIN 19684/Teil 6 (2/1977) wurden aus 2 g Bodenprobe die schlechtkristallinen bis amorphen Fe-Phasen extrahiert und nach der Abfiltration am ICP-OES analysiert.

Extraktion der schlechtkristallinen bis amorphen, wasserhaltigen Oxidhydroxide von Si, Al und Fe mit Tiron

Nach KODAMA & ROSS (1991) wurden 25 mg Bodenprobe mit 30 ml einer mit Natronlauge auf pH = 10,5 korrigierten Extraktionslösung von Tiron (Natriumsalz der 4,5-Dihydroxy-1,3-Benzen-Disulfonsäure; $C_6H_4Na_2O_8S_2$) für 1 Stunde bei 80°C behandelt. Nach Zentrifugation (10 min bei 3000 G), Dekantation und Verdünnung mit demineralisiertem Wasser auf das doppelte Volumen kamen die Extrakte ebenfalls am ICP-OES zur Analyse.

Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff})

Die Bestimmung der Summe der effektiv austauschbaren Kationen fand durch Extraktion unter Verwendung von 1-molarer Ammoniumnitrat-Lösung unter Schütteln in PE-Flaschen bei 30°C statt. Nach dem Zentrifugieren wurde die überstehende Lösung mit einer Pipette abgesaugt und mit Salpetersäure leicht angesäuert. Die Messungen der gelösten Kationen fanden am ICP-OES statt.

Fehlerquellen in der Durchführung der chemischen Extraktionsverfahren

Der Vorteil normierter Verfahren besteht in der Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit Literaturdaten. Bis auf die Analyse am ICP-OES wurden die Vorschriften möglichst genau befolgt. Die Einwaagenfehler liegen bei den großen Einwaagemengen (2 g Probe) der Dithionit- und Oxalat-Extraktion im Promillebereich, bei der Einwaage von 25 mg Probe für die Tiron-Extraktion dagegen im Prozentbereich. Des weiteren besteht eine wesentliche Fehlerquelle bei allen durchgeführten Extraktionsverfahren in der Abtrennung der Extraktionslösung vom festen Probenrückstand. Sowohl die ausgiebige Zentrifugation als auch die übliche Papierfiltration können nicht verhindern, daß möglicherweise erhebliche Mengen (unsichtbarer) Kolloide in die Extraktionslösungen gelangen (vgl. Abschn. 4.2.3 auf S. 45 und S. 48).

Um Matrixeffekte durch die Extraktionsmittel in den Lösungen zu minimieren, kamen für alle Messungen der Elementkonzentrationen adaptierte Kalibrationslösungen, die ebenfalls

die entsprechenden Extraktionsmittel enthielten, zum Einsatz. Die in Tab. 3.2 angegebenen Nachweisgrenzen entsprechen der dreifachen Standardabweichung der Messungen der Blindlösungen (3σ -Methode).

Tab. 3.2: Nachweisgrenzen bei der Messung der Lösungen aus der Dithionit-, der Oxalat- und der Tiron-Extraktion sowie der Lösungen zur Bestimmung der KAK_{eff} am ICP-OES (als Gew.-% auf die Proben-einwaage bezogen)

	NWG(oxal)	NWG(dith)	NWG(tiron)	NWG(kak)
Al	0,00026	0,0074	0,0060	0,00037
Ca	0,00034	0,014	0,0055	0,000080
Fe	0,00039	0,0059	0,0072	0,00022
K	0,00070	0,047		0,000094
Mg	0,00026	0,0019	0,0022	0,00054
Mn	0,000011	0,00026	0,0022	
Ti	0,000025	0,00017		0,000041
Zr	0,000016	0,00026		

3.1.5 Gleichgewichtsbodenlösung und Porenlösung

Zur Gewinnung der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) nach MEIWES ET AL. (1984) im Lößprofil Reinhausen wurde das Bodenmaterial soweit angefeuchtet, daß eine gerade verrührbare Suspension entstand. Durch Zentrifugieren (20 min bei 10000 G) wurde die Lösung vom Feststoff getrennt und mit einer Pipette abgesaugt.

Für die Gewinnung der Porenlösung aus den Proben des Lößprofils Reinhausen wurde

	NWG(gbl)
Al	0,050
Ca	0,060
Fe	0,042
K	0,038
Mg	0,022
Mn	0,0017
Na	0,032
Ti	0,0017

eine Hochdrucksedimentpresse nach BRUMSACK ET AL. (1992) verwendet. Da sich dieses Verfahren für die Gewinnung analysierbarer Lösungsmengen jedoch als sehr aufwendig und langwierig erwies, beschränkte sich die Untersuchung der Preßlösungen auf einige Stichproben.

Alle Boden- und Porenlösungen wurden am ICP-OES analysiert. Die in der Tabelle aufgelisteten Nachweisgrenzen der untersuchten Elemente beziehen sich auf die Konzentration in der Lösung.

Tab. 3.3: Nachweisgrenzen (mg/kg) bei der Messung der Bodenlösungen am ICP-OES

Für Porenlösungen des Bodenprofils im Solling konnte auf Literaturdaten von BARNEKOW (1996) und SCHLABACH (1996) zurückgegriffen werden, die ebenfalls mit der Hochdrucksedimentpresse (BRUMSACK ET AL., 1992) gewonnen worden waren.

3.2 Korngrößenspezifische Untersuchungen der Tonfraktion

3.2.1 Korngrößentrennung und Präparation für chemische und phasenanalytische Untersuchungen

Aus arbeitstechnischen Gründen wird die Bezeichnung „Kolloid“ hier im folgenden als Fraktion $< 2 \mu\text{m}$ definiert. Ein wesentliches Anliegen dieser Studie war die schonende oberflächensensitive Untersuchung des Probenmaterials. Chemische Reaktionen und damit Veränderungen des Probenmaterials während der Präparation waren nach Möglichkeit zu vermeiden. Aus diesem Grunde wurden bewußt keine aggressiven chemischen Verfahren (Karbonatzerstörung durch HCl, Beseitigung der organischen Substanz durch H_2O_2 , Extraktion der pedogenen Fe-, Al- und Mn-Oxide mit Dithionit/Citrat) zur vollständigen Dispergierung des Materials eingesetzt. Des weiteren wurde das Wasser, das für die Korngrößentrennung im Atterberg-Verfahren zum Einsatz kam, soweit wie möglich in ein chemisches Gleichgewicht mit dem Probenmaterial gebracht, um die Lösung chemischer Elemente aus dem Feinstmaterial zu umgehen. Hierzu wurde demineralisiertes Wasser (mit einem Zusatz von 2 Tropfen NH_4OH -Lsg. auf 25 l Wasser als Dispergierungsmittel) zunächst über mehr als 24 Stunden (mit mehrmaligem Umschütteln) mit Aliquoten des jeweiligen Probenmaterials äquilibriert und in der Zentrifuge (ca. 40 min bei ca. 5000 G) wieder weitestgehend von der Festphase befreit.

Um auch ohne chemische Reagenzien eine ausreichende Dispergierung der Tonfraktion zu erreichen, erfolgte eine 10-minütige Ultraschallbehandlung. Nach dem Atterberg-Verfahren wurden von jeweils 15 g feldfeuchter Probe zunächst die Fraktionen $< 2 \mu\text{m}$ in einem 30 cm-Glaszylinder abgetrennt, die daraufhin in der Zentrifuge in die Fraktionen $< 0,2 \mu\text{m}$ (14'52" bei 5000 U/min) und $0,2\text{--}0,63 \mu\text{m}$ bzw. $0,63\text{--}2 \mu\text{m}$ (9'23" bei 2000 U/min) aufgeteilt wurden. Nach mehrmaligen Wiederholungen jedes Trennungsschrittes (mind. 4 Sedimentationsgänge) waren die überstehenden Suspensionen weitgehend klar. Durch eine Filtration der Suspensionen mit $0,1 \mu\text{m}$ -Nitrocellulose-Filtern wurden die Kolloide aus der Suspension gewonnen.

Für die chemische Analyse des Kolloidmaterials an der Elektronenstrahl-Mikrosonde wurden die Kolloidseparate entweder direkt auf den Nitrocellulosefiltern auf Glasobjektträger geklebt oder aus einer konzentrierten Suspension auf Glasobjektträgern eingetrocknet. Für die röntgendiffraktometrische Phasenanalyse wurden im Trockenschrank 10 mg (± 2 mg) Probe aus der Suspension auf runden Probenträgern aus Glas bei 40°C eingetrocknet. Bei diesem Verfahren haben die blättrigen Tonminerale eine Vorzugsorientierung mit ihrer (001)-Ebene parallel zum Objektträger. Problematisch war die Fixierung vor allem der feinsten Fraktionen von Material aus dem Grenzbereich von A- und B-Horizont, da es sich beim Trocknen auf dem Objektträger stark kontrahierte und vom Objektträger ablöste.

Die Korngrößentrennung im Atterberg-Verfahren stellt prinzipiell einen Kompromiß dar: Zur möglichst vollständigen Auftrennung der einzelnen Tonfraktionen müßten die Sedimen-

tationsgänge sehr oft wiederholt werden (> 10 Durchgänge). Dies wiederum bedingt den Einsatz großer Mengen an Wasser, das mit den Mineralen chemisch reagieren kann. Da im vorliegenden Fall eine sensible, qualitative Betrachtung im Vordergrund steht, wurde eine nicht ganz vollständige Auftrennung der Tonfraktionen in Kauf genommen. Relative Trends werden aber dennoch klar sichtbar.

Organisches Material mit geringen Dichten tritt vor allem in den oberen Profilbereichen auf. Da die Dichtentrennung auf eine mittlere Masse von Silikaten ($2,6 \text{ g/cm}^3$) ausgerichtet ist, sind hier vor allem beim organischen Material die größeren Kornfraktionen überrepräsentiert und können nicht zuverlässig getrennt werden. Für die chemischen und röntgendiffraktometrischen Analysen resultiert daraus eine Verdünnung der feineren Tonfraktionen durch organisches Material.

Die Ton- bzw. Feinton-Fraktionen des Bodenprofils im Solling, deren Daten aus der Literatur übernommen wurden, stammen aus einem ähnlichen Trennungsverfahren unter Verwendung einer Kühlzentrifuge (GROSSKURTH, 1999). Details der Präparation sind dort nachzulesen.

3.2.2 Tonmineralogische Phasenanalyse der Tonfraktionen am Röntgendiffraktometer

Die röntgendiffraktometrischen Untersuchungen wurden an einem Philips-Diffraktometer PW 1800 durchgeführt, für die Auswertung kam das Programm APD 1700 von Philips zum Einsatz. Unter Verwendung einer Cu-Röntgenröhre wurden die Proben in $0,020^\circ$ -Schritten über einen Winkelbereich von $4\text{--}60^\circ 2\Theta$ mit einer Meßdauer von 4 sec pro Winkelschritt gemessen. Die Differenzierung von Tonmineralen anhand ihrer 060 -Reflexe bei etwa $62^\circ 2\Theta$ ist an orientierten Proben wegen der geringen Intensität der Reflexe nicht durchführbar. Zur Identifizierung quellbarer Tonminerale wurden die Proben anschließend eine Woche lang in einer Ethylenglykol-gesättigten Atmosphäre aufbewahrt und in einem Winkelbereich von $4\text{--}15^\circ 2\Theta$ erneut gemessen. Vor dem dritten Meßgang (ebenfalls $4\text{--}15^\circ 2\Theta$) wurden die Proben für 120 min einer Hitzebehandlung bei 350°C unterzogen. Die diagnostischen Basisabstände („d-Werte“) der 001 -Flächen der relevanten Tonminerale sind in Tabelle 4.4 (S. 73) dargestellt (DIXON & WEED, 1989; VEERHOFF, 1992).

Organisches Material (v.a. A-Horizont) und Schwierigkeiten bei der Fixierung des Materials auf dem Probenträger (Grenzbereich zwischen A- und B-Horizont) verhindern eine quantitative Analyse und bewirken durch eine Defokussierung im Röntgendiffraktometer z.T. eine leichte Peakverschiebung. Die interne Eichung mit Quarz und Illit, die in allen Proben zu finden sind, erlaubt dennoch zuverlässige, halbquantitative Aussagen.

3.2.3 Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Tonfraktionen an der Elektronenstrahl-Mikrosonde

Die Messung und die Aufbereitung der Meßdaten der Kolloidpräparate entsprechen größtenteils dem in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Verfahren. Allerdings war der Elektronenstrahl

hier für eine bessere Repräsentativität der Messungen auf einen Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ defokussiert. Die Ergebnisse der sechs bis zehn Wiederholungsmessungen der Hauptelemente (Si, Al, Ca, K, Fe, Mg, Na, Mn und Ti) jeder Probe wurden arithmetisch gemittelt. Die relativen Standardabweichungen nahmen zu, je größer die Kornfraktionen (Inhomogenität der Präparate) und je geringer die Konzentration des jeweiligen Elements waren. Dementsprechend liegen die relativen Standardabweichungen für Al, Si, Fe und K meist deutlich unter 10 %, für Mg, Mn, Na und Ti erreichen sie hingegen bis zu 20–30 %.

Die Literaturdaten der chemischen Zusammensetzung der Tonfraktionen des Bodenprofils im Solling stammen aus Analysen von Pulverpreßlingen mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde (GROSSKURTH, 1999).

3.3 Mikromorphologische und mikroanalytische Untersuchungen

3.3.1 Präparation der Bodenproben

Herstellung der Streupräparate für die Untersuchung am Rasterelektronenmikroskop (REM)

Lockeres Bodenmaterial kann unter dem REM als Streupräparat betrachtet werden. Hierzu wurde auf einem Glas-Objektträger fixiertes doppelseitiges Klebeband mit dem Lößmaterial bestreut, das bei 40°C im Trockenschrank getrocknet worden war. Für eine direkte Betrachtung der Mineraloberflächen wurde bei einem Teil der Proben das Lößmaterial einer vorsichtigen Reinigung durch eine 10-minütige Ultraschall-Behandlung in Wasser bzw. in einer verdünnten Oxalsäure-Oxalat-Lösung (zur Auflösung von Überzügen amorpher Oxidhydroxide) unterzogen. Um Aufladungserscheinungen am REM zu vermeiden, wurden die Streupräparate mit Kohlenstoff bedampft.

Einbettung von Lößboden in Kunstharz

Für die Untersuchung des Bodens im ungestörten Zustand wurden intakte Lößbrocken nach vorsichtigem Trocknen an der Luft in Kunstharz eingebettet, um die lockere Struktur zu stabilisieren. Beim Vergleich unterschiedlicher Kunstharze erwies sich Vestopal 160 (ungesättigtes Polyesterharz) als geeignet, da es die Poren der Probe nahezu vollständig ausfüllt und ausreichend elektronenstrahlstabil ist. In zylinderförmigen 10 ml-Polyethylen-Gefäßen wurden die gebrochenen Lößbrocken mit dem frisch angesetzten Gemisch aus Vestopalharz und dem Verdünner Styrol (im Verhältnis 4:1) mit Cyclohexanonperoxid (Härter) und Cobaltoctoat (Beschleuniger) umgossen und durch vorsichtiges Anlegen eines leichten Vakuums vollständig getränkt. Nach dem Aushärten, das bei Raumtemperatur 4–6 Wochen dauerte, wurden mit einer Innenkreissäge $500\ \mu\text{m}$ -dicke Scheiben gesägt, mit Superkleber auf Glas-Objektträgern fixiert, plan geschliffen und poliert. Da die Dicke der Proben für die Betrachtung an REM und EMS irrelevant ist, wurden die Präparate relativ dick geschnitten, was beim Aufkleben und Schleifen für die Stabilität von Vorteil

war. Gelegentlich auftretende schmale Klüfte an den Mineralkornoberflächen aufgrund der Schrumpfung des Harzes beim Aushärten konnten nicht immer vermieden werden. Ein weiteres Problem war die geringe Schleifhärte des Kunstharzes, die eine Reliefbildung beim Schleifen und Polieren des Schnittes verursacht. Die polierten Proben wurden zur Ladungsableitung mit Kohlenstoff bedampft.

Präparation für lichtmikroskopische Untersuchungen

Klassische lichtmikroskopische Untersuchungsmethoden an Löß bzw. lößbürtiger Bodensubstanz stoßen aufgrund der geringen Korngrößen des Lößmaterials schnell an ihre Grenzen und wurden daher hier nur ansatzweise durchgeführt. Unfixierte Lockerpräparate kamen direkt auf einem Glas-Objektträger unter ein Binokular bzw. ein Lichtmikroskop. Für Untersuchungen im Anschnitt mußten die Proben in Kunstharz eingebettet werden. Die hierfür notwendige Entwässerung geschah entweder durch Trocknen an der Luft oder über die Gasphase mit Aceton und CaCl_2 (FITZPATRICK, 1984), um störende Schrumpfungseffekte zu vermeiden. Die Einbettung in Technovit 9100 (Methylmetacrylat-Harz) ermöglicht das nachträgliche Anfärben von organischen Komponenten im Schliff. Die Präparationschritte Schneiden, Aufkleben, Schleifen und Polieren entsprechen denen der Einbettung in Vestopal (s.o.).

3.3.2 Mikromorphologische und mikroanalytische Untersuchungsverfahren

Rasterelektronenmikroskopie (REM), z.T. mit energiedispersiver Röntgenspektrometrie (EDX), und Feld-Emissions-Rasterelektronenmikroskopie (FE-REM)

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen fanden an einem Cambridge Stereoscan 250 Mark 3 (REM mit EDX), an einem Leo DSM Gemini (FE-REM) und am Hitachi S 2300 (REM) statt. Wegen der EDX-Ausrüstung und der guten Aufnahmen bei ausreichender Auflösung mit dem Rückstreu-Elektronen-Detektor, der aufgrund der Kontrastierung durch unterschiedliche Elektronendichten, d.h. durch unterschiedliche mittlere Ordnungszahl und Dichte des Materials, phasenchemische Abbildungen liefert, diente das Gerät von Cambridge der qualitativen (Vor-)Untersuchung an den angeschliffenen Kunstharz-Präparaten mit Schwerpunkt auf der Zusammensetzung und Struktur der Mineralkorn-Überzüge. Zur Abschätzung der Volumenanteile der Hauptkomponenten Quarz, stärker reflektierende Minerale (Feldspäte, Hornblenden, Pyroxene, Zirkon, Rutil, Fe-Minerale etc.), feinkörnige Matrix und Porenraum kam an ausgewählten, möglichst repräsentativen Bereichen von ca. 1 mm^2 eine bildanalytische Auswertung der REM-Aufnahmen zum Einsatz (s. Abb. 3.1). Hierzu wurden nach einer Kalibrierung mit reinen Phasen die Grauwert-Histogramme der 8 Bit-Graustufen-Bilder durch einzelne Gauss-Peaks nachmodelliert (MS Excel), deren relativer Flächeninhalt dem Volumenanteil der jeweiligen Phase entspricht.

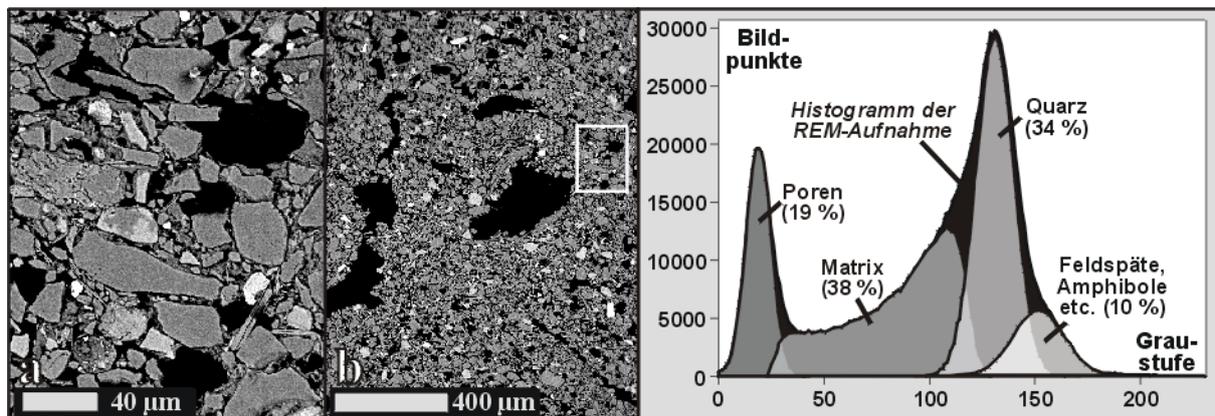


Abb. 3.1: Volumetrische Bestimmung der Phasen-Zusammensetzung im Boden anhand von REM-Aufnahmen: Rückstreu-Elektronen-Bild (b) mit Ausschnittvergrößerung (a) und zugehöriger grafischer Peak-Anpassung (mit Angabe der rel. Flächenanteile) (Bt-Horizont, 55–60 cm Tiefe, Lößprofil Reinhausen)

Das Hitachi-REM und das Leo-FE-REM zeichneten sich durch eine hohe Auflösung der oberflächensensitiven Sekundär-Elektronen-Bilder aus und eigneten sich daher besonders für die Darstellung von Oberflächenstrukturen an Streupräparaten.

Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMS)

Quantitative Messungen der Hauptelemente Si, Al, Ca, K, Fe, Mg, Na, Mn und Ti erfolgten an den polierten Anschliffen mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde Jeol JXA-8900 im Geochemischen Institut der Universität Göttingen. Die Meßpunkte auf der feinkörnigen Matrix an Mineraloberflächen und auf den Aggregaten wurden einzeln ausgesucht und für eine automatisierte Messung einprogrammiert (Abweichung $< 1 \mu\text{m}$). Auf diese Weise war es möglich, eine ausreichende Anzahl von Messungen für eine statistische Auswertung vorzunehmen. In dem lockeren Gefüge der feinkristallinen Phasen des Zwischenmittels sind die Gehalte durch Kunstharz (vormals Wasser bzw. Porenraum) und organisches Material verdünnt, was die zuverlässige Messung der Absolutkonzentrationen behindert. Ein wesentlicher Nachteil besteht hierdurch auch in der fehlenden Qualitätskontrolle der Meßdaten anhand der 100 %-Summe der gemessenen Element-Oxide wie bei „sauberen“ Mineralanalysen. Für die in dieser Studie interessierenden Hauptelemente zeigten die Analysen allerdings eine sehr gute Reproduzierbarkeit und lagen nur in Ausnahmefällen (Meßpunkte mit hohen Kunstharz-Anteilen) in den Bereichen der Geräte- und Element-spezifischen Nachweisgrenzen.

Eine ausführliche Beschreibung der EMS-Methodik einschließlich ihrer Vor- und Nachteile in der Untersuchung von Böden findet sich bei SAWHNEY (1986). Bei der Erforschung der Tonmineralverwitterung kommt die EMS bereits seit Mitte der 60er Jahre zum Einsatz, doch wurden die Möglichkeiten moderner Mikrosonden für Boden-Untersuchungen im Mikrometerbereich bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

Kapitel 4

Ergebnisse und Diskussion

Das makroskopisch homogen erscheinende Lößprofil bei Reinhausen ist vermutlich unter im wesentlichen konstanten äußeren Bedingungen gebildet worden. Schwach rötliche Bänder, die im ganzen Profil wiederholt auftreten, sind auf leicht erhöhte Anteile des lokal anstehenden mittleren Buntsandsteins zurückzuführen. Außer einer Zufuhr von Quarz (bzw. SiO_2) und geringen Mengen an Fe-Oxiden ist hier jedoch kein spürbarer Einfluß auf die mineralogische bzw. chemische Zusammensetzung zu erwarten. Wie sich bei den chemischen Untersuchungen zeigte, werden diese Variationen durch optische Merkmale (Farbe, Struktur) sensibler aufgezeichnet als durch chemische Parameter. Des weiteren sind die Entkalkung und die Tonverlagerung im Gelände deutlich zu erkennen. Der Salzsäuretest zeigt die Entkalkungsgrenze sehr scharf in 270 cm Tiefe. Der B-Horizont ist im Vergleich zum C-Horizont deutlich verdichtet, verlehmt und braun verfärbt. Der A-Horizont hat dagegen eine wesentlich lockerere, von Wurzeln und biogenen Degradationsprodukten gestützte Struktur und ist durch Huminstoffe grau bis schwarz gefärbt.

4.1 Morphologische Merkmale der Bodenbildung und Mineralverwitterung

Neben Voruntersuchungen am Lichtmikroskop fanden die morphologischen Betrachtungen aufgrund der geringen Größe des Probenmaterials im wesentlichen am Rasterelektronenmikroskop (REM) statt. Während Feldspäte und Quarz unter dem Lichtmikroskop auch aufgrund der feinkörnigen Umkrustungen vor allem im Streupräparat mitunter schwer zu unterscheiden sind, so fällt dies am REM deutlich leichter, da K- und Ca-Feldspäte wegen ihrer höheren durchschnittlichen Elektronendichte hellere Rückstreubilder liefern und die Apparatur zur energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX) – falls vorhanden – durch die halbquantitative Ermittlung der chemischen Zusammensetzung eine zuverlässige Identifizierung der Mineralphasen erlaubt.

4.1.1 Lößprofil Reinhausen

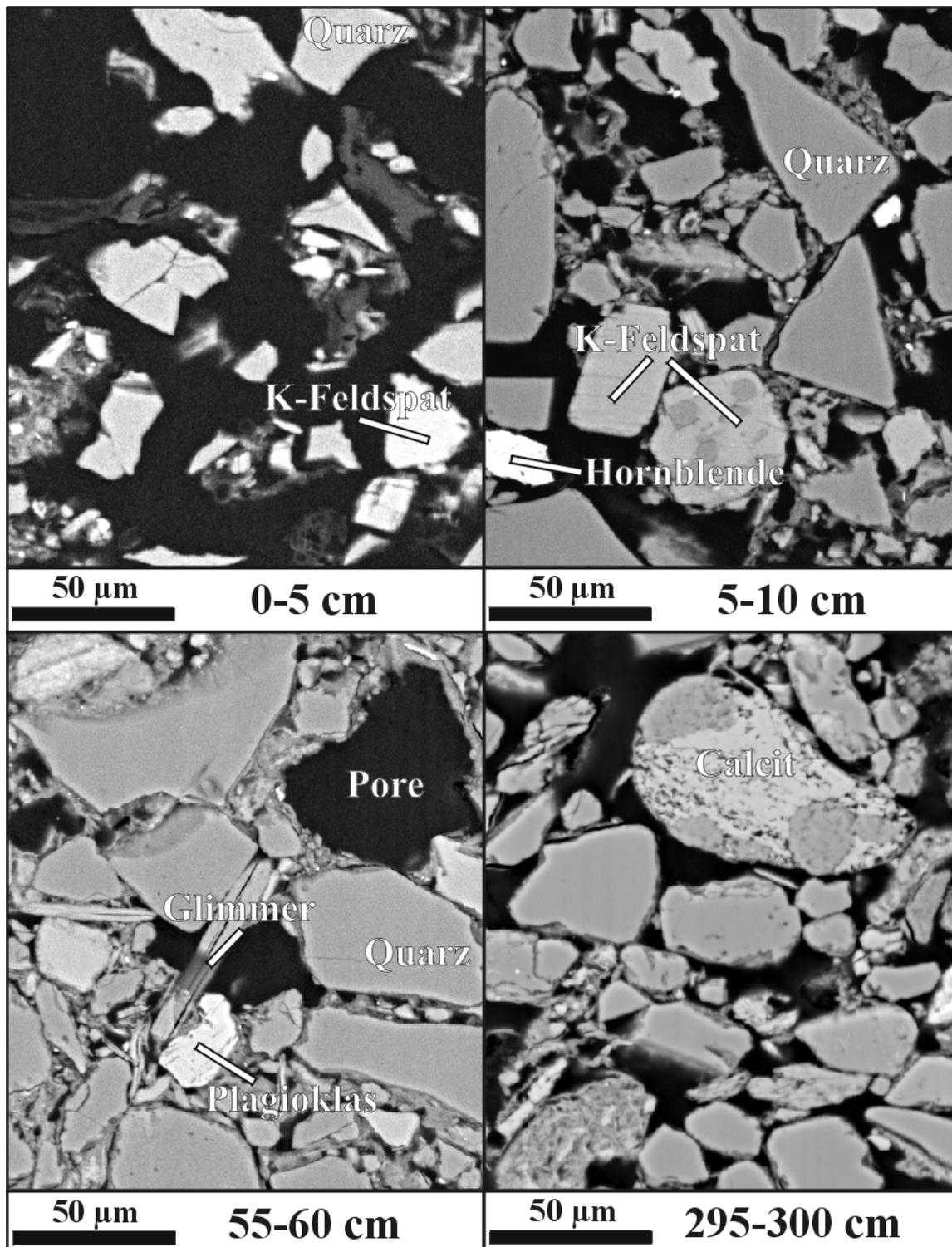


Abb. 4.1: Mineralbestand und Mikrogefüge des Bodenmaterials im Profilverlauf (REM-Aufnahmen von Boden-Anschliffen im Lößprofil Reinhausen)

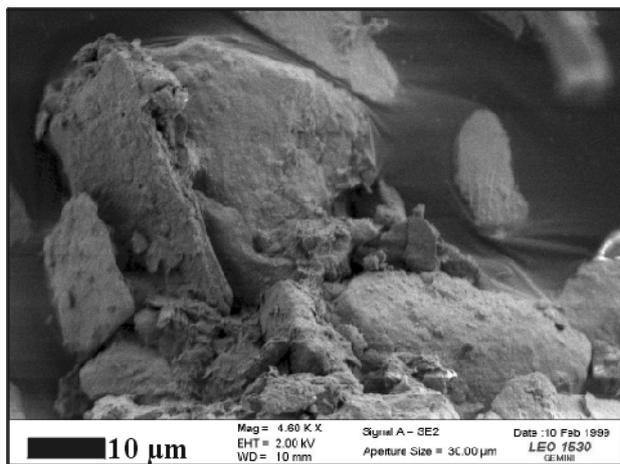


Abb. 4.2: „Größere“ Mineralkörner, die von einer feinkörnigen Matrix überzogen und zu Aggregaten verkittet werden (REM-Aufnahme, Lößprofil Reinhausen; Bv-Horizont, 165–170 cm Tiefe)

Im Vergleich unterschiedlicher Tiefen des Lößprofils Reinhausen ist die Tonverlagerung sehr deutlich zu erkennen (s. Abb. 4.1). Die Aufnahme aus 295–300 cm Tiefe (Cv-Horizont) zeigt wohl in etwa die ursprüngliche Lagerungsstruktur des Lösses. Kalzitkristalle sind hier unter dem Einfluß des Porenwassers allerdings schon deutlich korrodiert. Eine **feinkörnige Matrix**, die in REM-Abbildungen meist etwas dunkler ist als Quarz, bildet gelegentlich eigene Aggregate im 10er- μm -Bereich, größtenteils aber überzieht und verkittet sie größere Mineralkörner (s. Abb. 4.2). Neben vermutlich meist detritischen Partikeln von Quarz, Feldspat oder Glimmern besteht die Matrix nach REM-Untersuchungen im wesentlichen aus Tonmineralen – im μm - bis 100er-nm-Bereich ist unter dem REM mitunter die blättrige Struktur zu erkennen (s. Abb. 4.3) – sowie aus Oxiden und Oxidhydroxiden von Fe, Al und Si, wie aus halbquantitativen EDX-Analysen zu schließen ist.

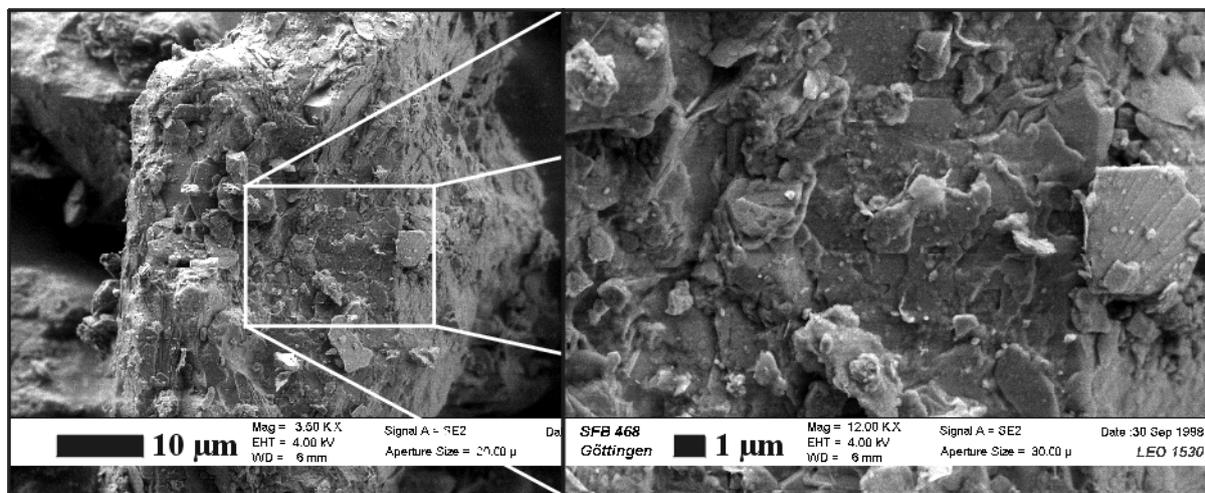


Abb. 4.3: Blättrige Tonminerale in der feinkörnigen Matrix, welche „große“ Mineralkörner (hier: Kalifeldspat) überzieht (REM-Aufnahmen des Lößprofils Reinhausen; Bt-Horizont, 95–100 cm Tiefe)

Abb. 4.4 veranschaulicht in grober Näherung die Zusammensetzung des Bodenmaterials im Tiefenverlauf nach Auswertung der REM-Histogramme (vgl. Abschn. 3.3.2). Unter der Bezeichnung „hochreflektierende“ Minerale sind alle Mineralphasen zusammengefaßt, die unter dem REM heller als Quarz erscheinen. Dies sind vor allem Feldspäte, Schwermminerale, Fe-Phasen und im C-Horizont Kalzit.

Im obersten Profilbereich (Ah-Horizont bis ca. 5 cm Tiefe) ist die mineralische Substanz

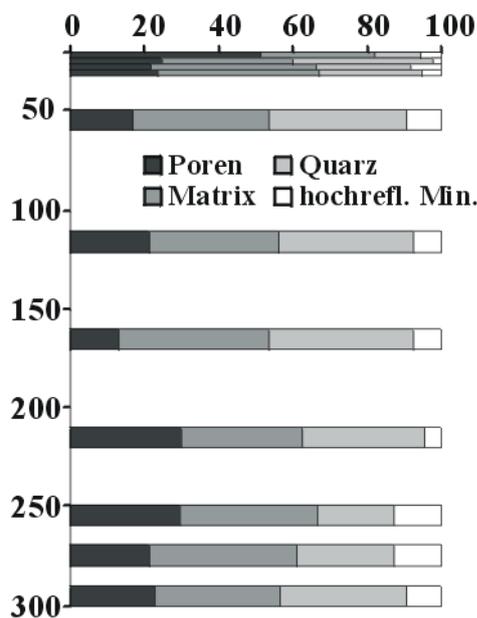


Abb. 4.4: Tiefenverlauf der relativen Volumenanteile der Bodenkomponenten (Vol.-%) nach Auswertung der REM-Histogramme im Lößprofil Reinhausen

sehr locker gepackt und von biogenem Material (Wurzeln, Humus) gestützt. Der Porenraum beträgt nach optischen Abschätzungen (vgl. Abschn. 3.3.2) > 50 Vol.-%; die feinkörnige Matrix ist hier größtenteils mit dem Sickerwasser gelöst oder partikulär weggeführt. Bei Betrachtung unter dem Binokular erscheinen die größeren Mineralkörner (v.a. Quarz) dieses Horizontes gräulich gebleicht, während sie in tieferen Horizonten die lößtypischen gelbbraunen, Fe-haltigen Umkrustungen zeigen. Diese Befunde lassen darauf schließen, daß auch organische Substanzen durch Komplexierung und/oder Reduktion der Oxidhydroxidphasen an der Mobilisierung der Matrix beteiligt waren bzw. sind. Quantitative Ergebnisse liefern hierzu die chemischen Extraktionen (vgl. Abschn. 4.2.3) und die Analysen an der Elektronenstrahl-Mikrosonde (vgl. Abschn. 4.3 und Abschn. 4.4.3). In 5–10 cm Tiefe haben die Mineralkörner (ca. 40 Vol.-%) bei einem Porenraum von nur noch ca. 20 Vol.-% eine deutlich höhere Lagerungsdichte und werden von der Matrix (ca. 40 Vol.-%) verkittet. Das Material hat hier eine intensiver braune Farbe unter dem Binokular. Der Tonanreicherungs-Horizont (Bt) enthält in einer Tiefe von ca. 60 cm die am dichtesten gepackte Bodensubstanz und die höchsten Matrix-Anteile. Darunter nimmt der Porenraum auf Kosten der Matrix bis zum Cv-Horizont wieder auf mittlere Werte zu.

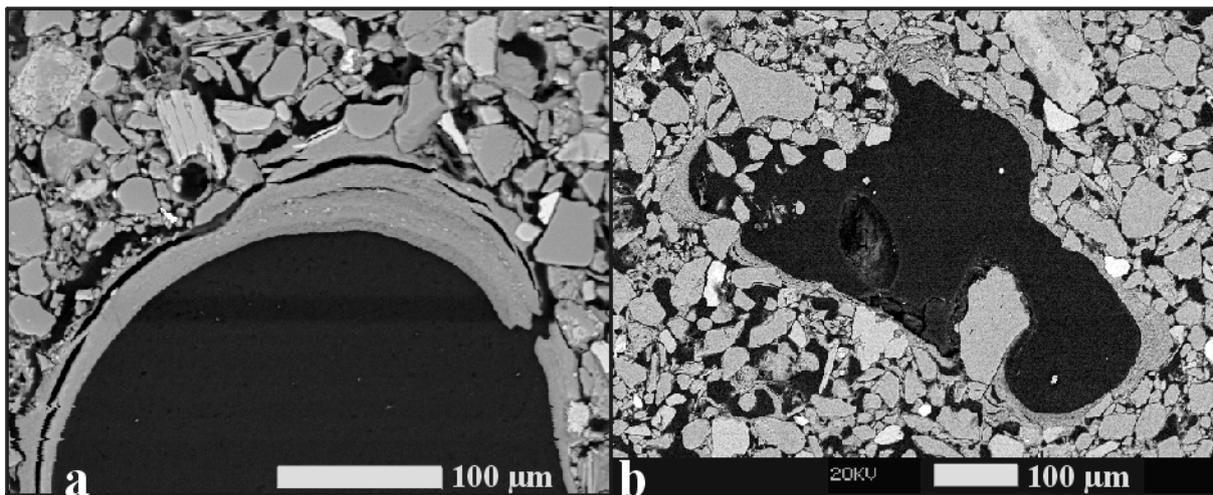


Abb. 4.5: Grobporen im B-Horizont (a: Bt-Horizont, 115–120 cm Tiefe, b: Bv-Horizont 165–170 cm Tiefe) im Lößprofil Reinhausen (REM-Aufnahmen)

In Detailaufnahmen der Matrix in Hohlräumen (vermutlich Wurzel- oder Wurmgänge) im Bt-Horizont (s. Abb. 4.5) offenbaren besonders schichtartige Abscheidungen von Tonen eine wechselnde Sickerwasserdynamik. Die einzelnen Schichten variieren mit Ausnahme unterschiedlicher SiO_2 -Anteile chemisch nur sehr wenig und sind nach optischen Beobachtungen im wesentlichen durch unterschiedliche Korngrößenspektren gekennzeichnet. Es ist anzunehmen, daß stärkere Sickerwasserbewegungen (durch höhere Niederschlagsraten) zur Mobilisierung von größerem Material geführt haben. Dies entspricht größeren Anteilen der detritischen Komponenten, vor allem Quarz. Chemische Analysen (EDX, Elektronenstrahl-Mikrosonde) liefern keine reproduzierbaren Unterschiede zwischen Auskleidungen von Grobporen und der Matrix im Feinporenbereich.

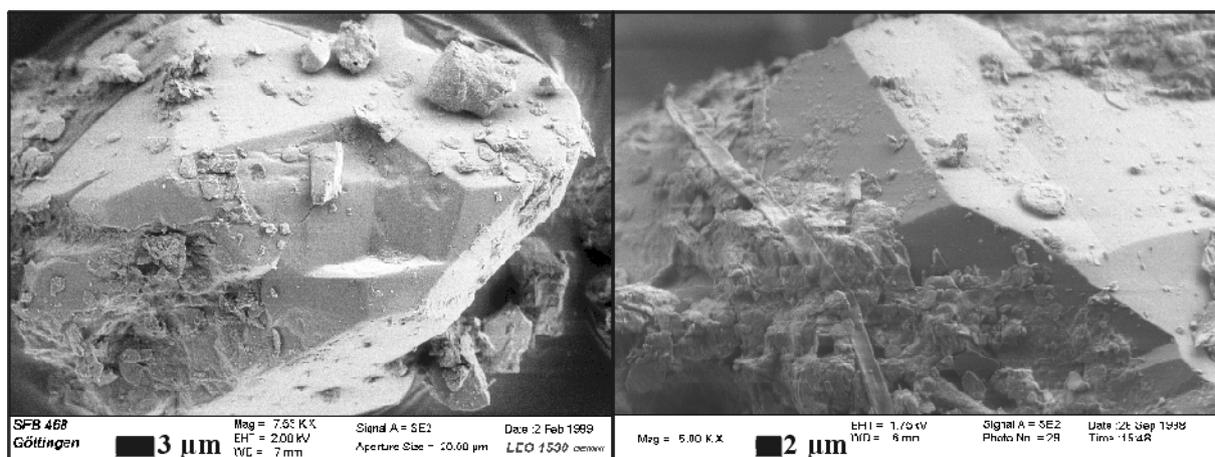


Abb. 4.6: Quarz mit idiomorphen Kristallflächen, feinkörniger Matrix und Pilzhyphen (Al-Horizont, 5–10 cm Tiefe) im Lößprofil Reinhausen (REM-Aufnahmen)

Das Lößprofil Reinhausen zeichnet sich durch relativ hohe **Quarz**-Anteile aus. Die optischen Abschätzungen aus den REM-Aufnahmen ergeben ca. 30–40 Vol.-% Quarz. Bei einer Trockenraumdichte des Lösses von ca. $1,5 \text{ g/cm}^3$ entspricht dies ca. 50–70 Gew.-% Quarz. In allen Horizonten des Lößprofils Reinhausen und des Sollingprofils sind Quarzkörner in unterschiedlicher Ausbildung zu finden. Vereinzelt auftretende Kristalle mit Durchmesser bis zu $400 \mu\text{m}$ sind mit Abstand die größten Mineralkörner und stammen sehr wahrscheinlich aus dem lokal anstehenden Buntsandstein. Kratz- und Splitterspuren auf den Oberflächen großer und kleiner Körner sind auf den äolischen Transport zurückzuführen (s. Abb. 4.7). Ätzstrukturen, die einen chemischen Lösungsangriff andeuten würden, konnten hier nirgends identifiziert werden. Dagegen sind in allen untersuchten Bereichen der beiden Profile authigen gewachsene Quarzkörner anzutreffen (s. Abb. 4.6). Diese zeigen neben den lößtypischen rundlichen, rauen Oberflächenbereichen frische, sehr glatte Kristallflächen, die eine kristallographisch orientierte Abscheidung von SiO_2 aus dem Sickerwasser darstellen. Es ist anzunehmen, daß der Kontakt zu anderen Körnern bzw. die dichte Belegung mit feinkörniger Bodenmatrix ein vollständiges Verheilen der ge-

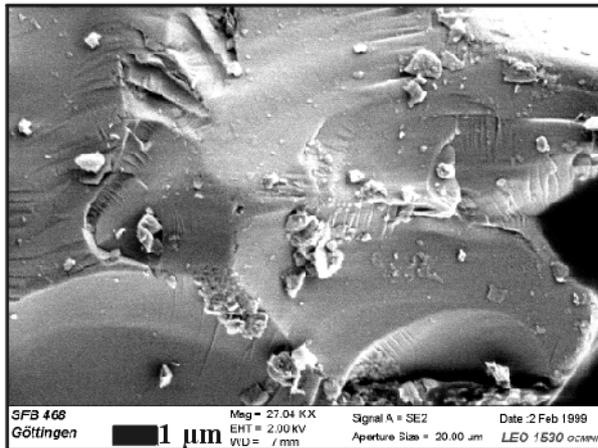


Abb. 4.7: Splitterspuren an einem Quarzkorn aus 5–10 cm Tiefe im Lößprofil Reinhausen

Bei neutralen bis sauren pH-Bedingungen ist die Löslichkeit von Si in Anwesenheit von Quarz sehr gering (ca. 6,6 mg/kg bei 25°C), während amorphes SiO₂ (Opal) viel leichter in Lösung geht (Löslichkeit ca. 116 mg/kg bei 25°C) (LANGMUIR, 1997). Dies bedingt letztlich die Umbildung von amorphem SiO₂ in thermodynamisch stabileren Quarz.

rundeten Quarzkristalle verhinderten, wodurch die nicht verheilten Bereiche wie korrodiert erscheinen. DREES ET AL. (1989) beschreiben diese Erscheinung als „üppi- ges Überwuchern“ („abundant overgrowth“). VEERHOFF (1992) führt das Quarzwachstum in stark versauerten bis podsolierten Waldbodenprofilen auf den fortgeschrittenen verwitterungsbedingten Silikatzerfall zurück, doch scheint auch bei mäßiger Versauerung wie im vorliegenden Fall schon genügend SiO₂ für das sekundäre Quarzwachstum aus der Silikatauflösung bzw. aus aufgelöstem Pflanzenopal (DREES ET AL., 1989) in das Sickerwasser zu ge-

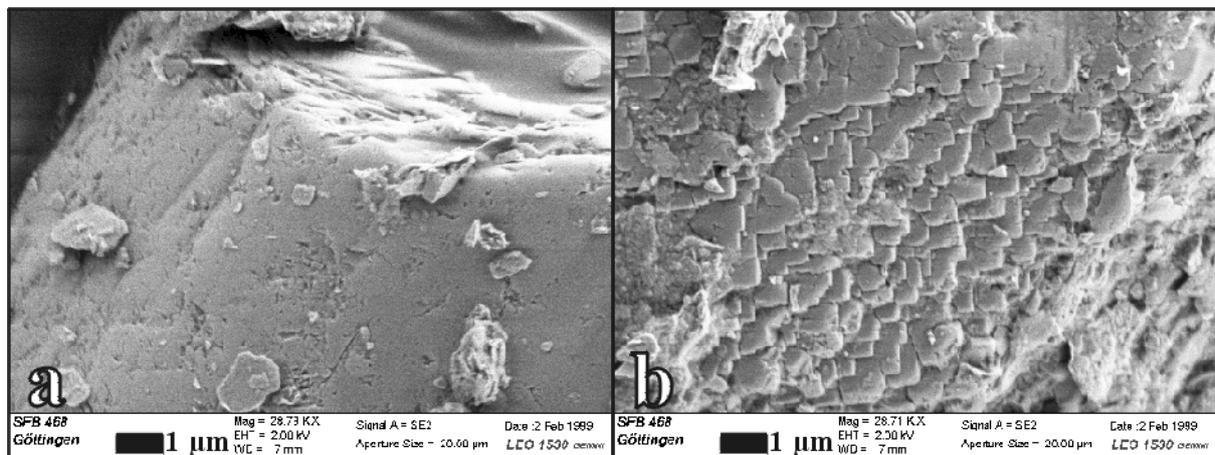


Abb. 4.8: Chemische Verwitterung von Kalifeldspat. a: leichte Lösungsspuren auf der gerundeten Kornoberfläche; b: starker Lösungsangriff nach kristallographischen Vorzugsrichtungen (REM-Aufnahmen, Al-Horizont, 5–10 cm Tiefe im Lößprofil Reinhausen)

Kalifeldspäte und **Plagioklase** sind nach Quarz die am häufigsten auftretenden Mineralphasen und im Löß typischerweise ebenfalls im wesentlichen mechanisch gerundet (s. Abb. 4.8). Im Gegensatz zu Quarz sind hier keine Kristall-Wachstumserscheinungen, sondern unterschiedlichste Stadien der chemischen Verwitterung von kleinen Ätzgruben bis hin zur Auflösung zu einem rudimentären Kristallgerüst zu finden.

Trotz des Quarzwachstums, das die Bereitstellung von SiO₂ voraussetzt, sind innerhalb der beiden untersuchten Bodenprofile anhand der (elektronen-) optischen Befunde an Quarz

und Feldspäten keine unterschiedlichen chemischen Verwitterungsstadien in Abhängigkeit von der Entkalkungszeit, d.h. in unterschiedlichen Horizonten, nachzuweisen. Die variablen Verwitterungsspuren an Quarzen und Feldspäten sind also im wesentlichen auf Prozesse vor der Lößdeposition zurückzuführen und erschweren die Erkundung von Verwitterungsreaktionen im Zuge der Bodenbildung.

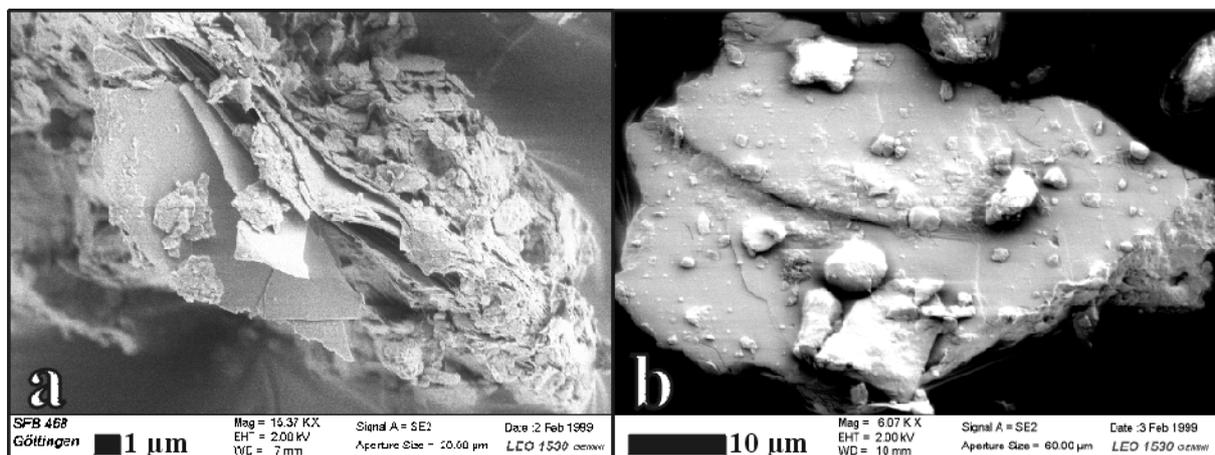


Abb. 4.9: Glimmerverwitterung: (a) aufgeblätterter Muskovit mit feinkörnigen Ablösungen aus 5–10 cm Tiefe (A1-Horizont), (b) chemisch kaum verwitterter Muskovit aus 165–170 cm Tiefe (Bv-Horizont) im Lößprofil Reinhausen (REM-Aufnahmen)

Bei **Glimmermineralen**, die vermutlich bereits während der Phase der Lößdeposition eine physikalische Vorverwitterung erfahren haben, ist vor allem im Lößprofil Reinhausen von unten nach oben eine leichte Zunahme der Verwitterungsintensität zu beobachten (s. Abb. 4.9). Diese zeigt sich vor allem in einer Auf- und Abblätterung der Glimmerschichten parallel zur 001-Richtung sowie in einem Absilfern (MEYER ET AL., 1962) feiner Schuppen an den aufgeblätterten Rändern und an der Oberfläche senkrecht zur 001-Richtung. Wie von zahlreichen Autoren (JACKSON, 1963B; NAHON, 1991; VEERHOFF, 1992) berichtet, führt das Einwirken saurer Sickerwässer zur randlichen Aufweitung der Glimmerblättchen, indem K aus den Zwischenschichten herausgelöst wird. Unter den oxidierenden Bedingungen in gut drainierten Lößprofilen erfolgt an Biotiten, die im Lößprofil Reinhausen nur sporadisch in tiefen Profilvereichen, im Bodenprofil im Solling gar nicht nachweisbar waren, außerdem eine Aufoxidierung von Fe^{2+} zu Fe^{3+} , wodurch die Stabilität der Kristallstruktur weiter gestört wird.

Des weiteren treten akzessorisch **Schwerminerale** (v.a. Zirkon, Rutil, Ilmenit, Hornblende, Pyroxen) auf, die im Profilverlauf keinen Verwitterungstrend erkennen lassen (s. Abb. 4.10). Mengenmäßig haben Schwerminerale im Löß von Natur aus aufgrund des äolischen Transportes keine große Bedeutung und scheinen darüber hinaus oftmals eine recht komplizierte Vorgeschichte zu besitzen. Aus diesen Gründen wurden sie in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

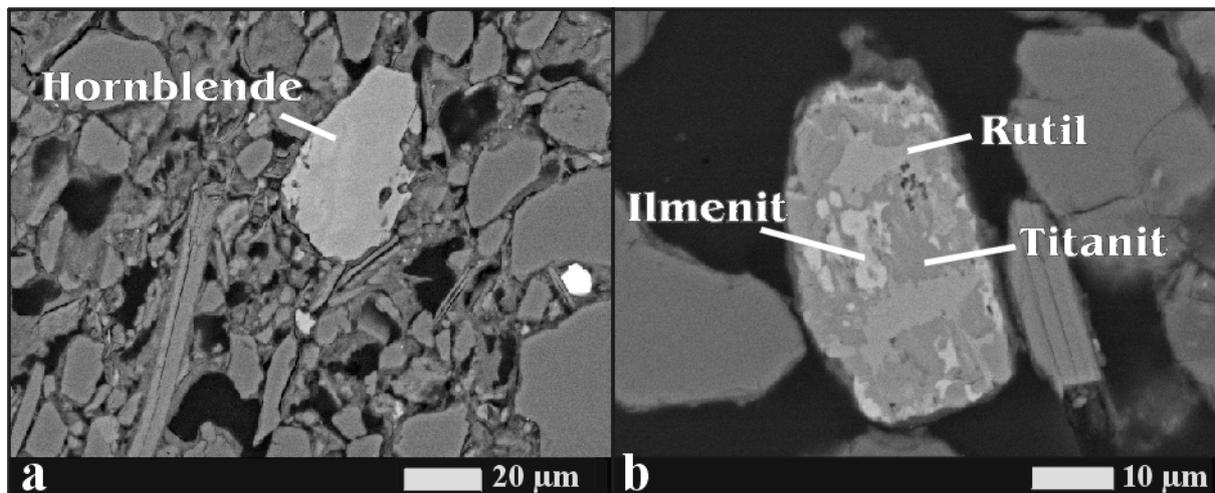


Abb. 4.10: Gelegentlich auftretende Schwerminerale im Lößprofil Reinhausen (REM-Aufnahmen). a: Ca-Hornblende (Bt-Horizont, 55-60 cm Tiefe); b: Ti-Mineral-Verwachsung mit Ilmenit, Rutil und Titanit, vermutlich aus einer hydrothermalen Umwandlungsphase (Bv-Horizont, 165–170 cm Tiefe)

4.1.2 Bodenprofil im Solling

Das Bodenprofil im Solling ist stärker versauert als das Lößprofil Reinhausen. Nach der geographischen Nähe zu urteilen, war die Zusammensetzung des frisch abgelagerten Lösses wohl sehr ähnlich, in der geringmächtigen Lößbedeckung (ca. 70–90 cm) im Solling ist jedoch erwartungsgemäß kein kalkhaltiger C-Löß mehr erhalten.

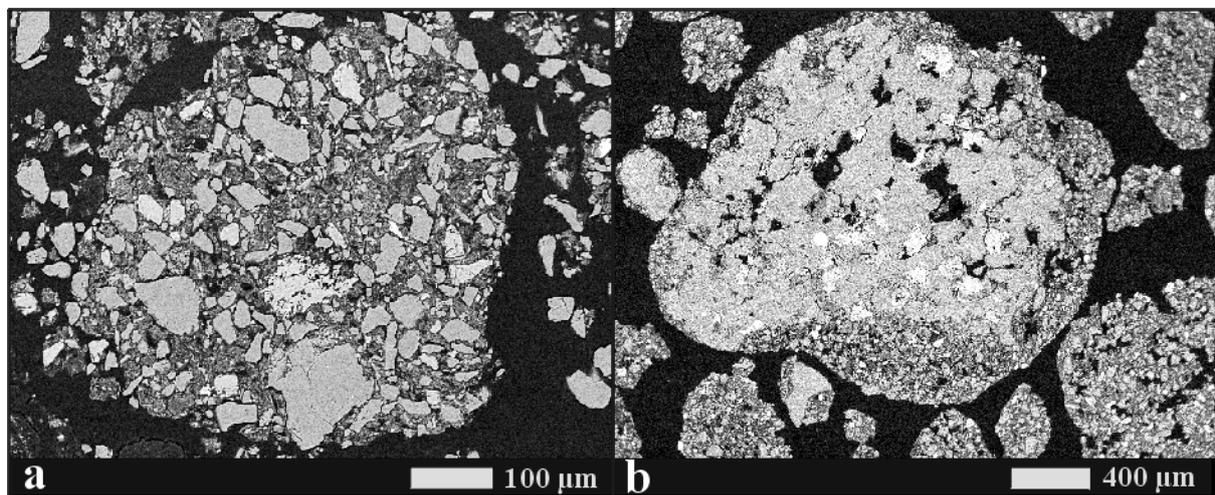


Abb. 4.11: Kompakte Bodenaggregate (a: 5–10 cm Tiefe, b: 40–50 cm Tiefe) im Bodenprofil im Solling (REM-Aufnahmen von Boden-Anschliffen)

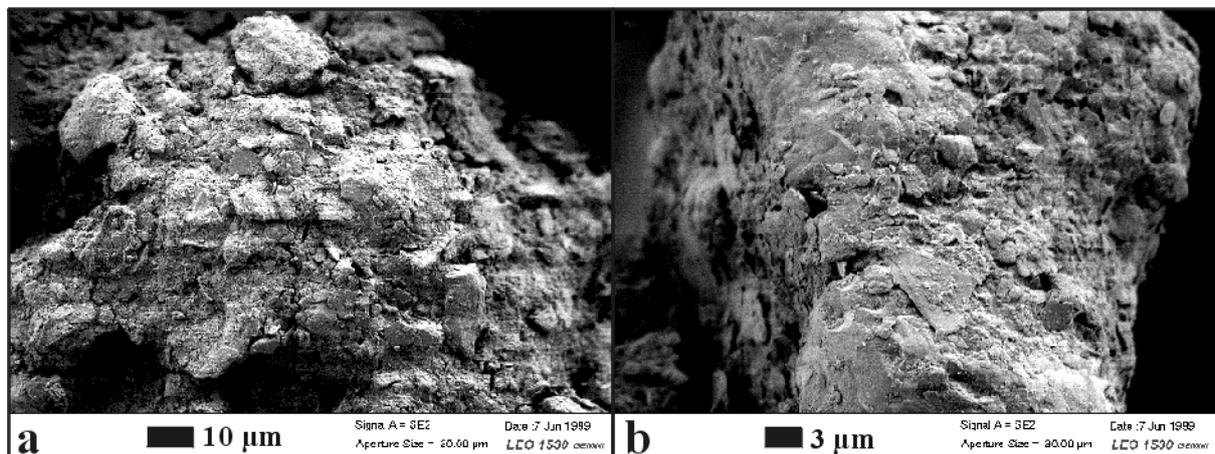


Abb. 4.12: Kompakte Bodenaggregate mit erkennbaren Glimmer- und Tonmineralenkomponenten (SBv-Horizont, 20–30 cm Tiefe) im Bodenprofil im Solling (REM-Aufnahmen von Streupräparaten)

Das Bodenprofil aus dem Solling zeigt unter dem REM eine prinzipiell ähnliche Feinstruktur des Bodenmaterials wie das Lößprofil Reinhausen. Die „größeren“ Mineralkörner werden ebenfalls unregelmäßig von einer feinkörnigen Matrix mit erkennbaren Anteilen an Tonmineralen überzogen bzw. verkittet, allerdings sind die Aggregate dichter verbacken als im Lößprofil Reinhausen (s. Abb. 4.11 und 4.12). Im SBv-Horizont sind neben Tonmineralen und dichter, sehr feiner Substanz auch Glimmerpartikel in der Matrix zu erkennen.

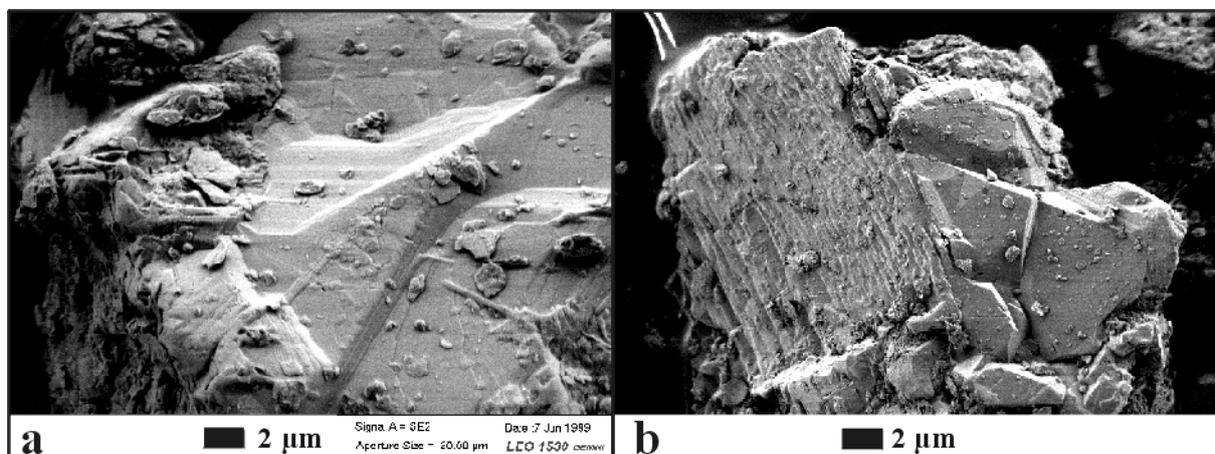


Abb. 4.13: (a) Quarzkorn mit stufenartigem, schnellem Flächenwachstum, (b) Gesteinsbruchstück aus wachsendem Quarz und stark angeätztem Feldspat im Bodenprofil im Solling (REM-Aufnahmen, Ahe-Horizont, 0–2 cm Tiefe)

Die stufenartige Abscheidung von SiO_2 an frischen Quarz-Kristallflächen ist auch hier ein Hinweis auf ein schnelles authigenes Wachstum von Quarzkörnern. An einem Gesteinsbruchstück aus Quarz und Feldspat ist die intensive Auflösung des Feldspates in direkter Nachbarschaft zu einem wachsenden Quarzkorn zu beobachten (s. Abb. 4.13).

4.2 Auswirkungen von Bodenbildung und Mineralverwitterung auf die chemische Zusammensetzung

4.2.1 Gesamtgehalte der Hauptelemente und Boden-pH im Lößprofil Reinhausen

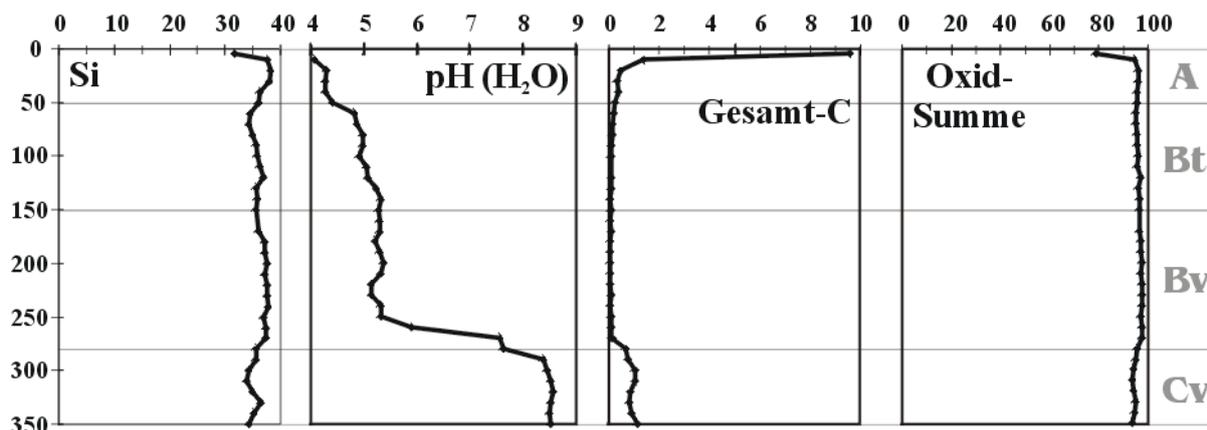


Abb. 4.14: Tiefenverläufe der $pH(H_2O)$ -Werte und der Gesamtgehalte an Si, C sowie der Summe der Hauptelement-Oxide (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen

Neben der Entkalkung bis in ca. 270 cm Tiefe, die eine massive Konzentrationsabnahme von Ca und C oberhalb von 270 cm sowie ein starkes Absinken des Boden-pH (H_2O) von 8 auf ca. 5,2 bedingt, belegen die Gesamtanalysen des Lößprofils Reinhausen (s. Abb. 4.14) analog zu den morphologischen Untersuchungen ebenfalls die intensive Tonverlagerung und damit die Ausbildung eines Tonauswaschungs- (Ah) und eines tonangereicherten Horizontes (Bt). Die Anteile von Quarz und Feldspäten nehmen in der Tonfraktion mit geringeren Korngrößen stark ab (vgl. Abschn. 1 und 4.4.1) und sind daher nur untergeordnet an der Tonverlagerung beteiligt. Die generell hohen SiO_2 -Gehalte variieren leicht. Neben dem Verdünnungseffekt durch die Tonfraktion im Bt-Horizont (SiO_2 -Abnahme) ist dies im wesentlichen auf wechselnde Einmischung des anstehenden mittleren Buntsandsteins zurückzuführen (SiO_2 -Zunahme). Einen großen Anteil hat hier vermutlich die Einwehung von freiliegenden, abgewitterten Sandsteinflächen. Möglicherweise sind auch kryoturbate Vorgänge während der Eiszeit beteiligt, die eine Vermischung von unten oder eine laterale Verlagerung bewirkten. Der mittlere Buntsandstein enthält im Vergleich zu Löß nahezu ausschließlich Quarz und wenig Kalifeldspat. Aus diesem Grund verursacht die Sandstein-Einmischung (wie z.B. in ca. 330 cm Tiefe) lediglich eine Konzentrationserhöhung für Si und in geringerem Maße für K sowie eine Verdünnung der übrigen untersuchten Elemente.

Der oberste Profilabschnitt (Ah-Horizont) enthält hohe Anteile organischer Substanz. Da hier Karbonat nicht stabil ist, kann C (ca. 9,6 Gew.-%) nur organisch vorliegen. Die Summe der an der RFA bestimmten Hauptelement-Oxide beträgt 79 Gew.-%. Die hier im Vergleich zu den übrigen untersuchten Elementen deutlich erhöhten Gehalte an P und Pb

haben sicherlich unterschiedliche Ursachen: P weist auf pflanzenphysiologische Prozesse hin, Pb auf technogene Emissionen.

Im anschließenden Al-Horizont bis ca. 60 cm Tiefe steigt die Summe der Hauptelement-Oxide auf ca. 95 Gew.-%, der Boden-pH stabilisiert sich von $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 4$ im Ah- auf ca. $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) 4,3$ im Al-Horizont.

Zum Bt-Horizont nimmt der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert auf ca. 5 zu. Bei abnehmenden Si-Gehalten ist hier eine deutliche Zunahme der Elemente festzustellen, die in hohen Konzentrationen in Tonmineralen enthalten oder an solche assoziiert sind (Al, K, Ca, Fe, Mn etc.). Der Einfluß des organischen Kohlenstoffs sinkt bis zum Ende des Bt-Horizontes auf ein Minimum von $< 0,1$ Gew.-%.

Ti und Zr

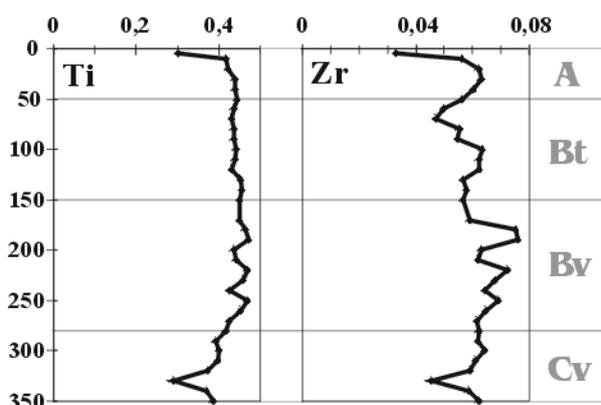


Abb. 4.15: Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an Ti und Zr (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen

Entscheidend für eine bilanzierende Betrachtung ist der Vergleich der untersuchten, variablen Parameter mit einer im Ausgangsmaterial vorhandenen Indexsubstanz, die verwitterungs- und verlagerungsresistent ist (SCHLICHTING & BLUME, 1961).

Strenggenommen muß die Indexsubstanz als eigene Phase in ihrer verlagerungsresistenten Korngrößenfraktion betrachtet werden, doch kann für halbquantitative Betrachtungen auch die Bestimmung eines Elements, das weder ausgewaschen noch zugeführt wird, wie Zr (KHAN, 1959) oder

Ti, herangezogen werden (SCHLICHTING & BLUME, 1961). Ti und Zr, das generell stärkeren Schwankungen unterliegt, haben ungefähr einen parallelen Tiefenverlauf (s. Abb. 4.15). Im Vergleich zum Ausgangsmaterial der Verwitterung (C-Horizont) sind folgende Effekte für die Gesamtgehalte von Ti und Zr zu beobachten:

- eine Konzentrationserhöhung durch die Entkalkung von A- und B-Horizont
- eine Verdünnung durch
 - angereicherte Tonminerale im Bt-Horizont (ca. 50–150 cm Tiefe)
 - organischen Kohlenstoff im obersten Profilverbereich
 - leichte Einmischungen von Buntsandstein-Material (z.B. in ca. 330 cm Tiefe)

Die im übrigen relativ gleichmäßigen Konzentrationsverläufe von Ti und Zr belegen die ursprüngliche Homogenität des Lößprofils. Ti ist dabei etwas gleichförmiger als Zr, da es auch in Tonmineralen enthalten ist.

Al, Fe, Mg und Mn

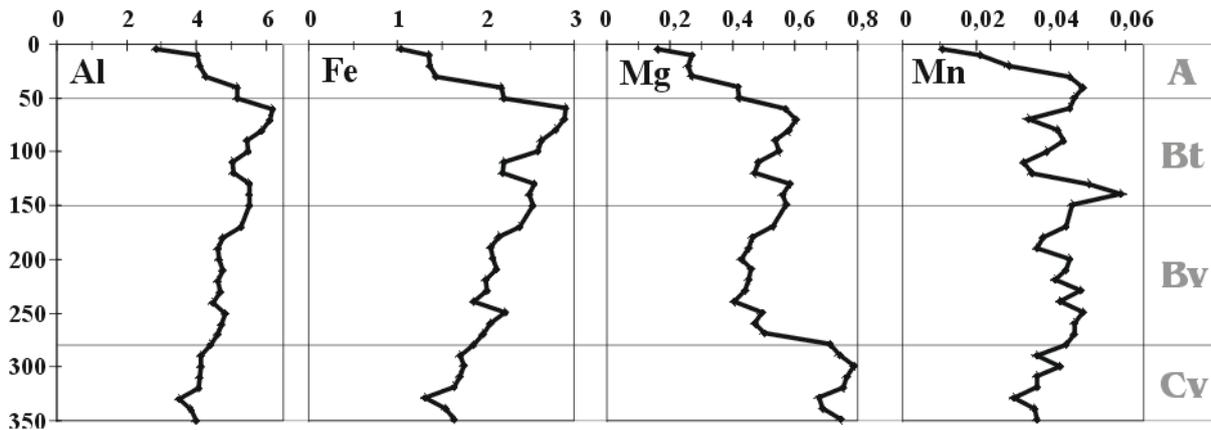


Abb. 4.16: Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an Al, Fe, Mg und Mn (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen

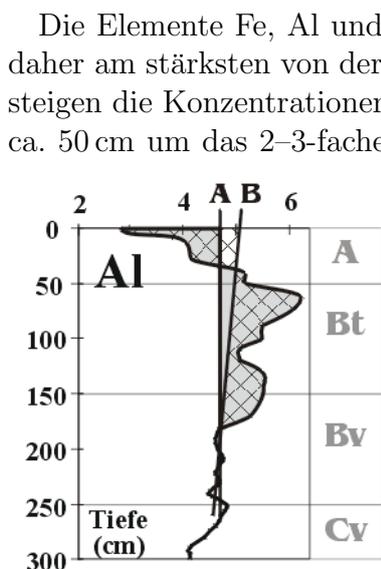


Abb. 4.17: Bilanzierung der Tonverlagerung anhand des Tiefenverlaufes der Gesamt-Al-Konzentrationen (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen

Die Elemente Fe, Al und Mg sind ganz wesentlich in der Tonfraktion angereichert und daher am stärksten von der Tonverlagerung betroffen (VEERHOFF, 1992). Im A-Horizont steigen die Konzentrationen dieser Elemente von der Profilloberfläche bis in eine Tiefe von ca. 50 cm um das 2–3-fache an. Unterhalb von ca. 50–60 cm Tiefe sinken die Al- und Fe-Gehalte bis zum unteren Ende des untersuchten Profils wieder ab (s. Abb. 4.16). Leichte Schwankungen in diesem Trend sind durch die variablen Quarz-Gehalte zu erklären. Mg folgt dem Trend von Al und Fe bis zum Beginn des Cv-Horizontes in ca. 270 cm Tiefe. Unterhalb der Entkalkungsgrenze ist zusätzliches Mg in Kalzit enthalten. Mn verhält sich prinzipiell ähnlich wie Al, Fe und Mg. Es unterliegt in bezug auf Transport und Ausfällung jedoch erheblich stärker dem Einfluß von pH und Eh (RedOx-Potential) und ist daher wesentlich variabler. Die leichte Verarmung aller hier beschriebenen Elemente in ca. 330 cm Tiefe ist auf eine Einmischung von Buntsandstein zurückzuführen (vgl. Abschn. 4.2.1).

Bei einem Vergleich der Al-Anreicherung im Bt-Horizont mit der Al-Verarmung im A-Horizont (s. Abb. 4.17) anhand der Konzentrationen (Gew.-%) mit dem Bv-Horizont als Referenz (Linie A) überwiegt die Anreicherung im Bt-Horizont die Wegfuhr im A-Horizont erheblich (graue Flächen). Unter Berücksichtigung der geringeren Dichte des Materials im A-Horizont, die eine niedrigere Al-Gesamtmenge bedeutet, ist die Diskrepanz etwas geringer. Bei der schwachen Hangneigung im Gelände und der Waldbedeckung ist kein bedeutender Abtrag an der Profilloberfläche zu erwarten. Möglicherweise unterlag der primäre Löß jedoch zur Zeit seiner Deposition einer kontinuierlichen Änderung seiner Zusammensetzung, die auf die ausgehende Eiszeit zurückzuführen ist: Abnehmende Windstärken und der zunehmende Abstand zum Eisrand aufgrund der

abschmelzenden Eiskappen bedingten geringere Anteile der größeren Kornfraktionen und damit eine relative Zunahme der Al- (auch Fe- und Mg-) reicheren Tonfraktion (Linie B).

Na, Ca, Sr und P

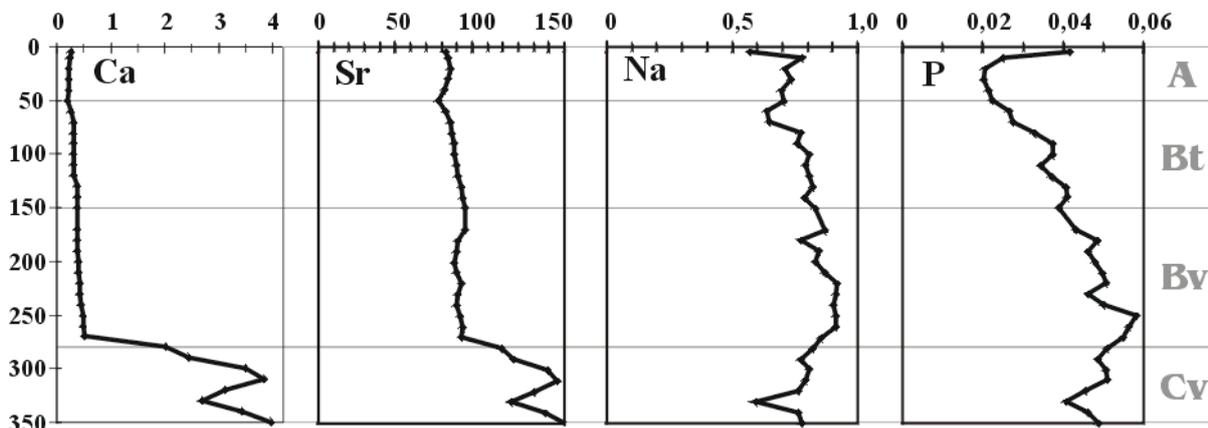


Abb. 4.18: Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an Na, Ca, Sr und P (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen

Verwitterungslabile Elemente wie Na, Ca, Sr und P deuten durch eine kontinuierliche Abnahme, die von der Entkalkungsgrenze bis zum oberen Profilende annähernd parallel

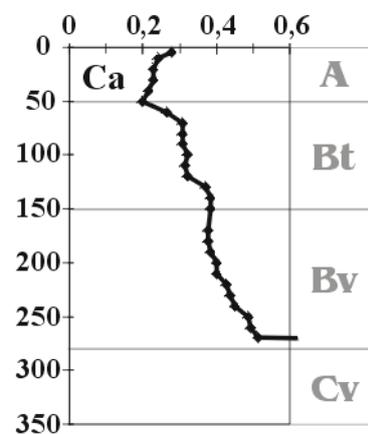


Abb. 4.19: Vergrößerte Darstellung des Tiefenverlaufes der Gesamt-Ca-Konzentrationen (Gew.-%) bis 0,6 Gew.-% im Lößprofil Reinhausen

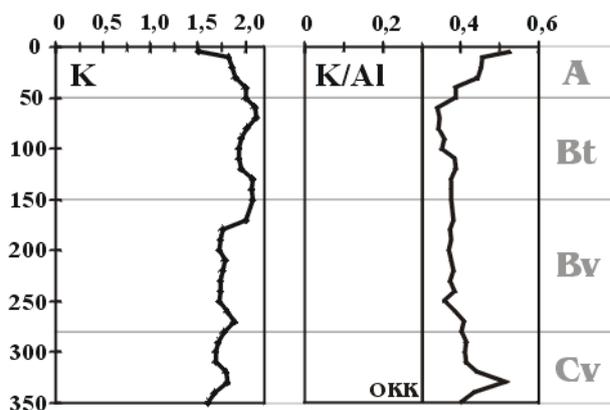
zum Boden-pH verläuft, einen zunehmenden Grad chemischer Verwitterung an (s. Abb. 4.18 und 4.19). Pflanzenphysiologische Prozesse können im oberen Bereich des A-Horizontes eine Anreicherung von Ca und P bewirken.

Ein leichter Konzentrationsprung aller vier Elemente zwischen A- und B-Horizont weist darauf hin, daß Ca, Na, Sr und P zumindest teilweise in der Tonfraktion gebunden oder adsorbiert sind bzw. im A-Horizont stärker mobilisiert wurden. Sie sind jedoch – sichtbar an der schwachen Korrelation mit Al – erheblich weniger physikalischen Umlagerungsprozessen wie der Tonverlagerung als vielmehr chemischen Lösungsprozessen unterworfen. Erstaunlich ist, daß P allenfalls schwach bevorzugt in den im Bt-Horizont angereicherten Fe-Oxidhydroxiden gebunden ist.

Unterhalb der Entkalkungsgrenze verhalten sich aufgrund der Kalzitdominanz Ca und Sr gegenläufig zu Na und P. Auch für die hier besprochenen Elemente hat die Sandstein-Einmischung in ca. 330 cm Tiefe einen Verdünnungseffekt (vgl. Abschn. 4.2.1).

K

K ist im Löß in erster Linie in Kalifeldspat und in Phyllosilikaten gebunden. Es gehört einerseits zu den Elementen, die bei einer chemischen Verwitterung von Silikaten im Vergleich



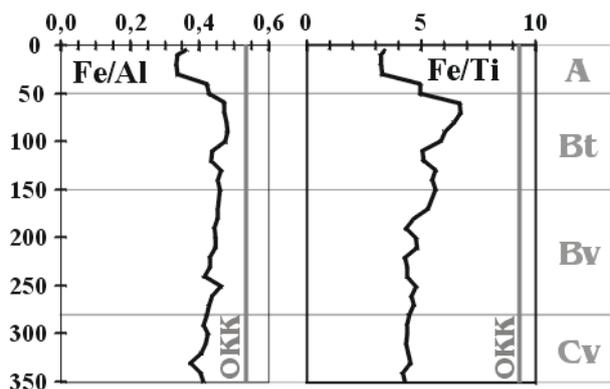
zu Al und Si bevorzugt weggelöst werden (HOLDREN & SPEYER, 1986; NAHON, 1991), andererseits ist es massiv von der Tonverlagerung betroffen, die im vorliegenden Profil deutlich ausgeprägt ist, so daß der Konzentrationsverlauf von K im Profil gewissermaßen eine Kombination der Tonverlagerungs- (vgl. Al, Fe etc.) und der Verwitterungsindikatoren (vgl. Na, Ca etc.) darstellt (s. Abb. 4.20). Dies kommt auch in dem Verhältnis K/Al zum Ausdruck, das vom C- zum oberen Ende des B-Horizontes leicht ab- (von ca. 0,45 auf 0,34), im A-Horizont bis zum oberen Profil-

Abb. 4.20: Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an K (Gew.-%) und der Verhältnisse der Gesamtgehalte von K zu Al im Lößprofil Reinhausen

ende dagegen wieder deutlich zunimmt (auf $> 0,5$). Dieser Verlauf erklärt sich bei einem weitgehenden Erhalt von Kalifeldspäten ($K/Al = 1,4$) durch die intensive Verlagerung von Tonmineralen ($K/Al \approx 0,5$ für einen typischen Illit, vgl. Tab. 4.1 auf S. 58; Smektite und Vermikulite liegen noch deutlich niedriger).

Elementverhältnisse

WEN ET AL. (1984) beschreiben Al im Löß-Milieu bei gemäßigttem Klima bis zur starken Versauerung als inert gegenüber



physikalischen oder chemischen Verwitterungsprozessen. Aus diesem Grunde wurde Al in zahlreichen Arbeiten als Maß für das Ausgangsmaterial der Verwitterung bei gemäßigten Klimaten herangezogen (ARAK & KYUMA, 1983; CHESTER ET AL., 1985; FENG, 1997). Demgegenüber betrifft die chemische Lösungsverwitterung zunächst Elemente wie Ca, Na, Sr, P und K. Da Fe nach der Meinung mehrerer Autoren (ARAK & KYUMA, 1983; WANG, 1987; FENG, 1997) unter oxidierenden Bedingungen besser angereichert werden kann als Al, wurde das Fe/Al-Verhältnis als Maßstab für die Intensität der chemischen Verwitterung verwandt. Bei niedrigen pH-Werten – wie im

Abb. 4.21: Tiefenverläufe der Verhältnisse der Gesamtgehalte von Fe/Al und Fe/Ti im Lößprofil Reinhausen. Als Referenz sind die Werte für die obere kontinentale Kruste (OKK) eingezeichnet (WEDEPOHL, 1984)

vorliegenden Profil im Bereich der intensivsten Verwitterung (A-Horizont) – ist die Löslichkeit von Fe (in Gegenwart von Ferrihydrit) allerdings höher als die von Al (LANGMUIR, 1997).

Während der Al-Pufferbereich bei höheren pH-Werten liegt als der Fe-Pufferbereich (ULRICH, 1986), kommen für den Anstieg des Fe/Al-Verhältnisses in dem hier bearbeiteten Profil von ca. 0,34 in den oberen 40 cm des Profiles auf ca. 0,48 im Bt-Horizont (s. Abb. 4.21) noch folgende Faktoren in Betracht:

- Eine Komplexierung durch organische Liganden, die vermutlich im wesentlichen aus dem Ah-Horizont stammen, könnte bevorzugt Fe in Lösung bringen. Hierfür kommen amorphe Oxid-Hydroxide, z.B. aus der Verwitterung von Biotit und Chlorit, in Betracht, die für eine Auflösung besonders anfällig sind. Die Ausfällung im Bt-Horizont ist vermutlich durch den höheren pH (H₂O)-Wert (um 5) und die teilweise Oxidation der organischen Liganden verursacht, was zum Überschreiten des Löslichkeitsproduktes amorpher Fe-Oxidhydroxide führt.
- Fe-haltige Tonminerale (Vermikulit, Smektit) sind bei einer Versauerung des Bodens weniger stabil als z.B. Illit und werden daher leichter aufgelöst (GLENN, 1960).
- Fe-haltige, quellfähige Tonminerale (v.a. Smektit, Vermikulit) sind von der Tonverlagerung aufgrund ihrer leichteren Dispergierbarkeit (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1992) bzw. ihrer meist geringeren Korngrößen (SCHLICHTING & BLUME, 1961; FÖLSTER ET AL., 1963; BLUME, 1964) stärker betroffen als nicht-quellfähige (v.a. Illit).

Ähnliche Ergebnisse liefert das Fe/Ti-Verhältnis, wobei sich Ti besonders als Referenzelement für das Ausgangsmaterial eignet (vgl. Abschn. 4.2.1). Da Ti nur zu geringen Teilen in der Tonfraktion enthalten ist, kommt der Bt-Horizont im Fe/Ti-Verhältnis deutlich zum Ausdruck.

4.2.2 Gesamtgehalte der Hauptelemente und Boden-pH im Bodenprofil im Solling

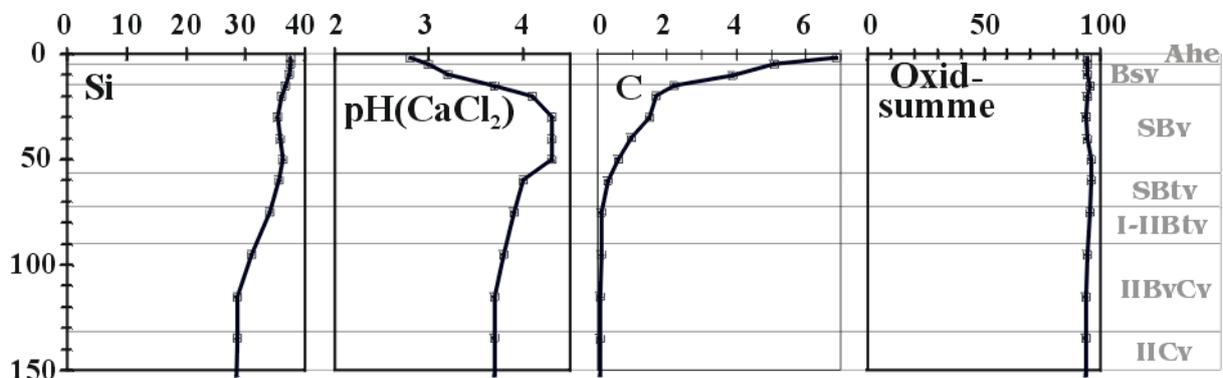


Abb. 4.22: Tiefenverläufe der $pH(CaCl_2)$ -Werte und der Gesamtgehalte an Si, C und der Summe der Hauptelement-Oxide (Gew.-%) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

Das vollständig entkalkte Bodenprofil im Solling zeigt anhand der pH -Werte einen deutlich höheren Versauerungsgrad als das Lößprofil Reinhausen (s. Abb. 4.22). Das schwach ausgeprägte $pH(CaCl_2)$ -Maximum in 20–40 cm Tiefe „läßt sich nur schwer mit der üblichen Vorstellung eines nach unten kontinuierlich zunehmenden pH -Wertes in Einklang bringen“ (GROSSKURTH, 1999). Porenlösungen dieses Profilabschnittes zeigen lokale Maxima der Al-, Mg-, Mn- und Na-Gehalte (SCHLABACH, 1996). Tonmineralanalysen ergeben in diesem Bereich eine besonders schlechte Kristallinität der illitschen Tonminerale (GROSSKURTH, 1999).

Der Wechsel in der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials kommt hier in der Zunahme der Si-Gehalte von ca. 30 Gew.-% unterhalb ca. 100 cm Tiefe (Tonstein) auf ca. 38 Gew.-% oberhalb ca. 70 cm Tiefe (Löß-Einfluß) zum Ausdruck. Vegetationsbedingt nehmen die C-Gehalte zum oberen Profilende hin stark auf ca. 7 Gew.-% zu.

Ti, Al, Fe, Mg und Mn

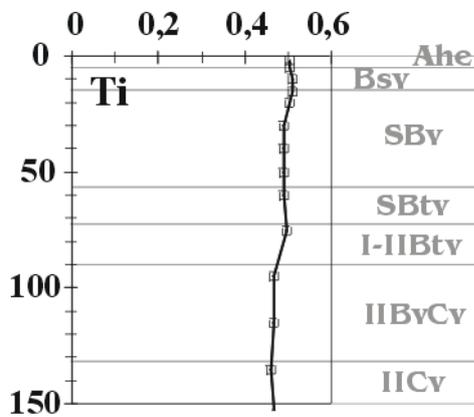


Abb. 4.23: Tiefenverlauf der Gesamtgehalte an Ti (Gew.-%) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

Einschränkungen in der generellen Zuverlässigkeit von Ti als Referenzelement für Ausgangsmaterial-Komponenten macht der Tiefenverlauf der Ti-Gehalte deutlich: Trotz eines massiven Wechsels der primären Gesteins-Substanz bleiben die Konzentrationen von Ti sehr konstant (s. Abb. 4.23).

Die Tiefenverläufe der Gehalte von Al, Fe, Mg und Mn werden dagegen sehr stark von dem Wechsel des Ausgangsmaterials dominiert (s. Abb. 4.24). Darüber hinaus sind der Stauwasser-Einfluß und die Ausbildung der Bodenhorizonte an einer deutlichen Abnahme von Al, Fe, Mg und Mn vom SBv über den Bsv zum Ahe-Horizont hin zu erkennen. Typisch für RedOx- und pH-bedingte Mobilisierung und Ausfällung von Fe und Mn im Stauwasser-

Milieu ist die Ausbildung getrennter Fe- bzw. Mn-Anreicherungs-lagen: Wegen seines negativeren RedOx-Potentials wird Mn schon in einem tieferen Profilvereich unter weniger stark oxidierenden Bedingungen als Oxid ausgefällt.

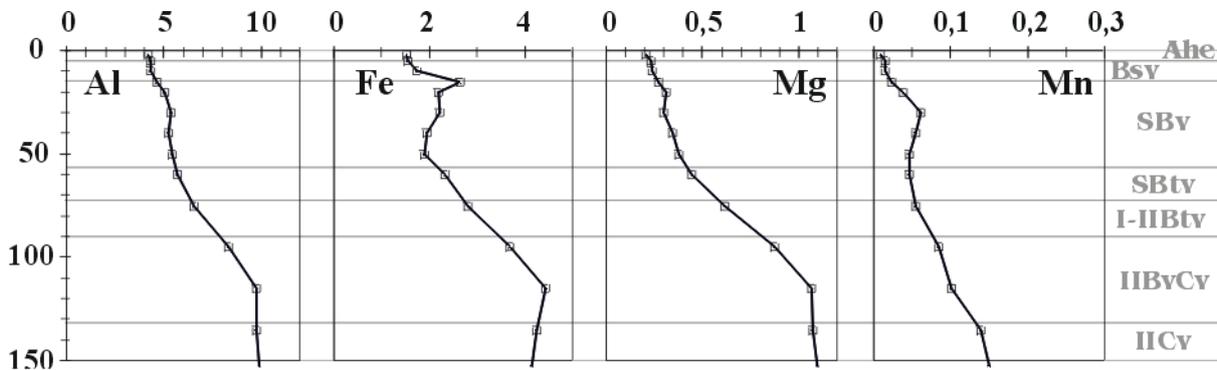


Abb. 4.24: Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an Al, Fe, Mg und Mn (Gew.-%) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

K, Ca, Na und P

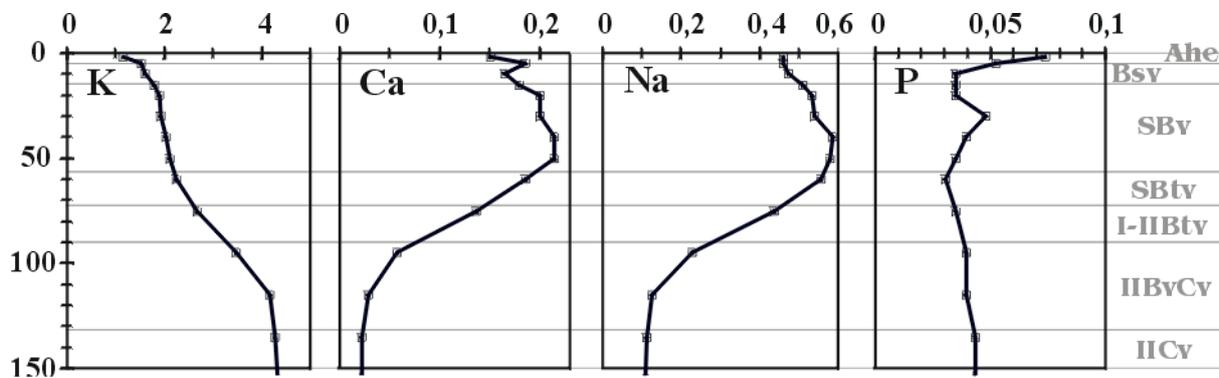


Abb. 4.25: Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an K, Ca, Na und P (Gew.-%) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

Den größten Einfluß auf die Tiefenverläufe der Gesamtgehalte an K, Ca und Na hat der Wechsel von dem K-reichen, Ca- und Na-armen Tonstein zu dem darüberliegenden Lößbetonten Profilbereich (s. Abb. 4.25). Auf Effekte der bodenbildenden Prozesse ist dagegen die Abnahme dieser drei Elemente von ca. 40 cm Tiefe bis zur Profilloberfläche zurückzuführen. Während die Vegetation eine P-Zunahme bewirkt, führt die chemische Verwitterung zu einer Wegfuhr von P. Vermutlich ist das lokale, schwache Minimum in ca. 10–20 cm Tiefe bei einer generellen Zunahme zur Profilloberfläche hin durch das Zusammenspiel dieser Prozesse zu erklären.

4.2.3 Chemische Bindungsformen der Hauptelemente

In der Annahme, daß amorphe bis schlechtkristalline Oxide und Oxidhydroxide von Si, Al und Fe aufgrund ihrer chemischen Reaktivität und ihrer großen Oberfläche die Eigenschaften von Böden wesentlich bestimmen, kommen in den Bodenwissenschaften routinemäßig chemische Extraktionsverfahren zur selektiven Bestimmung dieser Phasen zum Einsatz. In dieser Studie wird davon ausgegangen, daß die genannten Phasen in erster Näherung Verwitterungsneubildungen darstellen.

Extraktion der nichtsilikatischen Fe-Phasen mit Natrium-Dithionit und -Citrat im Lößprofil Reinhausen

Unter gemäßigt humiden Klimaten sind wasserfreie Fe-Oxide (v.a. Hämatit, Magnetit und Maghemit) nicht stabil und werden in einem Auflösungs-Wiederausfällungsprozeß zu Goethit, evtl. Lepidokrokit und/oder Ferrihydrit umgewandelt, wobei Goethit die stabilste Form darstellt und Ferrihydrit als Übergangsphase zu betrachten ist (SCHWERTMANN, 1971; CAMPBELL & SCHWERTMANN, 1984; SCHWERTMANN & TAYLOR, 1989). Pyrit wird unter reduzierenden Bedingungen gebildet und in einer oxidierenden Umgebung schnell zu hydroxidischen Fe-Phasen umgewandelt (ALLEN & HAJEK, 1989). Aus diesen

Gründen ist nichtsilikatisch gebundenes Fe in gut drainierten Lößböden in hydroxidischer bzw. oxidhydroxidischer Form (v.a. Goethit) zu erwarten.

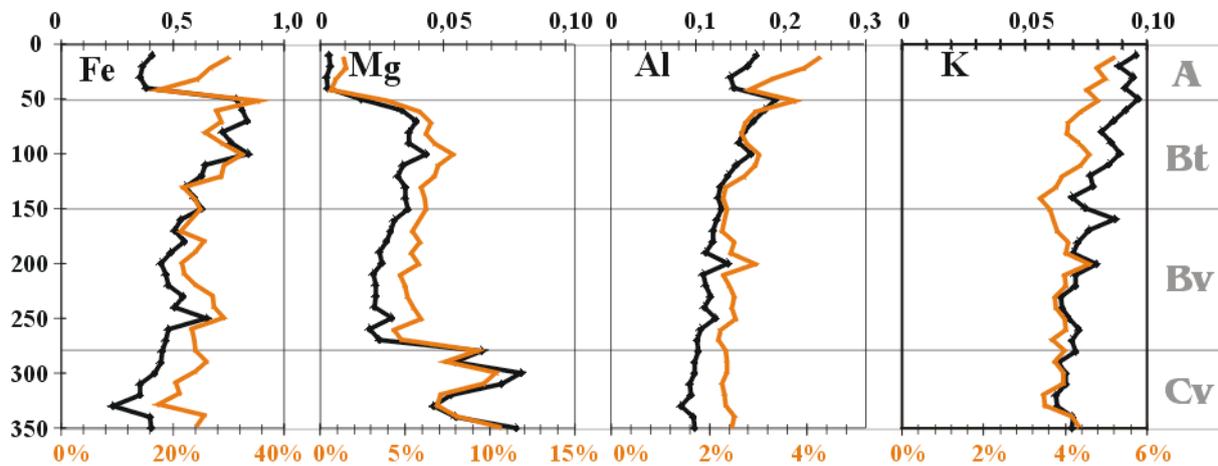


Abb. 4.26: Tiefenverläufe der Konzentrationen von Fe, Mg, Al und K (Gew.-%) in den Dithionit-Extrakten und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten (orange; in %; untere Skala) im Lößprofil Reinhausen

Die chemische Reduktion von Fe^{3+} zu Fe^{2+} und Komplexbildung mit Natriumdithionit und Natriumcitrat liefern die Summe des oxidischen und oxidhydroxidischen Fe im Boden (s. Abb. 4.26). Dieser Anteil läuft im Profil in erster Näherung parallel zu den Gesamtgehalten und beträgt im Mittel ca. 25 % des Gesamt-Fe. Schwankungen relativ zum Gesamtgehalt treten vor allem am Übergang vom A- zum Bt-Horizont auf. Im Bt-Horizont liegen die Fe-Anteile am Gesamtgehalt ca. 5–10 % höher als im A-, Bv- oder C-Horizont. Innerhalb des A-Horizontes ist eine leichte Zunahme des extrahierbaren Fe zum oberen Profilende hin in Relation zu den Gesamtgehalten angedeutet. Eine eventuelle verwitterungsbedingte Umbildung von silikatischem in oxidisches Fe, die eine Zunahme extrahierbarer Anteile zur Profilloberfläche hin erwarten läßt, ist anzunehmen. Möglicherweise wurden aber oxidhydroxidische Verwitterungsprodukte partikulär oder gelöst verlagert. Darauf könnten auch die höheren Fe-Gehalte im Bt-Horizont zurückzuführen sein.

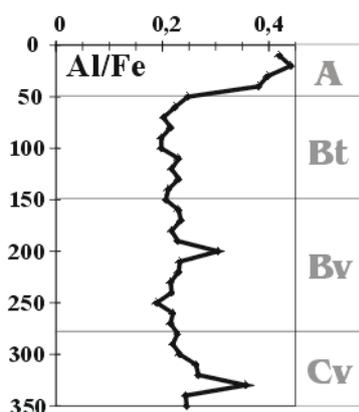


Abb. 4.27: Tiefenverlauf des Al/Fe-Verhältnisses in den Dithionit-Extrakten im Lößprofil Reinhausen

Die Dithionit-Extrakte wurden auch auf andere Hauptelemente hin analysiert: Mg verhält sich bei geringeren extrahierbaren Anteilen an den Gesamtgehalten qualitativ ähnlich zu Fe und ist bis 270 cm Tiefe wahrscheinlich in den Fe-Phasen gebunden. Im C-Horizont sind die Mg-Gehalte durch den Einfluß von Kalzit erhöht. Ein Anstieg der Al-Konzentrationen zeigt die Tonverlagerung an, doch ist noch ein weiterer Trend zu beobachten: Im Vergleich zu den Gesamtgehalten steigt der extrahierbare Al-Anteil von konstant ca. 2,2% im C-Horizont über ca. 2,8% im Bt-Horizont bis auf über 4% am oberen Profildende. Dies könnte auf eine verwitterungsbedingte Freisetzung von Al aus silikatischer Bindungsform zurückzuführen sein, das in oxidhydroxidischer Form wieder festgelegt wurde. Es wird angenommen, daß Fe-Oxidhydroxide bis ca. 20 Gew.-% Al – dies entspricht 30–40 Mol.-% – aufnehmen können (CORNELL & SCHWERTMANN, 1996). Im vorliegenden Fall liegen die Dithionit-extrahierbaren Al-Gehalte damit deutlich zu hoch für eine ausschließliche Bindung an Fe-Oxidhydroxide (s. Abb. 4.27).

Der Verlauf des K ist dem des Al hier sehr ähnlich; die extrahierbaren Anteile liegen dabei ca. 1% über denen des Al. Dies deutet vermutlich eine Anlösung von Silikaten an, die auch die hohen Al-Gehalte in den Extrakten erklären kann.

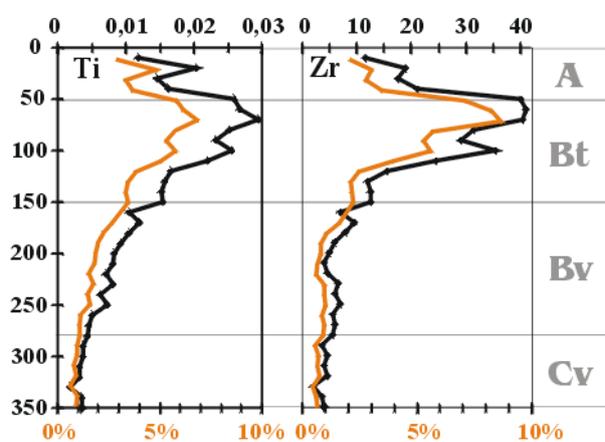


Abb. 4.28: Tiefenverläufe der Konzentrationen von Ti (Gew.-%) und Zr (mg/kg) in den Dithionit-Extrakten und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten (orange; in %; untere Skala) im Lößprofil Reinhausen

doch deutlich von den bodendynamischen Prozessen betroffen.

Bemerkenswert ist, daß Elemente, deren mineralische Bindungsformen als sehr stabil gegenüber der Verwitterung gelten, zu erheblichen Teilen in die Extraktionslösung gehen – wie z.B. Ti (bis 7% des Gesamt-Ti) und Zr (bis 9% des Gesamt-Zr; s. Abb. 4.28) – und den Bt-Horizont stark kontrastiert nachzeichnen. Ti und Zr sind u.a. auch in Fe-Phasen und Tonmineralen enthalten. Kolloide, die bei der Abtrennung der Extrakte in der Zentrifuge nicht erfaßt wurden, könnten z.T. für die hohen Ti- und Zr-Gehalte verantwortlich sein (vgl. Abschn. 4.2.3). Ti und Zr sind aber trotz relativ konstanter Gesamtgehalte im Profil (vgl. Abschn. 4.2.1) durch ihre teilweise Bindung an die Kolloidfraktion

der Verwitterung gelten, zu erheblichen Teilen in die Extraktionslösung gehen – wie z.B. Ti (bis 7% des Gesamt-Ti) und Zr (bis 9% des Gesamt-Zr; s. Abb. 4.28) – und den Bt-Horizont stark kontrastiert nachzeichnen. Ti und Zr sind u.a. auch in Fe-Phasen und Tonmineralen enthalten. Kolloide, die bei der Abtrennung der Extrakte in der Zentrifuge nicht erfaßt wurden, könnten z.T. für die hohen Ti- und Zr-Gehalte verantwortlich sein (vgl. Abschn. 4.2.3). Ti und Zr sind aber trotz relativ konstanter Gesamtgehalte im Profil (vgl. Abschn. 4.2.1) durch ihre teilweise Bindung an die Kolloidfraktion

Extraktion der „amorphen freien“ Oxidhydroxide von Al und Fe mit Ammoniumoxalat/Oxalsäure im Lößprofil Reinhausen

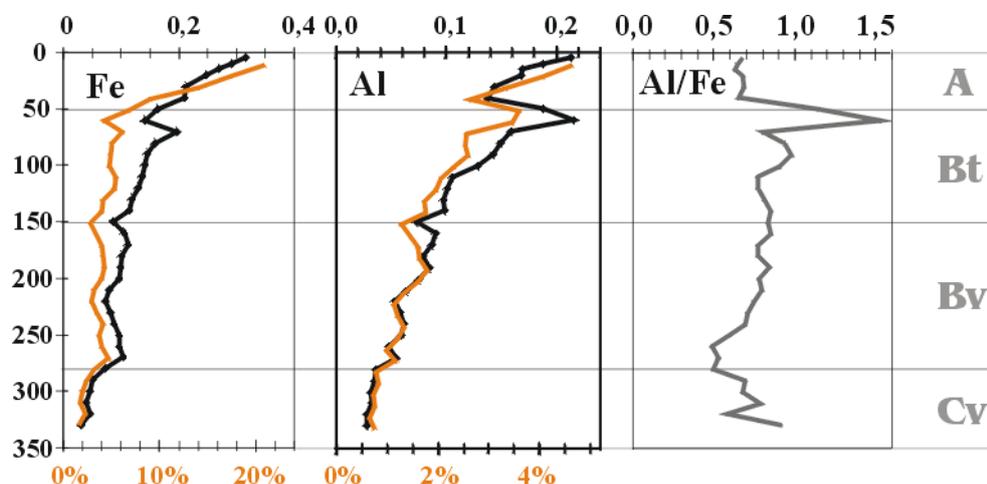


Abb. 4.29: Tiefenverläufe der Konzentrationen von Fe und Al (Gew.-%) und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten (orange; in %; untere Skala) sowie des Al/Fe-Verhältnisses in den Oxalat-Extrakten im Lößprofil Reinhausen

Die Oxalat-extrahierbaren Anteile von Fe liegen im C-Horizont bei ca. 3 %, im B-Horizont bei ca. 5 % und steigen im A-Horizont massiv auf > 20 % an (s. Abb. 4.29). Damit verhalten sie sich sehr unterschiedlich zu den Dithionit-Extrakten und lassen keine Abscheidung schlechtkristalliner Oxidhydroxide in tieferen Horizonten erkennen. Mit Ausnahme einer geringen Anreicherung in 40–70 cm Tiefe – der Bt-Horizont ist hier allenfalls schwach erkennbar – zeigen die Oxalat-extrahierbaren Anteile des Al einen ähnlichen Verlauf wie Fe. Sie nehmen von < 1 % des Gesamt-Al im C-Horizont auf > 4 % im A-Horizont zu.

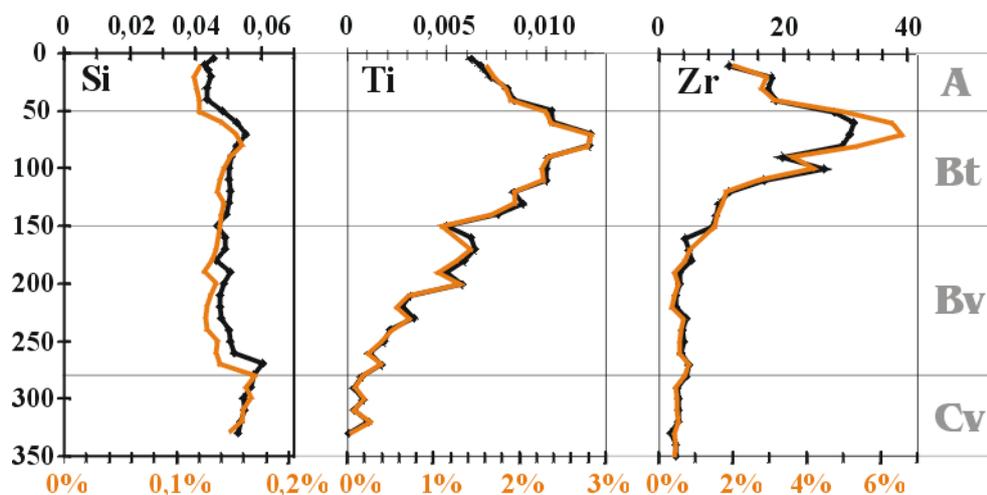


Abb. 4.30: Tiefenverläufe der Konzentrationen von Si, Ti (Gew.-%) und Zr (mg/kg) in den Oxalat-Extrakten und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten (orange; in %; untere Skala) im Lößprofil Reinhausen

In den Oxalat-Extrakten sind geringe Mengen Si (im Mittel ca. 0,05 Gew.-%) zu finden (s. Abb. 4.30), die qualitativ einen sehr ähnlichen Verlauf haben wie bei der Tiron-Extraktion (vgl. Abschn. 4.2.3). Sie weisen auf amorphe bis schlechtkristalline Si-Oxidhydroxide hin, die offenbar mit den amorphen freien Oxidhydroxiden von Fe und Al assoziiert sind.

Ti und Zr werden weniger stark gelöst als bei der Dithionit-Extraktion (ca. die Hälfte des Ti und ca. 3/4 des Zr in den Dith.-Lösungen), der Konzentrationsverlauf mit dem Maximum im Bt-Horizont ist aber sehr ähnlich. Die Oxalat-Extrakte waren vor der Messung abfiltriert und nicht wie die Dithionit-Extrakte in der Zentrifuge abgetrennt worden. Demzufolge handelt es sich entweder um sehr feine Ti- und Zr-haltige Kolloide (Fe-Oxidhydroxide, evtl. Tonminerale), die das Filterpapier fast ungehemmt passieren konnten, oder aber die Verwitterungsprozesse im Boden führen tatsächlich zu einem merklichen Angriff von Zirkon, Rutil etc..

Extraktion der schlechtkristallinen bis amorphen wasserhaltigen Oxidhydroxide von Si, Al und Fe mit Tiron im Lößprofil Reinhausen

Die Extraktion wurde ohne zusätzliche pH-Pufferung durchgeführt (KODAMA & ROSS, 1991). Der pH-Wert in der Extraktionslösung betrug nach dem Ansetzen 10,5. Unterhalb der Entkalkungsgrenze verursachte die pH-Pufferung durch Kalzit eine starke Abnahme der gemessenen Elemente in den Extraktionslösungen mit Ausnahme des Ca.

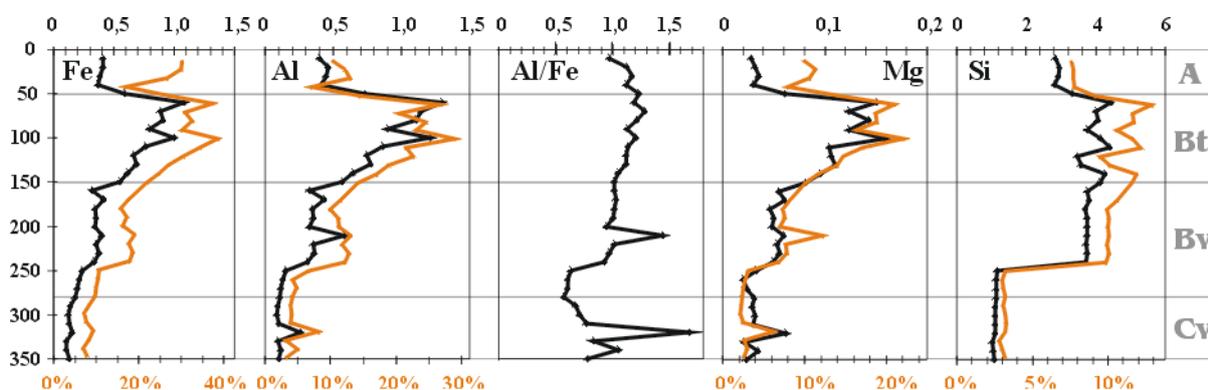


Abb. 4.31: Tiefenverläufe der Konzentrationen der untersuchten Hauptelemente (Gew.-%) in den Tiron-Extrakten und ihrer Verhältnisse zu den Gesamtgehalten (orange; in %; untere Skala) sowie des Al/Fe-Verhältnisses im Lößprofil Reinhausen

In den Tiron-Extrakten (s. Abb. 4.31) korrelieren Fe, Al und Mg mit einer starken Anreicherung im Bt-Horizont sehr gut miteinander. Bezogen auf die Gesamtgehalte werden bis ca. 40 % Fe sowie bis ca. 25 % Al und Mg gelöst. Die extrahierten Fe-Gehalte sind den Ergebnissen der Dithionit-Extraktion im A- und Bt-Horizont sehr ähnlich; im Unterschied zum Dithionit-Verfahren findet bei der Extraktion jedoch keine Reduktion, sondern nur eine Komplexierung des Fe statt (KODAMA & ROSS, 1991). In Bv- und C-Horizont wird hier deutlich weniger Fe extrahiert als beim Dithionit-Verfahren (ca. 20 % in bezug auf die Gesamt-Fe-Gehalte). Für Fe nimmt die Extraktion mit Tiron in der Effektivität eine

Zwischenstellung zwischen der Dithionit- und der Oxalat-Extraktion ein. Verwitterungsmisch beanspruchte Fe-Oxidhydroxide werden gelöst, während gutkristalline Phasen intakt bleiben. Das Material im A- und Bt-Horizont ist durch die Verwitterung stärker angegriffen als in größeren Profiltiefen (vgl. Oxalat-Extraktion, Abschn. 4.2.3). Die Fe-Oxidhydroxide, die im Bt-Horizont angereichert sind, stammen aus oberen Profilbereichen mit intensiver Verwitterung, weshalb die Tiron-Extraktion im Bt-Horizont die größten Fe-Mengen zu lösen vermag.

Die Si-Konzentrationen nehmen im Gegensatz zu Fe, Al und Mg im Bt-Horizont gegenüber dem Bv-Horizont nur sehr schwach zu. Si ist im A-Horizont gegenüber dem B-Horizont leicht verarmt. Anscheinend wird der Tiron-extrahierbare Teil des Si großteils unabhängig von Al- und Fe-Phasen von opalartigem Si bestimmt und liegt zu einem kleineren Teil an Fe-/Al-Oxidhydroxide assoziiert vor (vgl. Oxalat-Extraktionen, Abschn. 4.2.3). Unter dem Einfluß von Bio-Opal wären eigentlich größere Anteile an extrahierbarem Si im A-Horizont zu erwarten.

Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse der unterschiedlichen Extraktionsverfahren

Die Extraktion der Summe der Oxide und Oxidhydroxide (Natrium-Dithionit) von Fe liefert erwartungsgemäß die höchsten Anteile am Gesamt-Fe. Aufgrund des konstanten Anteils des Dithionit-löslichen Fe am Gesamt-Fe im gesamten Profil ist zu schließen, daß bei der Tonverlagerung keine bestimmten Fe-Phasen bevorzugt werden. Bei der Dithionit-Extraktion sollte überwiegend das Al in Fe-Oxiden erfaßt werden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1992). Im A-Horizont liegt das Al/Fe-Gewichtsverhältnis in den Extraktionen mit ca. 0,4 ungefähr doppelt so hoch, wie es für den maximalen Al-Einbau in Goethit als möglich angesehen wird (CORNELL & SCHWERTMANN, 1996). Nach CORNELL & SCHWERTMANN (1996) können ca. 36 Mol.-% des Fe in Goethit durch Al ersetzt werden, dies entspräche einem Gewichtsverhältnis von Al/Fe von 0,21. Unter dem A-Horizont liegt das Verhältnis bei ca. 0,2. Doch sind die hohen Al-Konzentrationen in den Dithionit-Extrakten auch angesichts der geringen Versauerung des Profils, die nötig wäre, um durch eine Al-Mobilisierung aus Tonmineralen zuerst das Al für den Einbau in Goethit zur Verfügung zu stellen, nicht über Fe-Oxide/Oxidhydroxide zu erklären. Ein Vergleich mit der Oxalat-Extraktion, die besser kristalline Fe-Phasen (z.B. Goethit) weitgehend unberührt läßt, zeigt, daß das Dithionit quantitativ sehr ähnliche Al-Mengen zu lösen vermag. Es ist daher davon auszugehen, daß entweder beträchtliche Al-Mengen aus Silikaten (möglicherweise angewitterten Tonmineralen) bzw. aus schlechtkristallinen Al-Oxidhydroxiden bei der Dithionit-Extraktion miterfaßt werden oder daß bei der Abtrennung der Extraktionslösungen vom Feststoff noch deutliche Kolloidmengen in Lösung bleiben.

Auffällig ist die Korrelation von Ti und Zr in Dithionit- und Oxalat-Extrakten mit Fe in den Dithionit- bzw. noch deutlicher mit Fe und Al in den Tiron-Extrakten. Die enge Assoziation von Ti und Fe-Oxidhydroxiden ist seit langem bekannt (RUPPERT, 1980; CORNELL & SCHWERTMANN, 1996), für Zr gilt ähnliches. Die Menge an extrahierbarem Ti und Zr ist jedoch bemerkenswert. Niedrige pH-Werte und die Einwirkung organischer

Komplexbildner dürften zur Mobilisierung im A-Horizont mit anschließender Ausfällung bzw. Anlagerung an feinkörnige Fe- bzw. Al-Phasen beigetragen haben.

Ein übliches Vorgehen in der Bodenkunde ist die sequentielle Extraktion von Fe bzw. Al mit immer stärker werdenden Extraktionsmitteln zur Bestimmung der Verteilung der Elemente auf die unterschiedlichen Bindungsformen. Ist genügend homogenes Probenmaterial vorhanden, so verspricht der Einsatz von jeweils frischer Probe für jeden Extraktionsschritt eine höhere Genauigkeit, da Effekte wie Materialverlust bzw. Verunreinigung bei der Trennung von Extrakt und Rückstand vermieden werden. Dementsprechend sind hier die gemessenen Fe- und Al-Konzentrationen im Gesamtmaterial (RFA), in den nichtsilikatischen (für Al schlechtkristallinen) Oxidhydroxiden (Tiron-Extraktion) sowie in den „amorphen, freien“ Oxidhydroxiden (Oxalat-Extraktion) aus unabhängigen Extraktionsgängen zusammengefaßt (s. Abb. 4.32).

Der Tiefenverlauf der Tiron-extrahierbaren Fe-Gehalte stellt anscheinend vor allem den von Verwitterung *und* Tonverlagerung betroffenen Teil der Fe-haltigen Phasen dar. Die Tonverlagerung hat einen wesentlichen Einfluß, doch die generelle Zunahme der Tiron-extrahierbaren Fe-Anteile vom C-Horizont ($\leq 10\%$) zum oberen Profilende hin (ca. 30–40 %) zeigt einen erheblichen Einfluß der Verwitterung auf die Änderung der Bindungsform des Fe im Boden an.

Das teils fast konträre Verhalten der (Oxalat-extrahierbaren) „amorphen, freien“ Oxidhydroxide von Fe mit einer starken Zunahme zum oberen Profilende (bis ca. 22 %

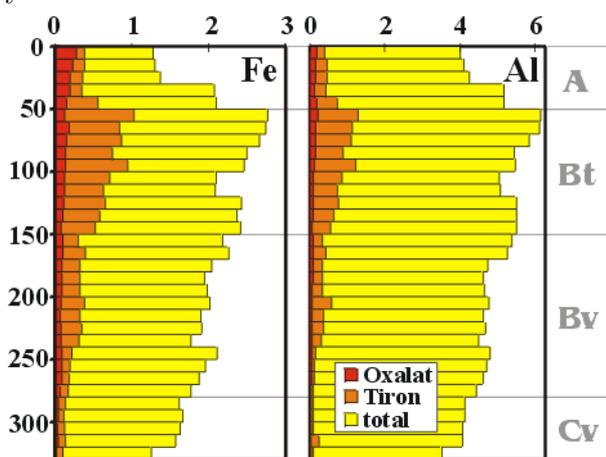


Abb. 4.32: Vergleich der Verteilung von Fe und Al (Gew.-%) in den untersuchten Extrakten im Lößprofil Reinhausen (die dargestellten Gehalte sind nicht gestapelt)

der Gesamtgehalte) scheint dagegen nahezu ausschließlich durch eine Umformung aus besser kristallinen Oxid-Phasen unter Beteiligung organischen Materials (Reduktion und/oder Komplexbildung mit anschließender Wiederausfällung) und auch durch Nachlieferung z.B. aus Biotiten und Chloriten erklärbar zu sein. Da hierfür organische Stoffe und/oder ein niedriger pH-Wert ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) \leq 4,3$) vonnöten ist bzw. sind, finden diese Reaktionen fast ausschließlich im A-Horizont statt. Die Verteilung der Oxalat-löslichen Fe-Phasen ist also durch chemische Lösungsprozesse (Verwitterung) gesteuert. Während der chemischen Verwitterung durchläuft das Fe offensichtlich mehrere Stadien von Bindungsformen unterschiedlicher Stabilität. Ursprüngliche, gutkristalline Fe-Phasen sind weder mit Tiron noch mit Oxalat extrahierbar, in einem Zwischenstadium können Fe-Phasen mit Tiron, nicht aber mit Oxalat gelöst werden, während stärker verwitterte Fe-Phasen auch durch Oxalat extrahiert werden können.

Prinzipiell ähnlich verhält sich Al im Vergleich der (Tiron-extrahierbaren) „schlechtkristallinen bis amorphen wasserhaltigen“ Oxidhydroxide mit den (Oxalat-extrahierbaren)

der Gesamtgehalte) scheint dagegen nahezu ausschließlich durch eine Umformung aus besser kristallinen Oxid-Phasen unter Beteiligung organischen Materials (Reduktion und/oder Komplexbildung mit anschließender Wiederausfällung) und auch durch Nachlieferung z.B. aus Biotiten und Chloriten erklärbar zu sein. Da hierfür organische Stoffe und/oder ein niedriger pH-Wert ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) \leq 4,3$) vonnöten ist bzw. sind, finden diese Reaktionen fast ausschließlich im A-Horizont statt. Die Verteilung der Oxalat-löslichen Fe-Phasen ist also durch chemische Lösungsprozesse (Verwitterung) gesteuert. Während der chemischen Verwitterung durchläuft das Fe offensichtlich mehrere Stadien von Bindungsformen unterschiedlicher Stabilität. Ursprüngliche, gutkristalline Fe-Phasen sind weder mit Tiron noch mit Oxalat extrahierbar, in einem Zwischenstadium können Fe-Phasen mit Tiron, nicht aber mit Oxalat gelöst werden, während stärker verwitterte Fe-Phasen auch durch Oxalat extrahiert werden können.

„amorphen, freien“ Oxidhydroxiden. Die Prozesse der Tonverlagerung (sichtbar vor allem in den Tiron-Extrakten) und der Lösungs-Verwitterung (sichtbar vor allem in den Oxalat-Extrakten) überlagern sich hier gegenseitig deutlich.

Zusammenfassend belegen die Extraktionen im Zuge der Bodenbildung nach der Lößablagerung eine chemische Transformation („Verwitterung“) und einen kolloidalen Transport (evtl. auch Lösungstransport mit anschließender Wiederausfällung) von Al, Fe, Mg, Ti und Zr. Generell ist bei vergleichenden quantitativen Betrachtungen aber zu berücksichtigen, daß aus ähnlichem Verhalten unterschiedlicher Elemente in den Extraktionslösungen nicht zwingend auf entsprechende Element-Assoziationen im Boden geschlossen werden kann, da die thermodynamische Stabilität jedes Elementes in jeder Phase während des Extraktions-Vorganges zahlreichen individuellen Faktoren (pH, RedOx-Milieu, gelöste Spezies etc.) unterliegt. Assoziierte Elemente können bei der Extraktion zwar mit freigesetzt werden, anschließend jedoch in anderer Form wieder ausfallen. Quantitative Betrachtungen und Bilanzierungen können zuverlässig nur für diejenigen Elemente angestellt werden, für deren Phasen das jeweilige Extraktionsverfahren optimiert wurde. Von Nachteil ist ebenfalls, daß die Verfahren nicht oberflächenspezifisch sind und die zu extrahierenden Kornüberzüge bis hin zur intakten Mineraloberfläche in Lösung bringen. Reale Phasen an der Grenzfläche Feststoff/Porenlösung sind hiermit nicht zu erfassen. Allerdings ist im komplexen Bodenmilieu auch nicht zu erwarten, daß sich die vielfältigen Elementvariationen der Gesamtanalysen und Extraktionen anhand weniger, konstant zusammengesetzter „Master-Phasen“ erklären lassen. Neben Oxiden und Oxidhydroxiden variabler Kristallinität von Fe, Al und evtl. Si sind hier mit Sicherheit auch illitische/smektitische Tonminerale als „Elementträger“ oder auch als pures Substrat für die Ausfällung beteiligt.

4.2.4 Effektive Kationenaustauschkapazität im Lößprofil Reinhausen

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) beschreibt die Belegung der Phasenoberflächen mit austauschbar gebundenen Kationen und gibt (u.a. anhand der Basensättigung) Hinweise auf die Bodenversauerung und auf die Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen. Die Kationenaustauschkapazität liegt in der Präsenz zugänglicher, negativ geladener Oberflächen begründet. In lößbürtigen Böden wird sie wesentlich von Tonmineralen, insbesondere quellfähigen wie Smektiten, Huminstoffen und feinkörnigen oxidischen und oxidhydroxidischen Phasen gewährleistet. Die Basensättigung gibt den Anteil der austauschbar gebundenen basischen Kationen (v.a. Ca, Mg, K, Na) an. Bei einer Bodenversauerung werden verstärkt saure Kationen (v.a. Al, H) angelagert.

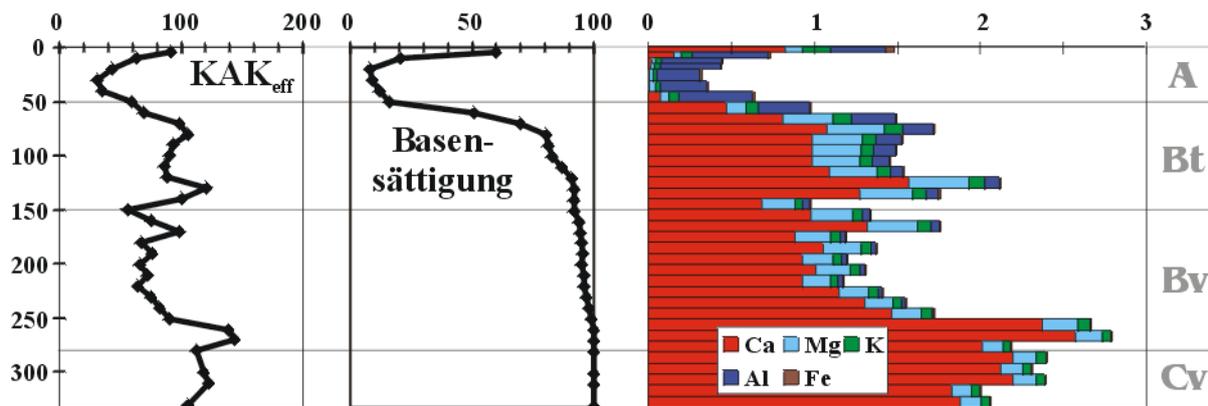


Abb. 4.33: Tiefenverläufe der effektiven Kationenaustauschkapazität (mval/kg), der Basensättigung (%) und der Konzentrationen der austauschbar gebundenen Elemente (g/kg) im Lößprofil Reinhausen

Im kalzitgesättigten C-Horizont schwankt die KAK_{eff} bei einer 100 %-igen Basensättigung im Bereich von ca. 120 mval/kg (s. Abb. 4.33). Es ist anzunehmen, daß die belegbaren Oberflächen hier vollständig abgesättigt sind. Oberhalb der Entkalkungsgrenze liegen die Werte deutlich niedriger. Im Bv-Horizont schwanken die KAK_{eff} -Werte um ca. 70 mval/kg, im Bt-Horizont liegen sie wegen des höheren Angebots an Austauschoberflächen wieder etwas höher bei im Mittel ca. 90 mval/kg. Die Basensättigung sinkt dagegen stetig bis in den Al-Horizont (5–50 cm Tiefe). An der Bv-Bt-Grenze liegt sie bei ca. 90 %, im oberen Bereich des Bt-Horizontes (ca. 50–70 cm Tiefe) nimmt sie bis zu einem Minimum im Al-Horizont (< 10 %) rapide ab. Der Anteil der sauren Kationen wird nahezu ausschließlich von Al gestellt, die molaren H_3O^+ -Gehalte liegen um mehrere Zehnerpotenzen niedriger. Das Minimum der KAK_{eff} mit ca. 30 mval/kg liegt ebenfalls im Al-Horizont, der einerseits aufgrund der Tonauswaschung kein großes Reservoir an Austauschoberflächen mehr bietet und andererseits versauerungsbedingt (pH(H_2O)-Werte um 4,3) erhebliche Teile austauschbar gebundener Kationen verloren hat. Organische Substanz und pflanzenphysiologische Prozesse bedingen im Ah-Horizont wiederum eine kräftige Zunahme sowohl der KAK_{eff} (ca. 90 mval/kg) als auch der Basensättigung (ca. 60 %).

4.2.5 Effektive Kationenaustauschkapazität im Bodenprofil im Solling

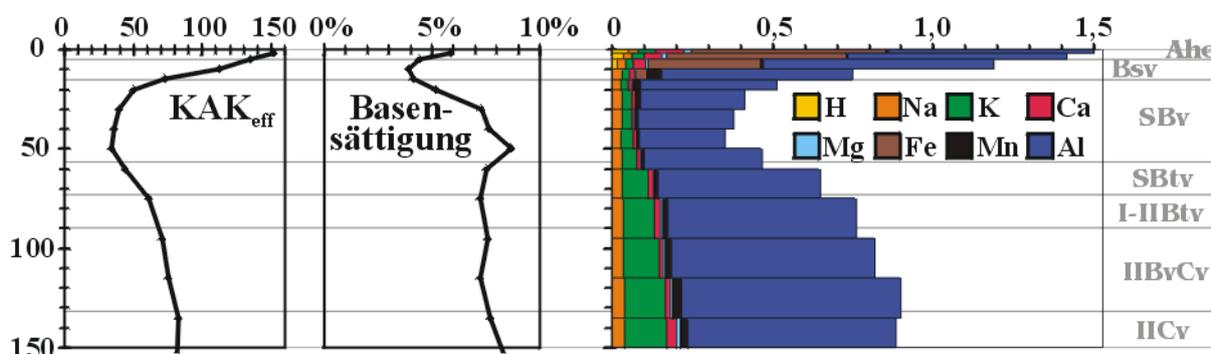


Abb. 4.34: Tiefenverläufe der effektiven Kationenaustauschkapazität (mval/kg), der Basensättigung (%) und der Konzentrationen der austauschbar gebundenen Elemente (g/kg) im Bodenprofil im Solling

Innerhalb des Löß-betonten Bereiches des Bodenprofils im Solling nimmt die effektive Kationenaustauschkapazität oberhalb von ca. 50 cm Tiefe zur Profilloberfläche hin stetig von 34 mval/kg auf ca. 150 mval/kg zu (s. Abb. 4.34). Dies ist in dem versauerten Boden auf die organische Substanz zurückzuführen (vgl. C-Gehalte; Abschn. 4.2.2); von Tonmineralen ist hier kein erheblicher Anteil an der KAK_{eff} zu erwarten. Al ist (im gesamten untersuchten Profilvergleich) das dominante Austauscherkation, oberhalb von ca. 10 cm Tiefe gewinnt auch Fe an Einfluß. Die Basensättigung erreicht maximal 8–9 %, oberhalb von 50 cm Tiefe nimmt sie bis auf ca. 4 % ab. Eine leichte Zunahme der Basensättigung in den obersten 5 cm des Profils ist auf pflanzenphysiologische Prozesse zurückzuführen.

Unter dem Einfluß des tonig-siltigen Buntsandsteins in den Misch-Fließerden erreicht die KAK_{eff} unterhalb von ca. 50 cm Tiefe wieder mittlere Werte von ca. 80 mval/kg. Bei sehr geringen C-Gehalten (< 0,1 Gew.-% unterhalb von 100 cm Tiefe) deutet dies auf austauschfähige Tonminerale hin.

4.2.6 Gleichgewichtsbodenlösung und Porenlösung

In Böden wird generell kein Gleichgewichtszustand erreicht, doch ergibt die Analyse von Sicker- bzw. Porenwasser im Boden in Zusammenhang mit den thermodynamischen Stabilitätsbedingungen der vorhandenen Mineralphasen Aufschluß darüber, welche Minerale in Kontakt mit der Lösung gebildet werden können und welche metastabil erhalten sind.

Für das Solling-Profil liegen Analysen abgepreßter Porenlösungen (SCHLABACH, 1996), für das Reinhausen-Profil Analysen von Gleichgewichts-Bodenlösungen vor. Beide liefern vergleichbare Ergebnisse, wie bei Paralleluntersuchungen festgestellt werden konnte.

In den Stabilitätsdiagrammen für K^+ , pH und H_4SiO_4 (s. Abb. 4.35) sowie für Na^+ bzw. Ca^{2+} , pH und H_4SiO_4 (s. Abb. 4.36) liegen die gemessenen Konzentrationen aller untersuchten (kalkfreien) Profilschnitte klar im Kaolinit-Feld.

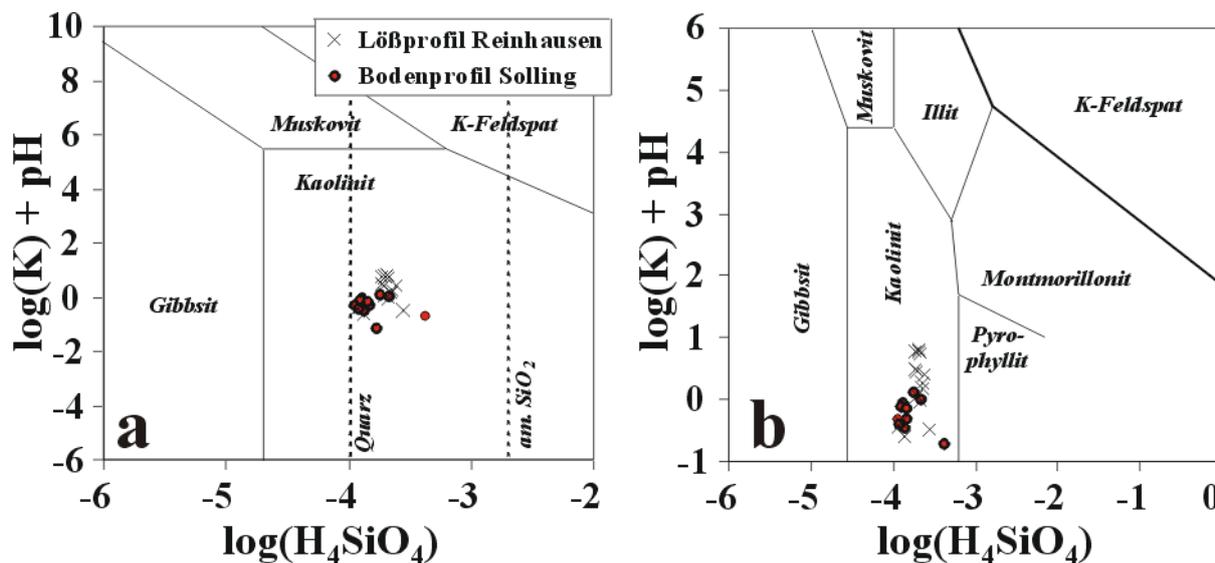


Abb. 4.35: Analysen der Gleichgewichts-Bodenlösungen (mol/l) aus dem kalkfreien Bereich des Lössprofils Reinhausen und der abgepreßten Porenlösungen (bis 5,45 MPa Preßdruck; mol/l) aus dem Bodenprofil im Solling (SCHLABACH, 1996) in einem Gleichgewichtsdiagramm für $\log([K^+]/[H^+])$ gegen $\log[\text{H}_4\text{SiO}_4]$ bei 25° C und 1 bar mit den Stabilitätsfeldern (a) für Gibbsit, Muskovit, Kaolinit, Quarz, Kalifeldspat und amorphes SiO_2 (LANGMUIR, 1997) sowie (b) zusätzlich für Illit, Pyrophyllit und Montmorillonit (GARRELS, 1984)

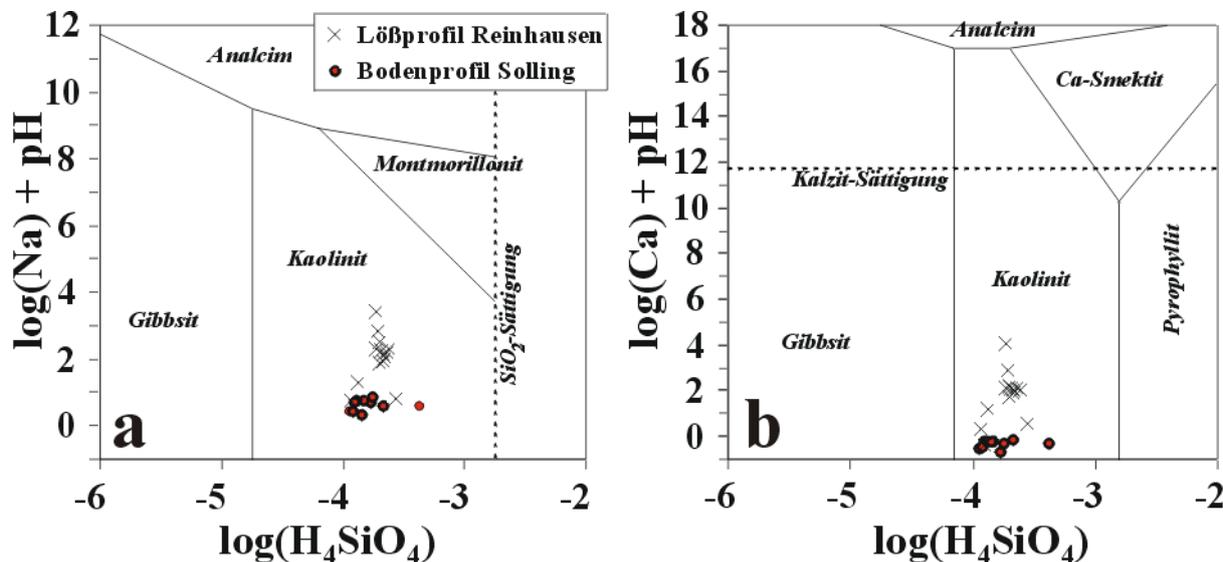


Abb. 4.36: Analysen der Gleichgewichts-Bodenlösungen (mol/l) aus dem kalkfreien Bereich des Lössprofils Reinhausen und der abgepreßten Porenlösungen (bis 5,45 MPa Preßdruck; mol/l) aus dem Bodenprofil im Solling (SCHLABACH, 1996) (a) in einem Gleichgewichtsdiagramm für $\log([Na^+]/[H^+])$ gegen $\log[\text{H}_4\text{SiO}_4]$ (BRICKER & GARRELS, 1965) und (b) in einem Gleichgewichtsdiagramm für $\log([Ca^{2+}]/[H^+])$ gegen $\log[\text{H}_4\text{SiO}_4]$ (NESBITT & WILSON, 1992) bei 25° C und 1 bar mit den Stabilitätsfeldern für Gibbsit, Kaolinit, Analcim, Montmorillonit und amorphes SiO_2 bzw. Ca-Smektit und Pyrophyllit

Die Si-Gehalte der Lösungen erklären das Wachstum von Quarz, amorphes SiO_2 (z.B. Grasopal) löst sich unter diesen Bedingungen dagegen ebenso wie Kalzit auf. Nach der Gleichgewichts-Thermodynamik ist eine Neubildung von Illit oder Smektit bzw. Montmorillonit aufgrund der Ergebnisse der Lösungsmessungen hier nicht möglich. Nach der Ostwald'schen Stufenregel ist jedoch mit Rücksicht auf die Oberflächenenergien der Mineralphasen eine metastabile Erhaltung von Illit möglich, der nach den mineralogischen Befunden in allen Horizonten der beiden untersuchten Profile vorhanden ist. Auch die Bildung von Illit aus verwitterndem Glimmer als metastabile Übergangsphase ist so möglich, dennoch stellt Kaolinit hier das stabile Endprodukt der chemischen Verwitterung dar.

4.3 Chemische und mineralogische Charakterisierung des Stoffbestandes im Mikrobereich

Die bodenbildenden Prozesse einschließlich der chemischen Verwitterung wirken am stärksten auf die Tonfraktionen wegen ihrer großen Oberflächen und ihrer Verlagerbarkeit ein. Für die Ermittlung von Art und Umfang der chemischen und mineralogischen Veränderungen im Laufe der Entwicklung des Bodens ist daher neben den Oberflächen von Mineralkörnern die feinkörnige Matrix von besonderem Interesse. Diese stammt zu einem großen Teil schon aus dem „frischen“ Löß, zum Teil wurde sie auch während der Verwitterung größerer Minerale oder durch Kristallisation aus der Lösung gebildet.

Direkte Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung im Mikrometerbereich unter Erhalt der originalen Kornstruktur werden durch den Einsatz der Elektronenstrahl-Mikrosonde ermöglicht. Systematische Analysen und Vergleiche der Oberflächenbereiche bzw. feinkristalliner Abscheidungen oder Aufwachsungen unterschiedlicher größerer Mineralkörner untereinander und mit der Matrix lieferten keine erkennbaren Zusammenhänge zwischen der Zusammensetzung feinkristalliner Substanz und dem jeweils benachbarten Mineralkorn bzw. „Trägermineral“. Eventuell auftretende verwitterungsbedingte *in situ*-Neubildungen bzw. Residualschichten auf Kornoberflächen sind bei der analytischen Auflösung der Mikrosonde von wenigen μm nicht zu erfassen, oder aber sie wurden durch Sickerwasserbewegungen mobilisiert und homogenisiert bzw. von den Tonverlagerungsprozessen überdeckt. Sehr oberflächensensitive XPS- (X-Ray Photoelectron Spectrometry) und XANES- (X-Ray Analysis Near Edge Spectrometry) Messungen bestätigen die chemische und phasenanalytische Übereinstimmung der Oberflächenzusammensetzung bei Quarzen und Pauschalproben am Lößprofil Reinhausen (DOYLE ET AL., 1999; RUPPERT & GLASOW, 2000). Somit können die Untersuchungen auf „reine“ Matrixbereiche und die Oberflächen von Quarzkörnern konzentriert werden. Hier fließt lediglich Si als verdünnende Komponente in die Messung ein. Mit einer ausreichenden Anzahl von Einzelanalysen ($n > 50$) lassen sich einerseits Mineralkomponenten in der Matrix identifizieren und andererseits die mittlere Zusammensetzung der Matrix sowie kompositorische Variationen mit der Profiltiefe ermitteln. Organisches Material und Kunstharz, das den Porenraum füllt und die vergleichsweise lockere Struktur der Matrix stabilisiert, sowie H_2O verdünnen die anorganische (Mineral-)Substanz – C und H können an der Mikrosonde nicht gemessen werden –, so daß die Summen der Oxide der analysierten Hauptelemente Si, Al, Fe, K, Ca, Mg, Na, Ti und Mn meist unter 80 Gew.-% liegen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Summen der gemessenen Element-Oxide auf 100 Gew.-% normiert und anschließend von Oxid- in Element-Konzentrationen umgerechnet. Die Analysen der Matrix ergeben sehr variable Ergebnisse für die einzelnen Elemente, so daß die Darstellung in Elementpaaren günstiger für die Interpretation ist als die separate Betrachtung der Elementkonzentrationen. Auf diese Weise können anhand von Korrelationen oder Antikorrelationen Verdünnungseffekte und einzelne Phasen sowie Änderungen in der Zusammensetzung von Phasen im Profilverlauf identifiziert werden. In Abb. 4.37 sind beispielhaft die auf 100 % normierten Analysen für jeweils zwei ausgewählte Elemente einer Probe aus 55–60 cm Tiefe

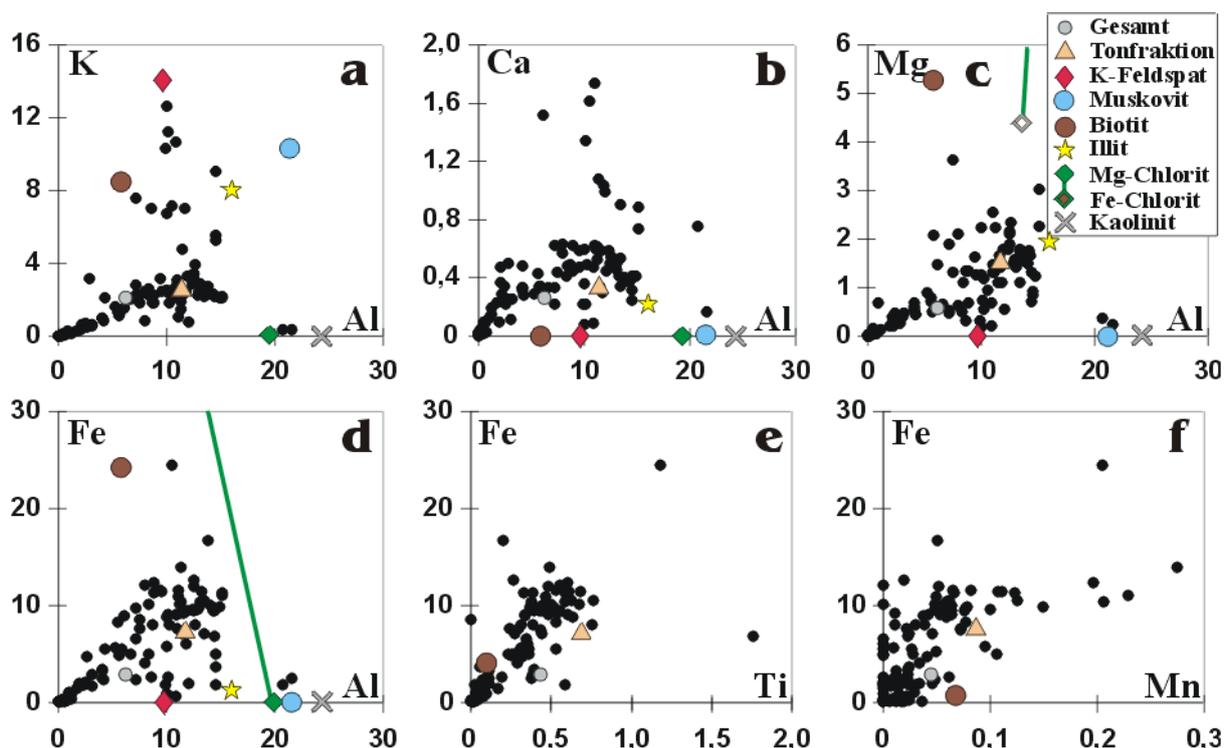


Abb. 4.37: Scattergramme ausgewählter Elementgehalte (Gew.-%) der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in 55–60 cm Tiefe des Lößprofils Reinhausen

des Lößprofils Reinhausen gegeneinander geplottet.

Zur Orientierung sind die darstellenden Punkte für Kalifeldspat und Kaolinit in der Grafik für K/Al (s. Abb. 4.37 a) sowie für einen Illit in die Grafiken für K/Al, Ca/Al, Mg/Al, Fe/Al und Fe/Ti (s. Abb. 4.37 a, b, c, d und e) eingezeichnet. Die Formeln der eingezeichneten Referenzpunkte sind in Tab. 4.1 angegeben.

Tab. 4.1: Chemische Summenformeln der Referenzpunkte in den Scattergrammen der Mikrosonden-Analysen

Quarz	SiO_2
Kalifeldspat	KAlSi_3O_8
Muskovit	$\text{KAl}_2[(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$
Illit	$[\text{K}_{0,77}\text{Na}_{0,01}\text{Ca}_{0,02}][\text{Al}_{1,63}\text{Fe}_{0,05}\text{Mg}_{0,3}\text{Ti}_{0,04}][(\text{OH})_2\text{Al}_{0,6}\text{Si}_{3,4}\text{O}_{10}]$
Biotit	$\text{K}(\text{MgFe}_2)[(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$
Clinochlor (idealisiert)	$(\text{Mg}_5\text{Al})[(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}](\text{OH})_8$
Fe-Chlorit (Kittrick (1982))	$(\text{Mg}_{1,05}\text{Fe}_{3,29}\text{Al}_{1,60})[(\text{Si}_{2,47}\text{Al}_{1,53})\text{O}_{10}](\text{OH})_8$
Kaolinit	$\text{Al}_2[(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5]$
Goethit	FeOOH

Die (meßtechnisch bedingten) mehr oder weniger großen Quarz-Anteile der Analysenwerte bewirken (als verdünnende Komponente im Ursprung) Scheinkorrelationen für alle

Elementpaare. Des weiteren sind als Komponenten Kaolinit, eine Ti-Fe-Phase (vermutlich Ilmenit) und Kalifeldspat deutlich zu erkennen. Der Kalifeldspat-Trend ist dabei analog zu Quarz auf die Anregung gröber kristalliner, detritischer Komponenten in der Matrix zurückzuführen.

Abgesehen von diesen Trends zu konkreten Phasen erscheint die Matrix im wesentlichen homogen zu sein, die mittlere Zusammensetzung entspricht in etwa einer Mischung von Illit mit Smektiten und/oder Vermikuliten bzw. entsprechenden Wechsellagerungsformen. Entsprechende Ergebnisse liefert die Phasenanalyse am Röntgendiffraktometer (vgl. Abschn. 4.4.1). Auf die chemische Summenformel von Illit bzw. Smektit bezogen, enthält sie ca. 0,3–0,4 molare Einheiten K, 1,5–2,0 molare Einheiten Al, 0,14–0,16 molare Einheiten Mg und maximal 0,5–1,0 molare Einheiten Fe – letzteres ist zum großen Teil auch in Fe-Oxidhydroxiden gebunden, wie die chemischen Extraktionen zeigen (vgl. Abschn. 4.2.3). Für eine exakte Differenzierung einzelner Tonmineralphasen ist die analytische Auflösung der Mikrosonde zu grob.

In Tab. 4.2 sind die Analysenergebnisse typischer Matrix-Zusammensetzungen sowie einiger Meßpunkte dargestellt, die besonders hohe Anteile einzelner Phasen enthielten.

Tab. 4.2: Mikrosonden-Analysen (Gew.-%, auf 100 % normiert) an Meßpunkten mit hohen Anteilen spezifischer Phasen sowie typischer Matrix-Zusammensetzungen im Lößprofil Reinhausen

Tiefe	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	Ti	Horiz.	Bemerkung
15–20	9,56	0,00	0,09	14,1	0,00	n.n.	0,01	30,3	0,01	A	Kalifeldspat
245–250	10,6	0,80	0,08	0,18	0,01	n.n.	8,70	31,2	0,01	Bv	Albit
285–290	0,065	69,2	0,53	0,21	0,48	0,06	0,07	0,48	0,00	Cv	Kalzit
245–250	0,030	0,058	0,18	0,02	0,01	0,02	0,02	0,22	59,4	Bv	Rutil
215–220	12,6	0,018	1,39	9,93	0,30	n.n.	0,53	28,5	0,15	Bv	Muskovit
245–250	23,2	0,19	0,63	0,10	0,32	n.n.	0,05	25,3	0,06	Bv	Kaolinit
15–20	0,50	0,012	25,0	0,09	0,03	1,92	0,01	0,41	35,8	A	Ilmenit
55–60	1,12	0,18	0,81	0,12	14,9	0,01	0,14	29,9	0,09	Bt	Mg-Silikat
245–250	9,32	1,22	13,1	0,13	11,5	0,13	0,47	19,5	0,07	Bv	Fe-Mg-Al-Silikat 1
15–20	12,8	0,053	20,2	0,07	10,3	0,30	0,00	13,7	0,03	A	Fe-Mg-Al-Silikat 2
285–290	3,35	1,39	59,1	0,01	0,43	0,12	0,00	2,71	0,31	Cv	Fe-Oxidhydroxid
215–220	7,64	0,95	34,8	0,37	4,08	0,09	0,06	12,5	0,24	Bv	Fe - Si
285–290	8,20	2,64	9,38	1,81	1,28	19,5	0,35	17,4	0,20	Cv	Mn-Konkretion
245–250	0,22	45,3	0,55	0,10	0,11	0,04	0,02	1,04	19,6	Bv	Ti - Ca
5–10	15,6	0,28	6,44	3,27	1,15	0,03	0,18	25,3	0,45	A	Matrix [Al]
55–60	13,1	0,50	9,30	2,85	1,42	0,06	0,12	26,2	0,38	Bt	Matrix [Bt]
215–220	18,9	0,66	5,02	0,02	0,37	0,03	0,03	25,8	0,09	Bv	Matrix [Bv]
285–290	12,1	1,30	7,18	2,91	1,42	0,03	0,22	27,2	0,32	Cv	Matrix [Cv]

Um Tiefenverläufe der Matrixzusammensetzung zu ermitteln, wurden an der Mikrosonde repräsentative Proben ausgewählter Horizontbereiche untersucht, die die chemischen Veränderungen der Matrix deutlich zeigen sollten. Im C-Horizont (Probe aus 285–290 cm Tiefe) sind die pH-Werte durch die Kalzitpufferung stabilisiert, im Sickerwasser herrschte hier noch kein Protonenüberschuß. Die Entkalkungsgrenze ist scharf ausgeprägt (vgl. Ab-

schn. 4.2.1). Dies bedeutet, daß das Sickerwasser beim Durchlaufen der Bodensäule durch die Auflösung des primären Kalzits sehr schnell mit Ca gesättigt wird und einem starken pH-Anstieg unterliegt. Um festzustellen, welchen Effekt diese plötzliche Änderung der Sickerwasser-Zusammensetzung auf die Bodenmatrix hat, wurde der Bereich der Entkalkungsgrenze sehr eng beprobt (Proben aus 285–290 cm, 265–270 cm und 245–250 cm Tiefe). Des weiteren wurden Proben aus allen Bodenhorizonten untersucht:

- Bv-Horizont: Proben aus 215–220 cm und 165–170 cm Tiefe
- Bt-Horizont: Proben aus 115–120 cm und 55–60 cm Tiefe
- Al-Horizont: Probe aus 15–20 cm Tiefe
- Ah/Al-Horizont: Probe aus 5–10 cm Tiefe. Aufgrund der geringen Mengen an freier Matrix sind die Analysen hier auf die dünnen Überzüge (meist $< 5 \mu\text{m}$) auf Quarzkörnern beschränkt.

Nach Möglichkeit wurden reine Matrixbereiche analysiert. Das Material aus 0–5 cm Tiefe (Ah-Horizont) enthält neben zahlreichen organischen Partikeln – vor allem detritischem Pflanzenmaterial – zu wenig freie Matrix für die Messungen.

Unter den anorganischen Bestandteilen der Matrix stellen meist illitische, smektitische und vermikulitische Tonminerale sowie Kaolinit die silikatischen Hauptkomponenten der Tonfraktion in Böden bei gemäßigt humidem Klima dar (vgl. Abschn. 1, S. 12), des weiteren sind im wesentlichen Oxide und Oxidhydroxide von Fe, Al und Si zu erwarten. Neben der „physikalischen“ Tonverlagerung über das Sickerwasser findet im Laufe der Bodenbildung ein beachtlicher Säureeintrag aus der Atmosphäre statt. In der weiteren Entwicklung des Bodens kommen zunehmend auch organische Säuren aus der Vegetation bzw. der Humusaufgabe hinzu. Da eine säurebedingte Silikatverwitterung zu einer bevorzugten Wegfuhr der Erdalkali- und Alkalikomponenten führt, ist in dem Löß-Bodenprofil mit Zunahme der Verwitterungsdauer eine Abnahme an Alkalien und Erdalkalien von unten nach oben im Profil zu erwarten.

Die im folgenden beschriebenen Befunde der chemischen Analysen stehen in Einklang mit den Ergebnissen der röntgendiffraktometrischen Phasenanalyse (vgl. Abschn. 4.4.1 und 4.4.2).

4.3.1 K- und Al-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen

Neben der im vorigen Abschnitt erläuterten, in etwa illitischen Zusammensetzung der feinkörnigen Matrix zeigen die deutlich höheren K- und Al-Gehalte in den Horizonten Bv–C (in den Mikrosonden-Analysen ab etwa 215 cm Profiltiefe) mit der Tiefe zunehmende Anteile von Muskovit an. Dieser scheint chemisch kaum angegriffen und im wesentlichen durch mechanische Zerkleinerung in die feinkörnige Matrix gelangt zu sein. Vor allem in tieferen Profilmereichen (ab ca. 200 cm) weisen die Analysen mit den höchsten Al-Gehalten auf den darstellenden Punkt des Kaolinit, der demnach bereits im primären Lößmaterial

enthalten ist. Kaolinit ist typisch für tropische und subtropische Verwitterungsbedingungen.

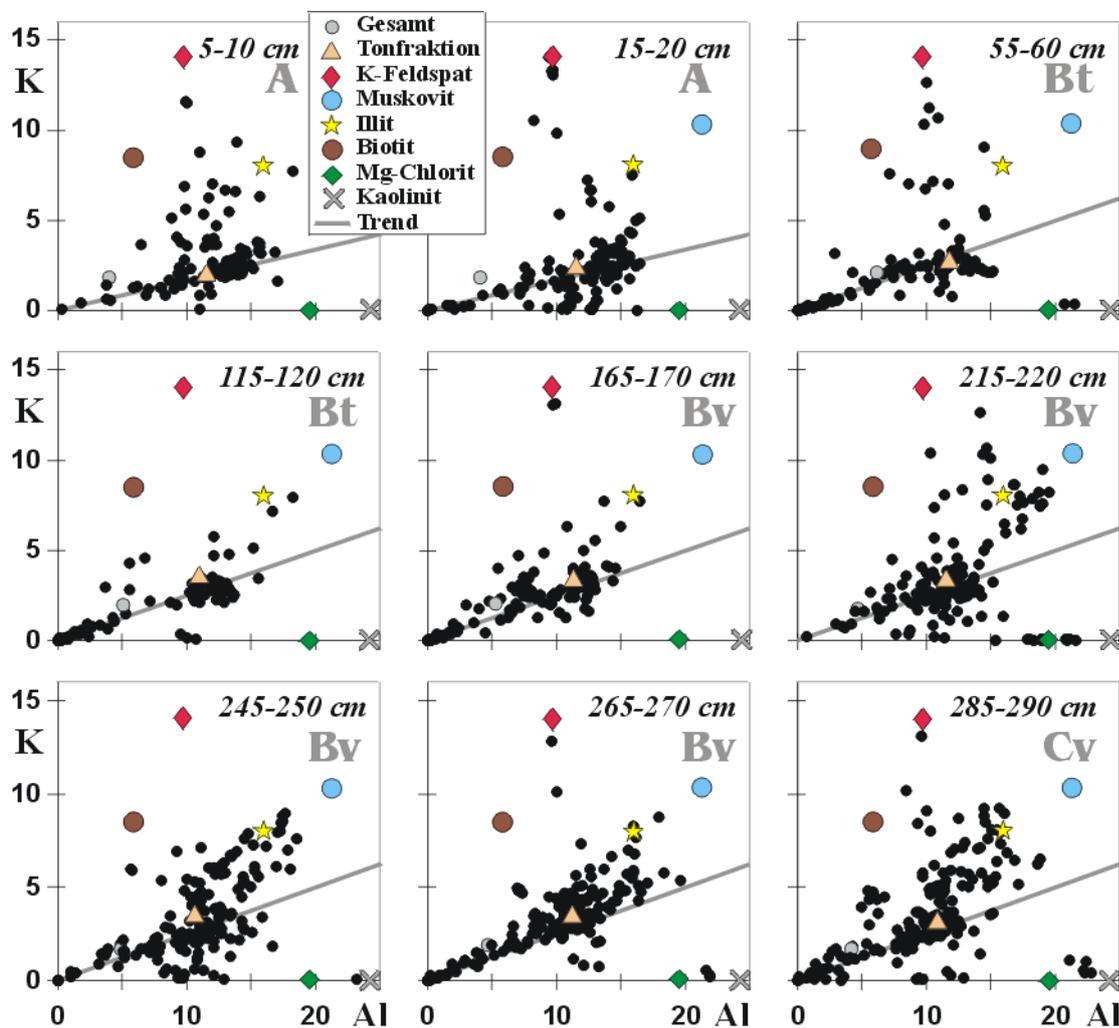


Abb. 4.38: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an K und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen

Die in Abb. 4.38 eingezeichneten (grafisch ermittelten) Trends der K/Al-Verhältnisse sollen die K-Abfuhr relativ zu Al veranschaulichen; bis in etwa 20 cm Tiefe beträgt das K/Al-Verhältnis ca. 1:6, darunter ist das K/Al-Verhältnis im Rahmen der Meßgenauigkeit konstant (K/Al ca. 1:4). Im obersten Profildbereich (bis etwa 20 cm Tiefe) verlagert sich der „Schwerpunkt“ der Analysenwerte der Matrix zu leicht höheren Al-Konzentrationen (> 15 Gew.-%). Es ist anzunehmen, daß dies auf die versauerungsbedingte Bildung von Al-reichen Boden-Chloriten hindeutet. Während Illit als Hauptkomponente der Matrix im gesamten Profil erhalten ist, werden leichter verwitterbare Tonmineralphasen (Smektit, Vermikulit, Wechsellagerungen) im obersten Profildbereich schon massiv angegriffen (vgl. Abschn. 4.4.1). Aus diesem Grunde ändern sich die K- und Al-Gehalte der Matrix nur

mäßig.

4.3.2 K- und Al-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling

Die feinkörnige Matrix im Bodenprofil im Solling ist ähnlich zusammengesetzt wie im Lößprofil Reinhausen. Sie ist aber generell dichter gepackt (vgl. Abschn. 4.1.2) und aufgrund geringerer Anteile an detritischem Quarz und Feldspat homogener zusammengesetzt. In Tab. 4.3 sind einige Mikrosonden-Analysen dargestellt.

Tab. 4.3: Mikrosonden-Analysen (Gew.-%, auf 100 % normiert) an Meßpunkten mit hohen Anteilen spezifischer Phasen sowie typischer Matrix-Zusammensetzungen im Bodenprofil im Solling

Tiefe	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	Ti	Horiz.	Bemerkung
2-5	8,41	0,20	47,3	0,38	0,18	4,19	0,06	4,07	0,77	Ahe	Al-Fe-Oxidhydroxid
73-90	13,9	0,32	10,20	0,80	8,01	0,25	0,12	20,0	0,75	I-IIBtv	Mg-Fe-Chlorit
0-2	15,4	0,25	4,60	5,33	1,60	0,04	0,14	25,3	0,41	Ahe	Matrix [Ahe]
2-5	13,5	0,10	10,0	3,14	1,47	0,01	0,11	24,8	0,39	Ahe	Matrix [Ahe]
5-10	13,9	0,55	7,39	4,39	0,99	0,01	0,27	25,2	0,72	Bsv	Matrix [Bsv]
23-30	16,7	0,11	7,86	3,42	1,51	0,09	0,14	23,0	0,55	SBv	Matrix [SBv]
40-50	16,6	0,07	7,11	7,29	1,20	0,32	0,38	21,6	0,18	SBv	Matrix [SBv]
57-65	17,2	0,07	6,68	3,24	1,48	0,21	0,10	23,2	0,88	SBtv	Matrix [SBtv]
73-90	15,4	0,05	4,63	6,76	1,68	0,01	0,20	24,5	0,33	I-IIBtv	Matrix [I-IIBtv]
132-150	14,2	0,05	4,74	6,31	2,29	0,02	0,32	25,4	0,16	IICv	Matrix [IICv]

Zum Vergleich sind die gleichen Referenzpunkte wie beim Lößprofil Reinhausen in die Plots eingezeichnet (vgl. Tab. 4.1 auf S. 58). Eine K- und Al-reiche Muskovit-Komponente ist nahezu im gesamten Profilverlauf nachzuweisen (s. Abb. 4.39).

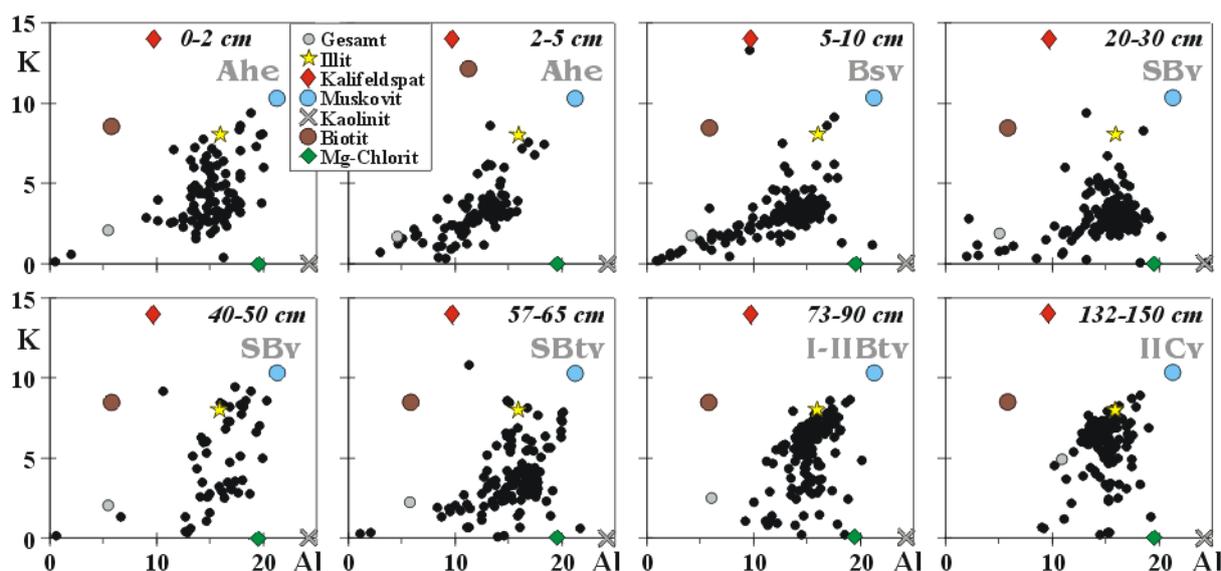


Abb. 4.39: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an K und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling

Die vergleichsweise hohen und stärker streuenden K-Gehalte im Ahe-Horizont (0–5 cm Tiefe) sind auf Pflanzenaktivität zurückzuführen. Der Bsv-Horizont und der obere Bereich des SBv-Horizontes sind sehr homogen zusammengesetzt und entsprechen analog zum Lößprofil Reinhausen einer Mischung aus Illit und K-armen Komponenten der Tonfraktion. In Zusammenhang mit dem höheren Versauerungsgrad lassen aber die Al-Konzentrationen, die in A- und B-Horizont des Sollingprofils höher liegen als in Reinhausen, auf höhere Anteile an sekundärem Al-Chlorit schließen. Illitische Tonminerale werden hier als Gemisch aus Illiten und unregelmäßigen Wechsellagerungen von Illiten mit bodenchloritischen Phasen angenommen, eigenständige Vermikulit- und Smektitminerale konnten nicht nachgewiesen werden (GROSSKURTH, 1999). Nach der Bodenansprache dominiert bis in 73 cm Tiefe der Löß die Bodenzusammensetzung, doch lassen die chemischen Analysen bereits unterhalb von ca. 40 cm Tiefe einen zunehmenden Einfluß von Sand- und Tonsteinen erkennen, vermutlich in Zusammenhang mit den Stauwasser-Bedingungen. Bei ca. 40–65 cm Bodentiefe streuen die K- und Al-Gehalte wieder stärker und weisen K-reichere Tonmineral- bzw. Glimmerkomponenten auf. Unterhalb von 73–90 cm Tiefe ist der Tonstein dominant für die Matrix-Zusammensetzung.

4.3.3 Ca- und Al-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen

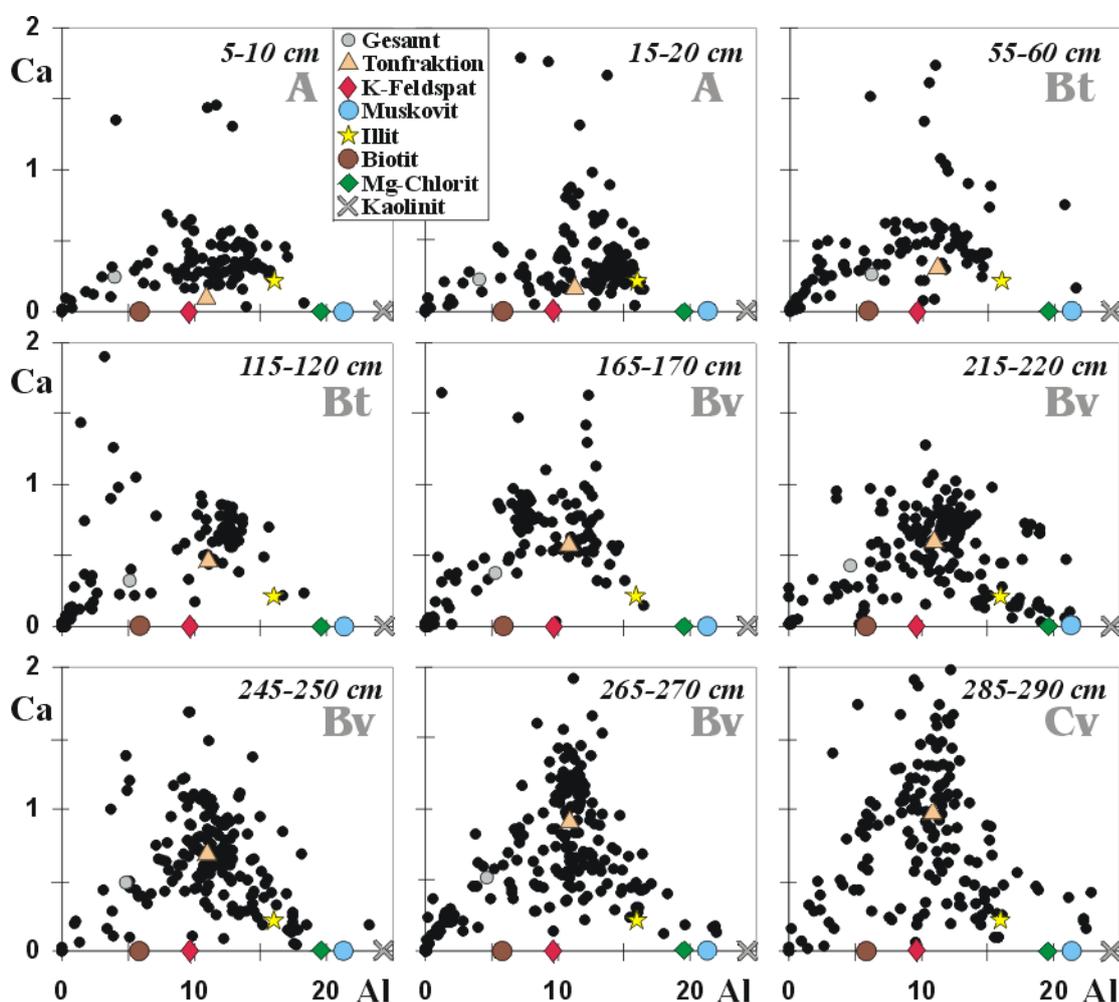


Abb. 4.40: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Ca und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen

Analog zu den K/Al-Plots zeigen auch die Grafiken für Ca und Al (s. Abb. 4.40) eine Abnahme des leichter löslichen Ca mit geringerer Profiltiefe. Allerdings ist Ca schon in größerer Profiltiefe (erkennbar ab ca. 250 cm Tiefe) in stärkerem Ausmaß als K von der Weglösung betroffen. Das Ca/Al-Verhältnis nimmt von ca. 1:10 auf ca. 1:20 ab. An der Entkalkungsgrenze liegen die Analysen der Matrix (sowohl im kalkhaltigen als auch im kalkfreien Bereich) bei ca. 0,5–1,5 Gew.-% Ca; im A-Horizont (bis ca. 20 cm Tiefe) betragen sie ca. 0,2–0,6 Gew.-% Ca. Plagioklas spielt als detritischer Ca-Träger eine viel geringere Rolle als Kalifeldspat für K. Ca liegt in der Matrix offensichtlich zu einem wesentlichen Anteil austauschbar gebunden vor, in B- und C-Horizont stellt Ca den überwiegenden Anteil der austauschbar gebundenen Kationen (vgl. Abschn. 4.2.4). Ein großes Ca-Angebot im Sickerwasser während der Entkalkungsphase dürfte zunächst zu einer verstärkten Festlegung, z.B. in smektitischen Tonmineralen, geführt haben. Im Anschluß an die vollständige

Entkalkung wurde vermutlich das fixierte Ca von den nun Ca-armen Sickerwässern wieder aus der Feinfraktion herausgelöst. Unterhalb des Bt-Horizontes (ca. 150 cm Tiefe) zeichnet sich mit zunehmender Tiefe immer stärker eine bimodale Verteilung zwischen einer sehr Ca-armen Komponente, die mit dem darstellenden Punkt des Muskovit zusammenfällt, und einem Material, das bei Al-Gehalten von ca. 7–14 Gew.-% ca. 0,5–1,0 Gew.-%, in tieferen Bereichen bis ca. 1,5 Gew.-% Ca enthält. Wie die K-Befunde zeigt dies für die Horizonte Bv und C einen deutlichen Anteil von Muskovit in der Matrix an. Die Ca-reiche Komponente weist auf smektitische Tonminerale als Ca-Träger in der Matrix hin.

4.3.4 Ca- und Al-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling

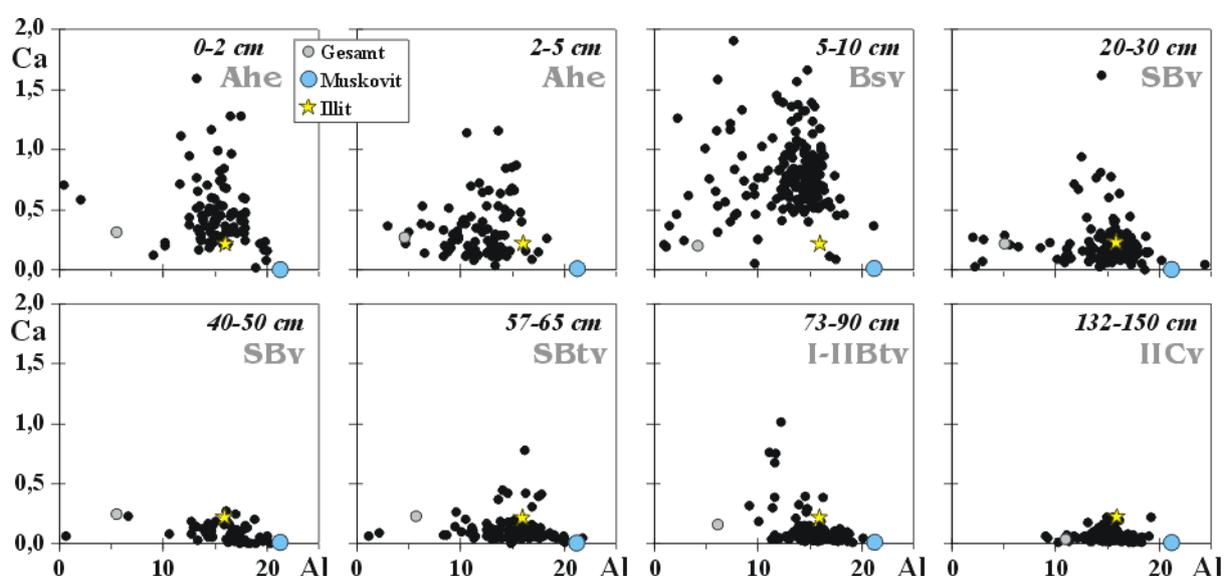


Abb. 4.41: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Ca und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling

Bis in ca. 10 cm Tiefe enthält die Matrix im Solling-Profil deutlich größere Ca-Mengen als in größerer Tiefe und als das Lößprofil Reinhausen (s. Abb. 4.41). Da keine künstliche Kalkung des Waldbodens stattgefunden hat und Ca-Relikte aus der Entkalkungsphase anders als im Lößprofil Reinhausen im Solling zu erkennen sind, ist der vergleichsweise hohe Ca-Gehalt des oberen Profilabschnitts nur durch pflanzenphysiologische Prozesse zu erklären. Dieser Einfluß reicht hier bis in ca. 30–40 cm Tiefe; im Bsv-Horizont sind die größten Ca-Gehalte zu finden.

4.3.5 Mg- und Al-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen

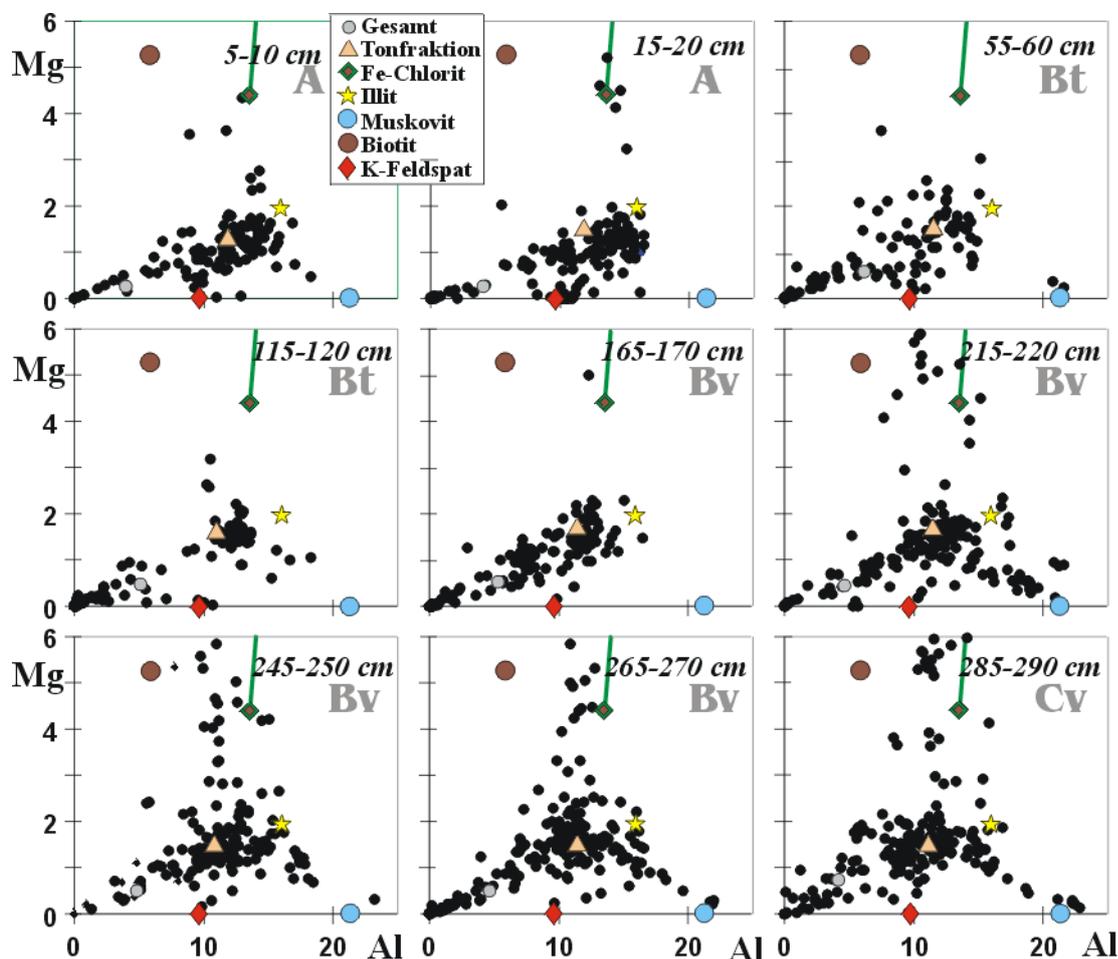


Abb. 4.42: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Mg und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen

Die von unten nach oben leicht abnehmenden Mg-Gehalte der Matrix lassen vermuten, daß Mg ebenso wie Ca vorübergehend an Kationenaustauscher angelagert und später wieder herausgelöst wird (s. Abb. 4.42). Dieser Effekt (vgl. Abschn. 4.3.3) ist jedoch für Mg deutlich schwächer ausgeprägt, da die Mg-Gehalte in der Matrix mit ca. 1,0–2,2 Gew.-% im C-Horizont bzw. 0,6–1,8 Gew.-% im A-Horizont generell höher liegen als die Ca-Konzentrationen und andererseits die Menge an Mg, die aus der Kalzitauflösung freigesetzt werden kann, erheblich geringer ist als die an Ca. Analog zum Ca werden diese Befunde auch bei Mg durch die KAK_{eff} -Bestimmungen bestätigt (vgl. Abschn. 4.2.4). Des weiteren sollten Tonminerale, die aus der Verwitterung Mg-haltiger Silikate (z.B. Biotit) hervorgegangen sind, noch Mg in nicht-extrahierbarer Form enthalten, wie z.B. Vermikulit.

Gelegentlich auftretende hohe Mg-Gehalte (bis ca. 10,2 Gew.-% Mg und 13 Gew.-% Al) sind durch Chlorit zu erklären. In diesen Punkten ist auch bis ca. 21 Gew.-% Fe enthalten.

4.3.6 Mg- und Al-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling

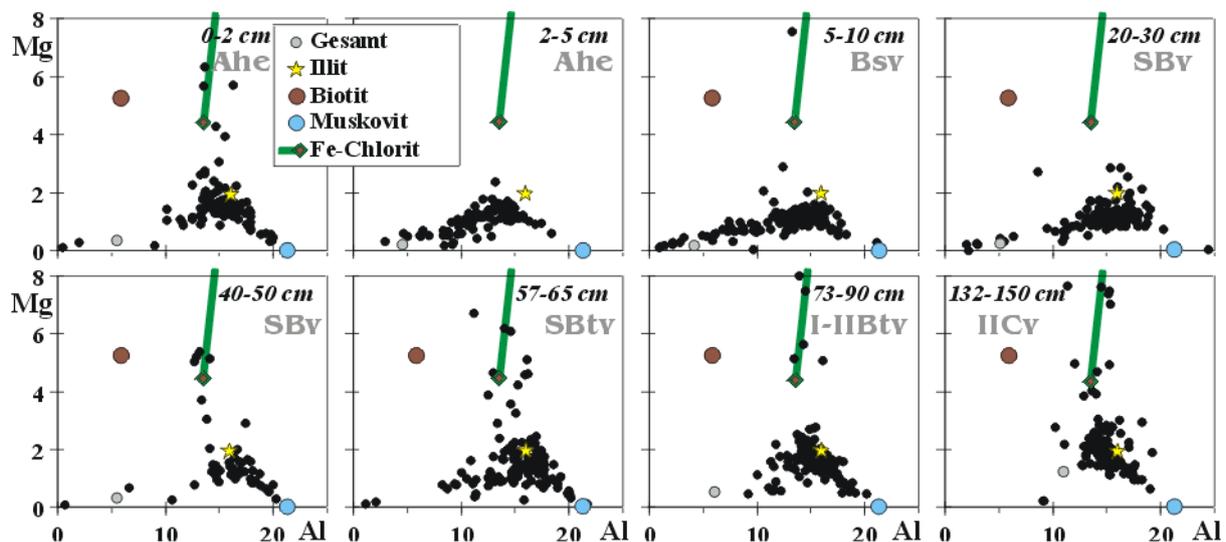


Abb. 4.43: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Mg und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling

Im Sollingprofil liegen ähnliche Mg-Konzentrationen wie im oberen Bereich des Lößprofils Reinhausen vor (s. Abb. 4.43). Primärer Mg-Chlorit ist vor allem in den tieferen Profilbereichen (unterhalb von 40 cm Tiefe) nachzuweisen. Auf Biotit sind keine Hinweise zu finden. In der Matrix ist die Hauptmenge des Mg offenbar in Tonmineralen enthalten.

4.3.7 Fe- und Al-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen

In 285–290 cm Profiltiefe wurde der höchste Fe-Gehalt mit knapp 60 Gew.-% Fe (s. Abb. 4.44) gemessen. Vermutlich handelt es sich hierbei um Goethit. Mischungstrends von Al mit Fe-Oxid- bzw. Fe-Hydroxid-Phasen sind in verschiedenen Profiltiefen zu erkennen. Die Zusammensetzung der Matrix liegt bis in 20 cm Tiefe bei ca. 3–9 Gew.-% Fe. Die Analysen in dem Tiefenbereich von ca. 50–170 cm weisen bei z.T. starker Streuung der Meßwerte eine leichte Erhöhung des Fe-Gehaltes auf ca. 5–13 Gew.-% Fe an; im C-Horizont liegt der größte Teil der Fe-Analysen der Matrix zwischen 5 und 10 Gew.-%. Anhand der Mikrosondenanalysen ist nicht zu ermitteln, zu welchen Teilen das Fe in Tonmineralen (z.B. Smektit, Vermikulit, Illit) oder in Fe-Oxiden bzw. -Hydroxiden gebunden vorliegt, die an Tonmineraloberflächen anhaften.

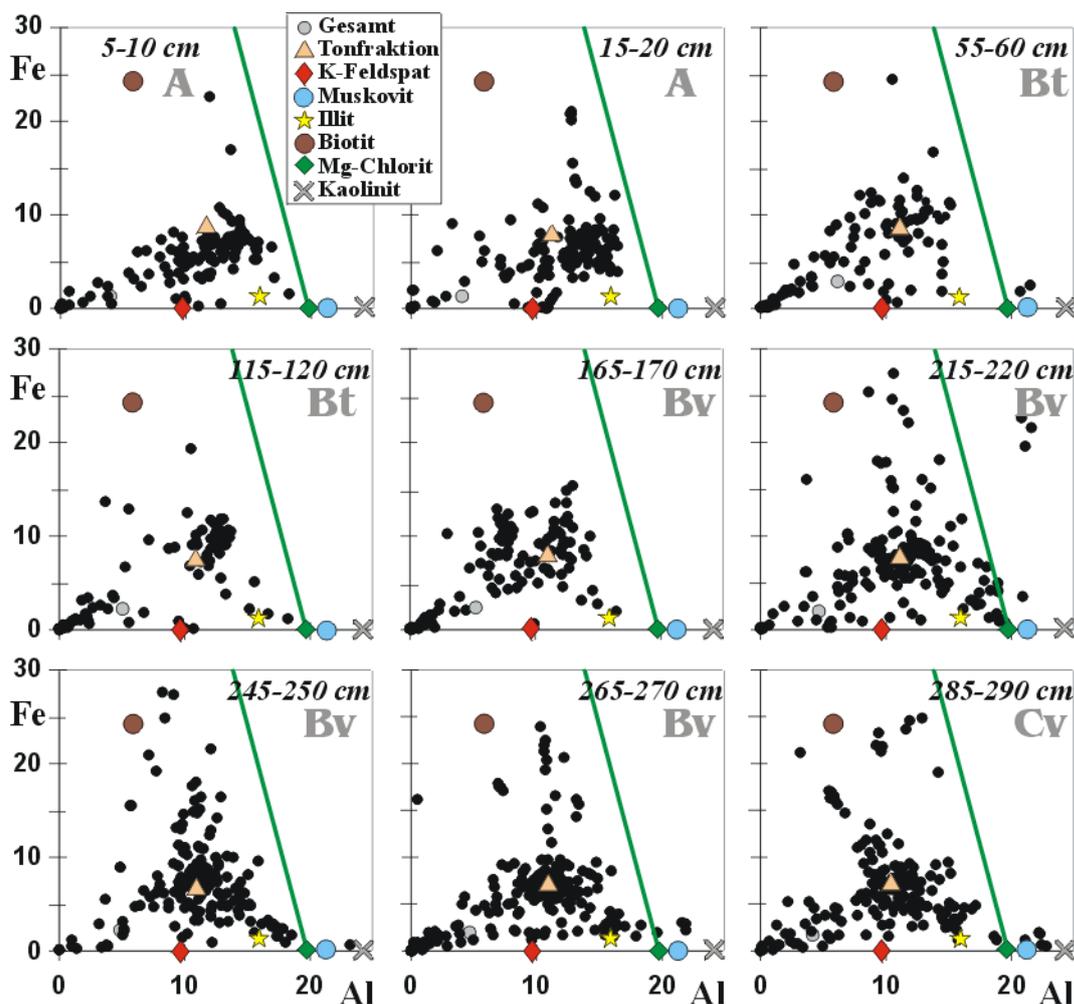


Abb. 4.44: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Fe und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen

Analog zu den Löß-Gesamtgehalten und zu der Extraktion der nichtsilikatischen Fe-Phasen mit Na-Dithionit und -Citrat (vgl. Abschn. 4.2.3) ist das Fe/Al-Verhältnis im A-Horizont ($\text{Fe}/\text{Al} \approx 0,5$) deutlich geringer als im Bt-Horizont ($\text{Fe}/\text{Al} \approx 0,8$). Allerdings liegen die Fe/Al-Verhältnisse bei den Mikrosonden-Analysen etwa um den Faktor 5 niedriger als bei den Dithionit-Extraktionen. Dies ist auf die hohen Anteile Al-reicher Tonminerale in der Matrix zurückzuführen, die bei der Extraktion der Fe-Oxide und -Hydroxide unberührt bleiben sollten. Neben einer bevorzugten Fe-Mobilisierung aufgrund einer Komplexierung durch organische Liganden ist die Fe-Wegfuhr im A-Horizont auf eine bevorzugte Verwitterung Fe-haltiger Tonminerale im obersten Profilbereich zurückzuführen (vgl. Abschn. 4.2.1). GLENN (1960) beschreibt für einen Lößboden unter vergleichbaren Klimabedingungen (gemäßigt-feucht) in Mississippi eine Fe-haltige (Nontronit-ähnliche) Smektit-Komponente, die in den oberflächennahen Horizonten instabil ist. In der Probe aus 285–290 cm Tiefe ist ein klarer Trend zu einer Phase ausgebildet, die einen solchen Fe-haltigen Smektit bzw. eine Vermikulit-Smektit- oder Vermikulit-Illit-Wechselagerungsform darstellt.

len könnte. Die Zusammensetzung in bezug auf alle gemessenen Elemente ist in Tab. 4.2 dargestellt.

4.3.8 Fe- und Al-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling

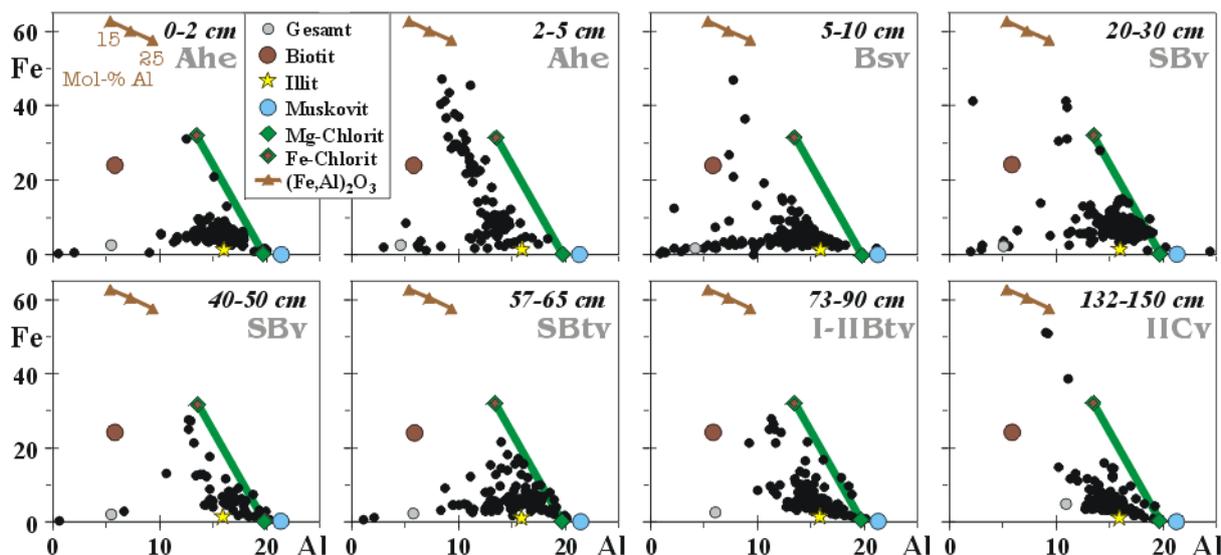


Abb. 4.45: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Fe und Al in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling. Eingetragen sind auch die darstellenden Punkte wasserfrei gerechneter Fe-Oxidhydroxide mit 15–25 Mol-% Ersatz von Fe durch Al

Klare Variationen der Fe-Gehalte der Matrix sind in Abhängigkeit von der Tiefe nicht nachzuweisen (s. Abb. 4.45). Während aber die Mikrosonden-Analysen der sehr Fe-reichen, punktuell auftretenden Komponenten in der Matrix des Lößprofils Reinhausen nur auf nahezu Al-freie Fe-Oxide bzw. -Oxidhydroxide schließen lassen, belegen die Analysen der Matrix im Sollingprofil (vor allem in 2–5 cm Tiefe) klar den Einbau von Al in Fe-Oxidhydroxide. Wiederholt auftretende Mischungstrends zeigen (besonders deutlich in 2–5 cm Tiefe), daß in Fe-Oxiden oder -Oxidhydroxiden ca. 20–25 Mol-% Fe durch Al ersetzt sind. Versauerungsbedingt werden hier also erheblich höhere Mengen an Al aus der Silikatverwitterung freigesetzt als im Lößprofil Reinhausen. Bestätigt wird dies auch durch die hohen Anteile von Al an der effektiven Kationenaustauschkapazität im Solling (vgl. Abschn. 4.2.5). Bei einer RedOx- bzw. pH-bedingten Ausfällung von gelöstem Fe wird auch Al in Abhängigkeit von der Konzentration in der Bodenlösung in die frisch gebildeten Oxidhydroxid-Phasen eingebaut (CORNELL & SCHWERTMANN, 1996).

4.3.9 Fe- und Mn-Gehalte der Matrix im Lößprofil Reinhausen

Mn, das in Al- und B-Horizont im Mittel zu ca. 50 % chemisch extrahierbar ist (mit allen Verfahren, vgl. Abschn. 4.2.3), zeigt eine Dynamik, die nur begrenzt an Fe gekoppelt ist. Bei Fe-Konzentrationen von ca. 5–10 Gew.-% variieren die Mn-Gehalte in A- und B-Horizont

(abgesehen von der verdünnungsbedingten Scheinkorrelation) weitestgehend unabhängig von Fe in einem Bereich von ca. 0,05–0,50 Gew.-%, wobei die mittlere Konzentration der Matrix bei ca. 0,05–0,12 Gew.-% Mn liegt (s. Abb. 4.46). Besonders unterhalb von ca. 250 cm Tiefe wurden sehr Mn-reiche Matrixbereiche gefunden. Die meisten Analysen der Matrix betragen <0,08 Gew.-%, während einzelne Messungen bei konstanten Fe-Gehalten (ca. 5–10 Gew.-%) bis zu 20 Gew.-% Mn erreichen. In diesem Tiefenbereich sind leicht geringere Mn-Anteile chemisch extrahierbar. Sehr Mn-reiche Konkretionen aus dem primären Lößmaterial werden im Zuge der Verwitterung offenbar aufgelöst und in Bereichen höherer pH-Werte und guter Durchlüftung wieder ausgefällt.

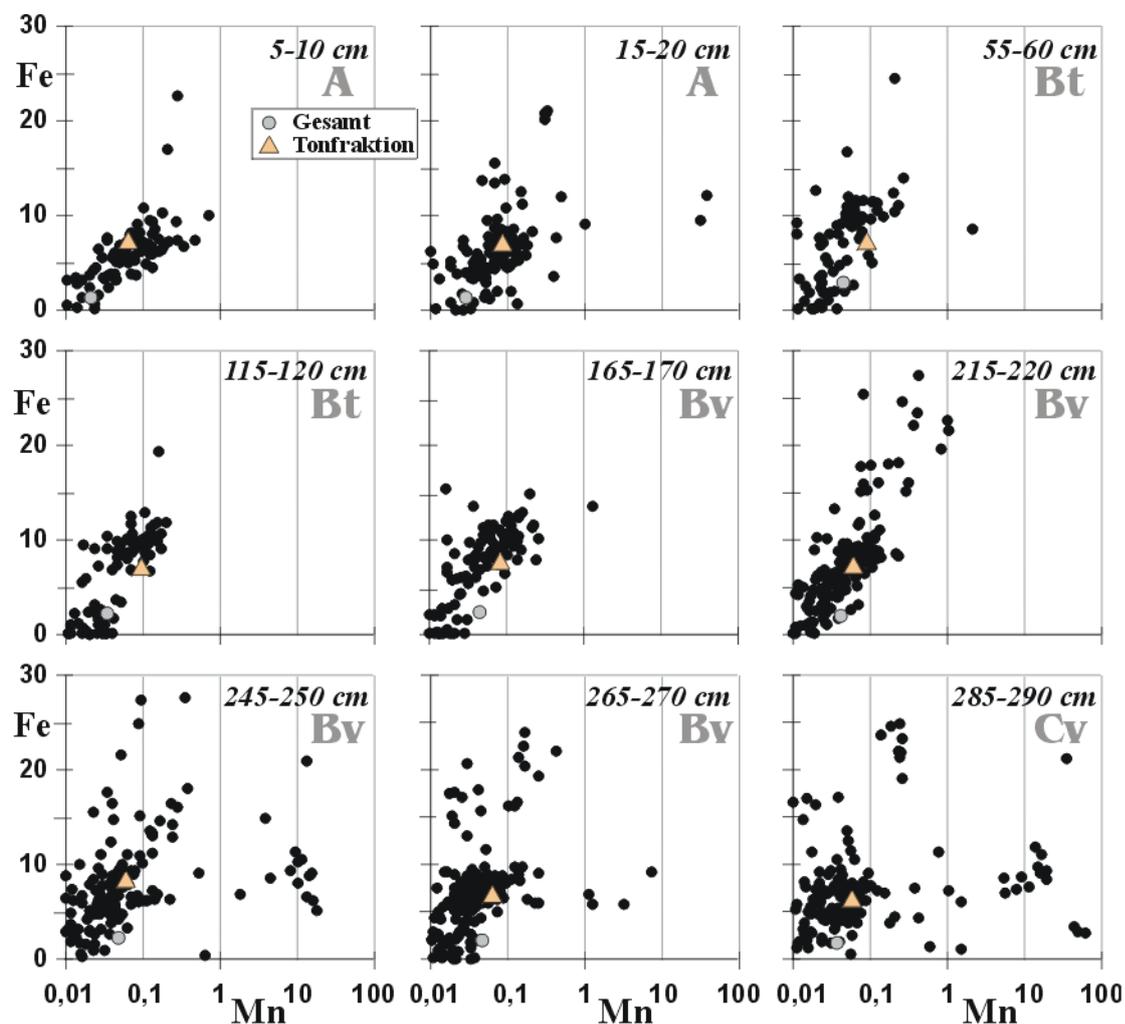


Abb. 4.46: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Fe und Mn (in logarithmischer Darstellung) in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Lößprofils Reinhausen

4.3.10 Fe- und Mn-Gehalte der Matrix im Bodenprofil im Solling

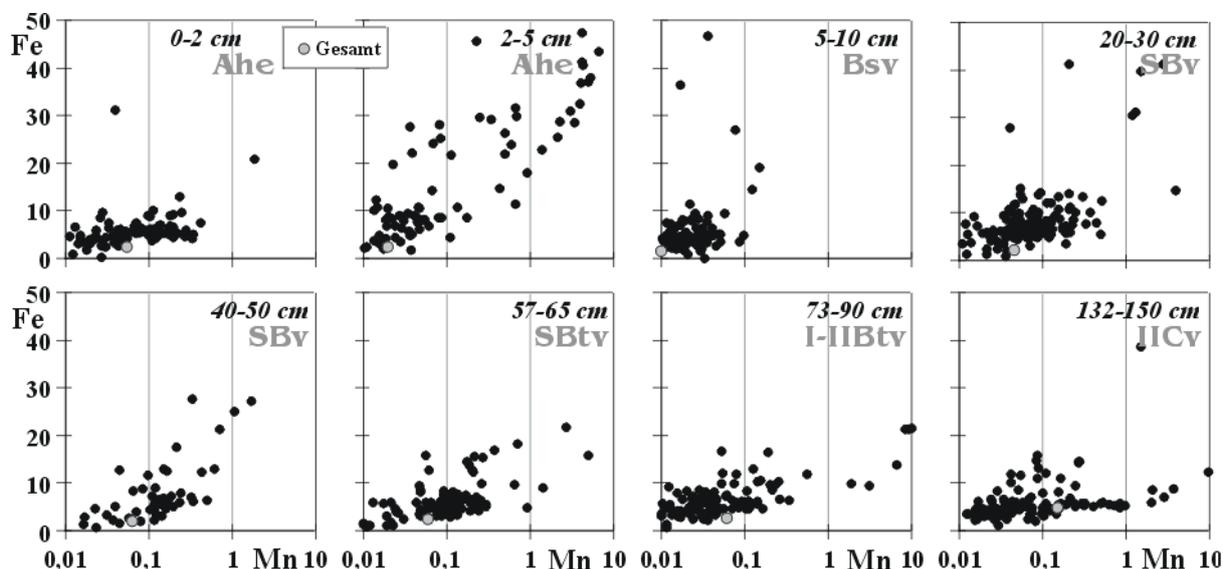


Abb. 4.47: Scattergramme der normierten Gehalte (Gew.-%) an Fe und Mn (in logarithmischer Darstellung) in der feinkörnigen Matrix und Gesamtgehalte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils im Solling

Wie im Lößprofil Reinhausen streuen die Mn-Gehalte der Matrix sehr stark (s. Abb. 4.47). Während der überwiegende Teil der Analysen niedrige Mn-Gehalte bis ca. 0,2 Gew.-% liefert, treten vereinzelt Werte von bis zu 13 Gew.-% Mn auf. Bei der Ausfällung Al-reicher Fe-Oxidhydroxide (vgl. Abschn. 4.3.8) werden auch erhebliche Mn-Mengen mitgefällt. In tieferen Profilmereichen (unterhalb ca. 50–70 cm Tiefe) korrelieren Fe und Mn aber kaum noch. Bei vergleichsweise konstanten Fe-Gehalten sind die Mn-Konzentrationen hier sehr variabel, was auf die hohe Mobilität von Mn in Abhängigkeit von RedOx-Potential und pH-Wert zurückzuführen ist.

4.3.11 Zusammenfassende Betrachtung der Mikrobereichsanalytik an Bodenanschliffen

Anhand der Mikrosonden-Analysen lassen sich verschiedene anorganische Komponenten in der feinkörnigen Bodenmatrix unterscheiden. Neben Illit dominiert in beiden Bodenprofilen unter den detritischen Fraktionen Quarz, der auch an Meßpunkten, die deutlich entfernt von größeren Quarzkörnern liegen, z.T. sehr hohe SiO_2 -Konzentrationen liefert. Weitere Detrituskomponenten sind Feldspäte, vor allem Kalifeldspäte, die auch im obersten untersuchten Profilmereichen noch erhalten sind. Unter den Glimmern ist Muskovit im C-Horizont des Lößprofils Reinhausen zu deutlichen Anteilen in der Matrix erhalten. Feinkörniger Biotit konnte dagegen nicht eindeutig in den Feinfraktionen nachgewiesen werden. Mit fortschreitender Verwitterung ist ein starker Abbau von Muskovit in der Matrix zu erkennen.

Mg-Chlorit und Kaolinit stammen aus dem ursprünglichen Lößmaterial, wie ihr Auftreten im C-Horizont zeigt. Chlorit ist in 15–20 cm Tiefe (A-Horizont) nachweisbar, Kaolinit wurde erst in einer Tiefe von 55–60 cm (Bt-Horizont) gefunden. Es ist aber davon auszugehen, daß Kaolinit, dessen Bildung auf intensive Silikatverwitterung zurückgeführt wird (ALLEN & HAJEK, 1989), auch in den obersten Profilhorizonten vorhanden ist. Die innige Vermischung von Tonkomponenten, deren Korngrößen geringer sind als die laterale Auflösung der Elektronenstrahl-Mikrosonde bei der Analyse (mehrere μm), verhindert die exakte Identifizierung aller Bestandteile. Dominantes Tonmineral ist in beiden Bodenprofilen Illit, der im gesamten Profil vorhanden ist. Vor allem in den weniger stark verwitterten Bereichen des Lößprofils Reinhausen lassen die Meßdaten des weiteren Fe-reichere Tonminerale (evtl. Vermikulit) vermuten, die verwitterungsanfälliger sind als Illit. Ca zeigt hier eine deutliche Abnahme zur Profilloberfläche hin. Dies kann auf leicht verwitterbare, Ca-reiche Tonminerale hindeuten, vermutlich aber wird hier Ca aus der Kalzitauflösung austauschbar an Tonminerale angelagert und nach der vollständigen Entkalkung wieder sukzessive entfernt. Fe-Oxide oder -Oxidhydroxide sind als reine Phasen nur in einer Probe des Reinhausen-Profiles (215–220 cm Tiefe) auszumachen. Die stärkere Versauerung des Solling-Profiles kommt hier u.a. in dem deutlichen Einbau von Al neben Mn in Fe-Oxidhydroxide zum Ausdruck. Ansonsten ist Fe vor allem in der Bodenmatrix des Lößprofils Reinhausen offenbar kaum in „großen“ Konkretionen als vielmehr in Form feinkörniger Oxidhydroxide mit Tonmineralen assoziiert bzw. in diesen gebunden (z.B. Vermikulit, Illit). Die chemischen Extraktionsverfahren zeigen hier hohe Gehalte an oxidhydroxidisch gebundenem Fe an (>30% der Gesamtgehalte im Bt-Horizont in den Dithionit- und den Tiron-Extrakten). Problematisch bei diesen nach häufig angewandter Vorschrift durchgeführten Extraktionen ist die Abtrennung der Festphase. Hier können selbst bei ausgiebiger Zentrifugation wie auch bei der Filtration mit Filtrierpapier Kolloide in die Extraktionslösungen gelangen, die bei der Analyse hohe Oxidhydroxid-Anteile vortäuschen, obwohl auch silikatisch gebundenes Fe in kolloidaler Form vorliegt. Die Abfuhr von K mit fortschreitender Verwitterung zeigt den Angriff auf K-haltige Tonminerale an. Es ist anzunehmen, daß gutkristalliner Illit am längsten erhalten bleibt, während zunächst smektitische, vermikulitische und Wechselagerungsformen abgebaut werden, vermutlich unter der Bildung von Boden-Chloriten. Eine Neubildung von Illit aus dem Einbau von K aus der Glimmerverwitterung (NIEDERBUDDE & KUSSMAUL, 1978) in Smektit ist jedoch nicht nachzuvollziehen und aufgrund der geringen K-Gehalte im Sickerwasser nicht zu erwarten (vgl. Kap. 1 und 4.2.6).

4.4 Auswirkungen der Bodenbildungsprozesse auf den Stoffbestand der Grob-, Mittel- und Feintonfraktion

Die Relikte chemischer und mechanischer Verwitterung, ausgefällte Neubildungen und Material aus dem primären Löß verteilen sich nicht gleichmäßig auf den gesamten Korngrößenbereich der Tonfraktion ($< 2 \mu\text{m}$). Aus diesem Grunde ist eine weitere Auftrennung der Tonfraktion in mehrere Korngrößenbereiche für detaillierte Aussagen sinnvoll. Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, sollte das Material im vorliegenden Fall bei der Präparation chemisch möglichst unbelastet erhalten bleiben. Bei der Auftrennung mit an die Probe angepaßtem Wasser und dem Verzicht auf eine chemische Vorbehandlung wurde eine nicht einheitliche Austauscherbelegung bewußt in Kauf genommen.

4.4.1 Veränderungen des Mineralbestandes in den Tonfraktionen des Lößprofils Reinhausen

Die Röntgen-Diffraktometrie ist als eines der wichtigsten bodenmineralogischen Verfahren schon seit den 30er Jahren im Einsatz (HENDRICKS & FRY, 1986; KELLEY ET AL., 1931). Für fein- bis feinstkörniges Bodenmaterial liefern röntgendiffraktometrische Pulvermethoden bei vergleichsweise geringem Material- und Zeitaufwand zuverlässige qualitative bis halbquantitative (u.U. quantitative) Informationen über die mineralogische Zusammensetzung. Allerdings sollten die röntgendiffraktometrischen Analysen nach Möglichkeit durch chemische, optische und/oder spektroskopische Methoden ergänzt bzw. verifiziert werden. Insbesondere für Aussagen über chemisch-mineralogische Veränderungen von Mineralphasen ist die separate Betrachtung nur einer Analysenmethode unzureichend.

Tab. 4.4: Basisabstände (Å) von Tonmineralen nach unterschiedlichen Vorbehandlungen

Mineral	unbehandelt	Ethylenglykol	350°C
Kaolinit	7	7	7
Illit	10	10	10
Vermikulit	10–14	14–18	10
Smektit	11–14	18	10
prim. Chlorit	14	14	14
sek. Al-Chlorit	14	14	12–14

In Tab. 4.4 sind die diagnostischen Basisabstände („d-Werte“) der 001-Flächen der relevanten Tonminerale zusammengestellt (DIXON & WEED, 1989; VEERHOFF, 1992).

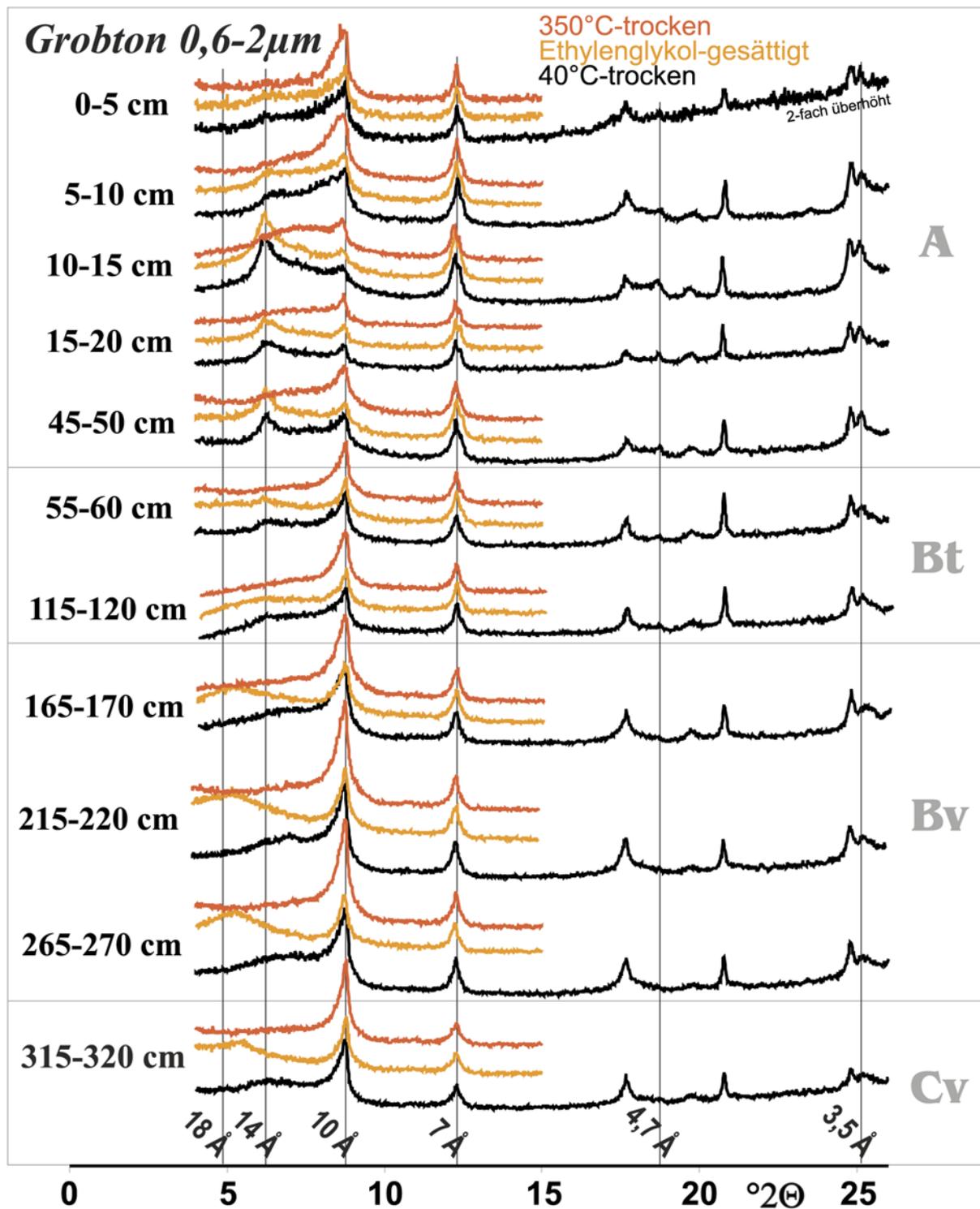


Abb. 4.48: Röntgendiffraktogramme der Korngrößenfraktion 0,6–2,0 μ m im Lößprofil Reinhausen mit der Angabe diagnostisch wichtiger Netzebenen-Abstände

In der Korngrößenfraktion 0,6–2,0 μ m („Grobton“) sind große Anteile an detrischem

Quarz zu erkennen (s. Abb. 4.48). Der Hauptpeak von Quarz bei $3,34 \text{ \AA}$ ($26,7^\circ 2\Theta$) überlagert den $3,38 \text{ \AA}$ -Reflex von Illit. Der $4,27 \text{ \AA}$ -Reflex von Quarz ($20,8^\circ 2\Theta$) ist im vorliegenden Fall diagnostisch gut geeignet, da hier keine Koinzidenzen bestehen. Als wichtigste Grobton-Komponenten sind des weiteren im gesamten untersuchten Profil folgende Phasen (mit ihren zur Identifizierung besonders geeigneten Reflexen) zu finden:

- Illit: $10,1 \text{ \AA}$ -Reflex bei $8,7^\circ 2\Theta$ und $5,0 \text{ \AA}$ -Reflex bei $17,7^\circ 2\Theta$
- Kaolinit: $4,8 \text{ \AA}$ -Reflex bei $19,8^\circ 2\Theta$ und $3,58 \text{ \AA}$ -Reflex bei $24,8^\circ 2\Theta$. Der $7,16 \text{ \AA}$ -Reflex des Kaolinit ($12,3^\circ 2\Theta$) ist im gesamten Profil deutlich ausgeprägt, er ist jedoch nicht eindeutig, da er mit dem $7,10 \text{ \AA}$ -Reflex von Chlorit zusammenfällt.

Der Bereich $> 10,1 \text{ \AA}$ (bzw. $< 8,7^\circ 2\Theta$) zeigt im Profilverlauf starke Variationen. Unter den herrschenden Bedingungen kommen hier im wesentlichen Smektit, Vermikulit und Chlorit als Ursachen für die Reflexe in Frage. Mit Hilfe der Ethylenglykol-Sättigung und der Entwässerung bei 350°C wird in Illit, quellfähige Tonminerale und Chlorit unterschieden (vgl. Tab. 4.4):

Im C-Horizont und im Bv-Horizont bis ca. 150–160 cm Tiefe treten deutliche Reflexe mit Basisabständen von ca. $12\text{--}14 \text{ \AA}$ auf, die bei der Sättigung mit Ethylenglykol auf etwa $16\text{--}18 \text{ \AA}$ aufweiten und bei der 350°C -Entwässerung beinahe komplett auf 10 \AA kontrahieren. Im primären Lößmaterial sind demnach quellfähige Tonminerale enthalten. Schwache Reflexe, die nach der Entwässerung bei ca. $10\text{--}12 \text{ \AA}$ zu erkennen sind, zeigen vermutlich Illit-Smektit-Wechselagerungen an. Weder primäre noch sekundäre Chlorite sind hier nachzuweisen. Der Bt-Horizont (Probe aus 115–120 cm Tiefe) enthält erkennbare Mengen an Chlorit (nicht aufweitbarer 14 \AA -Peak), vermutlich vermischt mit quellfähigen Tonmineralen. Eventuell handelt es sich hier auch um Chlorit-Smektit-Wechselagerungen. Bis zum Al-Horizont nehmen die Chlorit-Anteile stark zu. Die Probe aus 10–15 cm Tiefe enthält die höchsten Chlorit-Mengen (verglichen mit Illit bzw. Quarz). Quellfähige Tonminerale sind dagegen oberhalb von ca. 50 cm Profiltiefe nicht mehr nachzuweisen. Das Hervortreten des Chlorit-typischen $4,74 \text{ \AA}$ -Peaks bei $18,7^\circ 2\Theta$ bestätigt diesen Befund. Der $3,55 \text{ \AA}$ -Peak von Chlorit bei $25,3^\circ 2\Theta$ ist in 50–5 cm Tiefe ebenfalls ausgeprägt, in diesem Winkelbereich ist allerdings auch in Bv- und C-Horizont ein verschmierter Reflex zu finden, der unter vergleichbaren Bedingungen von HUGHES ET AL. (1994) auf Wechselagerungen von Kaolinit und quellfähigen Tonmineralen zurückgeführt wurde. Im obersten Bereich der Profils (0–10 cm Profiltiefe) nehmen die Chlorit-Anteile in Relation zu Illit bzw. Quarz wieder ab, bleiben aber bis zum oberen Profilende erhalten.

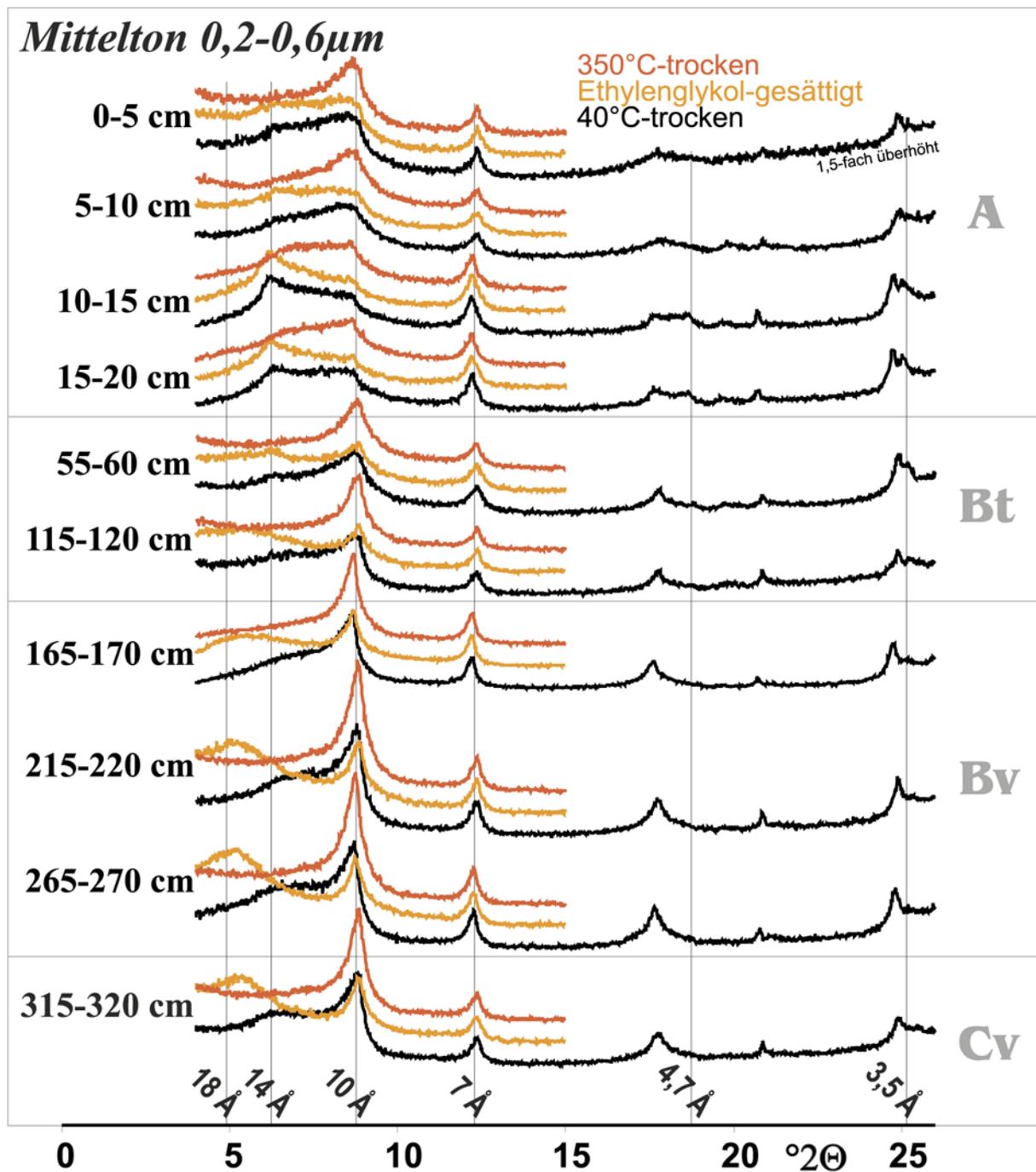


Abb. 4.49: Röntgendiffraktogramme der Korngrößenfraktion 0,2–0,6 μ m im Lößprofil Reinhausen mit der Angabe diagnostisch wichtiger Netzebenen-Abstände

Die Korngrößenfraktion 0,2–0,6 μ m („Mittelton“) enthält erwartungsgemäß deutlich geringere Quarz-Anteile (s. Abb. 4.49). Illit, Kaolinit und Quarz sind wie im Grobton im gesamten Profil präsent. In Relation zu Illit liegen im Mittelton der Horizonte C und Bv aber größere Mengen quellfähiger Tonminerale vor. In 115–120 cm Tiefe ist das Verhältnis

quellfähiger Tonminerale zu Chlorit höher als im Grobton. Oberhalb von ca. 60 cm Tiefe ist das massive Auftreten von Chlorit auch in der Mittelton-Fraktion belegt. Die Quellung mit Ethylenglykol bewirkt oberhalb von 20 cm Tiefe eine leichte Verstärkung des 14 Å-Peaks, eine Aufweitung auf mindestens 16–18 Å, wie sie für quellfähige Tonminerale typisch wäre, ist nicht mehr festzustellen.

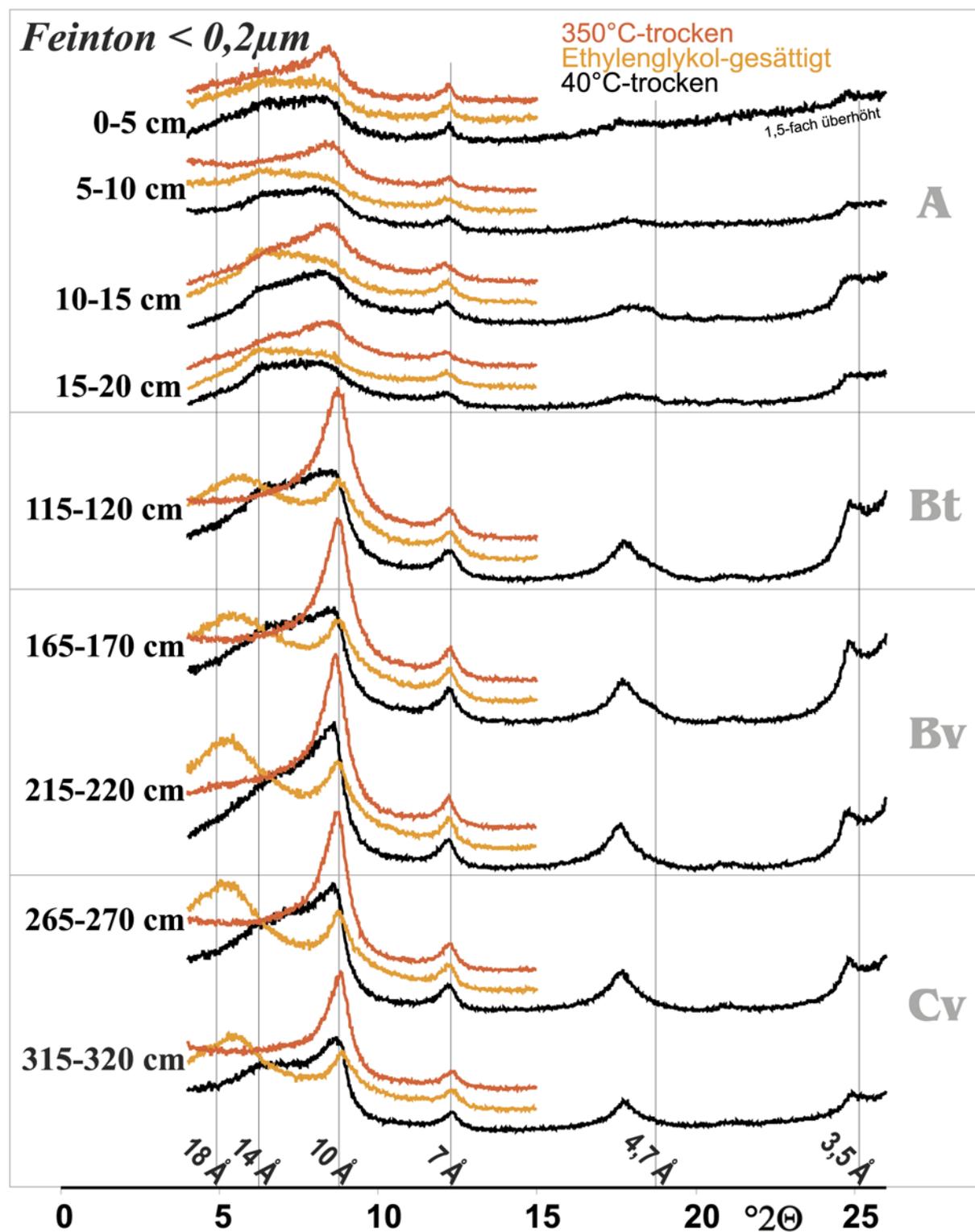


Abb. 4.50: Röntgendiffraktogramme der Korngrößenfraktion < 0,2µm im Lößprofil Reinhausen mit der Angabe diagnostisch wichtiger Netzebenen-Abstände

Im Feinton (Korngrößenfraktion $< 0,2 \mu\text{m}$) ist nahezu kein Quarz enthalten (s. Abb. 4.50). Illit und Kaolinit sind wieder im gesamten Profil zu finden, jedoch ist Illit hier weniger dominant als in den gröbereren Tonfraktionen. In B- und C-Horizont liegen höhere Anteile quellfähiger Tonminerale in Relation zu Illit und Kaolinit vor als im Mittel- und Grobton. Wie im Mittelton findet eine leichte Quellung durch Ethylenglykol auch noch im Chlorit-betonten Tiefenbereich von ca. 10–20 cm Tiefe statt, allerdings nur bis ca. 14 Å. Der Chlorit-Peak bei 14 Å im A-Horizont ist im Feinton weniger scharf ausgeprägt als in den gröbereren Tonfraktionen.

Zu geringeren Korngrößen hin zeigt das primäre Lößmaterial eine deutliche Abnahme detritischer Komponenten. Quellfähige Tonminerale sind dagegen in etwas höheren Gehalten vorhanden. Neben der Zerstörung der quellfähigen Tonminerale und der Bildung von Boden-Chlorit wird die Kristallinität von Illit – sichtbar an der Verbreiterung des 10 Å-Peaks – mit zunehmender Verwitterung vor allem in den feineren Fraktionen deutlich schlechter.

4.4.2 Veränderungen des Mineralbestandes in den Tonfraktionen des Bodenprofils im Solling

Da für das Bodenprofil im Solling auf gründliche Vorarbeiten aus der Literatur zurückgegriffen werden kann (GROSSKURTH, 1999), wurde in der vorliegenden Arbeit auf die Wiederholung dieser Untersuchungen verzichtet. Im folgenden werden diese Untersuchungen kurz zusammengefaßt:

GROSSKURTH (1999) beobachtet anhand röntgendiffraktometrischer Untersuchungen im gesamten Profilbereich Illit, dessen Gehalte und Kristallinität zur Profilloberfläche hin jedoch deutlich abnehmen. Damit geht eine zunehmende Vergrößerung des Basisabstandes von 10 auf 14 Å einher, die auf eine unregelmäßige, partikuläre Aufweitung der Illit-Zwischenschichten durch Al-Hydroxo-Komplexe sowie organische Verbindungen und andere Kationen-Komplexe zurückgeführt wird. Auf diese Weise werden unregelmäßige Wechselagerungen von Illiten mit bodenchloritischen Phasen gebildet. Eigenständige Vermikulit- oder Smektit-Minerale wurden nicht gefunden. Detaillierte infrarotspektrometrische Untersuchungen bestätigen diese Befunde. Die Quarz-Gehalte der Tonfraktionen sind nahezu konstant bei ca. 5–10 Gew.-% und nehmen nur oberhalb von 20 cm auf ca. 10–15 Gew.-% zu. Mit abnehmender Korngröße steigen die (normativ hergeleiteten) Goethit-Gehalte deutlich an. Die höchsten Gehalte werden in allen Kornfraktionen im Bsv-Horizont erreicht, in der Feinton-Fraktion ($< 0,2 \mu\text{m}$) sogar bis $> 20 \%$. Kaolinit liegt oberhalb von ca. 60 cm Tiefe etwa konstant bei 5–6 %, unterhalb von ca. 60 cm im Bereich der Nachweisgrenze ($\leq 2 \%$).

4.4.3 Veränderungen des chemischen Stoffbestandes in den Tonfraktionen des Lößprofils Reinhausen

Die Summe der mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde ermittelten Hauptelement-Oxide (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , MgO , MnO , Na_2O , SiO_2 und TiO_2) liegen in Bv- und C-Horizont

in allen Tonfraktionen gleichmäßig bei ca. 88–90 Gew.-%. Der Rest von ca. 10 Gew.-% dürfte im wesentlichen aus Wasser bzw. OH-Gruppen bestehen. Wegen zunehmender Anteile an organischer Substanz nehmen die Oxidsummen zur Profilloberfläche hin stark ab.

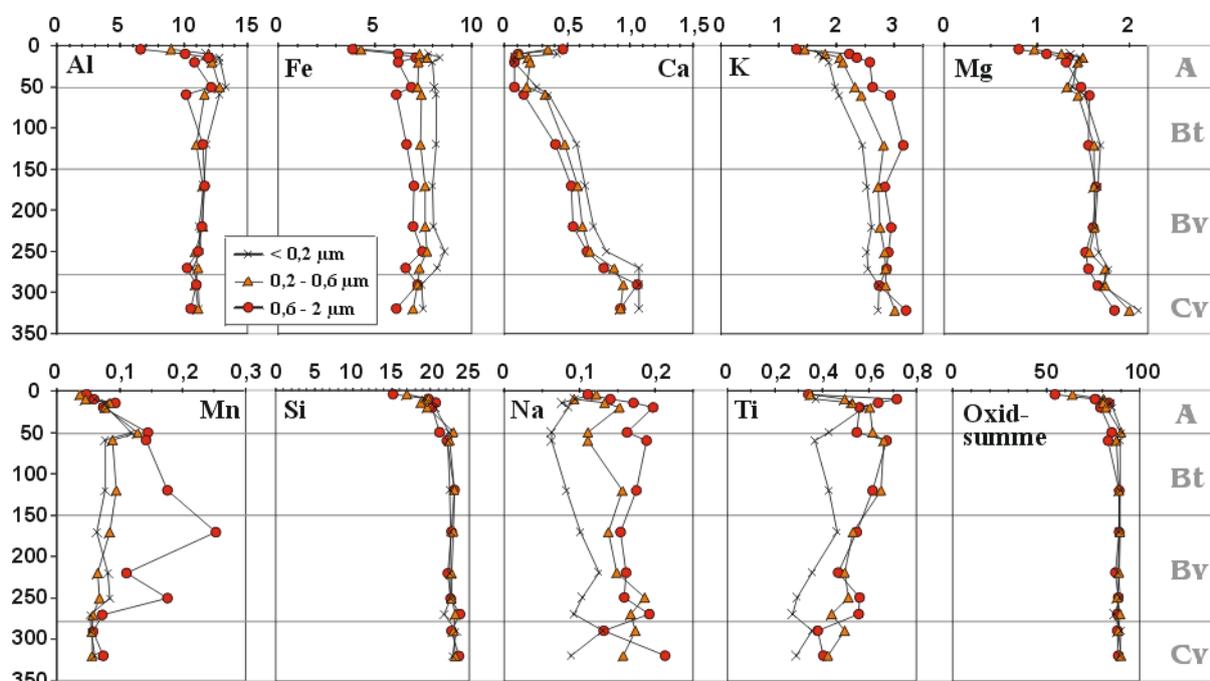


Abb. 4.51: Tiefenverläufe der chemischen Zusammensetzungen der einzelnen Tonfraktionen im Lössprofil Reinhausen (nicht normierte Absolutgehalte in Gew.-%)

Die Analysen der einzelnen Tonfraktionen (s. Abb. 4.51) liefern ähnliche Ergebnisse wie die mikroanalytischen Untersuchungen an Bodenanschliffen (vgl. Abschn. 4.3). Die statistisch ermittelte mittlere Zusammensetzung der Bodenmatrix trifft die tatsächliche Zusammensetzung also sehr genau. Während Al und Fe nur geringe Variationen im Profilverlauf zeigen, nehmen K und Mg leicht bis mäßig, Ca dagegen stark (Faktor 10 zwischen C- und Al-Horizont) zur Profilloberfläche hin ab. Die hohen Ca-Konzentrationen im Ah-Horizont sind vermutlich (analog zu den KAK-Untersuchungen, vgl. Abschn. 4.2.4) auf pflanzenphysiologische Prozesse zurückzuführen, die jedoch in mehr als 10 cm Tiefe keine weitere Wirkung erkennen lassen. Die Ca-Gehalte der Grobtonfraktion liegen nahezu im gesamten Profil ca. 0,2 Gew.-% unter denen des Feintons. Die starke Ca-Abnahme vom C- zum Al-Horizont ist sowohl mit der Vermutung der vorübergehenden Ca-Anlagerung aus der Kalzitauflösung an Tonminerale (vgl. Abschn. 4.3.3) als auch einem massiven Abbau Ca-reicher Tonminerale vereinbar. Angesichts der relativen Konstanz der Al-Gehalte und der Kontinuität der Ca-Abnahme oberhalb des C-Horizontes hat die Ca-Anlagerung vermutlich einen größeren Einfluß, wobei besonders im oberen Profilibereich (oberhalb ca. 150 cm Profiltiefe) auch von dem zunehmendem Abbau smektitischer Tonminerale ausgegangen werden muß (vgl. Abschn. 4.4.1). Konstante Al-Gehalte können hier durch die Bildung von Boden-Chloriten erklärt werden. Bei ca. 1 Gew.-% Ca im C-Horizont ist offensichtlich die

Ca-Sättigung der Tonfraktion erreicht.

K, das in der Tonfraktion in erster Linie in illitischen Tonmineralen, des weiteren in quellfähigen und evtl. Wechsellagerungsformen gebunden ist (vgl. Abschn. 4.3 und 4.4.1, spiegelt die Stabilität dieser Minerale im Verwitterungsprofil wider. Die Grobtonfraktion mit dem höchsten Illit-Anteil (und daher den höchsten K-Gehalten) ist erst später (d.h. in geringerer Profiltiefe) sichtbar vom Abbau der Tonminerale betroffen als die Feinfraktion. Einerseits liegt der K-reiche, verwitterungsresistentere Illit bevorzugt in der Grobtonfraktion vor, während smektitische und evtl. vermiculitische bzw. Wechsellagerungs-Tonminerale eher in den feineren Tonfraktionen zu finden sind, andererseits bietet die größere Oberfläche der feineren Fraktionen auch mehr Angriffsfläche für die Verwitterung. Die unterhalb von ca. 20 cm Tiefe generell höheren Ca-Gehalte der Feintonfraktion weisen im Zusammenhang mit der Ca-Anlagerung (s.o.) auf höhere effektive Kationenaustauschkapazitäten (KAK_{eff}) hin. Dies bestätigt das in der Feintonfraktion verstärkte Auftreten quellfähiger Tonminerale, die im Vergleich zu Illit eine wesentlich höhere KAK_{eff} besitzen (FANNING ET AL., 1989). Analog zu den röntgendiffraktometrischen Befunden ist der verwitterungsbedingte Abbau der quellfähigen Tonminerale in einer rapiden Abnahme der Ca-Gehalte der Feintonfraktion zwischen 50 und 20 cm Profiltiefe bis auf nahezu identische Werte wie in der Grobtonfraktion zu erkennen.

Im Gegensatz zu den Tiefenverläufen der Konzentrationen von Ca, K und Mg nehmen die Al-Gehalte vom C-Horizont bis etwa zum unteren Ende des Bv-Horizontes (ca. 150 cm Profiltiefe) leicht zu, wobei kein Unterschied zwischen den drei Tonfraktionen besteht. Im Bv- und Al-Horizont verschiebt sich die Bindungsform zugunsten der feineren Fraktionen, die nach oben im Profil weiter zunehmen, während die Al-Gehalte der Grobtonfraktion tendenziell sinken. Gerade im Verhältnis zu den abnehmenden Konzentrationen von Ca, K und Mg legen die hohen Al-Gehalte der feineren Fraktionen eine Zerstörung der ursprünglichen Tonminerale und die Bildung von Al-Chloriten nahe, die eine relative Al-Anreicherung bewirken könnten.

Die Fe-Gehalte in Fein- und Mittelton sind mit Ausnahme des Ah-Horizontes nahezu konstant, im Grobton nehmen sie von der Entkalkungsgrenze bis zum A-Horizont leicht ab. Ein direkter Zusammenhang zwischen Fe-Konzentrationen und der Verwitterung von Tonmineralen ist demnach nicht zu erkennen. Vermutlich vor allem in Form feinsten Oxidhydroxide sind die Fe-Phasen im gesamten Profil erhalten.

4.4.4 Veränderungen des chemischen Stoffbestandes in den Tonfraktionen des Bodenprofils im Solling

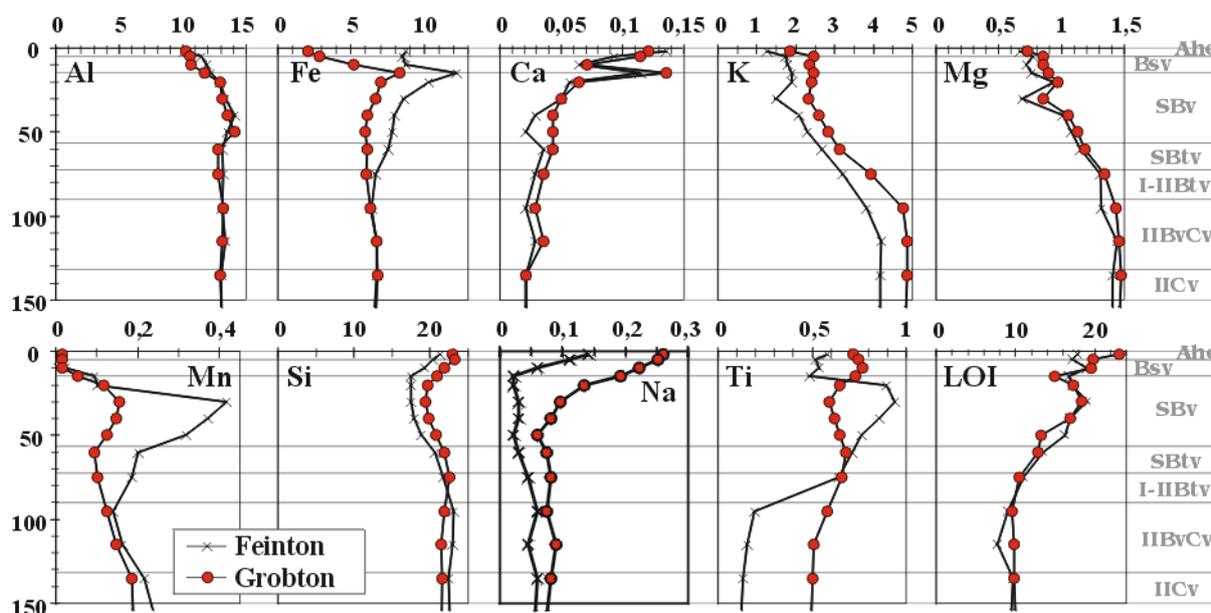


Abb. 4.52: Tiefenverläufe der chemischen Zusammensetzungen (Gew.-%) und des Glühverlustes bei der Veraschung (LOI) der einzelnen Tonfraktionen im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

Die Tonfraktionen des Bodenprofils im Solling bestätigen auch anhand ihrer chemischen Zusammensetzungen zahlreiche Befunde des Lößprofils Reinhausen (s. Abb. 4.52). Die Absolutkonzentrationen der meisten Elemente sind in beiden Profilen vergleichbar. Deutliche Effekte der verwitterungsbedingten Tonmineral-Zerstörung auf den Chemismus sind in der Abnahme von K und Mg zur Profilloberfläche hin zu sehen. Zu berücksichtigen ist hier jedoch auch der Wechsel des Ausgangsmaterials zu Sand- bzw. Tonstein, der unterhalb von ca. 60–70 cm Tiefe in der Tonfraktion (wie im gesamten Feinboden) eine deutliche Zunahme der K- und Mg-Gehalte bewirkt.

Der durch ausgefällte Fe-Oxide rostbraun gefärbte Bsv-Horizont (GROSSKURTH, 1999) enthält vor allem in der Feintonfraktion hohe Fe-Konzentrationen (ca. 12,2 Gew.-% in 10–15 cm Tiefe). Dies ist vermutlich auf den vorübergehenden Stauwassereinfluß zurückzuführen. Typisch für die Beteiligung von Stauwasser sind ebenfalls die hohen Mn-Gehalte in ca. 20–60 cm Tiefe. Manganoxid fällt schon unter weniger stark oxidierenden Bedingungen, d.h. in einem tieferen Profilvereich aus als Fe-Oxidhydroxide. Auffällig sind die hohen Ca-Gehalte in dem Fe-reichen Bsv-Horizont.

Organische Substanz, die auch stark die effektive Kationenaustauschkapazität beeinflusst (vgl. Abschn. 4.2.5), ist vermutlich für die deutliche Zunahme von Ca und Na zur Profilloberfläche hin verantwortlich. Der Glühverlust (LOI) ist ein Maß für die eingetragene organische Substanz.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Löß ist als weitverbreiteter Bestandteil der Deckschichten maßgeblich an der Bildung vieler Böden beteiligt und hat damit Einfluß auf deren Eigenschaften. Das hier untersuchte Bodenprofil aus Löß bei Reinhausen ist aus weitestgehend homogenem Ausgangsmaterial zusammengesetzt. Wegen seiner großen Mächtigkeit ist das Profil nur unvollständig entkalkt und veranschaulicht die Entwicklungsstadien eines Löß-dominierten Bodens von der Entkalkung bis zur mäßigen Versauerung. Das parallel untersuchte, bis ca. 75 cm Tiefe Löß-beeinflußte Bodenprofil im Solling befindet sich dagegen in einem fortgeschritteneren Stadium der Versauerung und schließt damit an die Entwicklung des Reinhausen-Profiles an.

Die Bodenbildung und die Verwitterung primärer Minerale im Boden führen in den beiden untersuchten lößbetonten Bodenprofilen zu großen Veränderungen der anorganischen Substanz. Die wichtigsten Prozesse in bezug auf Menge des umgesetzten Materials und Einfluß auf die Eigenschaften des Bodens sind:

- Entkalkung
- Tonverlagerung
- chemische Verwitterung der primären Mineralphasen
- physikalische Zerkleinerung

Neben der Entkalkung ist die Tonverlagerung über das Sickerwasser der Prozeß mit dem größten Materialumsatz. Die Tonfraktion, die mit variablen Anteilen organischer Substanz als feinstkörnige Matrix an größeren Mineralkörnern haftet und diese zu Aggregaten verkittet, ist aufgrund ihrer geringen Korngrößen physikalisch leicht verlagerbar. Wegen ihrer großen Oberfläche ist sie besonders reaktiv und hat einen wesentlichen Anteil an den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens (z.B. Kationenaustauschkapazität, Säurepufferung bzw. Aggregatbildung, Festigkeit, Wasserhaltevermögen). Da die Tonfraktion vor allem aus Tonmineralen und Oxidhydroxiden von Fe und Al (mit variablen Anteilen an Mn, Mg etc.) sowie geringen Anteilen an detritischem Quarz besteht, sind durch die

Tonverlagerung besonders die Elemente Fe, Mg, Al und K im Bt-Horizont angereichert. Die chemischen Extraktionsverfahren geben Rückschlüsse auf die Bindungsformen der Elemente Fe, Al und Si in den überwiegend feinkörnigen Oxiden und Oxidhydroxiden. Fe, dessen Konzentrationen in der Matrix nach Mikrosonden-Untersuchungen meist ca. 5–15 Gew.-% betragen, liegt demnach in der Tonfraktion größtenteils in Form mäßig- bis gutkristalliner (Dithionit- und Tiron-extrahierbarer) Oxidhydroxide vor (bis ca. 40 % des Gesamt-Fe). Fe-reiche Tonminerale (z.B. Vermikulit) spielen vermutlich eine untergeordnete Rolle. Für die Bildung der zur Profilloberfläche hin stark zunehmenden Anteile „amorpher, freier“ (Oxalat-extrahierbarer) Fe- und auch Al-Oxidhydroxide im Lößprofil Reinhausen ist die chemische Verwitterung, vermutlich unter Beteiligung organischer Komplexbildner, verantwortlich. Mit zunehmender Versauerung (Solling-Profil) findet bei der Ausfällung von Fe-Oxidhydroxiden ein Einbau von Al aus der Silikatverwitterung statt. Ca. 20–25 Mol-% des Fe werden hier durch Al ersetzt. Unter Stauwassereinfluß bildeten sich im Solling-Profil ein Fe-Anreicherungshorizont in ca. 10–30 cm Tiefe und ein Mn-Anreicherungshorizont in ca. 25–50 cm Tiefe durch die Ausfällung von Oxiden bzw. Oxidhydroxiden heraus, die bevorzugt in der Feintonfraktion vorliegen.

Die Untersuchungen geben keine Hinweise auf eine erhebliche Verwitterung von Feldspäten seit der Ablagerung des Lösses, während die chemischen Gesamtanalysen eine deutliche verwitterungsbedingte Wegfuhr vor allem von Ca, Na, P und Sr anzeigen. In allen untersuchten Profilmereichen ist bei einem Teil der Quarzkörner ein authigenes Wachstum durch Abscheidung von SiO₂ aus dem Sickerwasser zu beobachten. Es ist anzunehmen, daß für das Quarzwachstum die Zugänglichkeit der Oberfläche ein Rolle spielt. Eine Blockierung von Oberflächen durch die feinkörnige Matrix dagegen verhindert das Wachstum.

Den chemischen und phasenanalytischen Untersuchungsmethoden zufolge sind Illit-verbundene Minerale, die größtenteils schon in dem primären Lößmaterial vorhanden sind, die wichtigsten Tonminerale. Sehr oberflächensensitive Verfahren wie XPS- (X-ray Photoelectron Spectrometry) und XANES- (X-ray Absorption Near Edge Spectrometry), die an identischem Probenmaterial angewandt wurden, belegen, daß illitische Phasen sowohl in Gesamt-Löß-Präparaten als auch in Quarz-Separaten die Zusammensetzung der Oberflächen dominieren (DOYLE ET AL., 1999; RUPPERT & GLASOW, 2000). Die äußersten Atomlagen sind nach den XANES-Untersuchungen im gesamten Lößprofil Reinhausen strukturell konstant zusammengesetzt. Chemisch werden sie nach XPS-Untersuchungen vor allem von Si und Al dominiert. Die hohen Mg-Befunde (ca. 0,8–2,8 Gew.-% Mg) der XPS-Messungen werden durch Analysen mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde bestätigt.

Mit zunehmendem Verwitterungsgrad ist – vor allem in den oberflächennahen Profilmereichen und einhergehend mit einem K-Verlust – mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie und der FTIR-Spektrometrie (GROSSKURTH, 1999) eine deutliche Degradation von Illit (Verschlechterung der Kristallinität) festzustellen, die schließlich zur Bildung von Boden-Chloriten führt.

Des weiteren enthält der Löß bei der Deposition quellfähige – vermutlich vor allem smektitische – Tonminerale sowie Kaolinit und geringe Mengen an Mg-reichem Chlorit.

Die quellfähigen smektitischen Tonminerale reagieren naturgemäß empfindlicher auf Änderungen des chemischen Milieus als Illit. Die leichte Zugänglichkeit der Zwischenschichträume

bedingt die große Kationenaustauschkapazität, daher steigen die Ca-Gehalte der Matrix durch Einlagerung von Ca aus der Kalzitauflösung in die Kationenaustauscher zunächst deutlich an. Bei sinkenden pH-Werten der fortschreitenden Verwitterung werden basische Kationen leicht herausgelöst, so daß mit dem Einbau von Al in Form von Gibbsite-Gruppen ($\text{Al}(\text{OH})_3$) letztlich eine Umbildung zu Al-reichem Boden-Chlorit stattfindet.

Literaturverzeichnis

- B. L. Allen & B. F. Hajek (1989). Mineral Occurrence in Soil Environments. In Dixon & Weed (1989), Kap. 5, S. 199–278. SSSA Book Series 1.
- S. Arak & K. Kyuma (1983). Characterization of red and yellow-colored soil materials in southwestern Japan. In *Proc. Symp. Red Soil*, S. 105–117. Nanjing Pub. House, Nanjing.
- J. F. Banfield, W. W. Barker, S. A. Welch & A. Taunton (1999). Biological impact on mineral dissolution: Application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. In *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, Bd. 96, S. 3404–3411.
- J. F. Banfield & R. J. Hamers (1997). Processes at minerals and surfaces with relevance to microorganisms and prebiotic synthesis. In J. F. Banfield & K. H. Nealson (Hg.), *Geomicrobiology: Interactions between Microbes and Minerals*. Min. Soc. Am., Washington D.C.
- P. Barnekow (1996). Der Einfluß der Silikatverwitterung auf den Chemismus abgepreßter Porenlösungen von versauerten Bodenprofilen (Harz, Solling). Unveröffentlichte Diplomarbeit, angefertigt am Geochemischen Institut der Georg-August-Universität zu Göttingen.
- B. Büdel & D. C. Wessels (1991). Rock inhabiting blue-green algae/cyanobacteria from hot arid regions. *Algological Studies*, 64: S. 385–398.
- R. S. Beckwith & R. Reeve (1963). Studies on soluble silica in soils I. The sorption of silica acid by soils and minerals. *Aust. J. Soil Res.*, S. 157–168.
- U. Birkel & J. Niemeyer (1998). Tonminerale als Katalysatoren bei der Umwandlung von organischen Verbindungen. *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.*, 10 (6): S. 345–352.
- U. Birkel & J. Niemeyer (1999). Montmorillonit-katalysierte Bildung von Vorstufen gebundener Rückstände aus Brenzkatechin und p-Chloranilin. *Chemie der Erde*, 59: S. 45–77.
- H. P. Blume (1964). Zum Mechanismus der Tonverlagerung. In *Trans. 8. Int. Congr. Soil Sci.*, Bd. 5, S. 715–722. Bukarest.

- O. P. Bricker & R. M. Garrels (1965). Mineralogic factors in natural waters equilibria. In S. Faust & J. V. Hunter (Hg.), *Principles and applications of natural water chemistry*, S. 449–469. John Wiley & Sons, New York.
- G. Brümmer (1981). Einfluß des Menschen auf den Stoffhaushalt der Böden. *Schriftenreihe Agrarwiss. Fak. Univ. Kiel*, 62: S. 192–202.
- A. Bronger, E. Kalk & D. Schroeder (1976). Über Glimmer- und Feldspatverwitterung sowie Entstehung und Umwandlung von Tonmineralen in rezenten und fossilen Lößböden. *Geoderma*, 16: S. 21–54.
- H. J. Brumsack, E. Zuleger, E. Gohn & R. W. Murray (1992). Stable and radiogenic isotopes in pore waters from Leg 127, Japan Sea. In *Proc. ODP Sci. Results, Pt. 1: College Station, TX (Ocean Drilling Program)*, Bd. 127/128, S. 635–650. U.S.A.
- A. S. Campbell & U. Schwertmann (1984). Iron oxide mineralogy of placic horizons. *J. Soil Sci.*, 35: S. 569–582.
- R. Chester, E. J. Sharples & G. S. Sanders (1985). The concentration of particulate aluminium and clay minerals in aerosols from the northern Arabian Sea. *J. Sedimen. Pet.*, 58: S. 37–41.
- R. M. Cornell & U. Schwertmann (1996). *The Iron Oxides - Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses*. Verlag Chemie, Weinheim.
- A. Danin & J. Garty (1983). Distribution of cyanobacteria and lichens on hillsides of the Negev Highlands and their impact on biogenic weathering. *Z. Geomorph. N. F.*, 27 (4): S. 423–444.
- E. W. de Vrind-de Jong & J. P. M. de Vrind (1997). Algal deposition of carbonates and silicates. *Rev. Mineral.*, 35: S. 267–307.
- G. Deutschmann (1994). *Zustand und Entwicklung der Versauerung des Bodens und des oberflächennahen Buntsandsteinuntergrundes eines Waldökosystems im Solling*. Dissertation, Georg-August Universität zu Göttingen.
- J. B. Dixon & S. B. Weed (Hg.) (1989). *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, U.S.A., 1244 S. SSSA Book Series 1.
- C. S. Doyle, S. J. Traina, H. Ruppert, T. Kendelewicz, J. J. Rehr & G. E. Brown Jr. (1999). XANES studies at the Al K-edge of aluminum-rich surface phases in the soil environment. *Journal of Synchrotron Radiation*, 6: S. 621–623.
- L. R. Drees, L. P. Wilding, N. E. Smeck & A. L. Senkayi (1989). Silica in Soils: Quartz and Disordered Silica Polymorphs. In Dixon & Weed (1989), Kap. 19, S. 913–974. SSSA Book Series 1.

- J. I. Drever (1994). The effect of land plants on weathering rates of silicate minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58: S. 2325–2332.
- H. Ellenberg, R. Mayer & J. Schauer mann (Hg.) (1986). *Ökosystemforschung - Ergebnisse des Sollingprojektes 1966–1986*. Verlag Eugen Ulmer.
- D. S. Fanning, V. Z. Keramidas & M. A. El-Desoky (1989). Micas. In Dixon & Weed (1989), Kap. 12, S. 551–634. SSSA Book Series 1.
- M. Feldmann, J. Neher, W. Jung & F. Graf (1997). Fungal quartz weathering and iron crystallite formation in an Alpine environment, Piz Alv, Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 90: S. 541–556.
- Z.-D. Feng (1997). Geochemical Characteristics of a Loess-Soil Sequence in Central Kansas. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: S. 534–541.
- F. G. Ferris, W. S. Fyfe & T. J. Beveridge (1987). Bacteria as nucleation sites for authigenic minerals in a metal-contaminated lake sediment. *Chem. Geol.*, 63: S. 225–232.
- E. A. FitzPatrick (1984). *Micromorphology of soils*. Chapman and Hall, 433 S.
- H. Fölster, B. Meyer & E. Kalk (1963). Parabraunerde aus primär carbonathaligem Wurm-Löß in Niedersachsen. II. Profibilanz der zweiten Folge bodengenetischer Teilprozesse: Tonbildung, Tonverlagerung, Gefügeverdichtung, Tonumwandlung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 100: S. 1–11.
- J. K. Fredrickson & T. C. Onstott (1996). Microbes Deep Inside the Earth. *Sci. Am.*, 275: S. 68–73.
- E. I. Friedmann (1982). Endolithic microorganisms in the Antarctic cold desert. *Science*, 215: S. 1045–1052.
- E. I. Friedmann, O. R. Friedmann & C. P. McKay (1981). Adaptations of cryptoendolithic lichens in the Antarctic Desert. *Colloque sur les Ecosystemes Subantarctiques*, 51: S. 65–70.
- E. I. Friedmann & R. Ocampo (1976). Endolithic blue-green algae in the dry valleys; primary producers in the Antarctic desert ecosystem. *Science*, 193: S. 1247–1249.
- R. M. Garrels (1984). Montmorillonite/illite stability diagrams. *Clays and Clay Min.*, 32: S. 161–166.
- H. Gebhard, B. Meyer & F. Scheffer (1967). Zwischenschichtbelegung und Expansionsverhalten von Dreischicht-Tonmineralen in CaCO₃-gepuffertem Hydrogencarbonatmilieu kalkreicher Lockersedimentböden (Beispiel Löß). *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 114: S. 90–100.

- W. C. Ghiorse (1997). Subterranean Life. *Science*, 275: S. 789–790.
- J. R. Glasmann (1982). Alteration of andesite in wet instable soils of Oregon's western cascades. *Clays and Clay Min.*, 30: S. 253–263.
- R. C. Glenn (1960). Chemical weathering of layer silicate minerals in loess derived from loring silt loam of Mississippi. In *7th Intern. Soil Sci. VII*, Bd. 11, S. 523–531.
- G. F. Großkurth (1999). *FTIR-spektrometrische, röntgendiffraktometrische und geochemische Untersuchungen an Korngrößenfraktionen der Bodenprofile Fichte 1 (Solting) und Lange Bramke (Harz): Erkenntnisse zur Illitverwitterung in stark versauerten Waldböden*. Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen.
- M. Habte & M. Barrion (1984). Interaction of Rhizobium sp. with toxin producing fungus in culture medium and in a tropical soil. *Appl. Environ. Microbiol.*, 47: S. 1080–1083.
- C. E. Heijnen, J. D. van Elsas, P. J. Kuikman & J. A. van Veen (1988). Dynamics of Rhizobium leguminosarum biovar trifolii introduced into soil; the effect of bentonite clay on predation by protozoa. *Soil Biol. Biochem.*, 20: S. 483–488.
- C. E. Heijnen, C. H. Hok-A-Hin & J. A. van Veen (1991). Protection of Rhizobium by bentonite clay against predation by flagellates in liquid cultures. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 85: S. 65–72.
- C. E. Heijnen, C. H. Hok-A-Hin & J. A. van Veen (1992). Improvements to the use of bentonite clay as a protective agent, increasing survival levels of bacteria introduced into soil. *Soil Biol. Biochem.*, 24: S. 533–538.
- C. E. Heijnen & J. A. van Veen (1991). A determination of protective microhabitats for bacteria introduced into soil. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 85: S. 73–88.
- H. Heinrichs, B. Wachtendorf, K. H. Wedepohl, B. Rössner & G. Schwedt (1986). Hydrogeochemie der Quellen und kleineren Zuflüsse der Sösetalsperre (Harz). *Neues Jahrbuch Miner. Abh.*, 156 (1): S. 23–62.
- S. B. Hendricks & W. H. Fry (1986). The results of X-ray and microscopical examinations of soil colloids. In J. A. Kittrick (Hg.), *Soil mineral weathering*, S. 9–29. Van Nostrand Reinhold Co., New York, NY, U.S.A. Reprinted from *Soil Sci.*, Vol. 29, p. 457–479, 1930.
- D. A. Hiller (1991). *Elektronenstrahlmikroanalysen zur Erfassung der Schwermetallbindungsformen in Böden unterschiedlicher Metallbelastung*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Band 4.
- G. R. Holdren & P. M. Speyer (1986). Stoichiometry of alkali feldspar dissolution at room temperature and various pH values. In S. M. Coleman & D. P. Dethier (Hg.), *Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals*, S. 61–81. Academic Press, Inc., San Diego.

- G. G. S. Holmgren (1967). A Rapid Citrate-Dithionite Extractable Iron Procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31: S. 210–215.
- R. E. Hughes, D. M. Moore & H. D. Glass (1994). Qualitative and Quantitative Analysis of Clay Minerals in Soils. In *Quantitative Methods in Soil Mineralogy*, S. 330–359.
- M. L. Jackson (1963a). Aluminium Bonding in Soils: A Unifying Principle in Soil Science. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 27: S. 1–10.
- M. L. Jackson (1963b). Interlayering of Expansive Layer Silicates in Soils by Chemical Weathering. *Clays and Clay Min.*, 13: S. 29–46.
- W. T. Jiang, D. R. Peacor & P. R. Buseck (1994). Chlorite geothermometry? - Contamination and apparent octahedral vacancies. *Clays and Clay Min.*, 42: S. 593–605.
- L. H. P. Jones & K. A. Handreck (1963). Effects of iron and aluminium oxides on silica in solution in soils. *Nature*, 198: S. 852–853.
- W. O. Kelley, W. H. Dore & S. M. Brown (1931). The nature of the base exchange material of bentonite, soils and zeolites, as revealed by chemical investigation and x-ray analysis. *Soil Sci.*, 31: S. 25–55.
- D. A. Khan (1959). Studies on translocation of chemical constituents in some redbrown soils, terra rossa and rendzinas, using Zr as weathering index. *Soil Sci.*, 88: S. 196.
- J. A. Kittrick (1982). Solubility of two high-Mg and two high-Fe chlorites using multiple equilibria. *Clays and Clay Min.*, 30: S. 167–179.
- A. Klute (Hg.) (1986). *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, U.S.A., 1188 S. SSSA Book Series 5.
- H. Kodama & G. J. Ross (1991). Tiron Dissolution Method Used to Remove and Characterize Inorganic Components in Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: S. 1180–1187.
- S. Komarneni, M. L. Jackson & D. R. Cole (1985). Oxygen isotope changes during mica alteration. *Clays and Clay Min.*, 33: S. 214–218.
- K. O. Konhauser, Q. J. Fisher, W. S. Fyfe, F. J. Longstaffe & M. A. Powell (1998). Authigenic mineralization and detrital clay binding by freshwater biofilms: The Brahmani River, India. *Geomicrobiol. J.*, 15: S. 209–222.
- K. O. Konhauser, W. S. Fyfe, F. G. Ferris & T. J. Beveridge (1993). Metal sorption and mineral precipitation by bacteria in two Amazonian river systems: Rio Solimoes and Rio Negro, Brazil. *Geology*, 21: S. 1103–1106.

- K. O. Konhauser, S. Schultze-Lam, F. G. Ferris, W. S. Fyfe, F. J. Longstaffe & T. J. Beveridge (1994). Mineral precipitation by epilithic biofilms in the Speed River, Ontario, Canada. *Appl. Environ. Microbiol.*, 60: S. 549–553.
- K. O. Konhauser & M. M. Urrutia (1999). Bacterial clay authigenesis: a common biogeochemical process. *Chem. Geol.*, 161: S. 399–413.
- K. B. Krauskopf (1959). The geochemistry of silica in sedimentary environments. In H. A. Ireland (Hg.), *Silica in Sediments*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ. 7.
- W. E. Krumbein & K. Jens (1981). Biogenic rock varnishes of the Negev Desert (Israel): An ecological study of iron and manganese transformation by cyanobacteria and fungi. *Oecologica*, 50 (1): S. 25–38.
- D. Langmuir (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A., 600 S.
- J. C. Lewin (1961). The dissolution of silica from diatom walls. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 21: S. 182–189.
- L. Lidstrom (1968). Surface and bond-forming properties of quartz and silicate minerals and their application in mineral processing techniques. *Acta Polytech. Scand., Chem. Metall. Ser.*, 75: S. 1–50.
- R. R. Loucks (1991). The abundant H₂O content of potassic white micas: Muscovite-hydromuscovite-pyrophyllite-solutions. *Amer. Mineral.*, 76: S. 1563–1579.
- K.-J. Meiwes, N. König, P. K. Khanna, J. Prenzel & B. Ulrich (1984). Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben*, 7. Selbstverlag. Forstwiss. Fachbereich, Georg-August-Universität Göttingen.
- B. Meyer, E. Kalk & H. Fölster (1962). Parabraunerden aus primär carbonathaltigem Würm-Löß in Niedersachsen – I. Profilbilanz der ersten Folge bodengenetischer Teilprozesse: Entkalkung, Verbraunung, Mineralverwitterung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 99: S. 37–54.
- D. B. Nahon (1991). *Introduction to the petrology of soils and chemical weathering*. John Wiley and Sons, Inc.
- H. W. Nesbitt & R. E. Wilson (1992). Recent chemical weathering of basalts. *Am. J. Sci.*, 292: S. 740–777.
- E. A. Niederbudde & H. Kußmaul (1978). Tonmineraleigenschaften und -umwandlungen in Parabraunerde. - Profilpaare unter Acker und Wald in Süddeutschland. *Geoderma*, 20: S. 239–255.

- W. Pohl (2000). *Bedeutung endolithischer Biofilme für die Prozesse an Karbonatgesteins-Oberflächen*. Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen. Im Druck.
- H. Ruppert (1980). Fixation of metals on hydrous manganese and iron oxide phases in marine Mn-Fe-nodules and sediments. *Chemie der Erde*, 39: S. 97–132.
- H. Ruppert & A. Glasow (2000). The composition of surface layers in a weathering profile of loess: contrasting results from chemical extractions, X-ray photoelectron and electron microprobe spectrometry. In Vorbereitung.
- B. L. Sawhney (1986). Electron Microprobe Analysis. In Klute (1986), Kap. 10, S. 271–290. SSSA Book Series 1.
- F. Scheffer & H. Gebhard (1977). Chemisch-mineralogische und mikromorphologische Untersuchungen einer eutrophen (Ramann-) Braunerde des Budapester Hügellandes. *Geoderma*, 17: S. 145–163.
- F. Scheffer, B. Meyer & E. Kalk (1958). Mineraluntersuchungen am Würm-Löß südniedersächsischer Lößfluren als Voraussetzung für die Mineralanalyse verschiedener Lößbodentypen. *Chemie der Erde*, 19: S. 338–360.
- F. Scheffer & P. Schachtschabel (Hg.) (1992). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 491 S.
- S. Schlabach (1996). Konzentrationsänderungen natürlicher und anthropogener Inhaltsstoffe in abgepreßten Porenlösungen mit dem pH-Wert und der Tiefe auf versauerten Waldstandorten (Harz, Solling). Unveröffentlichte Diplomarbeit, angefertigt am Geochemischen Institut der Georg-August-Universität zu Göttingen.
- E. Schlichting & H.-P. Blume (1961). Art und Ausmaß der Veränderungen des Tonmineralbestandes typischer Lößböden aus jungpleistozänem Geschiebemergel und ihrer Horizonte. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 95: S. 227–239.
- B. Schnetger (1992). Chemical composition of loess from local and worldwide view. *N. Jb. Miner. Mh.*, 1: S. 29–47. Jg. 1992.
- U. Schwertmann (1971). Transformation of hematite to goethite in soils. *Nature*, 232: S. 624–625.
- U. Schwertmann & R. M. Taylor (1989). Iron Oxides. In Dixon & Weed (1989), Kap. 8, S. 379–438. SSSA Book Series 1.
- C. I. Steefel & P. van Capellen (1990). A new kinetic approach to modelling water-rock interaction: The role of nucleation, precursors and Ostwald ripening. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54: S. 2657–2677.

- A. T. Stone (1997). Reactions of extracellular organic ligands with dissolved metal ions and mineral surfaces. *Rev. Mineral.*, 35: S. 309–344.
- G. Strotzky & L. T. Rem (1966). Influence of clay minerals on microorganisms: 1. Montmorillonite and kaolinite on bacteria. *Can. J. Microbiol.*, 12: S. 547–563.
- S. R. Taylor, S. M. McLennan & M. T. McCulloch (1983). Geochemistry of loess, continental crust composition and crustal model ages. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: S. 1897–1905.
- K. Tazaki (1997). Biomineralization of layer silicates and hydrated Fe/Mn oxides in microbial mats: an electron microscopical study. *Clays and Clay Min.*, 45: S. 203–212.
- K. Tazaki, W. S. Fyfe, S. Iizumi, Y. Sampei, H. Watanabe, M. Goto, Y. Miyake & S. Noda (1994). Clay aerosols and arctic ice algae. *Clays and Clay Min.*, 45: S. 203–212.
- B. Ulrich (1986). Natural and anthropogenic components of soil acidification. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 149: S. 702–717.
- M. Veerhoff (1992). *Silicatverwitterung und Veränderungen des Tonmineralbestandes in Waldböden als Folge von Versauerungsvorgängen*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Band 8.
- Y.-Y. Wang (1987). Quaternary climatic change in Chinese loess plateau. *Sci. China*, S. 1099–1108.
- K. H. Wedepohl (1984). Die Zusammensetzung der oberen Erdkruste und der natürliche Kreislauf ausgewählter Metalle. Ressourcen. In E. Merian (Hg.), *Metalle in der Umwelt*, S. 1–10. Verlag Chemie, Weinheim.
- Q.-Z. Wen, W.-H. Yang, G.-Y. Diao, S.-H. Yu, F.-Q. Sun & Y.-L. Liu (1984). The evolution of chemical elements in loess of China and paleoclimatic conditions during loess deposition. In M. Pesci (Hg.), *Lithology and stratigraphy of loess and paleosols*. Geogr. Res. Inst., Hung. Acad. Sci, Budapest.

Anhang

Tab. 6.1: Gesamtgehalte der Hauptelemente (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Ti	Summe
0-5	2,9	0,28	1,04	1,51	0,16	0,011	0,57	0,041	31,8	0,30	78,7
5-10	4,0	0,24	1,35	1,83	0,27	0,021	0,78	0,025	37,5	0,42	94,6
15-20	4,1	0,23	1,37	1,86	0,26	0,029	0,71	0,021	38,2	0,42	96,2
25-30	4,3	0,23	1,44	1,89	0,27	0,045	0,73	0,020	38,0	0,44	96,2
35-40	5,2	0,21	2,18	2,01	0,42	0,049	0,70	0,021	36,3	0,44	95,8
45-50	5,2	0,20	2,21	2,01	0,42	0,046	0,70	0,022	36,1	0,44	95,5
55-60	6,2	0,26	2,91	2,10	0,57	0,045	0,64	0,027	34,5	0,44	95,3
65-70	6,1	0,31	2,89	2,12	0,60	0,034	0,65	0,027	34,4	0,43	95,0
75-80	5,9	0,31	2,80	2,02	0,58	0,042	0,77	0,033	35,0	0,44	95,6
85-90	5,5	0,31	2,63	1,96	0,54	0,043	0,76	0,038	35,6	0,44	95,7
95-100	5,5	0,32	2,59	1,93	0,55	0,039	0,81	0,038	35,8	0,44	96,2
105-110	5,0	0,31	2,21	1,93	0,48	0,033	0,79	0,034	36,3	0,44	95,8
115-120	5,1	0,32	2,20	1,96	0,47	0,035	0,81	0,037	36,8	0,43	97,0
125-130	5,5	0,37	2,55	2,08	0,58	0,050	0,82	0,041	35,5	0,45	96,1
135-140	5,5	0,39	2,50	2,07	0,56	0,059	0,79	0,041	35,9	0,46	96,6
145-150	5,5	0,39	2,54	2,08	0,57	0,046	0,83	0,039	35,7	0,45	96,3
155-160	5,4	0,38	2,46	2,04	0,55	0,045	0,85	0,041	35,9	0,45	96,4
165-170	5,3	0,38	2,39	2,01	0,53	0,044	0,87	0,043	36,1	0,45	96,5
175-180	4,7	0,38	2,15	1,77	0,46	0,038	0,77	0,048	37,2	0,46	97,1
185-190	4,6	0,39	2,05	1,74	0,45	0,036	0,85	0,046	37,3	0,47	96,9
195-200	4,7	0,40	2,08	1,73	0,43	0,045	0,83	0,048	37,5	0,44	97,5
205-210	4,8	0,40	2,13	1,78	0,46	0,044	0,87	0,050	37,2	0,44	97,2
215-220	4,6	0,43	2,00	1,77	0,45	0,041	0,92	0,051	37,5	0,47	97,5
225-230	4,7	0,44	2,01	1,74	0,44	0,048	0,91	0,046	37,5	0,46	97,5
235-240	4,5	0,45	1,86	1,74	0,40	0,043	0,91	0,050	37,8	0,43	97,5
245-250	4,8	0,49	2,22	1,73	0,49	0,049	0,91	0,058	36,9	0,47	97,1
255-260	4,7	0,49	2,06	1,81	0,47	0,046	0,91	0,056	37,4	0,45	97,7
265-270	4,6	0,51	1,97	1,88	0,50	0,046	0,85	0,055	37,3	0,42	97,4
275-280	4,4	2,02	1,87	1,78	0,71	0,044	0,82	0,051	35,7	0,42	95,5
285-290	4,1	2,44	1,71	1,71	0,74	0,036	0,77	0,048	35,7	0,39	95,1
295-300	4,1	3,51	1,75	1,69	0,79	0,043	0,81	0,051	34,3	0,40	93,9
305-310	4,1	3,84	1,71	1,69	0,77	0,036	0,79	0,051	34,0	0,40	93,4
315-320	4,1	3,12	1,65	1,80	0,75	0,036	0,76	0,045	34,9	0,37	94,3
325-330	3,5	2,69	1,31	1,81	0,68	0,030	0,59	0,041	36,5	0,29	95,1
335-340	3,8	3,44	1,55	1,68	0,69	0,036	0,76	0,046	35,2	0,37	94,6
345-350	4,0	3,98	1,65	1,60	0,75	0,036	0,78	0,049	34,2	0,39	93,7

Tab. 6.2: Gesamtgehalte der Nebenelemente (mg/kg) im Lößprofil Reinhausen

Tiefe (cm)	Ba	Co	Cr	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sc	Sr	V	Y	Zn	Zr
0-5	368	3	50	8	14	18	65	60	5	83	33	17	23	329
5-10	404	3	59	8	16	6	20	83	4	84	42	24	63	561
15-20	393	7	52	7	18	8	23	86	8	86	38	31	67	625
25-30	408	7	56	7	20	11	20	92	4	84	46	28	51	630
35-40	410	8	63	12	21	14	20	102	8	82	59	29	67	602
45-50	426	11	82	10	20	32	15	99	8	78	27	27	42	563
55-60	419	10	67	13	22	26	8	109	10	83	71	30	78	497
65-70	443	11	67	11	21	22	6	105	6	86	76	35	72	469
75-80	411	7	71	13	22	21	18	108	10	87	75	36	79	553
85-90	390	5	69	12	19	18	10	100	7	88	70	35	73	548
95-100	391	8	77	11	19	20	16	98	9	88	75	37	69	634
105-110	415	9	66	11	17	13	17	96	9	90	66	40	63	625
115-120	389	12	65	10	16	11	16	99	8	91	65	39	58	625
125-130	405	9	69	12	17	13	18	108	8	93	69	37	71	565
135-140	424	10	70	11	15	15	23	105	9	94	74	39	66	577
145-150	427	15	71	12	16	15	26	104	6	95	74	40	65	566
155-160	424	13	70	12	16	15	22	102	7	95	72	40	65	578
165-170	421	10	68	11	15	14	17	100	8	95	69	39	65	590
175-180	349	13	76	10	16	14	17	91	9	91	62	42	59	752
185-190	342	8	78	8	16	12	17	84	7	90	59	42	59	758
195-200	351	7	75	8	14	14	17	88	3	88	59	35	65	630
205-210	351	3	78	9	15	18	16	88	8	90	64	40	63	619
215-220	338	7	75	10	15	10	18	84	7	93	60	42	58	724
225-230	351	8	78	6	16	13	21	83	9	91	57	39	60	679
235-240	343	6	75	8	14	12	16	83	5	90	59	36	58	643
245-250	342	10	84	10	18	18	15	86	10	92	60	43	62	690
255-260	359	12	77	9	15	16	19	87	10	94	60	40	58	647
265-270	366	7	66	9	16	13	20	91	7	93	58	36	56	616
275-280	347	10	67	7	15	11	14	84	6	119	52	37	64	624
285-290	358	10	64	9	11	7	12	83	7	127	52	33	50	621
295-300	340	9	63	8	12	9	16	81	5	149	49	35	58	643
305-310	348	4	63	6	13	8	16	84	14	155	51	33	66	613
315-320	362	7	60	7	13	6	19	87	9	140	51	33	52	590
325-330	371	4	42	9	9	3	19	85	7	125	39	26	47	455
335-340	350	8	59	6	12	4	11	79	8	147	50	32	49	588
345-350	329	9	61	6	15	7	15	80	10	161	49	33	56	623

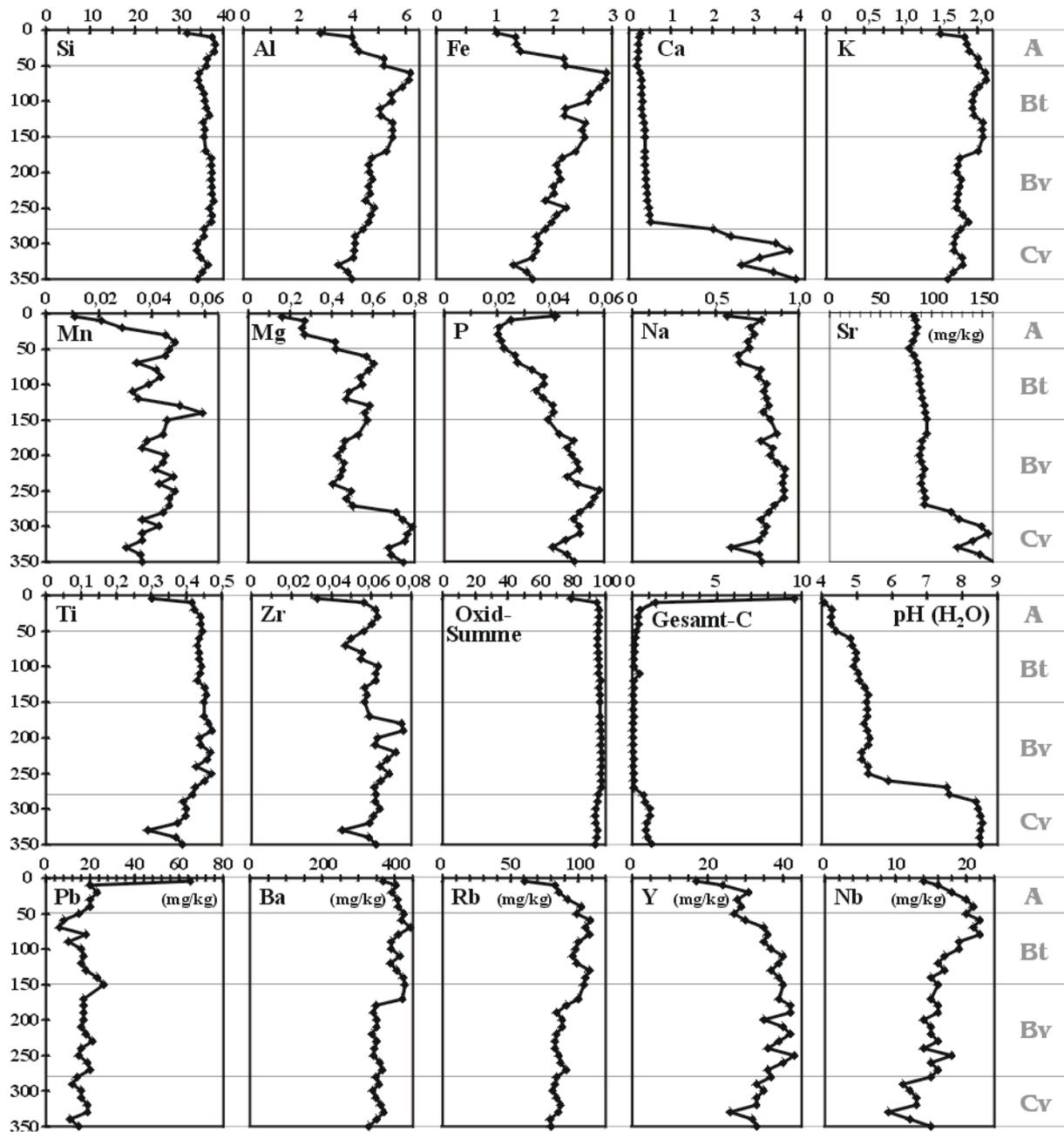


Abb. 6.1: Tiefenverläufe der Gesamtgehalte der Hauptelemente (Gew.-%) und der Nebenelemente (mg/kg) sowie der pH(H₂O)-Werte im Lößprofil Reinhausen

Tab. 6.3: Dithionit-extrahierbare Anteile im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Ti	Zr
5-10	0,171	0,009	0,409	0,095	0,004	0,006	0,012	0,00115
15-20	0,162	0,006	0,365	0,089	0,004	0,027	0,020	0,00190
25-30	0,141	0,006	0,355	0,094	0,003	0,024	0,015	0,00175
35-40	0,145	0,006	0,383	0,091	0,003	0,024	0,016	0,00210
45-50	0,194	0,028	0,784	0,096	0,017	0,032	0,026	0,00400
55-60	0,181	0,069	0,810	0,092	0,033	0,019	0,027	0,00410
65-70	0,168	0,087	0,832	0,086	0,039	0,018	0,029	0,00405
75-80	0,156	0,082	0,726	0,081	0,036	0,021	0,025	0,00315
85-90	0,150	0,084	0,760	0,085	0,036	0,021	0,023	0,00290
95-100	0,166	0,105	0,841	0,089	0,043	0,022	0,026	0,00355
105-110	0,148	0,092	0,644	0,085	0,034	0,017	0,022	0,00245
115-120	0,137	0,082	0,629	0,077	0,032	0,018	0,017	0,00155
125-130	0,129	0,097	0,560	0,078	0,035	0,040	0,016	0,00120
135-140	0,126	0,097	0,597	0,070	0,035	0,029	0,015	0,00125
145-150	0,130	0,103	0,631	0,075	0,036	0,024	0,015	0,00125
155-160	0,124	0,081	0,536	0,087	0,030	0,019	0,011	0,00070
165-170	0,120	0,087	0,510	0,076	0,029	0,027	0,012	0,00095
175-180	0,120	0,084	0,551	0,072	0,027	0,019	0,011	0,00080
185-190	0,112	0,082	0,494	0,070	0,024	0,018	0,0093	0,00060
195-200	0,137	0,084	0,449	0,079	0,025	0,022	0,0083	0,00050
205-210	0,109	0,083	0,469	0,071	0,022	0,022	0,0081	0,00040
215-220	0,112	0,087	0,482	0,071	0,023	0,024	0,0072	0,00045
225-230	0,117	0,097	0,547	0,065	0,023	0,032	0,0082	0,00065
235-240	0,111	0,096	0,508	0,065	0,022	0,021	0,0064	0,00060
245-250	0,123	0,131	0,651	0,069	0,029	0,026	0,0073	0,00070
255-260	0,106	0,120	0,482	0,072	0,020	0,025	0,0050	0,00055
265-270	0,101	0,147	0,469	0,069	0,024	0,025	0,0045	0,00060
275-280	0,104	0,981	0,452	0,071	0,066	0,021	0,0044	0,00055
285-290	0,098	1,78	0,445	0,064	0,055	0,019	0,0037	0,00035
295-300	0,098	2,42	0,421	0,067	0,082	0,022	0,0038	0,00045
305-310	0,093	2,69	0,351	0,067	0,074	0,018	0,0032	0,00040
315-320	0,094	1,74	0,351	0,063	0,053	0,016	0,0033	0,00045
325-330	0,082	1,43	0,231	0,063	0,046	0,011	0,0019	0,00020
335-340	0,097	2,26	0,397	0,070	0,055	0,016	0,0036	0,00035
345-350	0,098	2,70	0,402	0,070	0,080	0,017	0,0036	0,00040

Tab. 6.4: Oxalat-extrahierbare Anteile im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Si	Ti
0-5	0,214	0,0025	0,316	0,023	0,012	0,046	0,0062
5-10	0,188	0,0033	0,291	0,0070	0,0014	0,043	0,0067
10-15	0,169	0,0027	0,269	0,0026	0,0006	0,044	0,0069
15-20	0,168	0,0023	0,247	0,0025	0,0018	0,045	0,0072
25-30	0,144	0,0005	0,211	0,0009	0,0021	0,043	0,0081
35-40	0,138	0,0006	0,211	0,0016	0,0010	0,043	0,0084
45-50	0,188	0,0058	0,164	0,0056	0,0029	0,048	0,010
55-60	0,216	0,0015	0,141	0,011	0,022	0,052	0,010
65-70	0,159	0,0021	0,197	0,013	0,035	0,055	0,012
75-80	0,150	0,0021	0,160	0,012	0,040	0,053	0,012
85-90	0,143	0,0024	0,146	0,010	0,037	0,051	0,010
95-100	0,128	0,0023	0,142	0,0086	0,034	0,050	0,010
105-110	0,105	0,0025	0,136	0,0073	0,030	0,050	0,010
115-120	0,101	0,0021	0,131	0,0086	0,034	0,051	0,0084
125-130	0,097	0,0021	0,120	0,0074	0,035	0,050	0,0088
135-140	0,098	0,0020	0,115	0,0080	0,039	0,050	0,0076
145-150	0,073	0,0020	0,087	0,0051	0,026	0,047	0,0050
155-160	0,090	0,0021	0,106	0,0075	0,036	0,049	0,0062
165-170	0,086	0,0023	0,112	0,0071	0,030	0,049	0,0064
175-180	0,079	0,0028	0,102	0,0079	0,031	0,046	0,0059
185-190	0,084	0,0026	0,100	0,0066	0,032	0,051	0,0050
195-200	0,076	0,0028	0,097	0,0056	0,029	0,049	0,0057
205-210	0,064	0,0020	0,080	0,0063	0,027	0,048	0,0031
215-220	0,054	0,0026	0,072	0,0037	0,019	0,047	0,0027
225-230	0,058	0,0029	0,082	0,012	0,021	0,048	0,0033
235-240	0,061	0,0025	0,088	0,0057	0,020	0,050	0,0022
245-250	0,059	0,0022	0,098	0,0058	0,023	0,051	0,0018
255-260	0,047	0,0031	0,096	0,0060	0,019	0,052	0,0011
265-270	0,055	0,0023	0,104	0,0071	0,024	0,061	0,0017
275-280	0,036	0,0009	0,073	0,0042	0,195	0,058	0,0007
285-290	0,035	0,0028	0,051	0,0048	0,207	0,057	0,0003
295-300	0,031	0,0018	0,046	0,0039	0,189	0,054	0,0008
305-310	0,032	0,0035	0,041	0,0037	0,213	0,055	0,0003
315-320	0,028	0,0026	0,047	0,0035	0,186	0,054	0,0010
325-330	0,028	0,0016	0,030	0,0047	0,174	0,053	0,0001

Tab. 6.5: Tiron-extrahierbare Anteile im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	Si
5-10	0,398	0,007	0,407	0,028	0,008	2,84
15-20	0,464	0,000	0,410	0,032	0,016	2,95
25-30	0,451	0,000	0,383	0,035	0,022	2,93
35-40	0,414	0,000	0,370	0,030	0,031	2,82
45-50	0,732	0,028	0,594	0,061	0,018	3,31
55-60	1,296	0,038	1,085	0,151	0,041	4,44
65-70	1,141	0,045	0,889	0,124	0,008	4,00
75-80	1,105	0,061	0,909	0,143	0,019	4,08
85-90	0,896	0,057	0,795	0,124	0,022	3,77
95-100	1,212	0,074	1,001	0,159	0,023	4,15
105-110	0,865	0,089	0,759	0,104	0,026	4,40
115-120	0,747	0,058	0,667	0,106	0,019	3,48
125-130	0,774	0,070	0,688	0,110	0,025	3,59
135-140	0,646	0,092	0,615	0,096	0,029	4,25
145-150	0,562	0,076	0,552	0,081	0,029	4,14
155-160	0,326	0,064	0,320	0,055	0,011	3,76
165-170	0,432	0,071	0,417	0,061	0,036	3,82
175-180	0,347	0,070	0,341	0,046	0,015	3,70
185-190	0,352	0,075	0,350	0,051	0,018	3,76
195-200	0,324	0,069	0,341	0,048	0,020	3,74
205-210	0,582	0,080	0,403	0,060	0,025	3,74
215-220	0,357	0,073	0,351	0,054	0,026	3,73
225-230	0,365	0,087	0,374	0,056	0,031	3,77
235-240	0,310	0,081	0,334	0,049	0,019	3,73
245-250	0,150	0,116	0,237	0,033	0,023	1,17
255-260	0,132	0,113	0,215	0,020	0,020	1,12
265-270	0,119	0,144	0,196	0,024	0,022	1,14
275-280	0,106	0,533	0,183	0,030	0,014	1,15
285-290	0,097	0,617	0,143	0,029	0,013	1,11
295-300	0,090	0,847	0,127	0,032	0,015	1,10
305-310	0,102	0,982	0,131	0,030	0,013	1,11
315-320	0,257	0,723	0,153	0,062	0,016	1,12
325-330	0,092	0,374	0,111	0,021	0,007	1,02
335-340	0,115	0,868	0,110	0,034	0,012	1,06
345-350	0,102	0,833	0,130	0,023	0,010	1,08

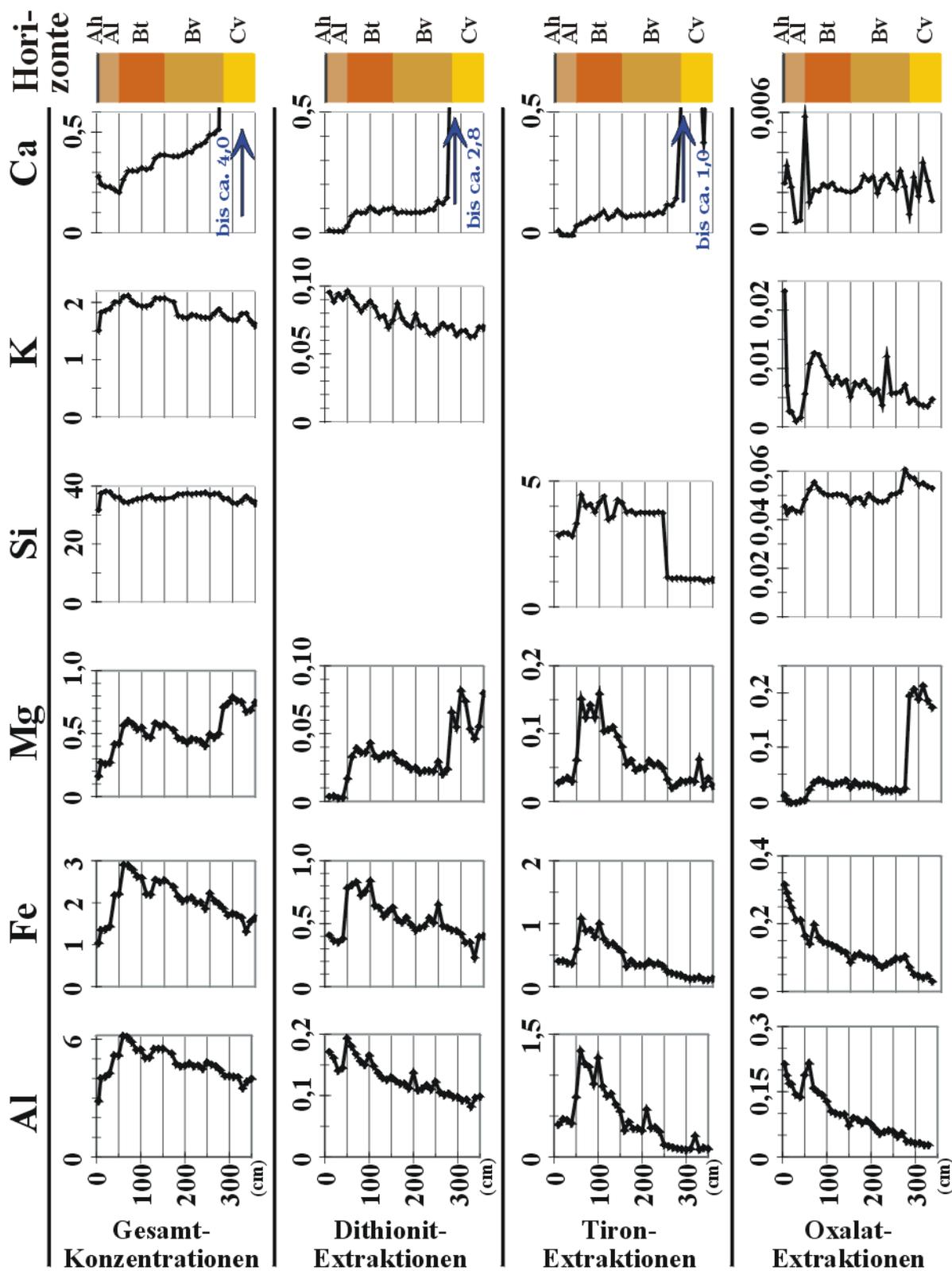


Abb. 6.2: Zusammenstellung der Tiefenverläufe der Gesamtgehalte und der mit Dithionit, Oxalat bzw. Tiron extrahierbaren Anteile wichtiger Elemente (Gew.-%) im Lößprofil Reinhausen

Tab. 6.6: Effektiv austauschbar gebundene Kationen im Lößprofil Reinhausen (mval/kg bzw. pH)

Tiefe	Ca	Mg	K	Na	Al	pH
5	41,2	8,68	4,27	0,0895	36,8	
10	7,89	3,32	1,75	0,0482	50,4	3,2
15	0,923	2,12	0,865	0,0329	40,3	3,2
20	0,811	1,84	0,858	0,0335	40,1	3,3
30	0,261	1,75	0,715	0,0296	28,4	3,7
40	0,397	2,98	0,818	0,0380	30,6	3,6
50	3,55	4,34	1,48	0,0671	49,7	3,6
60	23,4	9,94	1,99	0,153	34,1	3,6
70	40,5	25,0	2,70	0,170	29,8	3,6
80	53,9	28,0	2,80	0,192	21,0	3,6
90	49,3	24,7	2,06	0,243	17,5	3,8
100	49,2	24,1	1,91	0,228	15,4	3,9
110	49,2	23,7	1,92	0,232	11,5	3,9
120	54,4	23,7	2,07	0,224	8,08	3,7
130	78,2	30,1	2,49	0,308	9,44	3,8
140	63,6	26,3	2,08	0,277	8,21	3,7
150	34,4	16,2	1,20	0,150	4,43	3,5
160	48,9	20,3	1,57	0,212	4,64	3,6
170	66,0	24,5	2,11	0,281	5,51	3,6
180	44,2	17,7	1,47	0,188	3,39	3,6
190	52,5	18,7	1,54	0,212	3,32	3,7
200	46,2	15,5	1,26	0,229	3,45	3,8
210	50,6	16,9	1,47	0,246	2,81	3,9
220	46,5	13,6	1,22	0,281	2,73	3,7
230	57,5	14,1	1,56	0,346	2,26	3,9
240	65,2	13,9	1,37	0,460	1,78	4,1
250	73,1	15,0	1,53	0,496	0,776	4,1
260	118,4	17,5	1,91	0,599	0,281	5,0
270	128,3	13,4	1,32	0,312	0,071	6,6
280	100,5	10,4	1,15	0,232	0,033	7,2
290	109,7	11,3	1,46	0,193	0,032	7,2
300	106,0	11,0	1,32	0,119	0,030	7,2
310	109,5	11,7	1,37	0,0985	0,022	
320	91,1	9,85	1,30	0,101	0,015	
330	93,8	10,4	1,24	0,0389	0,009	

Tab. 6.7: Chemische Zusammensetzung der Grobtonfraktion (0,6–2,0 μm) im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	Ti	Oxidsumme
0–5	6,60	0,46	3,83	1,30	0,81	0,05	0,11	15,2	0,34	54,9
5–10	10,1	0,11	6,19	2,23	1,11	0,06	0,14	19,7	0,72	76,3
10–15	11,9	0,09	7,12	2,36	1,33	0,09	0,17	20,7	0,64	83,6
15–20	10,8	0,08	6,20	2,58	1,32	0,07	0,20	20,1	0,56	79,1
45–50	12,2	0,08	6,86	2,63	1,48	0,15	0,16	21,1	0,55	85,1
55–60	10,1	0,16	6,10	2,94	1,56	0,14	0,19	22,1	0,67	83,1
115–120	11,5	0,41	6,64	3,16	1,56	0,18	0,18	23,1	0,61	89,2
165–170	11,7	0,53	7,00	2,83	1,63	0,25	0,15	22,7	0,55	88,8
215–220	11,4	0,55	6,96	2,95	1,61	0,11	0,16	22,3	0,47	87,2
245–250	11,1	0,66	7,45	2,90	1,53	0,18	0,16	22,6	0,56	88,4
265–270	10,2	0,79	6,59	2,87	1,56	0,07	0,19	23,8	0,55	88,2
285–290	11,0	1,06	7,20	2,75	1,66	0,06	0,13	22,7	0,38	88,0
315–320	10,5	0,92	6,08	3,21	1,84	0,07	0,21	23,7	0,41	88,6

Tab. 6.8: Chemische Zusammensetzung der Mitteltonfraktion (0,2–0,6 μm) im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	Ti	Oxidsumme
0–5	9,02	0,35	4,28	1,46	0,98	0,04	0,12	17,0	0,35	64,2
5–10	11,9	0,12	7,30	1,81	1,26	0,05	0,09	19,7	0,50	80,7
10–15	12,2	0,19	7,69	2,07	1,49	0,08	0,13	18,8	0,53	80,7
15–20	12,2	0,21	7,26	2,11	1,45	0,08	0,15	19,5	0,60	81,8
45–50	12,8	0,18	7,20	2,32	1,33	0,13	0,11	22,9	0,62	90,0
55–60	11,6	0,32	7,38	2,43	1,45	0,09	0,11	22,5	0,66	87,8
115–120	11,0	0,48	7,37	2,82	1,62	0,10	0,16	23,1	0,65	88,9
165–170	11,5	0,59	7,59	2,73	1,62	0,08	0,14	23,0	0,53	89,7
215–220	11,5	0,62	7,62	2,77	1,63	0,06	0,15	22,7	0,50	89,2
245–250	10,9	0,68	7,70	2,84	1,56	0,07	0,19	22,7	0,51	88,3
265–270	11,1	0,87	7,29	2,85	1,74	0,06	0,17	23,2	0,44	89,6
285–290	10,9	0,95	7,19	2,86	1,74	0,06	0,17	23,0	0,50	88,8
315–320	11,1	0,93	6,95	3,02	1,99	0,06	0,16	23,2	0,43	89,8

Tab. 6.9: Chemische Zusammensetzung der Feintonfraktion ($< 0,2\mu\text{m}$) im Lößprofil Reinhausen (Gew.-%)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Si	Ti	Oxidsumme
5–10	11,8	0,42	7,78	1,69	1,36	0,06	0,09	19,3	0,37	80,3
10–15	12,8	0,09	8,38	1,77	1,46	0,08	0,08	20,1	0,52	84,8
15–20	12,9	0,08	7,97	1,88	1,43	0,08	0,09	20,6	0,58	85,6
45–50	13,3	0,26	8,10	1,99	1,39	0,12	0,06	22,4	0,43	90,6
55–60	12,8	0,35	8,19	2,06	1,51	0,08	0,06	22,2	0,37	89,7
115–120	11,8	0,58	8,20	2,45	1,68	0,08	0,08	22,5	0,43	89,6
165–170	11,6	0,65	7,96	2,53	1,66	0,06	0,10	22,6	0,47	89,2
215–220	11,2	0,71	8,01	2,61	1,63	0,08	0,13	22,5	0,36	88,5
245–250	11,3	0,81	8,59	2,53	1,67	0,08	0,10	22,6	0,29	89,7
265–270	10,7	1,07	8,20	2,55	1,78	0,05	0,09	21,8	0,28	86,7
285–290	11,1	1,07	7,38	2,73	1,71	0,05	0,13	23,3	0,36	89,8
315–320	11,2	1,07	7,49	2,72	2,10	0,06	0,09	22,8	0,29	89,6

Tab. 6.10: Gesamtgehalte der Hauptelemente (Gew.-%) und Glühverlust (LOI) des Feinbodens (< 2 mm) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Ti	LOI
0–2	4,2	0,150	1,52	1,15	0,21	0,008	0,46	0,07	37,6	0,50	5,9
2–5	4,3	0,186	1,55	1,51	0,24	0,015	0,46	0,05	37,5	0,50	5,3
5–10	4,3	0,164	1,73	1,59	0,24	0,015	0,47	0,03	37,3	0,51	5,4
10–15	4,7	0,179	2,65	1,79	0,27	0,023	0,51	0,03	36,6	0,51	4,5
15–20	5,1	0,200	2,20	1,90	0,31	0,04	0,53	0,03	36,0	0,50	5,3
20–30	5,3	0,200	2,21	1,93	0,30	0,06	0,54	0,05	35,4	0,49	6,1
30–40	5,2	0,214	1,96	2,04	0,34	0,05	0,59	0,04	35,9	0,49	5,4
40–50	5,5	0,214	1,91	2,13	0,38	0,05	0,58	0,03	36,4	0,49	4,0
50–60	5,7	0,186	2,33	2,24	0,45	0,05	0,56	0,03	35,7	0,49	4,2
60–75	6,6	0,136	2,80	2,67	0,62	0,05	0,44	0,03	34,1	0,50	4,6
75–95	8,3	0,057	3,68	3,49	0,87	0,09	0,23	0,04	31,0	0,47	5,8
95–115	9,7	0,029	4,43	4,16	1,07	0,10	0,13	0,04	28,7	0,47	5,9
115–135	9,7	0,021	4,24	4,28	1,07	0,14	0,11	0,04	28,6	0,46	6,2
135–185	10,2	0,021	3,95	4,42	1,14	0,17	0,10	0,04	28,2	0,48	6,4
185–235	10,0	0,021	3,64	4,48	1,09	0,19	0,13	0,04	28,3	0,47	6,8
235–280	10,6	0,043	3,59	4,86	1,18	0,26	0,13	0,05	27,8	0,49	6,0

Tab. 6.11: Chemische Zusammensetzung (Gew.-%) und Glühverlust (LOI) der Gesamtttonfraktion (< 2,0 µm) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Ti	LOI
0–2	10,2	0,129	5,48	1,54	0,70	0,015	0,20	0,25	22,1	0,65	20,4
2–5	11,0	0,107	5,58	2,11	0,81	0,008	0,19	0,21	21,9	0,64	18,6
5–10	11,1	0,071	6,47	2,15	0,81	0,015	0,16	0,13	20,9	0,68	19,3
10–15	11,9	0,129	9,50	2,28	0,86	0,070	0,14	0,13	19,8	0,65	15,6
15–20	12,9	0,064	7,72	2,30	0,96	0,11	0,11	0,11	19,2	0,70	17,3
20–30	13,2	0,050	7,00	2,19	0,83	0,19	0,08	0,17	19,1	0,65	18,4
30–40	13,5	0,043	6,36	2,54	1,05	0,18	0,07	0,16	19,5	0,65	16,9
40–50	14,0	0,043	6,30	2,74	1,12	0,15	0,05	0,13	20,5	0,67	13,8
50–60	12,9	0,043	6,61	2,96	1,18	0,13	0,06	0,10	21,5	0,69	13,0
60–75	13,0	0,029	6,30	3,65	1,33	0,13	0,07	0,10	22,3	0,65	10,7
75–95	13,2	0,029	6,36	4,39	1,39	0,13	0,07	0,08	22,3	0,43	9,4
95–115	13,2	0,036	6,76	4,61	1,45	0,15	0,07	0,07	22,1	0,38	9,1
115–135	13,0	0,021	6,83	4,62	1,45	0,20	0,07	0,09	21,9	0,37	9,8
135–185	13,2	0,021	6,47	4,52	1,43	0,22	0,06	0,08	22,0	0,33	9,8
185–235	13,1	0,021	6,19	4,96	1,49	0,22	0,05	0,09	21,7	0,35	10,3
235–280	13,0	0,029	6,02	4,87	1,46	0,25	0,06	0,11	22,3	0,37	9,40

Tab. 6.12: Chemische Zusammensetzung (Gew.-%) und Glühverlust (LOI) der Feintonfraktion ($< 0,2\mu\text{m}$) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Ti	LOI
0–2	10,2	0,136	8,76	1,26	0,68	0,015	0,14	0,41	21,3	0,58	17,9
2–5	11,5	0,093	8,55	1,74	0,77	0,008	0,11	0,35	20,3	0,52	17,2
5–10	11,9	0,064	8,73	1,79	0,72	0,023	0,059	0,23	19,2	0,53	19,0
10–15	12,2	0,114	12,19	1,89	0,77	0,093	0,022	0,21	17,5	0,49	16,8
15–20	13,0	0,057	10,28	1,90	0,93	0,10	0,022	0,13	17,5	0,89	17,2
20–30	13,4	0,050	8,61	1,50	0,69	0,42	0,030	0,28	17,5	0,94	19
30–40	14,1	0,029	7,94	2,09	1,01	0,37	0,030	0,25	17,9	0,86	16,9
40–50	13,5	0,021	7,82	2,29	1,08	0,32	0,022	0,21	18,8	0,76	16,3
50–60	13,1	0,036	7,53	2,66	1,15	0,20	0,030	0,12	20,6	0,71	13,5
60–75	13,2	0,029	6,71	3,21	1,31	0,19	0,045	0,13	21,8	0,64	11,0
75–95	13,1	0,021	6,38	3,82	1,32	0,14	0,059	0,07	23,1	0,19	9,0
95–115	13,3	0,029	6,75	4,19	1,44	0,16	0,045	0,07	23,0	0,16	7,8
115–135	13,1	0,021	6,78	4,17	1,41	0,22	0,059	0,09	22,3	0,13	9,7
135–185	13,1	0,021	6,36	4,16	1,40	0,27	0,052	0,09	22,8	0,11	9,2
185–235	12,6	0,014	6,64	4,20	1,42	0,27	0,045	0,09	21,6	0,11	12,2
235–280	13,0	0,021	6,12	4,29	1,46	0,31	0,052	0,10	22,1	0,09	11,00

Tab. 6.13: Chemische Zusammensetzung (Gew.-%) und Glühverlust (LOI) der Grobtonfraktion ($0,2-2,0\mu\text{m}$) im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

Tiefe (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Ti	LOI
0–2	10,3	0,12	2,06	1,83	0,73	0,015	0,26	0,08	23,0	0,72	23,1
2–5	10,6	0,11	2,86	2,46	0,85	0,015	0,25	0,08	23,3	0,74	19,8
5–10	10,7	0,071	5,18	2,36	0,86	0,015	0,22	0,08	21,9	0,77	19,5
10–15	11,7	0,136	8,29	2,46	0,90	0,054	0,19	0,10	20,8	0,73	15,0
15–20	12,9	0,064	7,04	2,41	0,97	0,12	0,13	0,11	19,6	0,65	17,3
20–30	13,1	0,050	6,68	2,32	0,86	0,15	0,10	0,14	19,4	0,59	18,3
30–40	13,5	0,043	6,13	2,61	1,06	0,15	0,08	0,14	19,8	0,62	16,9
40–50	14,1	0,043	6,00	2,83	1,13	0,12	0,06	0,12	20,8	0,65	13,2
50–60	12,8	0,043	6,13	3,12	1,19	0,09	0,07	0,08	21,9	0,68	12,8
60–75	12,8	0,036	6,03	3,93	1,34	0,10	0,08	0,08	22,5	0,66	10,5
75–95	13,2	0,029	6,35	4,75	1,44	0,12	0,07	0,08	21,9	0,58	9,6
95–115	13,1	0,036	6,77	4,86	1,46	0,15	0,09	0,07	21,5	0,51	9,8
115–135	12,9	0,021	6,85	4,87	1,47	0,19	0,08	0,09	21,6	0,50	9,9
135–185	13,2	0,021	6,55	4,77	1,45	0,19	0,07	0,07	21,5	0,49	10,2
185–235	13,3	0,029	6,02	5,25	1,52	0,19	0,06	0,09	21,8	0,44	9,6
235–280	13,0	0,036	5,97	5,14	1,46	0,22	0,07	0,11	22,5	0,51	8,70

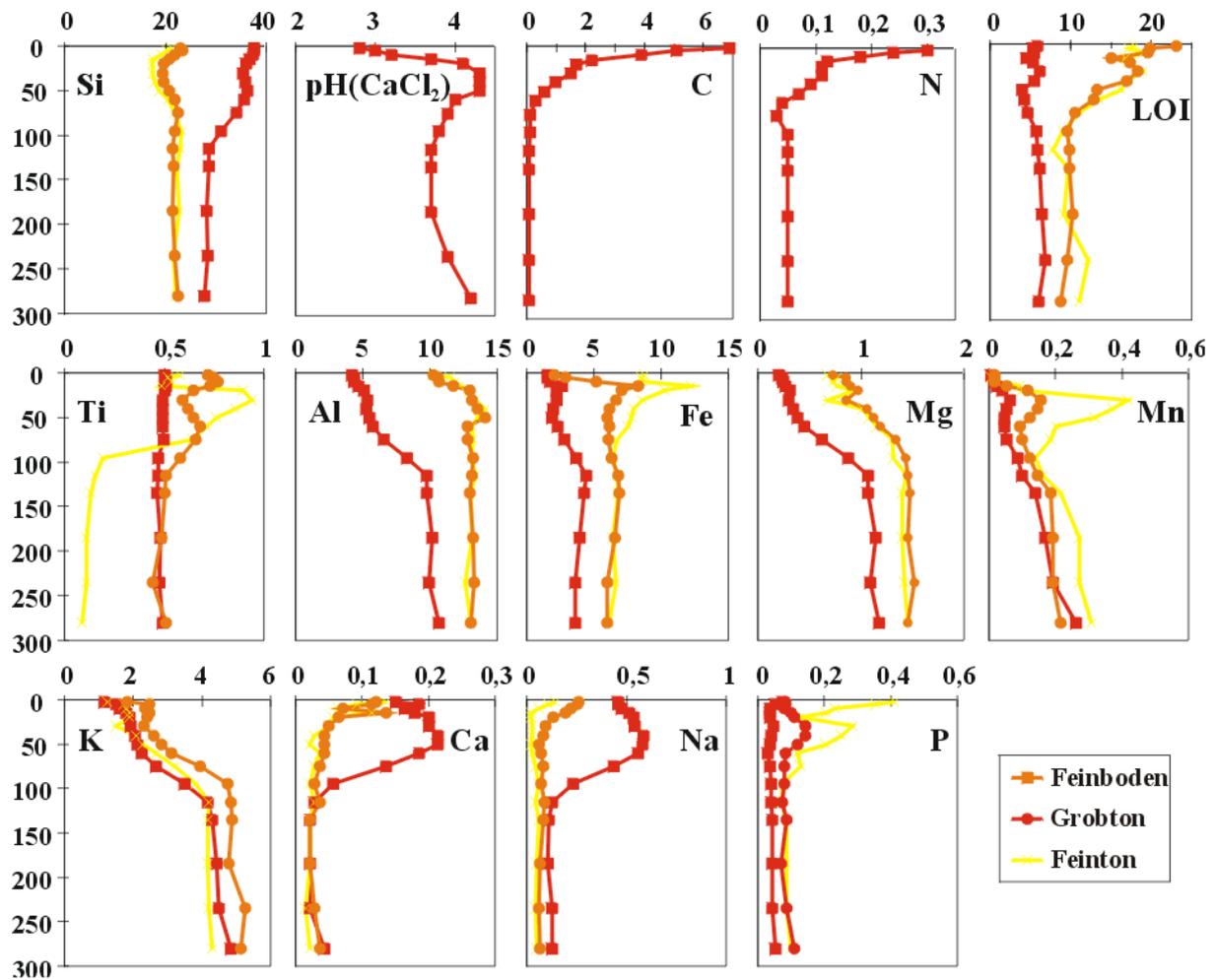


Abb. 6.3: Tiefenverläufe der Gesamtgehalte der Hauptelemente (Gew.-%) im Feinboden und in den Tonfraktionen sowie der pH(CaCl₂)-Werte im Bodenprofil im Solling (GROSSKURTH, 1999)

Danksagung

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr. H. Ruppert für die Vergabe des Themas, seine interessierte Anteilnahme und Unterstützung sowie die stete Bereitschaft zu detaillierten Diskussionen danken.

Herrn P.D. Dr. H. Heinrichs danke ich für die Übernahme des Korreferates sowie für die wertvollen Erfahrungen, die ich während meiner Diplomarbeit bei ihm machen konnte.

Herr Prof. Dr. B. Meyer half in der Anfangsphase der Arbeit bei der Auswahl des Probenmaterials und mit wertvollen Hinweisen für die Bearbeitung und Untersuchung des Probenmaterials, wofür ich ihm sehr dankbar bin.

Herr Dr. T. Heinrichs wies mich in die Elektronenmikroskopie ein, Herr Dr. Andreas Kronz betreute mich sorgsam an der Elektronenstrahl-Mikrosonde und vertraute mir auch bei der heiklen Messung der Kunstharz-Bodenpräparate. Bei den Korngrößentrennungen sowie den röntgendiffraktometrischen Messungen wäre ich ohne die sehr bereitwillige Hilfe von Herrn Dr. Klaus Wemmer nicht zurecht gekommen. Hierfür danke ich ihnen allen sehr herzlich.

Bei den vielfältigen Laborarbeiten wurde ich durch zahlreiche technische Angestellte und wissenschaftliche Hilfskräfte unterstützt, denen hiermit aufrichtig gedankt sei.

Herrn Dr. Thomas Weiß danke ich für die sorgfältigen Korrekturen in der Endphase der Arbeit.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, die mich immer unterstützten und mir mein Studium ermöglichten, sowie meiner Freundin Karina, die mich auch in Motivationstiefs immer ermutigte und mir unter anderem durch eine hervorragende Korrekturarbeit sehr vieles erleichterte.

Lebenslauf

Name: Andreas Glasow

Geboren: 31. Juli 1970 in Reutlingen

Vater: Ernst-Wilfried Glasow

Mutter: Adelheid Glasow, geb. Bischoff

Familienstand: ledig

Staatsangehörigkeit: deutsch

1976–1981: Grundschule Mähringen

1981–1990: Wildermuth-Gymnasium Tübingen mit Abschluß Abitur

1990–1991: Zivildienst beim Arbeiter-Samariter-Bund Tübingen

1991–1993: Grundstudium Mineralogie an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen

1993–1996: Hauptstudium Mineralogie an der Georg-August-Universität Göttingen

1995–1996: Anfertigung der Diplomarbeit „Metallanreicherungen in Flugstäuben - Eine Fallstudie in der Nähe eines Betonwerkes“ am Geochemischen Institut der Universität Göttingen

1997–2000: Anfertigung der vorliegenden Dissertation im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 468 „Wechselwirkungen an geologischen Grenzflächen“