

**Die Rolle des Bodenskeletts bei der nachhaltigen Sicherung
von Speicher- und Regelfunktionen der Waldböden
im Südschwarzwald**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften
der Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg i. Brsg.

vorgelegt von

Ute Heisner

Freiburg im Breisgau
im September 2003

Dekan: Prof. Dr. K.-R. Volz
Referent: Prof. Dr. Ernst E. Hildebrand
Korreferent: Prof. Dr. S. Fink

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	7
1 Grundlagen und Zielsetzungen	9
2 Material und Methoden	12
2.1 Standorte	12
2.1.1 Das regionale Raster	12
2.1.2 Das lokale Raster.....	12
2.2 Probenahme und Probenaufbereitung.....	14
2.3 Laborexperimente	14
2.3.1 Bestimmung von austauschbaren Ionen der Skelettfraktion.....	14
2.3.2 Bestimmung der inneren Oberflächen des Skeletts.....	16
2.4 Chemische Analysen	23
2.4.1 Elementgehalte der Feinerde.....	23
2.4.2 Elementgehalte der Perkolationslösungen.....	23
2.5 Bodenphysikalische Parameter.....	23
2.6 Bestimmung der Korngrößenverteilung der Skelettfraktion.....	24
2.6.1 Validierung der Meßergebnisse.....	25
2.6.2 Überprüfung der Messgenauigkeit.....	27
2.7 Tonmineralogische Untersuchungen	29
2.8 Statistische Methoden.....	29
3 Ergebnisse.....	31
3.1 Kationenaustauschereigenschaften des Skeletts im Südschwarzwald.....	31
3.1.1 Das Bodenskelett als Kationentauscher	31
3.1.2 Vergleich von Bodenskelett und Feinboden.....	38
3.1.3 Vergleich von regionalem und lokalem Raster.....	41
3.1.4 Vergleich von austauschbaren Vorräten des Skeletts und des Feinbodens.....	44
3.2. Korngrößenverteilung des Skeletts	46
3.2.1 Verteilung der Skelettpartikel im Bodenprofil	48
3.2.3 Verteilung der Skelettpartikel bei regionalem und lokalem Raster.....	49
3.3 Charakterisierung des Kapillarvolumens der Bodensteine.....	50
3.3.1 Kapillarvolumenverteilung des Bodenskeletts im Tiefenverlauf	51
3.3.2 Vergleich von regionalem und lokalem Raster.....	51
3.4 Mineralogische und röntgendiffraktometrische Untersuchungen	53
4 Räumliche Muster der Austauschereigenschaften der Skelettfraktion	57
4.1 Quantifizierung des skelettbürtigen Ernährungspotentials	57
4.2 Regionalisierung des skelettbürtigen Ernährungspotenzials.....	61

4.2.1 Regressionsanalyse des Datenmaterials	61
4.2.2 Entwicklung einer Pedo-Transferfunktion zur Prognose der KAK_{eff} von Wald- böden im kristallinen Südschwarzwald	67
5.0 Diskussion	75
5.1 Die Bedeutung von Steinen der Böden im Südschwarzwald als Nährelementspei- cher	75
5.2 Probeflächenauswahl und Probenahmetechnik.....	81
5.3 Regionalisierung	84
5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick	88
6. Zusammenfassung	90
Abstract.....	91
Danksagung	107
Anhang.....	108

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Vermiculitisierte Kavitäten in Bodensteinen als „hot spots“ der Nährelementspeicherung	9
Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebietes im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (a: regionales Raster, b: lokales Raster) sowie in den Landesgrenzen von Baden-Württemberg (c).	13
Abb. 3: Versuchsaufbau zur Gewinnung von Perkolaten aus Skelett-Quarzsand-Systemen (verändert nach HILDEBRAND 1991).	15
Abb. 4: Versuchsaufbau zur Bestimmung wasserreichbarer Oberflächen am Skelett.	16
Abb. 5: Dampfdruck bzw. pF-Wert in Funktion von der relativen Feuchte.	18
Abb. 6: Wassergehalt des Skelett bei unterschiedlichen Wasserspannungen, (Balken = 95%-Konfidenzintervall, n=20).	20
Abb. 7: Zeitreihenanalyse für den Dampfspannungsausgleich; schwarz: K_2CO_3 , hell-grau: K_2SO_4 O: Probe1, □: Probe2, △: Probe3, ◇: Probe 4.	21
Abb. 8: Boxplots zum Dampfspannungsausgleich dreier zufällig ausgewählter Teilkollektive einer Grundgesamtheit an Steinen, n=120.	22
Abb. 9: Sensorkopf des PARSIVELM300.	24
Abb. 10: Ableitung der Partikelgröße aus der Verschattung eines Lichtbandes.	24
Abb. 11: Manuell ermittelte Korngrößenverteilung eines Referenzdatensatzes (schwarz) u. dreier Wiederholungsmessungen (grau) desselben mit einem laseroptischen Schüttgutvermesser.	26
Abb. 12: Variationskoeffizient in Abhängigkeit der Anzahl von Steinen pro Durchmesserklasse.	28
Abb. 13: Beziehung der voneinander unabhängigen Standortvariablen ‚Gewicht der Probe‘ und ‚Volumen der Probe‘.	28
Abb. 14a: Austauschbare Kationen des Skeletts in Abhängigkeit von der Menge der perkolierten Austauscherlösung (Fraktion): Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm, n=61, gestr. Linie=arithm. Mittelwert.	23
Abb. 14b: Austauschbare Kationen des Skeletts in Abhängigkeit von der Menge der perkolierten Austauscherlösung (Fraktion): Tiefenstufen 10-30 cm, 30-60 cm u. 60-90 cm, n=61, gestr. Linie=arithm. Mittelwert.	32
Abb. 15: Tiefenprofile der effektiv (Fraktion 1-5) austauschbaren M_b -Kationen des Bodenskeletts, n=61.	35
Abb. 16: Mittelwert und Standardabweichung der am Skelett effektiv (Fraktion 1-5) austauschbaren Kationen aller Standorte (n=61).	37
Abb. 17: effektiv austauschbare M_a -Kationen des Skeletts aller Profile (Mittelwert, Standardabweichung, Anzahl der Rasterpunkte).	36
Abb. 18: Vergleich der Mengen effektiv austauschbarer M_b -Kationen von homogenisiertem Feinboden und Skelett.	38
Abb. 19a: Tiefenprofile der austauschbaren M_b -Kationen von Feinboden und Skelett, n=61.	40
Abb. 19b: Tiefenprofile der austauschbaren M_a -Kationen von Feinboden und Skelett, n=61.	40

Abb. 20: Vergleich der Basensättigung von homogenisiertem Feinboden und Skelett.	41
Abb. 21: Vergleich der kurz- und mittelfristig austauschbaren Ionen von Standorten des regionalen und lokalen Probeentnahmenetzes.	42
Abb. 22: Vergleich der effektiv austauschbaren M_b - und M_a -Kationen von Standorten des regionalen und lokalen Probeentnahmenetzes.	43
Abb. 23: Median, 25%-Perzentil, 75%-Perzentil und Standardabweichung der austauschbaren Ca-, Mg-, K-, Al-, Fe- und Mn-Vorräte aller Standorte (n=61).	45
Abb. 24: Durchmesserverteilung des Skeletts über alle Standorte hinweg, n=61, gestrichelte Linie=Mittelwert.	47
Abb. 25: Mittelwert und Standardabweichung des relativen Anteils der Anzahl der Skelettpartikel unterteilt in 4 Durchmesserklassen, n=61.	48
Abb. 26: Tiefenprofile von Mittelwert und Standardabweichung der Gesamtkornzahl aller Standorte (links) und unterteilt in vier Durchmesserklassen (rechts; \emptyset 2-3,25 mm=durchgezogene schwarze Linie, \emptyset 3,75-6,5 mm=gestrichelte, schwarze Linie, \emptyset 7,5-25 mm=durchgezogene graue Linie, \emptyset 35-95 mm=gestrichelte, graue Linie; n=61).	48
Abb. 27: Tiefenprofile von Mittelwert und Standardabweichung der Gesamtkornzahlen aller Standorte, getrennt nach regionalem (n=31) und lokalem (n=30) Probeentnahmenetz.	49
Abb. 28: Tiefenprofile von Mittelwert und Standardabweichung für die Wassergehalte des Skeletts bei pF 4,6 aller Standorte, n=61.	51
Abb. 29: Tiefenprofile von Mittelwert und Standardabweichung für die Wassergehalte des Skeletts bei pF 4,6, differenziert nach regionalem (n=31) und lokalem (n=30) Probenahmenetz.	52
Abb. 30: Beitrag des Skeletts zur effektiv austauschbaren M_b -Gesamtmenge, gruppiert nach den beprobten Ausgangsgesteinen, n=61.	55
Abb. 31: Beitrag des Skeletts zum effektiv austauschbaren Ca-Vorrat.	58
Abb. 32: Beitrag des Skeletts zum effektiv austauschbaren Mg-Vorrat.	59
Abb. 33: Beitrag des Skeletts zur Summe der effektiv austauschbaren Kationen Σ	60
Abb. 34: Beziehung zwischen effektiv austauschbaren skelettbürtigen Kationen und der Wasserdampfadsorption der Skelettpartikel aller Standorte ohne Kalkung.	62
Abb. 35: 30fache Vergrößerung der Oberfläche eines Skelettpartikels der Größe 3x1 cm des BZE-Rasterpunktes St. Blasien (Tiefe 30-60 cm).	64
Abb. 36: Beziehung zwischen effektiv austauschbaren skelettbürtigen Kationen und der Wasserdampfadsorption der Skelettpartikel ungekalkter, kristalliner Standorte.	65
Abb. 37: Vergleich der austauschbaren M_b -Kationen von Feinboden und Skelett ungekalkter Standorte kristalliner Ausgangsgesteine.	66
Abb. 38: Vergleich der Gehalte austauschbarer M_b - und M_a -Kationen von Feinboden und Skelett der ungekalkten, kristallinen Standorte mit weniger als 10 $\mu\text{mol/g}$ TG M_b -Ionen in der Skelettfraktion ab einer Bodentiefe von 30 cm.	59
Abb. 39: Beziehung zwischen der Wasserdampfadsorption bei pF 4,6 [mg/g TG], dem Niederschlag [mm/a] und der KAK_{eff} [$\mu\text{mol/g}$ TG] des Skeletts, n=36.	70

-
- Abb. 40:** Beziehung zwischen der modellierten KAK_{eff} [$\mu\text{mol}_\circ/\text{g TG}$] des Skeletts, der Mg-Gehalte der Feinerde [$\mu\text{mol}_\circ/\text{g TG}$] und der M_b -Gehalte des Skeletts [$\mu\text{mol}_\circ/\text{g TG}$], $n=35$ 71
- Abb. 41:** Beziehung zwischen der modellierten KAK_{eff} [$\mu\text{mol}_\circ/\text{g TG}$] des Skeletts, der Mg-Gehalte der Feinerde [$\mu\text{mol}_\circ/\text{g TG}$] und der Ca-Gehalte des Skeletts [$\mu\text{mol}_\circ/\text{g TG}$], $n=34$ 72

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Angaben zu pF-Wert, relativer Luftfeuchte und Kapillar-Äquivalentdurchmesser der beim Dampfspannungsausgleich eingesetzten Salze.	18
Tab. 2: pF-Wert, Mittelwert der Skeletteinwaage $[x_i]$ sowie untere u. obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls der Skeletteinwaage $[x_u$ und $x_o]$ für den Dampfspannungsausgleichs mit übersättigten Salzlösungen, $n=20$	20
Tab. 3: Ergebnisse des ANOVA-Tests auf Repräsentanz dreier Teilkollektive aus einer Skelettprobe, $n=120$	23
Tab. 4: Daten zum Chi-Quadrat-Test (X^2) auf Repräsentanz basierend auf 3 Wiederholungsmessungen der Korngrößenverteilung.	26
Tab. 5: Summenhäufigkeit der AK von Einzelelementen, Summe der M_a - und M_b -Kationen, KAK_{eff} und der Basensättigung des Grobbodens	34
Tab. 6: Verteilung von Anzahl, Mittelwert, Median und Standardabweichung der effektiv austauschbaren skelettbürtigen basischen Kationen (M_b Skel) sowie die Anzahl gekalkter Standorte, getrennt nach regionalem und lokalem Rasternetz und Korngröße $< 2mm$ (=Feinb.) und $> 2mm$ (=Skelett).	44
Tab. 7: Häufigkeitsverteilung des am Grobboden gebundenen Wassers bei pF 4,6 der Gesamtprofile. Referenz: Trocknung bei $105^\circ C$	49
Tab. 8: Statistische Kennziffern (n = Anzahl Regressoren, FG = Freiheitsgrade, r^2 = Bestimmtheitsmaß, $adj.r^2$ = adjustiertes Bestimmtheitsmaß, $p>F$ = Signifikanzschwelle, RMSE = Standardschätzfehler d. Modells, STD = Standardabweichung) der multiplen linearen Regression zur Modellierung der skelettbürtigen KAK [$\mu mol/g$ TG].	70
Tab. 9: Statistische Kennziffern der multiplen linearen Regression zur Modellierung effektiv austauschbarer M_b -Kationen [$\mu mol/g$ TG] (Abkürzungen siehe Tabelle 8).	72
Tab. 10: Matrix der Produktmoment-Korrelationskoeffizienten nach PEARSON der für die multiplen Regressionen ausgewählten Prädiktoren, $n=36$	73

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	= Maßeinheit: Jahr
Abb.	= Abbildung
adj.	= adjustiert
AFJZ	= Allgemeine Forst- und Jagdzeitschrift
AFZ	= Allgemeine Forstzeitschrift
AK	= Austauschkapazität
Al ³⁺	= chemisches Element: Aluminium
arithm.	= arithmetisch
Anm. d. Verf.	= Anmerkung der Verfasserin
BMBF	= Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMELF	= Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forstwirtschaft
Bd.	= Band
Bu	= Buche (<i>Fagus sylvatica</i>)
BZE	= Bodenzustandserhebung im Walde
ca.	= cirka
Ca ²⁺	= chemisches Element: Calcium
CH ₃ COOK	= chemische Verbindung: Kaliumacetat
cm ²	= Maßeinheit: Quadratcentimeter
cm ³	= Maßeinheit: Kubikcentimeter
CV	= Variationskoeffizient
DFG	= Deutsche Forschungsgemeinschaft
dschtl.	= durchschnittlich
evtl.	= eventuell
Fe ²⁺	= chemisches Element: Eisen
Feinb.	= Feinboden
FG	= Freiheitsgrad(e)
Fi	= Fichte (<i>Picea abies</i> Karst)
FVA	= Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt
FwC	= Forstwissenschaftliches Centralblatt
gestr.	= gestrichelt
h	= Maßeinheit: Stunde
H ₂ O	= chemische Verbindung: Wasser
ha	= Maßeinheit: Hektar
hPa	= Maßeinheit: Hektopascal
Hrsg.	= HerausgeberIn
i.a.	= im allgemeinen
i.d.R.	= in der Regel
K ⁺	= chemisches Element: Kalium
K ₂ CO ₃	= chemische Verbindung: Kaliumcarbonat
K ₂ SO ₄	= chemische Verbindung: Kaliumsulfat
KAK	= Kationenaustauschkapazität
KAK _{eff}	= effektive Kationenaustauschkapazität
Kalk.	= Kalkung
kg	= Maßeinheit: Kilogramm
Ki	= Kiefer (<i>Pinus sylvestris</i>)
log	= Logarithmus
Lsg.	= Lösung
m	= Maßeinheit: Meter

M	= molar
M _a -Kationen	= Kationensäuren
M _b -Kationen	= basische Kationen
max.	= maximal
Mg ²⁺	= chemisches Element: Magnesium
min	= Maßeinheit: Minute
min.	= mindestens
ml	= Maßeinheit: Milliliter
mm	= Maßeinheit: Millimeter
Mn ²⁺	= chemisches Element: Mangan
m ü. NN	= Meter über Normalnull
n	= Stichprobenumfang
N	= chemisches Element: Stickstoff
NN	= Normalnull
(NH ₄) ₂ SO ₄	= chemische Verbindung: Ammoniumsulfat
Nr.	= Nummer
NO _x	= chemische Verbindung: Stickoxide
p	= Wahrscheinlichkeit
pF	= dekadischer Logarithmus der Spannung an einer hängenden Wassersäule
pH	= negativer dekadischer Logarithmus der H ⁺ -Konzentration
Prof.	= ProfessorIn
r	= Korrelationskoeffizient
r LF	= relative Luftfeuchtigkeit
RSME	= mittlere Abweichung des linearen Modells
S	= chemisches Element: Schwefel
S.	= Seite
schriftl.	= schriftlich(e)
sKAK	= skelettbürtige Kationenaustauschkapazität
sKaK _{eff}	= effektive, skelettbürtige Kationenaustauschkapazität
sKaK _{Modell}	= modellierte, skelettbürtige Kationenaustauschkapazität
sog.	= sogenannt
STD	= Standardabweichung
Ta	= Tanne (<i>Abies alba</i> Mill)
Tab.	= Tabelle
TG	= Trockengewicht
TWI	= terrestrische Waldschadensinventur
u.a.	= und andere
ü.M.	= über dem Meeresspiegel
vgl.	= folglich
WS	= Wassersäule
x _i	= Mittelwert
x _o	= obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls
x _u	= untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls
z.B.	= zum Beispiel
Zp.	= Zeitpunkt
Z.Pfl.ern.Bodenk.	= Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde
μmol	= Maßeinheit: Mikromol (= 10 ⁻⁶ Mol)
>	= größer als
<	= kleiner als
° C	= Maßeinheit: Grad Celsius

1 Grundlagen und Zielsetzungen

Die konventionelle Bestimmung der austauschbaren und damit mittelfristig verfügbaren Nährelementkationen für Waldböden (MEIWES et al. 1984) bezieht sich i.d.R. auf die Feinbodenfraktion (< 2 mm). Korngrößen über 2 mm werden aufgrund ihrer vermeintlich geringen spezifischen Oberfläche verworfen. Neuere Arbeiten zeigen allerdings, dass die Skelettfraktion hinsichtlich der Nährstoffkreisläufe in einem Waldökosystem nicht als inerte, unbeteiligte Matrix angesehen werden darf, sondern dass Steine als 'hot spots' der Speicherung austauschbarer Kationen ein hohes Ernährungspotenzial besitzen können (RIVARD & DE KIMPE 1980, UGOLINI et al. 1996, MARTIN-GARCIA et al. 1999, DEUTSCHMANN & LUDWIG 2000). Abbildung 1 veranschaulicht beispielhaft die Bindungskapazität für Nährelemente an inneren Skelettoberflächen (vermiculitisierte Kavitäten) und an unverwitterten Skelettbestandteilen (quasi-prozessualer Leerraum) im Bodenquerschnitt.

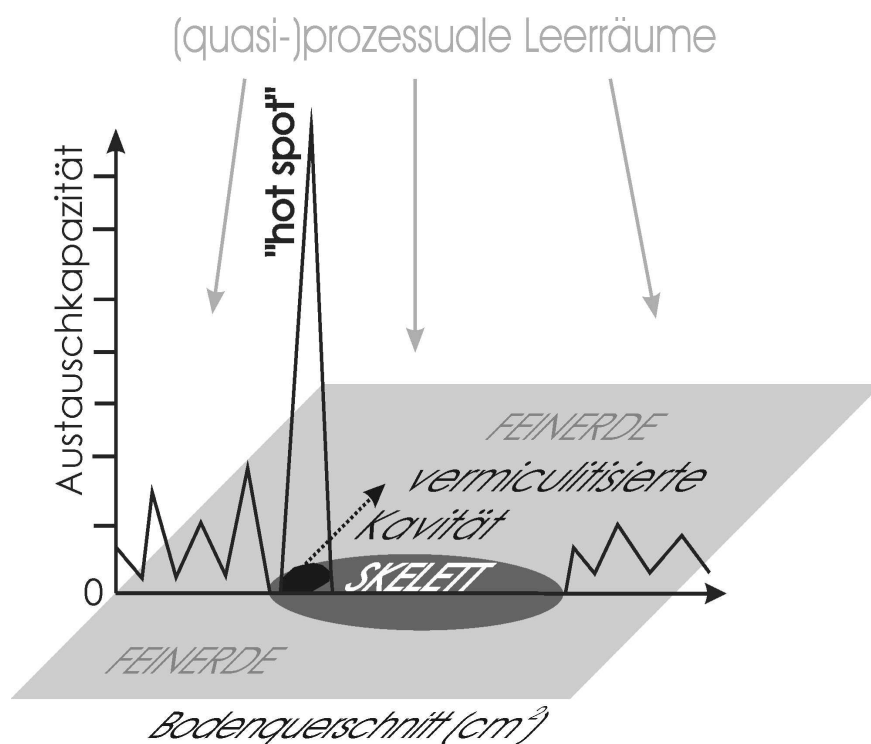


Abb. 1: Vermiculitisierte Kavitäten in Bodensteinen als „hot spots“ der Nährelementspeicherung.

JONGMANS et al. (1997) und VAN BREEMEN et al. (2000b) wiesen nach, dass Pilz-Hyphen in der Lage sind, das Mikroporensystem der Skelettfraktion zu erschließen und Steine somit als kurz- und mittelfristige Nährstofflieferanten in Wäldern eine Rolle spielen könnten. KOHLER wies anhand dreier Waldstandorte im Südschwarzwald nach, dass der

Grobboden silikatischer Ausgangsgesteine mehr effektiv austauschbare M_b -Kationen enthalten kann als der Feinboden (KÖHLER et al. 2000). Außerdem zeigen die Intensitätsparameter der Nährelementverfügbarkeit (z.B. die Basensättigung) im Grobboden wesentlich günstigere Bedingungen der Nährelementaufnahme an als in der Feinerde. Die Nutzung dieses Potenzials ist sehr wahrscheinlich, da in den Steinen nährstoffadsorbierende Gewebe (hyaline und melanisierte Pilz-Hyphen) angetroffen wurden, die einen by-pass-Fluss von Nährelementen direkt von Steinen in die Bäume via Mykorrhiza-Pilzen nahe legen (KÖHLER 2001).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die ernährungskundlichen Bedingungen eines „ökologischen Waldumbaus“ im Rahmen der Zielsetzungen des interdisziplinären BMBF-Verbundprojekt „Zukunftsorientierte Waldwirtschaft - Bedeutung der Überführung von Fichtenreinbeständen in strukturreiche Mischbestände für Standortnachhaltigkeit und Stoffhaushalt im Südschwarzwald“ (DUVENHORST 2001) genauer zu bestimmen. Hierfür wird die bisher unberücksichtigte Nährelementquelle Grobboden als kurz- und mittelfristiger Speicher austauschbarer Ionen auf der räumlichen Integrationsebene „Südschwarzwald“ quantifiziert. Durch Regressionsanalysen werden die ausschlaggebenden Einflussfaktoren für skelettbürtige, austauschbare Nährelementpotenziale bestimmt. Die aus diesen Prädiktoren entwickelten Pedo-Transferfunktionen sollen es ermöglichen, den kurz- und mittelfristig verfügbaren Nährelementgehalt von Steinen im Südschwarzwald auf einfache Weise zu schätzen.

Ausgangshypothese der Arbeit war, dass die Menge kurz- und mittelfristig gebundener Kationen des Skeletts eines Bodens primär von Art, Menge und mineralogischen Eigenschaften des Ausgangsgesteins abhängig ist und sekundär von örtlichen Größen wie z.B. der Jahresmitteltemperatur, dem durchschnittlichen jährlichen Niederschlag oder der Bestockung eines Standorts. Dazu wurden im Untersuchungsgebiet zwei Messnetze unterschiedlicher Ausdehnung angelegt, um an insgesamt 61 Waldstandorten folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Beziehungen bestehen zwischen den effektiv austauschbaren Ionen von Skelett und Feinerde in bezug auf die Speicherkapazität und die räumliche Verteilung der Nährelemente?

- Welche Gesteinseigenschaften lassen Prognosen zu über Menge und Art der austauschbaren Ionen in Steinen (z.B. Mineralzusammensetzung, spezifische innere Oberfläche)?
- Können aus okular bestimmbar Gesteinseigenschaften wie der Beschaffenheit der Skelettpartikel (z.B. Korngrößendurchmesser, Anteil dunkler Mineralien) oder dem Verwitterungszustand (Farbe, Grad der „Mürbheit“, etc.) die Menge und Zusammensetzung austauschbarer Ionen in Steinen vorhergesagt werden?
- Ist es möglich, die skelettbürtigen Ionenspeicherpotenziale mit Hilfe von Pedo-Transferfunktion für das Wuchsgebiet „Südschwarzwald“ zu schätzen?

Um den Anteil der ‚skelettbürtigen Kationenaustauschkapazität‘ eines Bodens zu ermitteln, wurden die Bodensteine isoliert und mit 0.1m NH₄Cl perkoliert (HILDEBRAND 1991).

Zur Quantifizierung derjenigen Skelettoberflächen eines Standorts, die als mögliche Austauscher an geochemischen Elementkreisläufen beteiligt sind, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die der Diffusion zugängliche Fläche von Steinpartikeln abgeschätzt werden kann. Es bestimmt die vom Skelett durch Dampfspannungsausgleich adsorbierte Wassermenge bei pF 4,6.

Um die standörtliche Variabilität des Grobbodens für den Südschwarzwald besser beurteilen zu können, wurden folgende Parameter bei den als Datenbasis untersuchten Profilen erhoben:

- Korngrößenverteilung mittels eines laseroptischen Schüttgutvermessers
- Farbe, Farbmuster (Anteil der dunklen Minerale)
- Verwitterungsgrad
- Vorkommen von Wurzeln und/oder Rhizomorphen.

2 Material und Methoden

2.1 Standorte

Um die Bedeutung der Skelettfraction für den Nährstoffhaushalt auf der Maßstabsebene des Südschwarzwaldes zu erfassen, wurde neben einem regionalen Probenahmernetz auf der Grundlage des Rasters der baden-württembergischen Bodenzustandserhebung (BZE) im Wald (BUBERL et al. 1994) ein weiteres lokales Raster in drei Forstamtsbezirken auf der Basis der Betriebsinventur angelegt. Für alle Profile sind im Anhang graphische Profilskizzen aufgeführt, die anhand der Vorgaben der BZE (BMELF 1994) erstellt wurden.

2.1.1 Das regionale Raster

Dieses Raster bezieht sich auf 31 Standorte des 8x8-km-Netzes der baden-württembergischen BZE. Das Gebiet befindet sich innerhalb des Südschwarzwaldes und wird nach Süden durch die Schweizer Grenze und nach Norden durch die Städte Waldkirch und Furtwangen begrenzt. Die beprobten Waldflächen befinden sich in Höhenlagen zwischen 270 und 1290 m ü. NN. Die mittleren Jahresniederschläge liegen im Bereich von 1000 – 1900 mm (Gesamtmittel 1422 mm) und die Jahresmitteltemperaturen zwischen 4,9 - 9,3 °C (Gesamtmittel 6,7 °C). Charakteristische Substrate sind Gneise und Granite, die jedoch aufgrund ihrer unterschiedlichen Genese (z.B. ana- oder diatektische Überformung) in einer sehr heterogenen räumlichen Verteilung vorliegen. Für dieses Rasternetz liegen punktscharfe Daten zu allen relevanten Bodenparametern entsprechend dem Analyseprogramm der BZE und den Erhebungen der terrestrischen Waldschadensinventur (TWI) vor sowie standörtliche Informationen, die die lokalen Forstämter zur Verfügung stellen.

2.1.2 Das lokale Raster

In Zusammenarbeit mit der bodenkundlichen Abteilung der FVA wurden im Rahmen des interdisziplinären BMBF-Verbundvorhabens gemeinsam mit dem Projekt „Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften“ (ZIRLEWAGEN 2002) insgesamt 30 Standorte beprobt. Die Auswahl erfolgte mittels eines Zufallsgenerators aus der Grundgesamtheit der Probestellen der forstlichen Betriebsinventur (Rasterung 200x100 m) im Bereich der Forstämter Todtmoos, Todtnau und Kandern. Die Ausgangsgesteine der Profile waren entweder Granit/heller Gneis oder

dunkler Gneis. Die Standorte befinden sich in Höhen von 695 - 1290 Meter ü. NN. Die Spanne der mittleren Jahrestemperatur reicht von 5,9 - 6,9 °C (Gesamtmittel 5,97 °C) bei Niederschlägen von 1650 - 1785 mm (Gesamtmittel 1768 mm). Für die Profile liegen punktscharfe bodenphysikalische und bodenchemische Analysedaten (ZIRLEWAGEN 2002) und Erhebungen der Betriebsinventuren 1989 und 2001 vor sowie standörtliche Informationen, die die lokalen Forstämter zur Verfügung stellen.

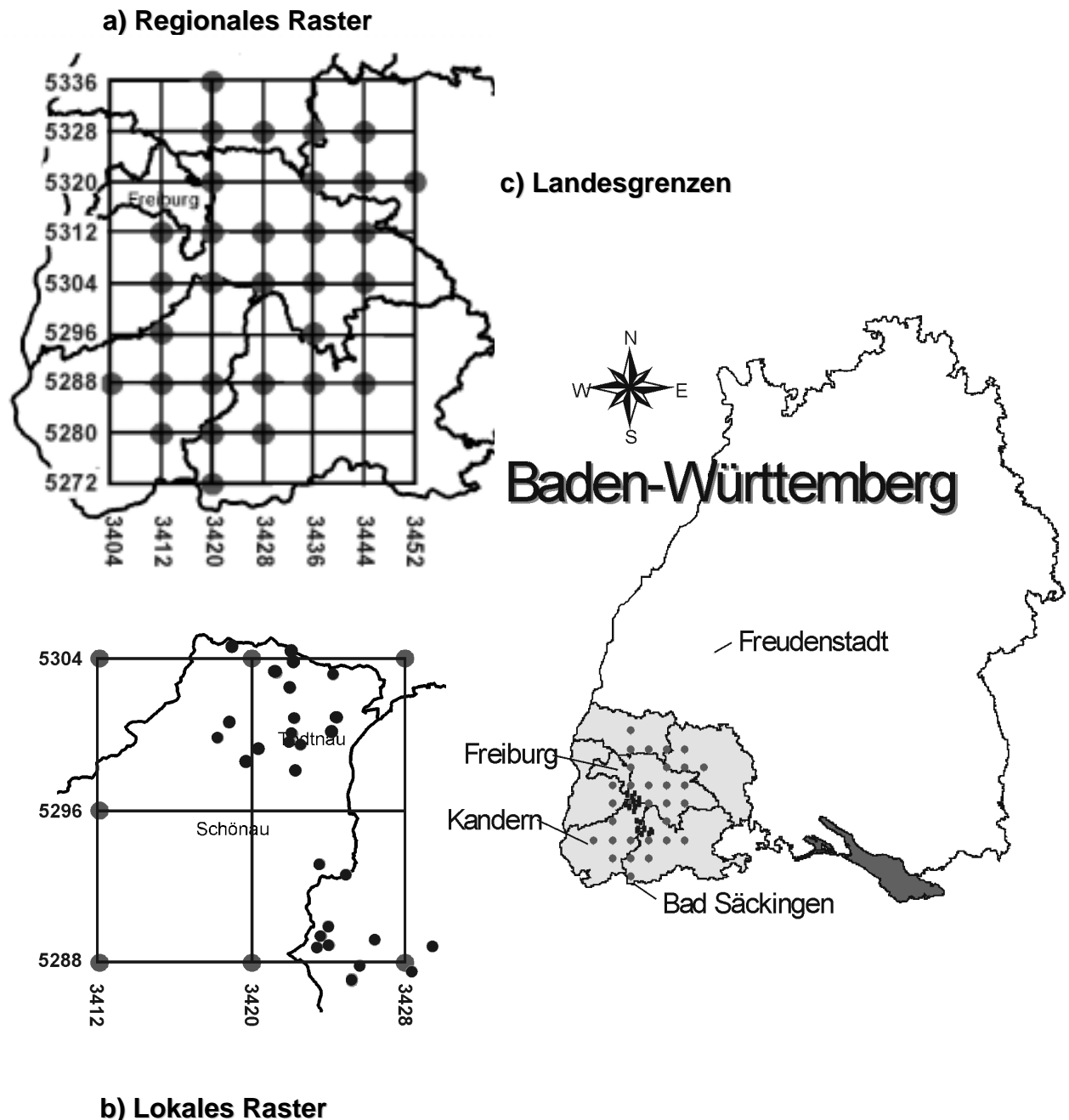


Abb. 2:

Lage der untersuchten Bodenprofile im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (a: regionales Raster, b: lokales Raster) sowie innerhalb der Landesgrenzen von Baden-Württemberg (c).

2.2 Probenahme und Probenaufbereitung

Für die Beprobung wurde eine mit 200 ml Stechzylindern gefüllte, motorbetriebene Rammkernsonde bis zu einer Tiefe von max. 1 m in die Erde getrieben und anschließend mit einem Lastenheber manuell wieder entnommen. Aus 5 Tiefenstufen (0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm) wurden mittels der Stechzylinder möglichst volumengerechte Proben entnommen. Um die gesteinsbürtigen, austauschbaren Ionen untersuchen zu können, wurden die Stechzylinder-Proben anschließend mit einem 2mm-Sieb in Feinerde- und Skelettfraktion getrennt. Danach wurden die an der Skelettfraktion anhaftende Feinsubstanz durch folgende Reinigungsschritte entfernt:

- schonende Spülung mit deionisiertem Wasser (ca. 30 min)
- Hauptreinigung im Ultraschallbad mit deionisiertem Wasser (Einwirkzeit: ca. 10 min mit dreifacher Wiederholung).

Zur Vorbereitung der Perkolation wurde das gereinigte Skelett mit chemisch inertem Quarzsand (Firma Merck) in 200 ml Stechzylinder eingebaut (feinerdesubstituierte Quarzsand-Skelett-Systeme). Für jede Charge wurden Blindproben perkoliert, um die Freisetzung von Ionen durch den verwendeten Quarzsand berücksichtigen zu können. Die Quarzsandkorrektur erfolgte routinemäßig und wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht graphisch dargestellt. Eine detaillierte Darstellung dazu gibt KOHLER (2001). Nach der Perkolation mit NH_4Cl wurde das Skelett durch erneute Spülung mit deionisiertem Wasser von anhaftendem Quarzsand befreit und solange mit deionisiertem Wasser gespült, bis keine Cl^- -Freisetzung mehr festzustellen war. Der Nachweis erfolgte durch Zugabe von AgNO_3 .

2.3 Laborexperimente

2.3.1 Bestimmung von austauschbaren Ionen der Skelettfraktion

Die Quantifizierung von Ionenspeicher- und Mobilisierungspotenzialen der Skelettfraktion erfolgte mit der Perkulationsmethode zur chemischen Analyse ungestört gelagerter Bodenproben nach HILDEBRAND (1991). Die volumenecht (200 cm^3) in Quarzmehl eingebettete Skelettfraktion wurde fraktionsweise unter leichter Wasserspannung (10-20 hPa) 5mal mit jeweils 500 ml 0,1M NH_4Cl perkoliert. Die Perkulationsdauer betrug pro Fraktion ca. 12 h. Nach der dritten Perkolation wurde die Probe für 180 h (7,5 Tage) bei einem

Spannungsgleichgewicht von 700-800 hPa gehalten. Mit diesem Vorgehen sollte der Frage nachgegangen werden, ob in der Skelettfraction ein diffusives Nachladen spontan austauschbarer Kationen stattfindet, wie dies schon für den Mineralboden gezeigt werden konnte (HILDEBRAND 1994). Nach dem Durchlauf der 5 Fraktionen à 250 ml Lösung (Dauer der Perkolation insgesamt: 10 Tage) sind die direkt austauschbaren Kationen i.d.R. abgeschöpft.

Eine ausführliche Beschreibung der Perkulationsmethode ist bei HILDEBRAND (1991) und KOHLER (2001) dargestellt. Abbildung 3 skizziert den Versuchsaufbau.

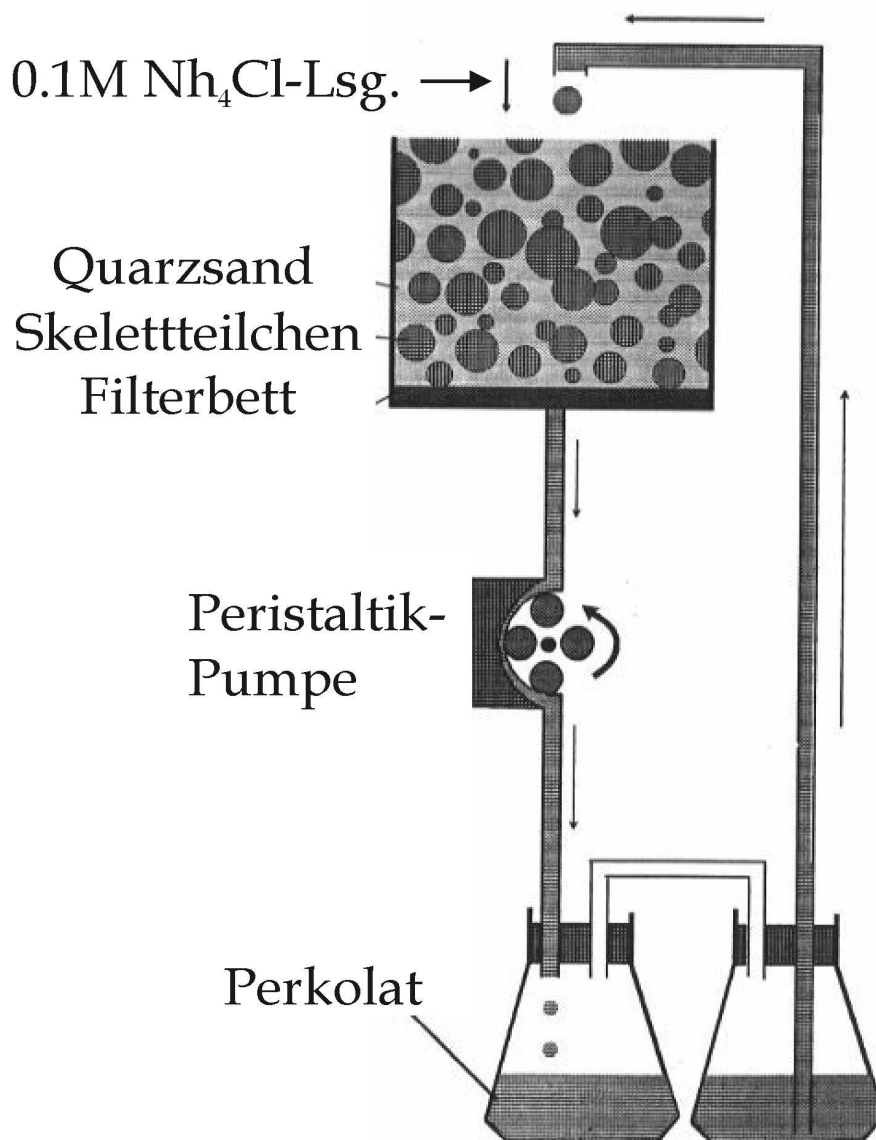


Abb. 3: Versuchsaufbau zur Gewinnung von Perkolaten aus Skelett-Quarzsand-Systemen (verändert nach HILDEBRAND 1991).

2.3.2 Bestimmung der inneren Oberflächen des Skeletts

Ein Verfahren, um das Gesamtvolumen eines porösen Mediums darzustellen, ist die Messung der gaserreichbaren Oberflächen (sog. „BET-Oberflächenmessung“, vgl. BRUNAUER et al. 1958). Die von unpolaren Gasen erreichbaren Oberflächen müssen jedoch nicht zwingenderweise identisch sein mit Oberflächen, die polare Gase (z.B. Wasserdampf) adsorbieren. KOHLER (2001) konnte anhand dreier ausgewählter Standorte zeigen, dass nicht in allen Fällen ein Zusammenhang zwischen der Kationenaustauschkapazität und der BET-Oberfläche des Grobbodens besteht. Offensichtlich werden Skelettoberflächen, die Austauschereigenschaften besitzen, durch die Adsorption unpolarer Gase mangelhaft charakterisiert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, wasserdampferreichbare Oberflächen des Grobbodens mit Hilfe von Dampfspannungsausgleich zwischen Steinen und übersättigten Salzlösungen zu bestimmen. In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

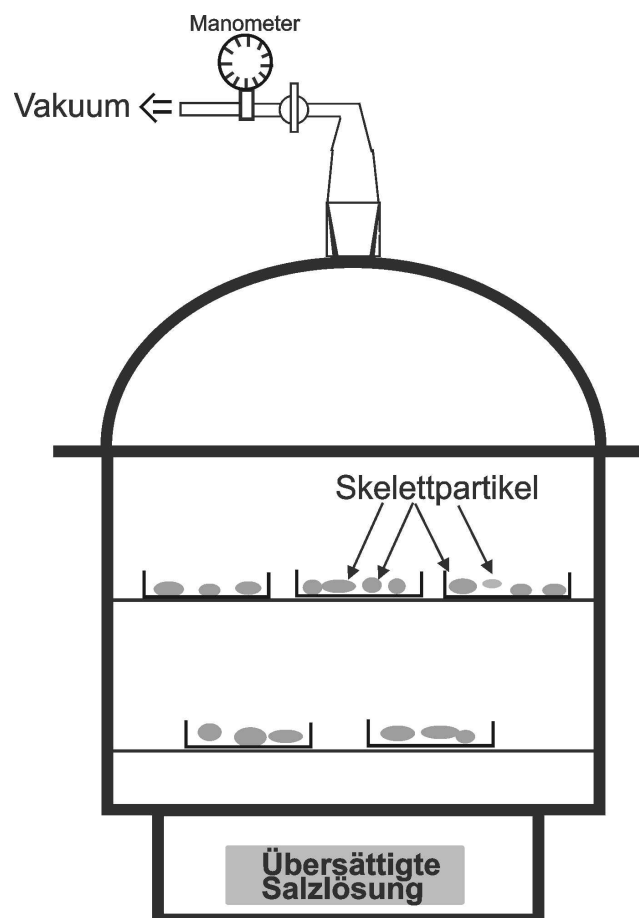


Abb. 4: Versuchsaufbau zur Bestimmung wassererreichbarer Oberflächen am Skelett.

Für die Wasserdampfadsorption nach dem Prinzip des Dampfspannungsausgleiches wird eine definierte Menge luftgetrockneter Steine (ca. 20 g) einer Probe in einen evakuierten Exsikkator gebracht, in dem sich eine übersättigte Salzlösung mit bekannter Wasserdampfspannung befindet (z.B. K_2SO_4). Durch Dampfspannungsausgleich wird eine der Skelettoberflächen proportionale Wasserdampfmenge zwischen Steinen und Salz ausgetauscht. Es stellt sich ein Dampfspannungsgleichgewicht zwischen dem Wassergehalt der Steine und der übersättigten Salzlösung ein, d.h. die Wasserbindung an den Steine entspricht der Wasserdampfspannung des übersättigten Salzes (gleicher pF-Wert).

Voraussetzungen für den Versuchsaufbau sind dabei:

- gleiche Temperatur in den Probengefäßen
- gleicher Luftdruck in den Probengefäßen
- Übersättigung der hygroskopischen Salzlösung während der Gleichgewichtseinstellung.

Zur Herstellung einer Außentemperatur von 21° C werden die Exsikkatoren in einem auf diese Temperatur eingestellten Brutschrank aufbewahrt. Zur Beschleunigung der Einstellung des Gleichgewichts wird im Exsikkator ein Vakuum angelegt. Luftdruck, Temperatur, Vakuum und der Übersättigungsgrad der Lösung werden während der Versuchsdauer täglich kontrolliert.

Die Beziehung des pF-Werts zur relativen Luftfeuchte einer gesättigten Salzlösung innerhalb eines geschlossenen Systems wurde schon von THOMAS (1921) und SCHOFIELD (1935) berechnet. Sie ist ausführlich bei RODE (1959) und Di GLERIA et al. (1962) beschrieben.

Abbildung 5 zeigt den Zusammenhang zwischen der relativen Feuchte im Exsikkator und der Dampfspannung bzw. dem hydrostatischen Druck für 36 hygroskopische Salze. Die vier in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Salzlösungen sind in der Abbildung grau markiert (Angaben zur ‚relativen Feuchte‘ aus KOHLRAUSCH, S.357 und Di GLERIA et al, S. 631).

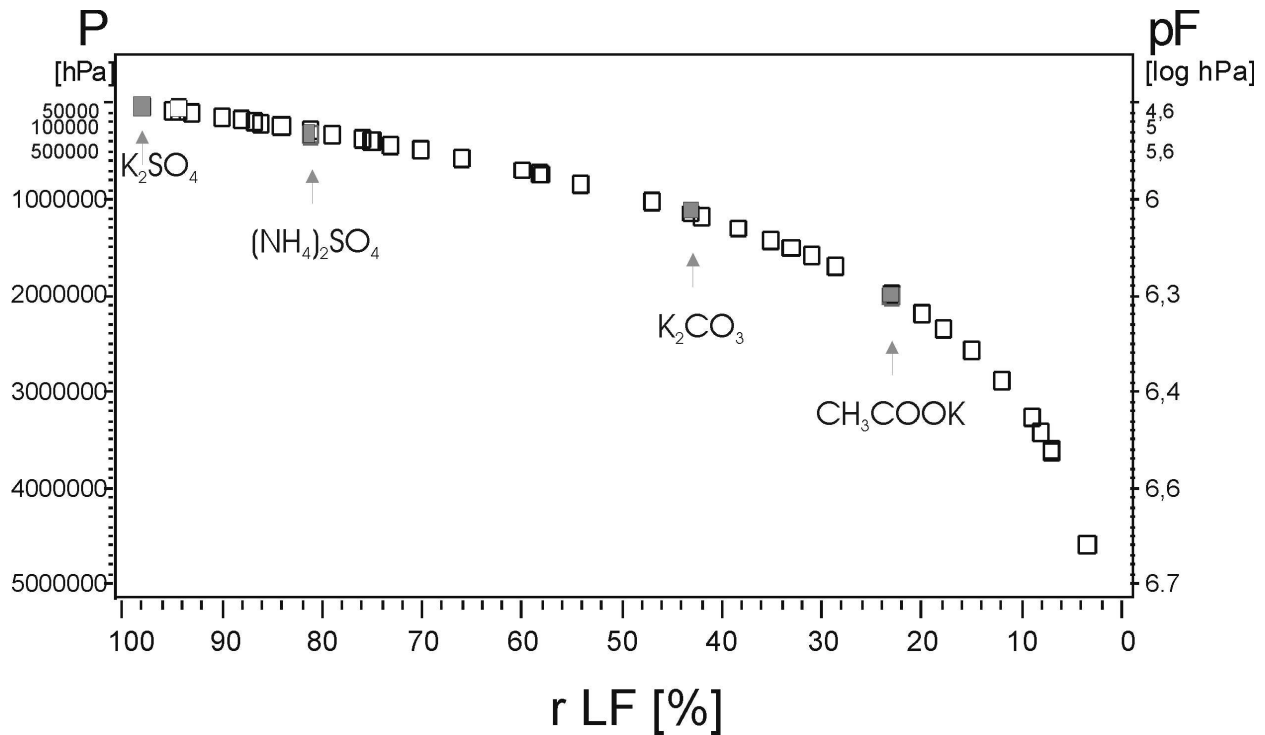


Abb. 5: Dampfdruck bzw. pF-Wert in Funktion von der relativen Feuchte

Der Sättigungsdampfdruck kann auch als Kapillarspannung beschrieben werden. Die Kapillarspannung wird hierbei als die Grenzspannung ermittelt, bei der das Wasser einer übersättigten Salzlösung entgegen dem Bestreben, sich zu verdünnen, noch in Lösung gehalten wird. Nach der Gleichung des kapillaren Aufstiegs (LAPLACE, 1878) kann diese Kapillarspannung in Kapillar-Äquivalentdurchmesser umgerechnet werden. Der Berechnung des Sättigungsdampfdrucks wird die ‚Idealform‘ einer zylindrischen Kapillare zugrundegelegt, deren Saugspannung als logarithmierter Wert der Länge einer hängenden Wassersäule (WS) angegeben und allgemein als pF-Wert (= log cm WS) bezeichnet wird. Mit steigendem pF-Wert verringert sich die Wassermenge, die vom Porenraum im Skelett entgegen der Dampfspannung des Systems gehalten werden kann.

Für die im Versuch eingesetzten Salze gelten folgende Angaben:

	K_2SO_4	$(NH_4)_2SO_4$	K_2CO_3	CH_3COOK
pF-Wert [log hPa]	4,6	5,5	6,0	6,3
rLF [%]	0,98	0,81	0,43	0,23
Äquivalent \varnothing [μ m]	0,0104	0,00949	0,003	0,00156

Tab. 1:

Angaben zu pF-Wert, relativer Luftfeuchte und Kapillar-Äquivalentdurchmesser der beim Dampfspannungsausgleich eingesetzten Salze.

Bei Gleichgewichts-Sättigungsdampfdruck im Exsikkator ist das Gewicht der Skelettteilchen die Summe aus der Trockensubstanz der Körner und dem Gewicht des adsorbierten Wassers. Als Maß der inneren Oberfläche wird deshalb die Differenz der Wassermenge betrachtet, die sich bei einer Trocknung der Steine bei 105° C ergibt (Wasserdampfadsorption im Adsorptionsgang). Diese wird durch Präzisionswägungen festgestellt. Für die Wägung wird das Material dem Exsikkator entnommen und kurzfristig dem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ausgesetzt (Dauer: ca. ½ Minute). Dadurch trat i.d.R. ein Wasserverlust ein. Der Fehler betrug jedoch nie mehr als 1,5% des Gesamtwasservorrates der Steine.

Wird das Verfahren an der gleichen Probe mit übersättigten Salzlösungen unterschiedlicher Dampfspannung durchgeführt, erhält man eine pF-Kurve des Skeletts innerhalb des Dampfspannungsbereiches der eingesetzten übersättigten Salzlösungen. Es war zu überprüfen, ob

- mit dem Verfahren messbare Wassergehaltsänderungen auftreten,
- der Zeitpunkt der Einstellung eines Gleichgewichtes des Systems in einem für die zeitliche Konfiguration des Projektes vertretbarem Rahmen liegt,
- Teilmengen einer Probe sich signifikant voneinander unterscheiden bzw. ob sie als repräsentativer Ausschnitt der Gesamtprobe angesehen werden können.

Diese Fragen wurden in geeigneten Vorversuchen bearbeitet.

2.3.2.1 Messung von Wassergehaltsänderungen des Skeletts bei unterschiedlichen Wasserdampfspannungen

Zu Anfang der Methodvalidierung war sicherzustellen, dass durch die Behandlung messbare Wassergehaltsänderungen erzielt werden. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, sollte die Wägung gleicher Proben bei unterschiedlichen pF-Werten ausreichend große Unterschiede aufweisen, um eine Abgrenzung der verschiedenen Gleichgewichtszustände zu gewährleisten. Zur Validierung der Messergebnisse wurde die Bestimmung der Wasserdampfadsorption für die vier o.g. übersättigten Salzlösungen an 20 Proben vorgenommen. In Abbildung 6 ist der Wassergehalt bei unterschiedlichen Wasserdampfspannungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass schon bei einer Einwaage von 10 g

Skelett pro Probe messbare Gewichtsveränderungen zu verzeichnen sind. Es kann mit 95%iger Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die durch die eingesetzten Salzlösungen resultierenden Gewichte sich signifikant voneinander unterscheiden.

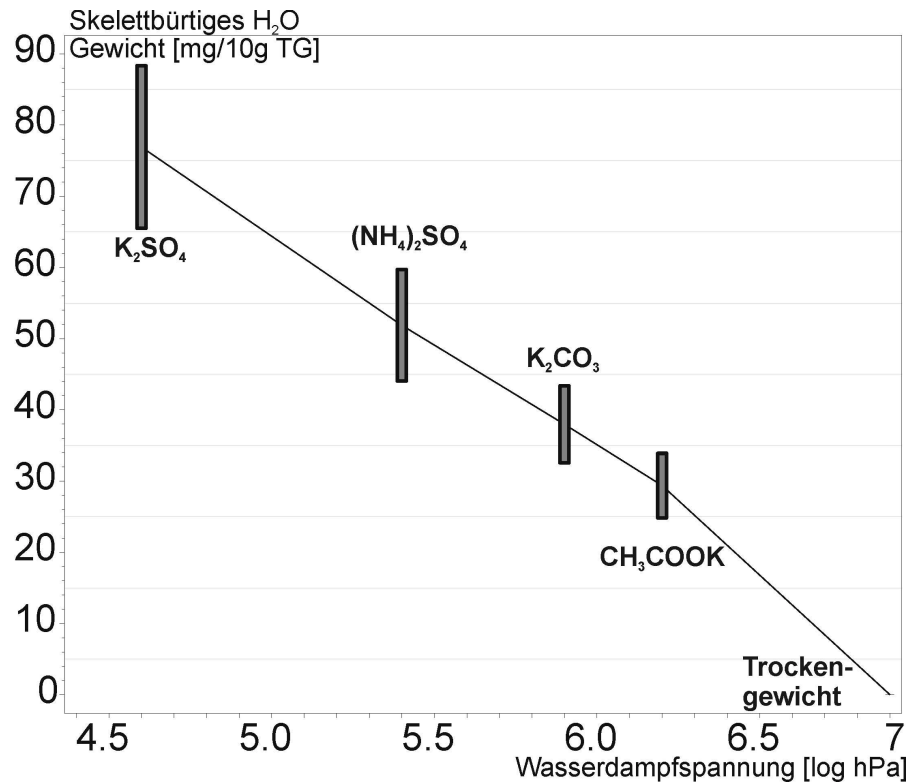


Abb. 6: Wassergehalt des Skeletts bei unterschiedlichen Wasserdampfspannungen, (Balken = 95%-Konfidenzintervall, n=20).

Um Unterschiede hinsichtlich der Ausdehnung innerer Oberfläche quantifizieren zu können, muss sich das Gewicht der Proben bei den vier für die eingesetzten Salze gebildeten Gruppen signifikant voneinander unterscheiden. Tabelle 2 zeigt für jeden pF-Wert den Mittelwert (x_i) und die untere und obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls (x_u und x_o) an.

Salz	pF-Wert	x_i	x_u	x_o
K_2SO_4	6,3	29,37	24,84	33,89
$(NH_4)_2SO_4$	6,0	37,97	32,57	43,36
K_2CO_3	5,5	51,88	44,04	59,71
CH_3COOK	4,6	76,91	65,49	88,33

Tab. 2: pF-Wert, Mittelwert der Skeletteinwaage [x_i] sowie untere u. obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls der Skeletteinwaage [x_u und x_o] für den Dampfspannungsausgleichs mit übersättigten Salzlösungen, n=20.

Ein nichtparametrischer Rangsummentest (Wilcoxon-Paardifferenzen-Rangtest, SACHS 2002) ergibt, dass die Differenzen der Messungen für die verwendeten Salze bei ca. 23-28% liegen und die Einzelproben sich signifikant voneinander unterscheiden. Um die unterschiedlichen Messergebnisse der eingesetzten Salze zu sichern, wurde für die Ausführung des Experiments eine Skeletteinwaage von min. 20 g als sinnvoll erachtet.

2.3.2.2 Zeitliche Konfiguration des Versuchs

Um die Dauer bis zur Gleichgewichtseinstellung abschätzen zu können, wurde an vier Proben ein Dampfspannungsausgleich für pF 4,6 und 6,3 durchgeführt. Die Versuchsdauer variierte dabei zwischen einer, drei und fünf Wochen.

Den in Abbildung 7 dargestellten Ergebnissen ist zu entnehmen, dass die Einstellung des Gleichgewichts bei der Einwaage von 20 g Skelett bereits nach einer Woche erreicht war. Bei einer Einstellungszeit für das Gleichgewicht von drei und fünf Wochen kam es nur zu nicht signifikanten Veränderungen (Wilcoxon-Paardifferenzen-Rangtest, SACHS 2002). Führt man den gleichen Versuch mit einer Einwaage von 50 g Skelett durch, nehmen alle Proben nach einer Woche weiter an Gewicht zu und ein stabiles Gleichgewicht stellt sich erst nach ca. 3 Wochen ein. Die Dauer vom Einsetzen der Proben in den Exsikkator bis zur Wägung wurde deshalb auf eine Woche festgesetzt und die Einwaage bei 20 Gramm belassen.

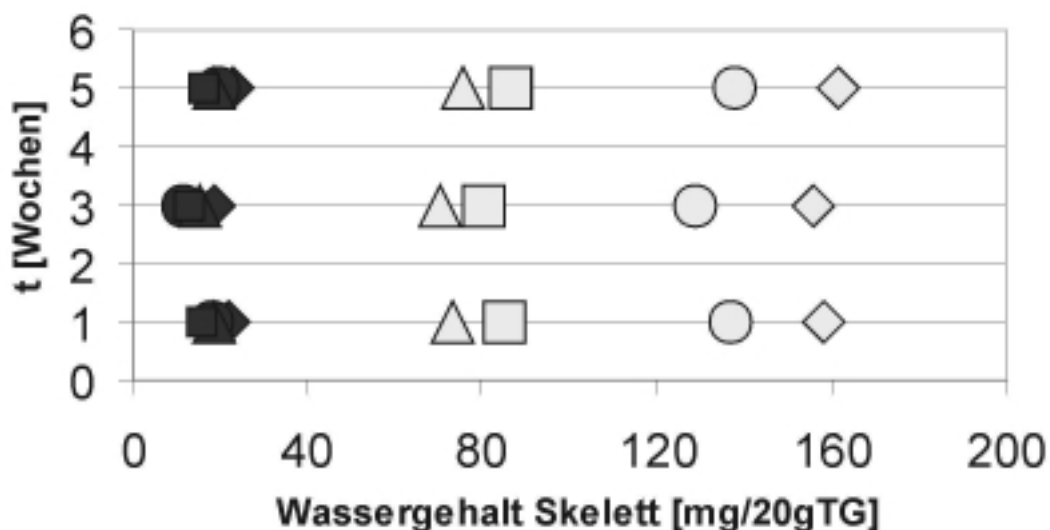


Abb. 7: Zeitreihenanalyse des Dampfspannungsausgleichs; schwarz: K₂CO₃, hell-grau: K₂SO₄; O: Probe1, □: Probe2, △: Probe3, ◇: Probe 4.

2.3.2.3 Prüfung von Homogenität und Repräsentanz der Messungen

Die Steingehalte in den 200-ml-Stechzylindern aller Probenahmeorte variieren zwischen 0,52 und 449,75 g. Da bei einer Einwaage von 20 g pro Probe die Bestimmung der Wasserdampfadsorption aller Steine eines Aliquots den zeitlichen Rahmen der Arbeit übersteigen würde, wurden dieser Grundgesamtheit drei zufällig ausgewählte Teilkollektive zur Untersuchung entnommen. Dabei muss sichergestellt sein, dass das zufällig ausgewählte Material repräsentativ für die Gesamtprobe ist. Hierzu wurden von 120 Messstellen jeweils 3 Proben von 20 g zufällig ausgewählt und die Änderung des Wassergehaltes nach dem oben beschriebenen Verfahren bei pF 4,6 (K_2SO_4) bestimmt. Die Ergebnisse der Probenreihen der ersten, zweiten und dritten Teilmengen sind als sog. Box-Plots in Abbildung 8 dargestellt (vgl. Abb. 23, S.38). Anhand der Lagemaße sowie der Werte über bzw. unter dem 95%-Konfidenzintervall (Einzelpunkte) kann die Verteilung der 3 Stichproben beurteilt werden.

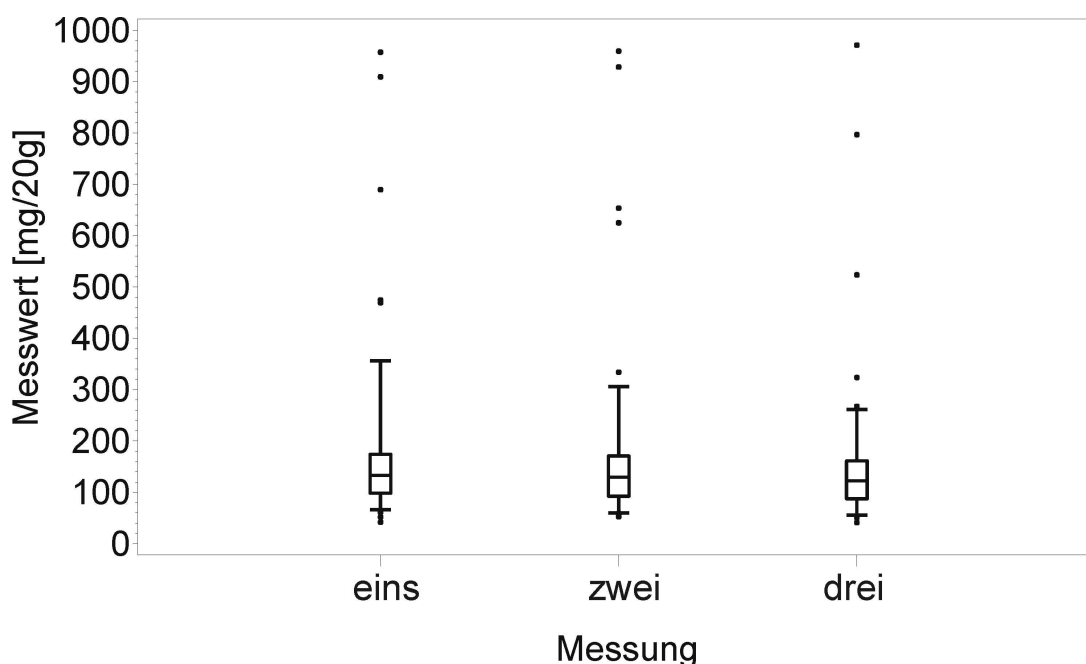


Abb. 8: Boxplots zum Dampfspannungsausgleich dreier zufällig ausgewählter Teilkollektive einer Grundgesamtheit an Steinen, n=120.

Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Einzelmessungen ist nicht vorhanden. Eine Varianzanalyse (FAHRMEIR 2003) bestätigt dieses Ergebnis. Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, kann mit 95%iger Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die Einzelmessungen der gleichen Grundgesamtheit entstammen ($p > 0,53$).

Varianzanalyse			
Freiheitsgrade	Irrtumswahrscheinlichkeit	F-Wert	Wahrscheinlichkeit [p]
2	0.05	0,53	0.5911

Tab. 3: Ergebnisse des ANOVA-Tests auf Repräsentanz dreier Teilkollektive aus einer Skelettprobe, n=120.

Zur weiteren Bearbeitung der Ergebnisse des Dampfspannungsausgleichs wird das arithmetische Mittel der Messungen aus den drei zufällig gezogenen Stichproben gebildet.

2.4 Chemische Analysen

2.4.1 Elementgehalte der Feinerde

Für die Feinerde-Analysen des regionalen Rasters konnte auf die konventionellen physikalischen und chemischen Analysen der BZE zurückgegriffen werden (BUBERL et al. 1994). Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb des BMBF-Verbundprojekts konnten die konventionellen physikalischen und chemischen Analysen der Feinerde des lokalen Rasters von ZIRLEWAGEN (2002) übernommen werden.

Alle Feinerdeproben wurden im bodenkundlichen Labor der FVA Baden-Württemberg analysiert. Die Kationen der Feinerde wurden mittels ICP-AES (Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma), die Anionen der Feinerde mittels IC (Ionenchromatographie), der pH-Wert der Feinerde mit der Zweistab-Glaselektrode ermittelt.

2.4.2 Elementgehalte der Perkolationslösungen

Im Labor des Instituts für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Freiburg wurden die Kationen der Perkolationslösungen mit Atomabsorptions- bzw. Atomemissionspektrometrie (Flamme) analysiert.

2.5 Bodenphysikalische Parameter

Nach Reinigung der Skelettpartikel wurden Farbe, Gehalt an dunklen Mineralen, okular bestimmbarer Grad der Verwitterung und Vorkommen von Feinwurzeln und Rhizomorphen erfasst. Im Anschluss an die Perkolationen wurde nach 24stündiger Trocknung bei 105° C das Trockengewicht der Proben gravimetrisch bestimmt.

2.6 Bestimmung der Korngrößenverteilung der Skelettfraktion

Um zu überprüfen, ob die Korngröße von Steinen einen Einfluss auf ökochemisch wichtige Eigenschaften der Skelettfraktion besitzt, wurde die Korngrößenverteilung der Skelettproben ermittelt.

Dazu wurde die Durchmesserverteilung der Proben mit einem Schüttgutvermesser bestimmt (PARSIVELM300, Firma PMTech). Das Gerät besteht aus einem laseroptischen Sensor mit Schutzgehäuse (Abbildung 9) sowie einer Steuerungsanlage.



Abb. 9: Sensorkopf des PARSIVELM300.

Der Sensor erzeugt ein horizontales Lichtband. Durch das Lichtband hindurchtretende Teilchen führen zu einer Reduzierung der am Empfänger gemessenen Ausgangsspannung (Abbildung 10, Teil a und b). Die Amplitude dieses Signals ist ein relatives Maß für die Teilchengröße (Abbildung 10, Teil c).

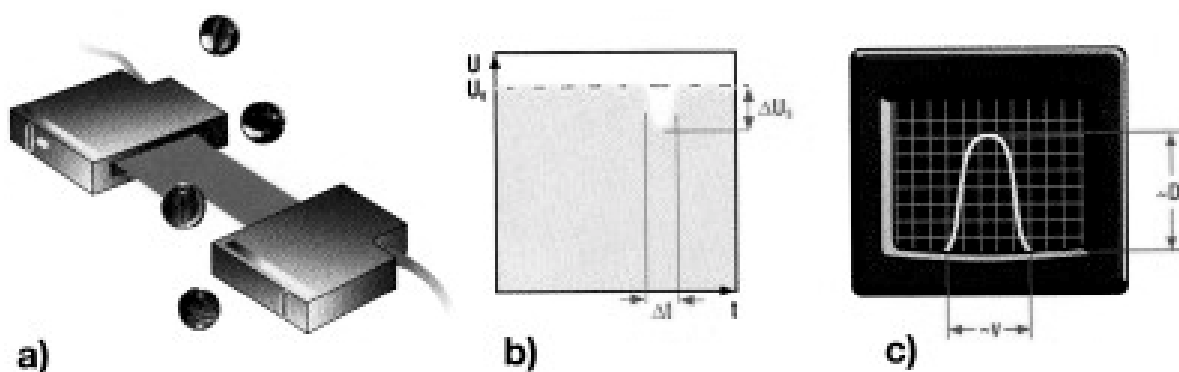


Abb. 10: Ableitung der Partikelgröße aus der Verschattung eines Lichtbandes (Erläuterungen der Grafik unter www.pmttech.de).

Die Skelettpartikel werden als kugelförmige Körper vermessen, der volumenäquidistante Durchmesser D wird als Maßeinheit ausgegeben. Man erhält so eine auf einem Kugelmodell des Skeletts basierende „Äquivalentgrößen-Verteilung“ der Probe. Weitere Informationen zum Messgerät können bei der Firma pmtech (www.pmtech.de) eingeholt werden.

Die Ergebnisse von der Validierung der Messergebnisse (Kapitel 2.6.1.1) und von der Überprüfung der Messgenauigkeit (Kapitel 2.6.1.2) zeigen, dass das Gerät den Anforderungen für die Bestimmung der Korngrößenverteilung von Skelettpartikeln in bodenkundlichen Labors genügt und für die vorliegende Arbeit eingesetzt werden kann. Dazu fasst das laseroptische Messinstrument PARSIVELM300 die Partikel eines Standorts zwischen 0,01 mm und 5 cm zu 32 Durchmesserklassen zusammen. Die Einteilung der Klassen ist geräteabhängig und kann nicht verändert werden. Die in die Betrachtung der vorliegenden Arbeit einbezogenen Skelettpartikeln werden laseroptisch in Durchmesserklassen zwischen 1,85 mm - 5 cm (= 18 Klassen) unterteilt. Um sicherzustellen, dass tatsächlich nur der Grobboden (> 2 mm) untersucht wird, wurden die Partikel vor der Messung durch Siebung in die Fraktionen $<$ und > 2 mm getrennt. Da die Auszählung durch PARSIVELM300 nicht völlig zerstörungsfrei verläuft, kann die kleinste Durchmesserklasse (1,85-2,179 mm) trotzdem Skelettpartikel enthalten, deren Durchmesser < 2 mm ist. Durchmesser > 5 cm werden vom Gerät nicht erkannt und sind deshalb durch dreimaliges Messen mit der Schubleere manuell ermittelt worden. Aus dieser Gruppe setzten sich die letzten 5 der insgesamt 23 Durchmesserklassen eines Standorts zusammen.

2.6.1 Validierung der Messergebnisse

Da die Messvorrichtung bisher nicht für bodenkundliche Fragestellungen wie z.B. die Bestimmung von Korngrößendurchmessern benutzt wurde, musste die Methode überprüft werden. Als Nachweis der Güteanforderungen für den beabsichtigten Gebrauch wurde mittels eines händisch vermessenen Referenz-Datensatzes von 200 Steinen die Genauigkeit der Messung getestet (Abbildung 11).

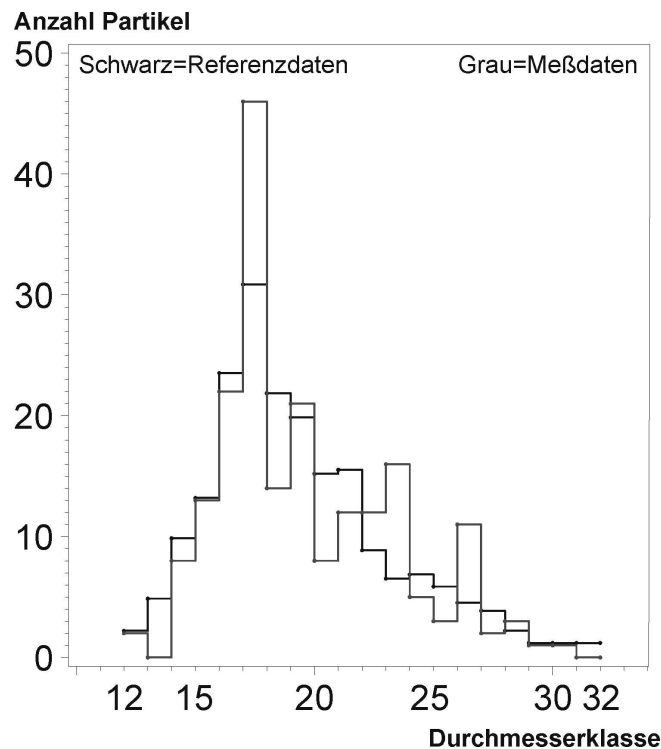


Abb. 11: Manuell ermittelte Korngrößenverteilung eines Referenzdatensatzes (schwarz) und dreier Wiederholungsmessungen (grau) desselben mit einem laseroptisch Schüttgutvermesser.

Da bei den drei Messungen nur ca. 87,7 % der Partikel des Referenzdatensatzes von PARSIVELM300 erfasst wurden, wurde der Chi-Quadrat-Test auf Homogenität für diskrete Zahlen angewendet (FAHRMEIR 2003). Dieser Test entscheidet, ob die beobachteten Häufigkeiten sich signifikant von solchen unterscheiden, die man aufgrund theoretischer Annahmen erwartet. Tabelle 4 ist zu entnehmen, dass die Wahrscheinlichkeit, welche aus dem berechneten Wert resultiert ($p=0,1262$) kleiner als die Prüfgröße ist. Die Null-Hypothese, dass es sich um unabhängige Stichproben handelt, kann mit ca. 90% Sicherheit abgelehnt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Verteilung von Referenz- und Messdaten homogen ist.

Chi-Quadrat-Test auf Homogenität (Likelihood Ratio Chi-Square)		
Freiheitsgrade	berechneter Wert für X^2	Wahrscheinlichkeit [p]
20	24,1903	0,1262

Tab. 4: Daten zum Chi-Quadrat-Test (X^2) auf Repräsentanz basierend auf 3 Wiederholungsmessungen der Korngrößenverteilung.

Die von dem laseroptischen Schüttgutvermesser nicht erkannten Partikel stammen aus allen Durchmesserklassen. Der Messfehler ist laut Angaben des Herstellers auf Konfigurationsprobleme der Steuersoftware zurückzuführen und auch schon in anderen

Qualitätsnachweisen in gleicher Art und Intensität festgestellt worden. Für spätere Auswertungen wird aus diesem Grund das eigentliche Messergebnis jeder Durchmesserklasse um einen Anteil von 12,5% erhöht.

2.6.2 Überprüfung der Messgenauigkeit

Durch die dreimalige Vermessung einer Probe ist es möglich, den Variationskoeffizienten (CV) als Maß für die Homogenität der Wiederholungsmessungen zu berechnen (FAHRMEIR 2003). Der CV gibt an, wie viel Prozent vom arithmetischen Mittel die Standardabweichung beträgt. Bei einem CV von 10% handelt es sich um eine sehr homogene Menge, bei einem CV größer 80% liegt eine sehr inhomogene Menge vor.

Dabei ist zu beachten, dass die Messungen mit dem Schüttgutvermesser nicht gänzlich zerstörungsfrei verlaufen. Beim Aufprall der Skelettkörner in ein Auffanggefäß können instabile Partikel in kleinere Teilchen zerfallen. Die veränderten Ausgangsbedingungen führen teilweise dazu, dass das laseroptische Messgerät Steine bei Folgemessungen einer anderen Durchmesserklasse zuordnet. Daher unterliegt der CV der Messungen einer Streuung, die nicht nur von der Messtechnik abhängt, sondern auch vom Untersuchungsmaterial.

Durch eine dreimalige Zählung der 20 Durchmesserklassen an 34 Proben steht ein für statistische Zwecke ausreichend großes Probenkollektiv zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Messungen zur Verfügung. Damit können die Messergebnisse kalibriert werden.

Die in Abbildung 12 dargestellte Auswertung der dreimaligen Zählung von 20 Durchmesserklassen an 34 Proben zeigt, dass ab einer Partikelzahl von 20 Steinen pro Durchmesserklasse der Anteil der Standardabweichung am arithmetischen Mittelwert 30% oder weniger beträgt. In Anbetracht des methodisch verursachten Messfehlers wegen Zerstörung von Skelettpartikeln beim Arbeitsvorgang können diese Ergebnisse als Beleg dafür gelten, dass die Messungen der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Zur weiteren Verwendung der Korngrößenanalysen mit dem laseroptischen Messgerät wird das arithmetische Mittel der Durchmesserklassen einer Probe aus drei Messungen gebildet. Damit ist gewährleistet, dass Extremwerte das Untersuchungsergebnis nicht signifikant beeinflussen.

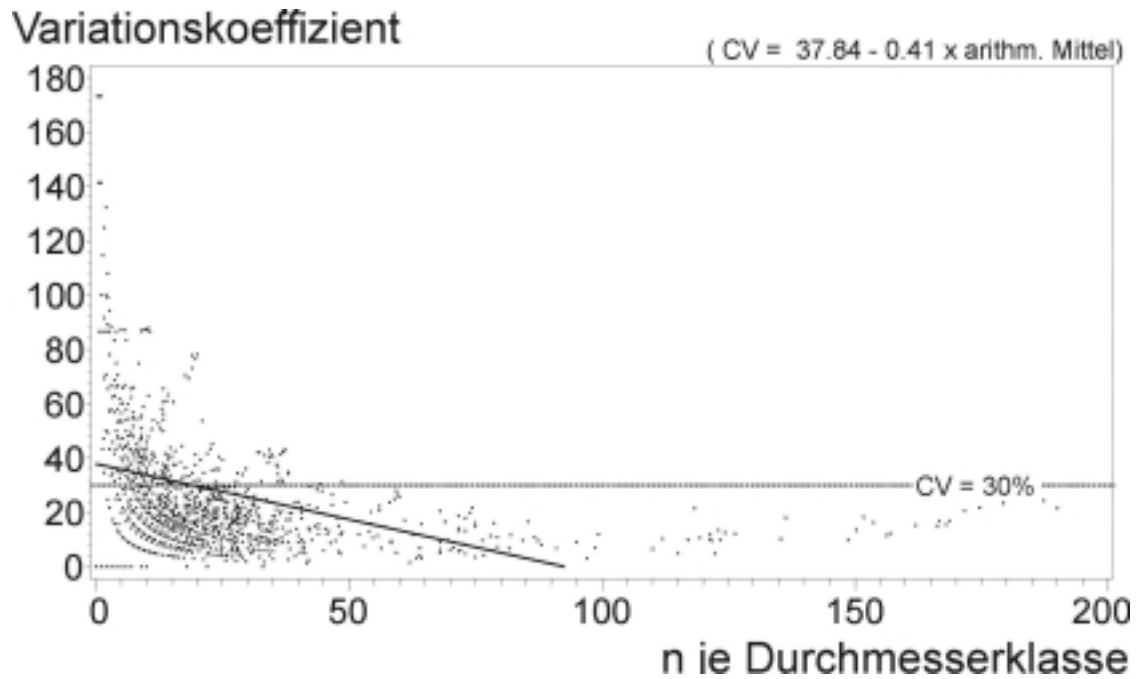


Abb. 12: Variationskoeffizient in Abhängigkeit der Anzahl von Steinen je Durchmesserklasse.

In Abbildung 13 ist ein weiterer Qualitätsnachweis dargestellt.

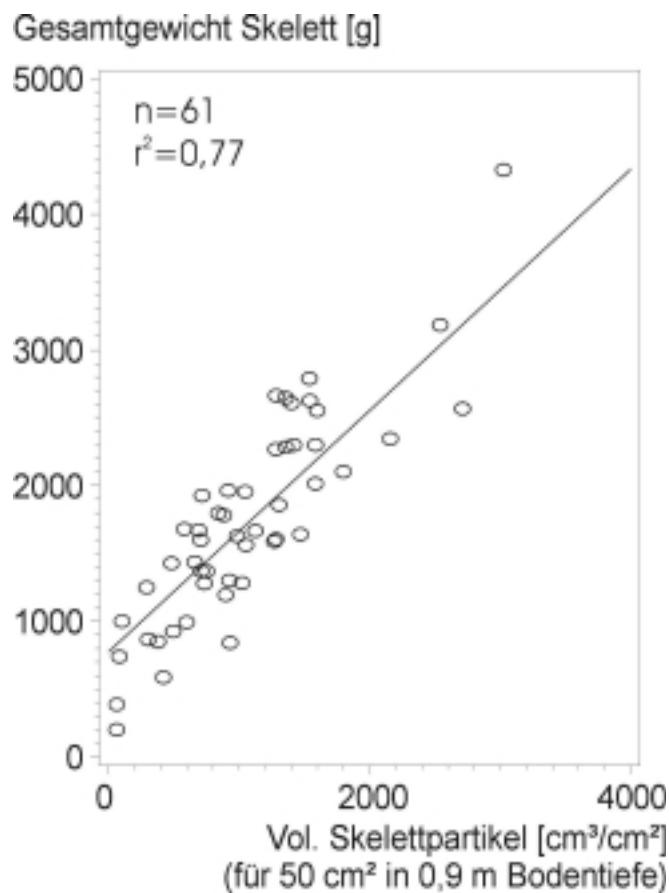


Abb. 13: Beziehung der voneinander unabhängigen Standortvariablen ‚Gewicht der Probe‘ und ‚Volumen der Probe‘.

Nach erfolgter Messung mit PARSIVELM300 kann aus der Partikelzahl je Durchmesserklasse und dem jeweiligen mittleren Durchmesser der Durchmesserklassen unter Zugrundelegung eines „Kugelmodells“ das Volumen der Skelettfractionen berechnet werden. Bei konstantem spezifischem Gewicht muss diese Beziehung straff sein, anderenfalls liegt ein Mess- oder Wägfehler vor. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass 77% der Variation des Skelettgewichtes mit dem mittleren Volumen pro 50 cm² in 0,9 m Bodentiefe erklärt werden kann. Da Skelettkörner keine idealen Kugeln sind und die dreimalige Vermessung der Partikel eines Standorts nicht völlig zerstörungsfrei verläuft, kann dieses Ergebnis als Nachweis für eine hinreichende Genauigkeit der Messungen mit dem laseroptischen Schüttgutvermesser betrachtet werden.

2.7 Tonmineralogische Untersuchungen

Die Analysen der tonmineralogischen Zusammensetzung von Gesteinsbruchstücken aus dem Untersuchungsgebiet des regionalen Rasters wurden von der Firma „Tonmineralogische Beratung, Dr. Butz-Braun“, Kirchhain/Hessen durchgeführt. Von 11 ausgesuchten Standorten wurden aus den Tiefenstufen 10-30, 30-60 und 60-90 cm gereinigte Skelettproben analysiert. Für die röntgendiffraktometrische Untersuchung wurden die Proben in einem Stahlmörser zerkleinert und fraktioniert. Die Fraktion < 6,3 mm wurde anschließend luftgetrocknet. Nach Ethylenglycol-Behandlung und thermischer Behandlung bei 350°C und 550°C sowie im unbehandelten Zustand wurde das Röntgenbeugungsmuster bestimmt, um die Mineralzusammensetzung semiquantitativ zu erfassen.

2.8 Statistische Methoden

Mit Hilfe von Regressionsanalysen (FAHRMEIR 2003, SCHÖNWIESE 2000) können die Ionenfreisetzungsraten der Skelettfraction steuernde Kenngrößen identifiziert werden. Die explorative Datenanalyse und Implementierung in eine Pedo-Transferfunktion erfolgt unter Einsatz des Softwaresystems SAS, Release 8.2 (TS2M0). Es wird die Prozedur REG (SAS INSTITUTE 1999) angewendet und als Auswahlverfahren ein Optimierungsprozess gewählt, der unter den möglichen Prädiktorenkombinationen aus dem Satz der zur Verfügung stehenden Variablen die bestmögliche Güte der Anpassung berechnet (RSQUARE-Verfahren). Diese Prozedur eignet sich besonders als Entscheidungshilfe, wenn mehrere mögliche Prädiktoren vorhanden sind (SCHUEMER et al. 1990). Da bei diesem hinsichtlich der Variablenauswahl sehr effektiven Instrument jedoch stets die Gefahr besteht, dass vom Computer nach statistischen Kriterien ausgewählte Einflussfaktoren sachlogisch nicht

haltbar sind (BACKHAUS et al. 2000, BECHER 1999), wurde das Ergebnis bezüglich der Art und Stärke der Wirkungen von berücksichtigten Variablen geprüft. Statistisch signifikante Zusammenhänge werden nur bei sachlogisch plausiblen Ergebnissen akzeptiert. Bei widersprüchlichen Ergebnissen werden Prädiktoren verworfen, auch wenn das Bestimmtheitsmaß sich dadurch verschlechtert.

3 Ergebnisse

3.1 Kationenaustauschereigenschaften des Skeletts im Südschwarzwald

3.1.1 Das Bodenskelett als Kationentauscher

In Abbildung 14 sind die austauschbaren Kationenäquivalente aller Skelettproben in Abhängigkeit von der Menge der perkolierten Austauscherlösung in fünf Fraktionen für fünf Tiefenstufen dargestellt. Dabei charakterisieren die ersten drei Fraktionen den rasch austauschbaren Ionenpool der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK).

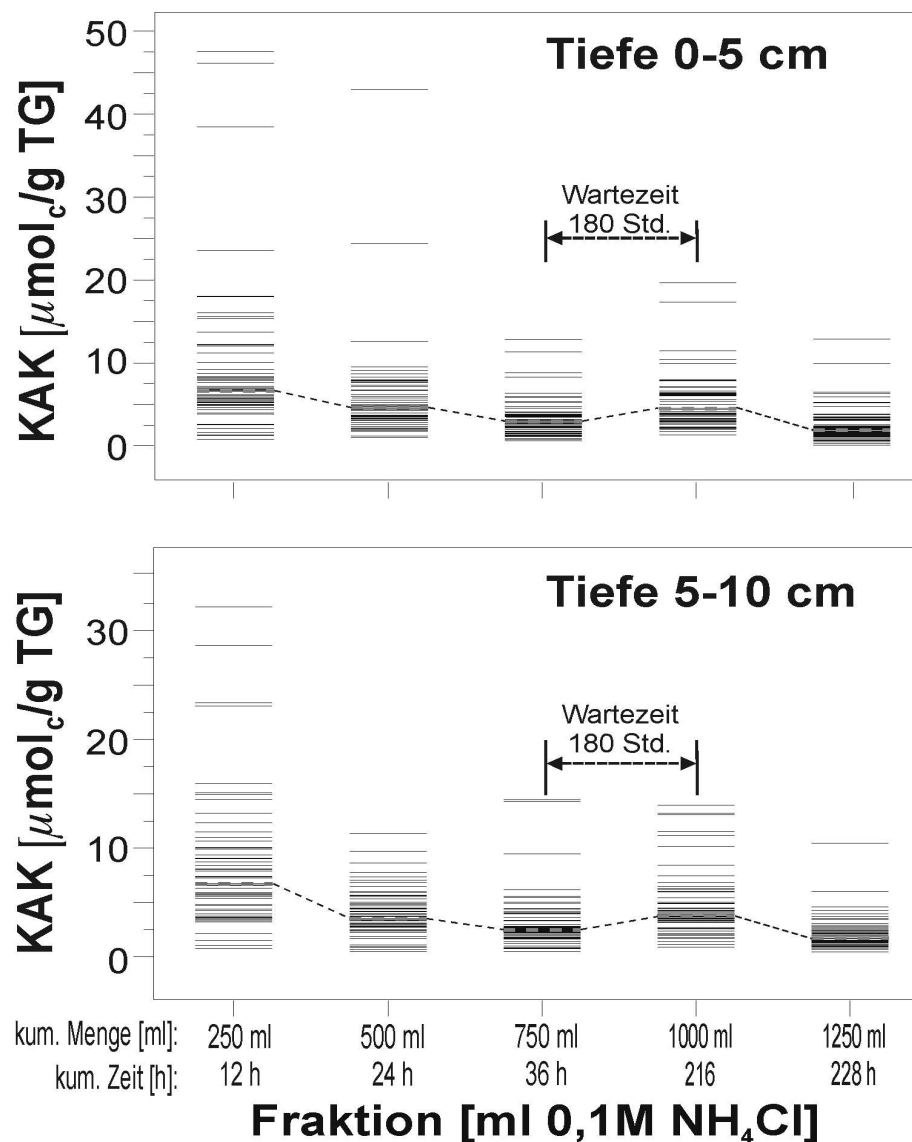


Abb. 14a: Austauschbare Kationen des Skeletts in Abhängigkeit von der Menge der perkolierten Austauscherlösung (Fraktion). Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm, n=61, gestrichelte Linie=arithm. Mittelwert.

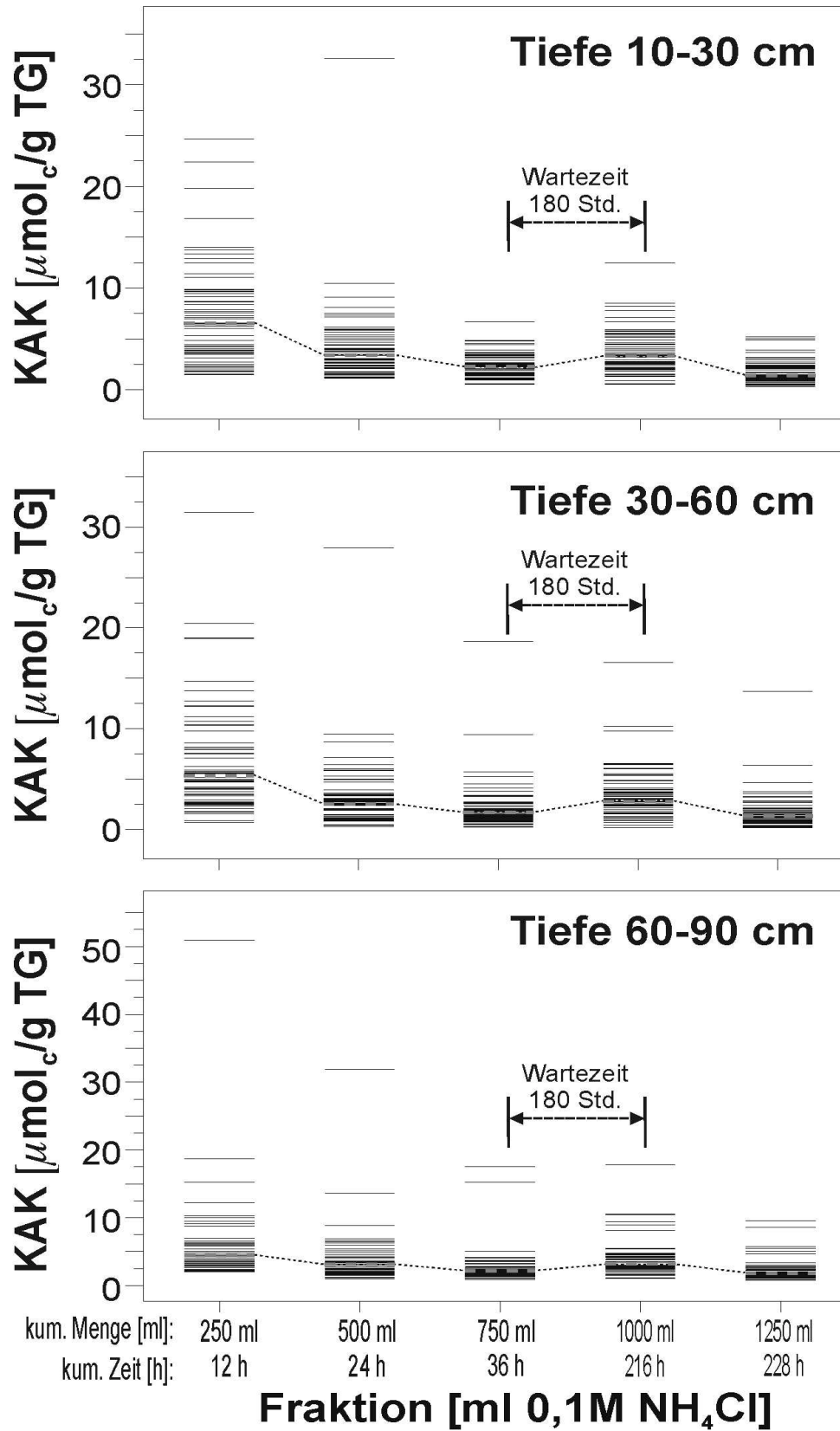


Abb. 14b: Austauschbare Kationen des Skeletts in Abhängigkeit von der Menge der perkolierten AustauschergLösung (Fraktion).
Tiefenstufen 10-30 cm, 30-60 cm u. 60-90 cm, n=61, gestr. Linie=arithm. Mittelwert.

Die höchsten Mengen austauschbarer Kationen als auch die breiteste Streuung treten bei der Perkolation der ersten Fraktion auf. Für die erste Fraktion werden Mittelwerte zwischen 8-9 $\mu\text{mol/g}$ TG (Bodentiefen 0-5 cm und 5-10 cm) und 7-7,5 $\mu\text{mol/g}$ TG (Bodentiefen von 30 - 90 cm) gemessen. Bis zur dritten NH_4Cl -Gabe sinkt bei abnehmender Streuung der Einzelergebnisse der Mittelwert stetig ab.

Nach der 7,5tägigen Unterbrechung der Perkolation liegt der Mittelwert der KAK um zwei Drittel höher bis doppelt im Vergleich zu Fraktion drei bei einer damit verbundenen erneuten Zunahme der Streuung. Im Skelett konnten also – analog zur Feinerde - Kationen durch diffusiven Transport nachgeliefert werden.

Zu bemerken ist, dass auch nach der Perkolation der letzten Fraktion der Austauschprozess nicht vollständig beendet ist. Die Mittelwerte liegen hier für alle Tiefenstufen bei ca. 1,5 bis 2,5 $\mu\text{mol/g}$ TG. Dies zeigt, dass die Nachlieferung mittelfristig austauschbarer Kationen ein Prozess ist, der auch nach 10 Tagen nicht völlig zum Erliegen kommt. Denkbar ist, dass das eintauschende Neutralsalz einen Teil der Austauschflächen an inneren Hohlräumen des Skeletts nur sehr langsam erreicht („Flaschenhalseffekt“) und die Nachlieferung dadurch zwar langsamer wird, jedoch nie ganz zum Erliegen kommt.

Die Gehalte austauschbarer Kationen der Skelettfraktion eines Profils werden in Tabelle 5 nach der Summenhäufigkeit in 5 Klassen eingeteilt. Da sehr hohe und sehr niedrige Werte für eine ökologische Bewertung der Untersuchungsbefunde meist von besonderem Interesse sind, wurden die Klassenbreiten nicht einheitlich gewählt, sondern in eine breite Klasse mit mittleren Werten und Klassen mit geringerer Breite im relativ niedrigeren und höheren Bereich unterteilt (vgl. BLOCK et al. 1991).

Folgende Klassen der Summenhäufigkeiten der AK wurden unterschieden:

sehr niedrig	<15%
niedrig	15-<35 %
mittel	35-<65%
hoch	65-<85%
sehr hoch	>85%

Eine Prüfung der Anpassung der beobachteten Werte an eine beliebige zu erwartende Verteilung durch den Kolmogoroff-Smirnow-Test ergibt, dass die Gehalte an austauschbaren Kationen nicht der Normalverteilung folgen, sondern eine linksschiefe Verteilung

ausbilden. Die Gehalte der meisten Profile liegen unter dem aus allen Standorten gebildeten arithmetischen Mittelwert.

Parameter	n	Minimum	Percentile der Summenhäufigkeit				Maximum	Median
			15%	35%	65%	85%		
Na⁺ [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	0,00	0,19	0,43	1,39	3,77	10,68	0,80
Ka⁺ [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	0,87	1,96	2,44	3,24	5,29	36,07	2,82
Ca²⁺ [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	4,53	7,84	12,69	23,05	35,62	95,95	17,23
Mg²⁺ [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	1,75	3,36	5,83	10,59	14,38	49,26	8,48
Summe M_b-Kationen [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	9,82	18,09	23,37	38,20	59,23	159,70	28,86
Al³⁺ [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	4,31	19,40	39,75	59,37	74,71	150,03	46,70
Fe²⁺ [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	0,12	0,42	0,62	1,02	2,23	6,13	0,85
Mn²⁺ [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	0,02	0,81	1,61	3,70	7,81	23,86	2,65
Summe M_a-Kationen [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	5,31	20,97	43,65	63,26	78,68	163,48	52,89
KAK_{eff} [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]	61	17,61	57,36	69,72	100,04	119,97	319,73	84,75
Basensättigung [%]	61	14,10	23,11	29,21	45,96	58,94	92,64	37,62

Tab. 5: Summenhäufigkeit der AK von Einzelementen, Summe der M_a- und M_b-Kationen, KAK_{eff} und der Basensättigung des Grobbodens

Betrachtet man den Tiefenverlauf der Anzahl kurz- und mittelfristig ausgetauschter M_b-Kationen der Standorte (Abbildung 15) zueinander, fällt auf dass bei 43 von 61 Standorten ab 30 cm bis 90 cm die Gehalte an austauschbaren M_b-Kationen als mindestens niedrig einzustufen sind. Bei dieser Profilgruppe wurde ab 30 cm Bodentiefe immer $< 10 \mu\text{mol}_c$ M_b-Kationen pro g TG ausgetauscht.

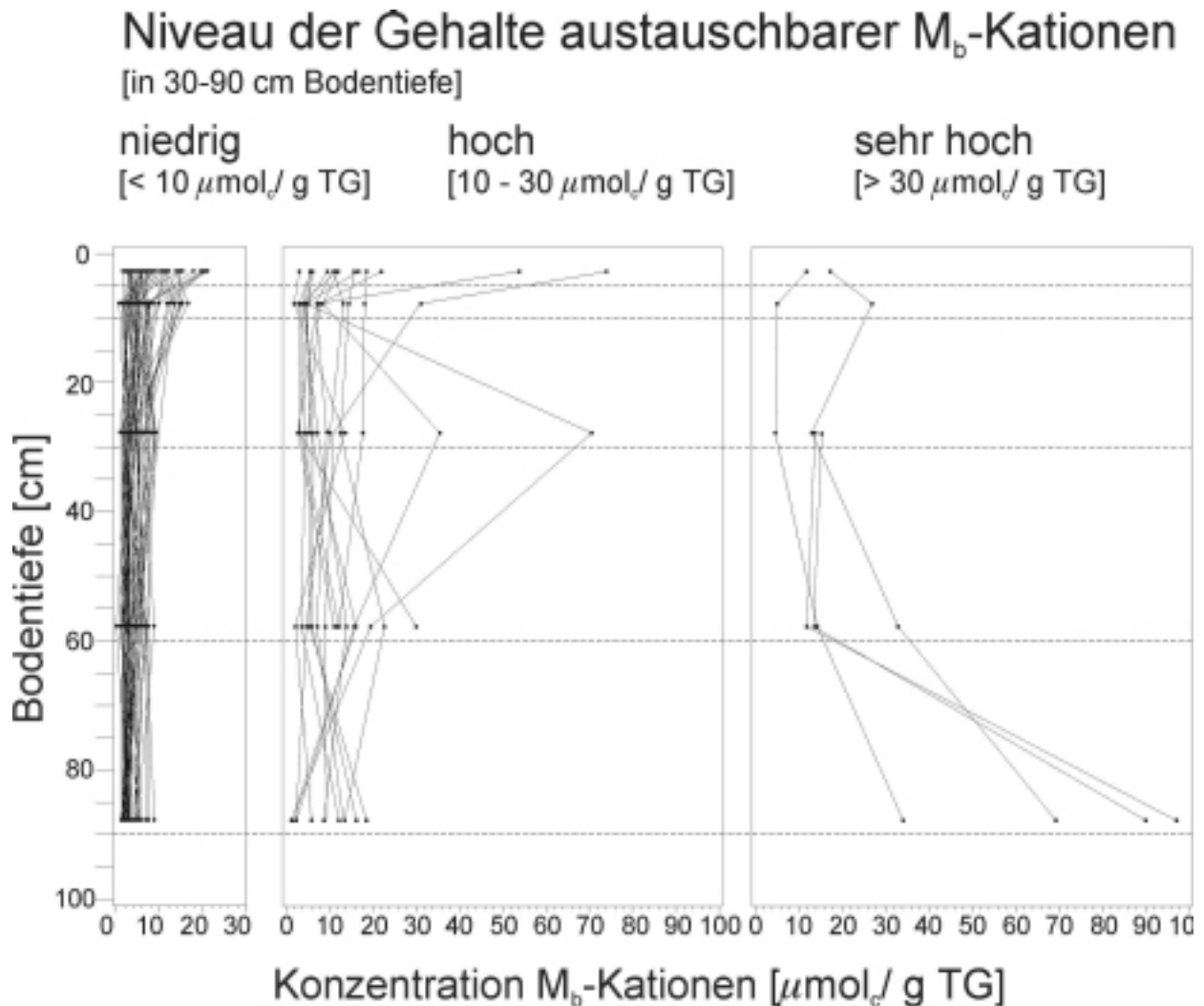


Abb. 15: Tiefenprofile der effektiv (Fraktion 1-5) austauschbaren M_b -Kationen des Bodenskeletts, $n=61$.

Bei den Profilen mit niedriger Konzentration austauschbarer M_b -Kationen ist die Streuung der Einzelmessungen um den durchschnittlichen Mittelwert mit < 6% als sehr gering einzustufen. Der Maximalwert liegt bei diesen Profilen in den oberen 5 cm ($21,11 \mu\text{mol}_e/\text{g TG}$). Ausgangsgesteine sind Granite/helle Gneise, z.T. als Hangschutt (22 Standorte) und dunkle Gneise, z.T. als Hangschutt (21 Standorte). Etwa 25% dieser Standorte wurde in der Vergangenheit gekalkt.

Die verbleibenden 18 Standorte lassen sich durch ihren Tiefenverlauf nochmals unterteilen in einen Teil mit M_b -Gehalten $>10 \mu\text{mol}_e/\text{g TG}$ und uneinheitlicher Tiefenfunktion sowie eine Gruppe von 4 Standorten, bei der die Konzentration austauschbarer M_b -Kationen im Oberboden $> 10 \mu\text{mol}_e/\text{g TG}$ ist und in 90 cm Bodentiefe deutlich zunimmt (höchster Wert: $97,5 \mu\text{mol}_e/\text{g TG}$).

Die 14 Standorte mit heterogenem Tiefenverlauf setzen sich aus 9 Standorten auf dunklem Gneis, z.T. als Hangschutt, 4 Standorten auf Granit/hellem Gneis, z.T. als Hangschutt und 1 Standort auf Fließerde aus Feinlehm zusammen. Die Hälfte dieser Probenahmeorte war in der Vergangenheit gekalkt worden.

Die Profilgruppe mit sehr hohen Austauschkapazitäten in der Bodentiefe 90 cm entstammt ausschließlich von Ausgangsgesteinen mit lehmigen oder sandigen Ausgangsgestein (2x Sandstein, 1x Verwitterungslehm/Rotliegendes, 1x Schlufflehm). Sie weist die höchste Summe an effektiv austauschbaren Kationen aller beprobten Standorte auf. Es wurden dort keine Kalkungen durchgeführt.

In Abbildung 16 sind Mittelwert, Standardabweichung und Extremwerte der skelettbürtigen KAK (sKAK) im Bodenprofil dargestellt.

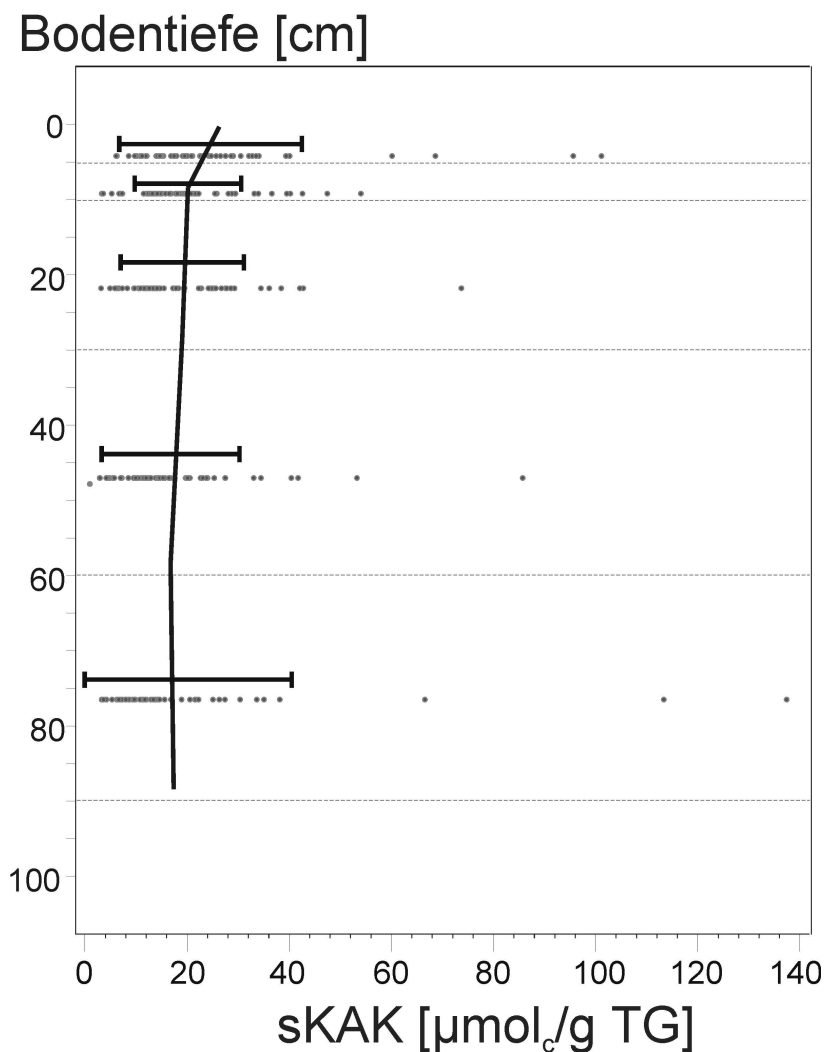


Abb. 16: Mittelwert und Standardabweichung der am Skelett effektiv (Fraktion 1-5) austauschbaren Kationen aller Standorte, n=61.

Die sKAK nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab. In der Tiefenstufe 0-5 cm liegt der Mittelwert effektiv austauschbarer Kationen bei ca. $23,8 \mu\text{mol}_c/\text{g TG}$. Bereits in der Tiefenstufe 5-10 cm ist der Gehalt um etwa ein Fünftel geringer. Bis in 10-30 cm Bodentiefe ist nur eine leichtere Abnahme von $1 \mu\text{mol}_c/\text{g TG}$ auf $19,5 \mu\text{mol}_c/\text{g TG}$ zu verzeichnen. Danach fällt der Mittelwert nochmals um ca. $2,5 \mu\text{mol}_c/\text{g TG}$. Die Tiefenstufen 30-60 cm und 60-90 cm sind nahezu identisch, wobei die Streuung in der untersten Tiefenstufe am größten ist. Die Maximalwerte entstammen mehrheitlich Profilen mit schluffigem oder sandigem Substrat.

In Abbildung 17 ist der Tiefenverlauf der Konzentrationen austauschbarer M_a -Kationen der Standorte dargestellt. Er ist ähnlich dem der M_b -Kationen niedrigen Austauschniveaus (Mittelwert ca. $10,4 \mu\text{mol}_c/\text{g TG}$, Standardabweichungen $< 25\%$). Mit zunehmender Bodentiefe nimmt die Menge effektiv austauschbarer M_a -Ionen geringfügig ab.

Summe skelettbürtiger M_a -Kationen [$\mu\text{mol}_c/\text{gTG}$]

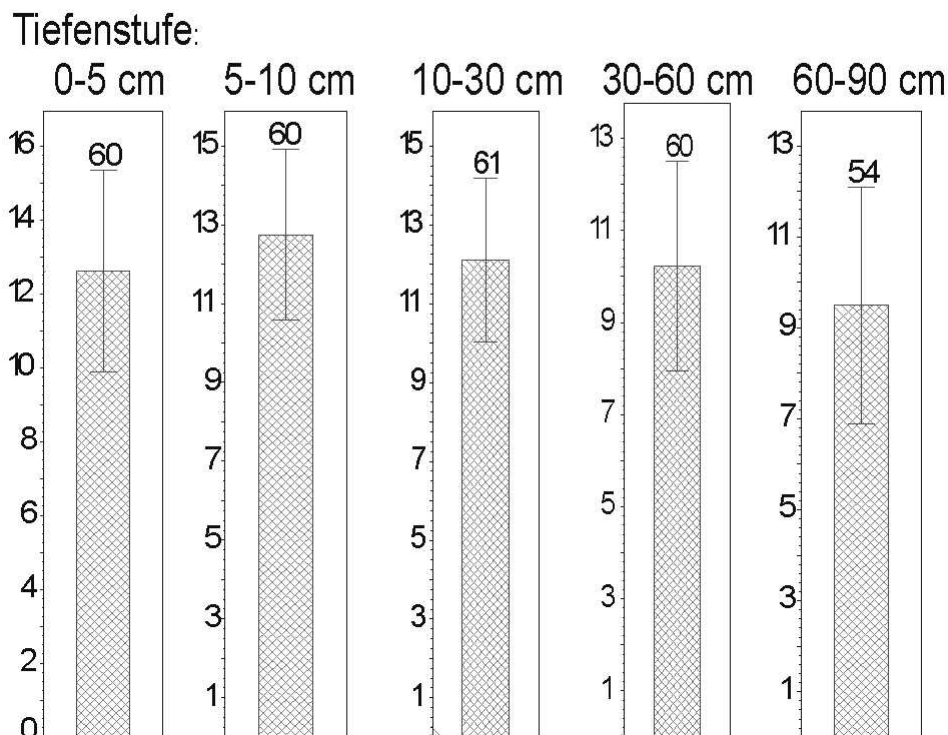


Abb. 17: effektiv austauschbare M_a -Kationen des Skeletts aller Profile (Mittelwert, Standardabweichung, Anzahl der Standorte).

3.1.2 Vergleich von Bodenskelett und Feinboden

Der Vergleich der Ionenspeicher- und Mobilisierungspotenziale von homogenisiertem Feinboden und der Skelettfraktion aller Standorte (Abbildung 18) zeigt, dass in den Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm die feinbodenbürtigen M_b -Austauschgehalte höher sind als die des Skeletts. In der Tiefenstufe 10-30 cm ist der Unterschied zwischen homogenisiertem Feinboden und Steinen am geringsten. Bei generell abnehmender Austauschkapazität ab 30 cm Bodentiefe liegen gegenläufige Verhältnisse vor. Die Mengen austauschbarer M_b -Kationen des Skeletts sind nun höher als die des Feinbodens. Die Skelettfraktion liefert ab einer Bodentiefe von 30 cm knapp über 50% der Gesamtkonzentration austauschbarer Neutralkationen. Sie stellen damit ein bodenökologisch bedeutsames Reservoir verfügbarer basischer Kationen in Waldböden dar.

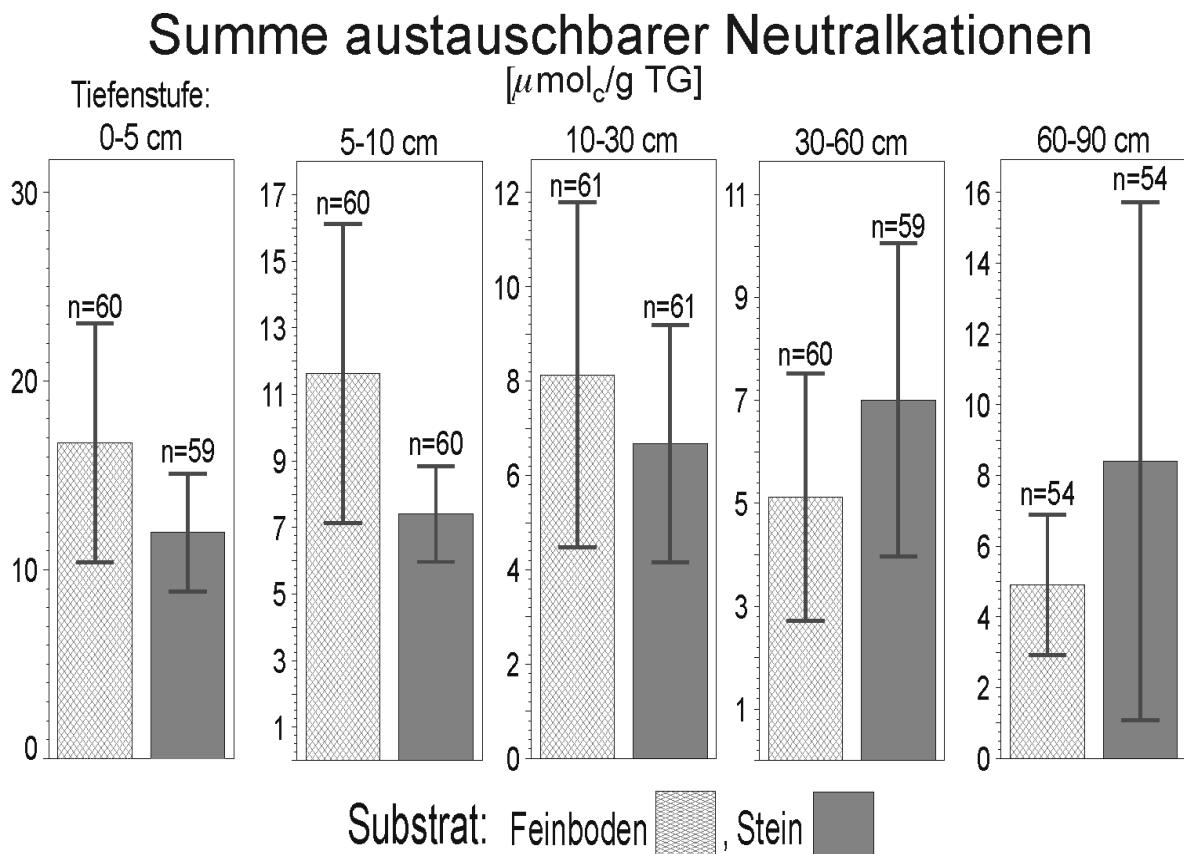


Abb. 18: Vergleich der Mengen effektiv austauschbarer M_b -Kationen von homogenisiertem Feinboden und Skelett.

Betrachtet man die austauschbaren M_b -Ionen getrennt nach Elementen (Abbildung 19a) wird dieser Befund noch deutlicher. Die Mittelwerte der Gehalte an austauschbaren M_b -Ionen von Feinboden und Skelett unterscheiden sich ab einer Bodentiefe von 30 cm nicht mehr signifikant voneinander. Die Streuung um den arithm. Mittelwert innerhalb der

Skelettfraktion steigt mit zunehmender Bodentiefe an, während er sich bei der Feinbodenfraktion nicht signifikant verändert.

Im Gegensatz zu den M_b -Kationen sind im homogenisierten Feinboden signifikant mehr austauschbare Kationensäuren gespeichert als in den Steinen (Abbildung 19b). Das bedeutet, dass die KAK_{eff} des Grobbodens allgemein immer auf niedrigerem Niveau liegt als die des Feinbodens. Austauschbares Al^{3+} stammt über das ganze Tiefenprofil hinweg zu über 80% aus dem Feinboden. Bei Fe^{2+} überwiegt der Anteil austauschbarer Gehalte des Feinbodens am Gesamtgehalt bis zu einer Tiefe von 30 cm, danach unterscheiden sich die austauschbaren Fe-Pools von Fein- und Grobboden nicht mehr signifikant voneinander. Feinbodenbürtiges Al^{3+} und Fe^{2+} zeigen im Oberbodenbereich deutlich breitere Streuungen der Werte um den arithm. Mittelwert.

Auffällig ist, dass die effektiv austauschbaren Mg^{2+} -Gehalte von Skelett und Feinboden über das gesamte Profil hinweg einen nahezu identischen Mittelwert aufweisen und auch die Standardabweichung außer in der Tiefe 30-60 cm sehr ähnlich ist. Anhand eines Chi-Quadrat-Test auf Homogenität ($p < 0,023$) der Standorte wird deutlich, dass die Mg^{2+} -Gehalte von Fein- und Grobboden mit über 97% Sicherheit der gleichen Grundgesamtheit angehören.

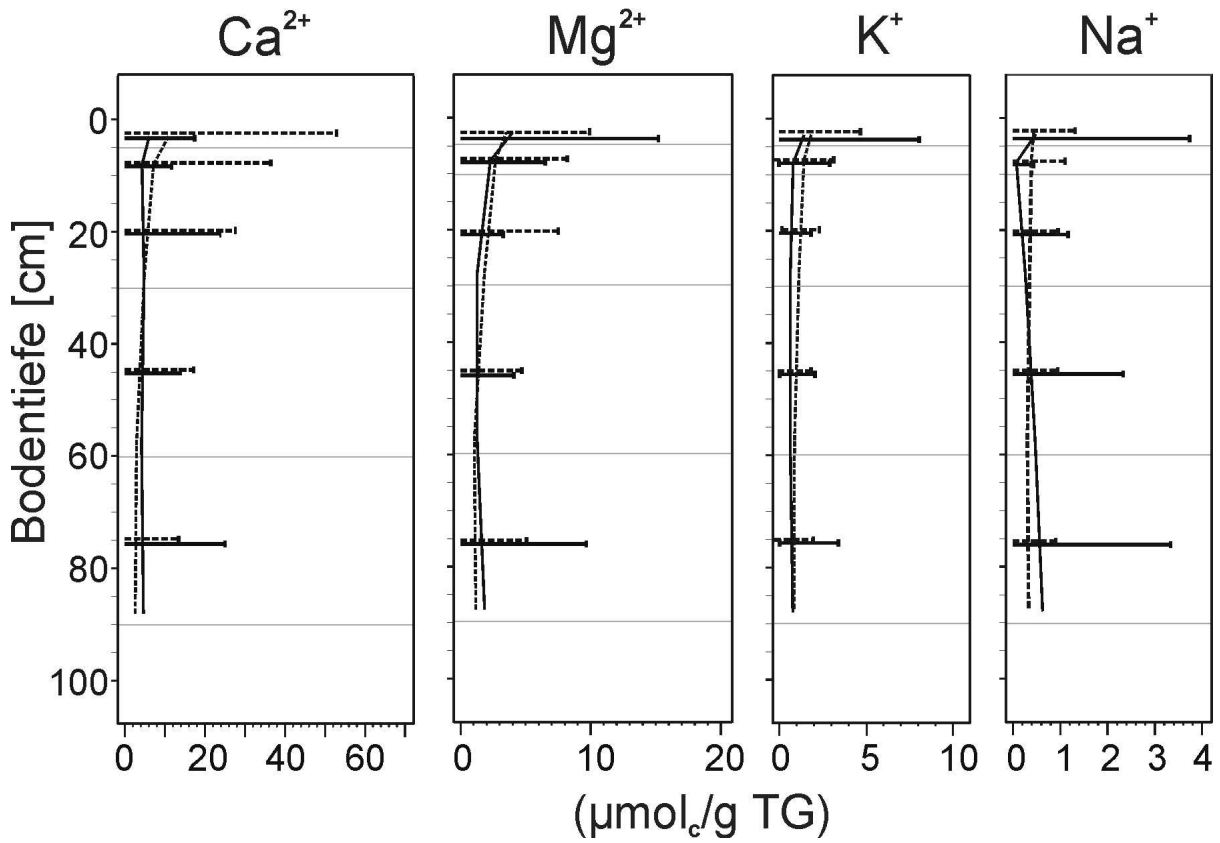


Abb. 19a: Tiefenprofile der austauschbaren M_b -Kationen von Feinboden und Skelett, $n=61$
 (..... Feinboden, — Skelett).

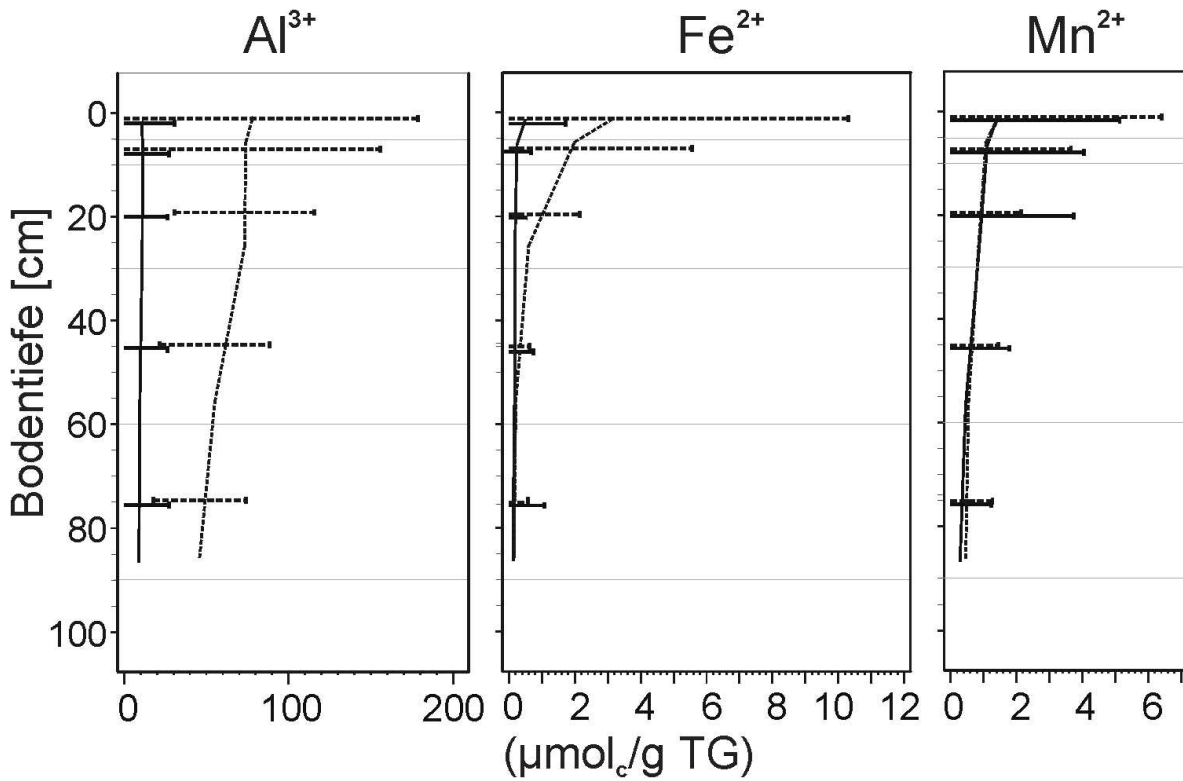


Abb. 19b: Tiefenprofile der austauschbaren M_a -Kationen von Feinboden und Skelett, $n=61$
 (..... Feinboden, — Skelett).

Da in den Steinen deutlich weniger austauschbare Kationensäuren gespeichert werden als im homogenisierten Feinboden, umfasst das Bodenskelett immer signifikant höhere Basensättigungen als die Fraktion <2 mm.

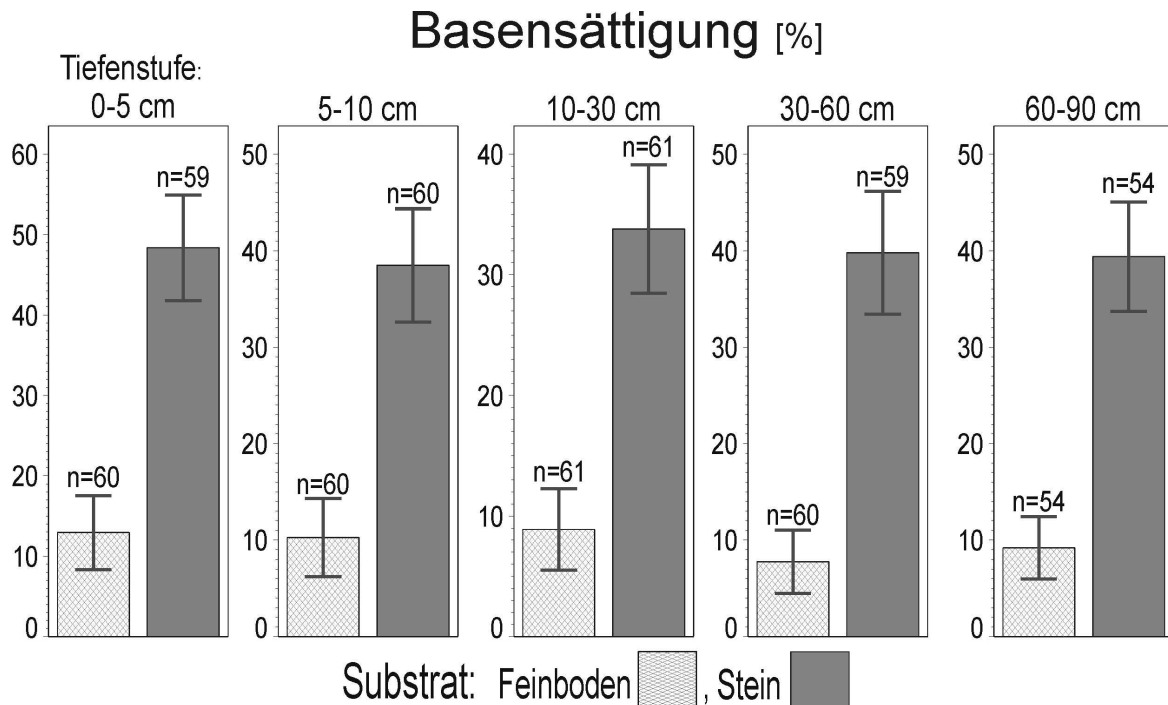


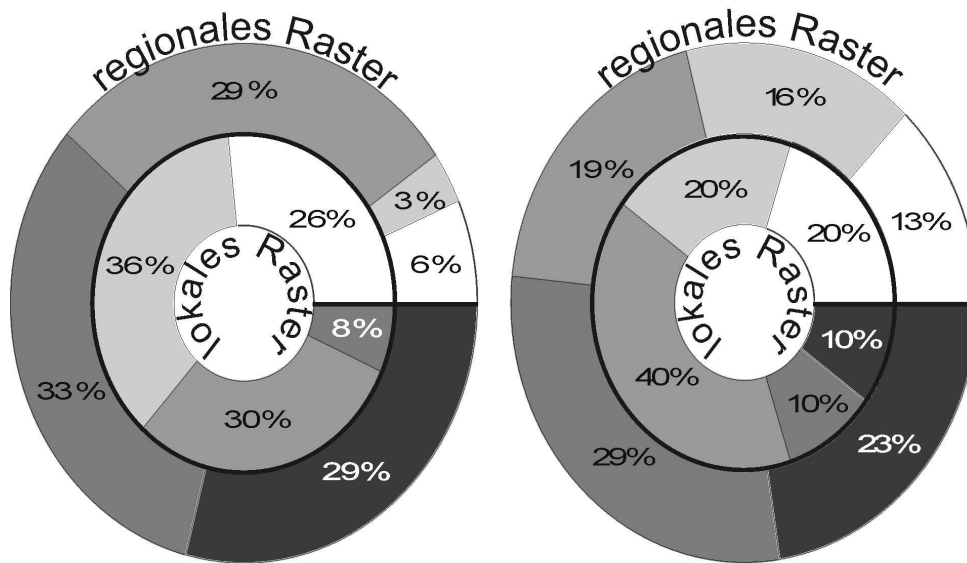
Abb. 20: Vergleich der Basensättigung von homogenisiertem Feinboden und Skelett.

3.1.3 Vergleich von regionalem und lokalem Raster

Ein Vergleich der Ionenspeicher- und Mobilisierungspotenziale der Feinboden- und Skelettfraktion von Standorten der beiden Rasternetze unterschiedlicher räumlicher Dichte ergibt, dass die Gehalte effektiv austauschbarer Ionen des regionalen Netzes stärker um den Mittelwert streuen. Offensichtlich ist das Spektrum derjenigen Faktoren, welche die Menge austauschbarer Ionen beeinflussen, im Falle des regionalen Messnetzes größer. Dies kann mit der vermutlich höheren Variabilität relevanter Standortfaktoren erklärt werden.

Um die Unterschiede im Austauschverhalten der Kationen von regionalem und lokalem Raster genauer erfassen zu können, wurde die feinboden- und skelettbürtige KAK aller Standorte nach der Summenhäufigkeit entsprechend Tabelle 5 in 5 Klassen eingeteilt und daraufhin das regionale und lokale Raster gegenübergestellt. Bei der in Abbildung 21 gezeigten Grafik stellt der äußere Ring das regionale und der innere Ring das lokale Raster dar.

Einteilung nach der Summenhäufigkeit



KAK Feinerde ($\mu\text{mol}/\text{gTG}$) KAK Skelett

Summenhäufigkeit:

□	<15%	: 176,10-253,50
■	15-35%	: 253,51-319,30
■	35-65%	: 319,31-408,10
■	65-85%	: 408,11-502,90
■	>85%	: 502,91-749,50

Summenhäufigkeit:

□	<15%	: 27,61- 57,36
■	15-35%	: 57,37- 69,71
■	35-65%	: 69,72-100,04
■	65-85%	: 100,05-119,97
■	>85%	: 119,98-319,73

Abb. 21: Vergleich der kurz- und mittelfristig austauschbaren Kationen von Standorten des regionalen und lokalen Probeentnahmernetzes.

Ein Vergleich der Summenhäufigkeiten zeigt, dass im Gebiet des lokalen Rasternetzes sowohl bei der Fein- als auch bei der Grobbodenfraktion die Standorte mit niedriger und sehr niedriger Austauschkapazität (Summenhäufigkeiten <35%) überwiegen. Der Feinboden des lokalen Rasters weist keine Profile mit sehr hoher Austauschkapazität auf (Summenhäufigkeit >85%), während diese Feinbodenklasse im regionalen Netz einen Anteil von 29% umfasst. Dahingegen sind in der Grobbodenfraktion beider Probenahmernetze jeweils alle Klassen vertreten.

In Abbildung 22 ist der effektiv austauschbare Kationen-Gehalt von Skelett und Feinerde beider Rasternetze dargestellt. Die Durchschnittswerte kurz- und mittelfristig austauschbarer M_b - und M_a -Kationen des Skeletts beider Rasternetze liegen auf ähnlichem Niveau (M_b -Kationen: regionales Raster=46 $\mu\text{mol}/\text{g TG}$, lokales Raster=33 $\mu\text{mol}/\text{g TG}$; M_a -Kationen: regionales Raster=59,32 $\mu\text{mol}/\text{g TG}$, lokales Raster=51,54 $\mu\text{mol}/\text{g TG}$). Nur im Falle der M_b -Kationen des lokalen Rasters übersteigen die

Austauschgehalte aus dem Skelett die des Feinbodens. Ansonsten überwiegen bei den betrachteten Summenparametern der KAK immer die feinbodenbürtigen Anteile. Die feinbodenbürtige Menge effektiv austauschbar gebundener M_a -Kationen ist beim regionalem wie beim lokalem Rasternetz um ca. das fünffache höher als die vom Skelett effektiv austauschbar gebundene Menge.

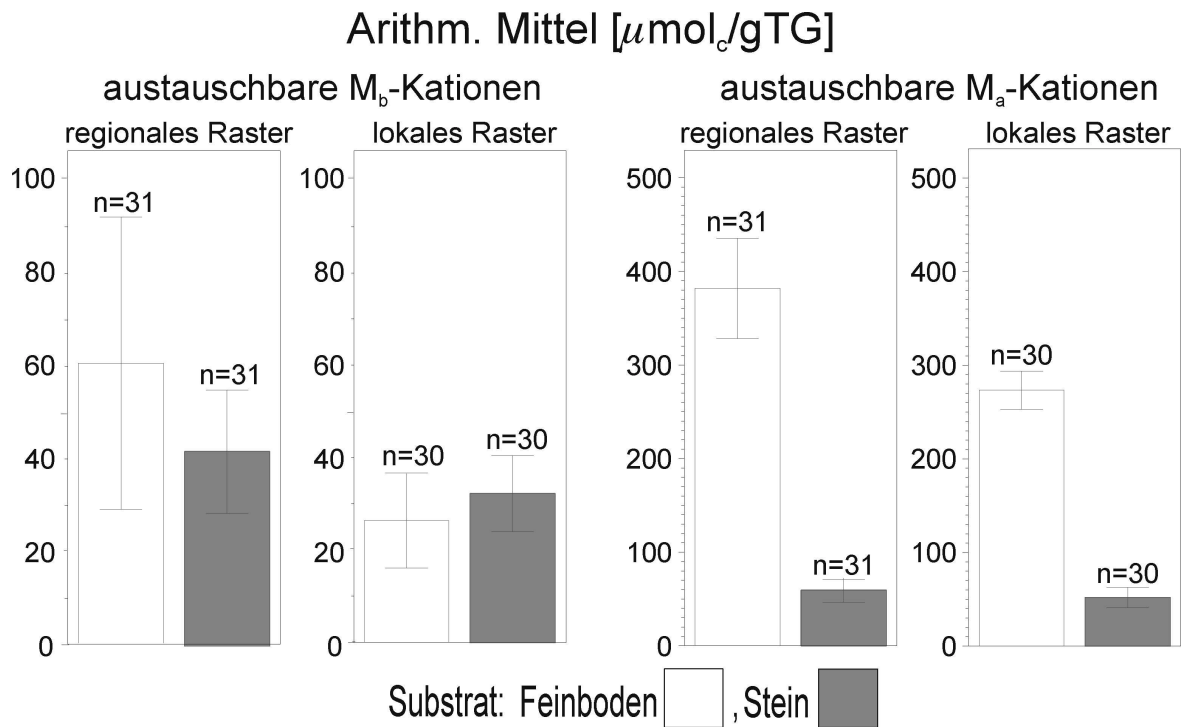


Abb. 22: Vergleich der effektiv austauschbaren M_b - und M_a -Kationen von Standorten des regionalen und lokalen Probeentnahmenetzes.

Für Tabelle 6 wurden die Standorte des regionalen und des lokalen Rasters entsprechend Abbildung 15 aufgeteilt in zwei Gruppen, bei der ab 30 cm Bodentiefe $< 10 \mu\text{mol}_c/\text{g TG}$ skelettbürtige M_b -Kationen vorliegen (= „sKAK niedrig“) bzw. $> 10 \mu\text{mol}_c/\text{g TG}$ (= „sKAK hoch“). Nur das regionale Rasternetz weist Standorte mit sandigen und/oder lehmigen Substraten auf. Diese Profile wurden aufgrund ihrer auffallend hohen Austauschkapazität nicht in den Vergleich für Tabelle 6 miteinbezogen.

Der Anteil der Gruppe „sKAK niedrig“ beträgt bei dem lokalen wie bei dem regionalen Raster ca. 70% der Grundgesamtheit. Bei beiden Rasternetzen waren ca. 30% der Standorte mit niedriger sKAK in der Vergangenheit gekalkt worden, während von den Standorten mit hoher sKAK ca. 50% einer Kalkung unterzogen worden ist.

	Gruppe	n	X_i [$\mu\text{mol/g TG}$]	Median [$\mu\text{mol/g TG}$]	Stdabw. [$\mu\text{mol/g TG}$]	Kalk. [n]
Regionales Raster	sKAK hoch (M _b Skel ab 30cm > 10 $\mu\text{mol/g TG}$)	7	Feinb.: 116,26 Skelett: 48,84	Feinb.: 59,53 Skelett: 44,94	Feinb.: 134,49 Skelett: 21,35	3
	sKAK niedrig (M _b Skel ab 30cm < 10 $\mu\text{mol/g TG}$)	20	Feinb.: 53,99 Skelett: 29,80	Feinb.: 34,71 Skelett: 28,09	Feinb.: 60,55 Skelett: 12,19	5
Lokales Raster	sKAK hoch (M _b Skel ab 30cm > 10 $\mu\text{mol/g TG}$)	7	Feinb.: 25,67 Skelett: 52,88	Feinb.: 15,97 Skelett: 44,60	Feinb.: 24,31 Skelett: 29,43	4
	sKAK niedrig (M _b Skel ab 30cm < 10 $\mu\text{mol/g TG}$)	23	Feinb.: 26,51 Skelett: 27,24	Feinb.: 21,96 Skelett: 17,01	Feinb.: 14,76 Skelett: 28,20	8

Tab. 6: Verteilung von Anzahl, Mittelwert, Median und Standardabweichung der effektiv austauschbaren skelettbürtigen basischen Kationen (M_bSkel) sowie die Anzahl gekalkter Standorte, getrennt nach regionalem und lokalem Rasternetz und Korngröße < 2mm (=Feinboden) und > 2mm (=Skelett).

Die vom Feinboden des lokalen Raster effektiv ausgetauschten M_b-Kationen der Gruppen „sKAK niedrig“ und „sKAK hoch“ nehmen ähnliche Werte auf einem sehr niedrigen Niveau an (Mittelwert ca. 26 $\mu\text{mol/g TG}$). Aufgrund des allgemein sehr niedrigen Austauschniveaus des Feinbodens liegt bei den 7 Standorten der Gruppe ‚lokales Raster, sKAK hoch‘ der Anteil der am Skelett gebundenen austauschbaren M_b-Kationen an der Gesamtaustauschmenge bei über 65% (Mittelwert: 52,88 $\mu\text{mol/g TG}$).

3.1.4 Vergleich von austauschbaren Vorräten des Skeletts und des Feinbodens

Die ökochemische Bedeutung des Skeletts für die Nährstoffversorgung hängt u.a. auch vom Steingehalt der Standorte ab. Da die Proben bis zu einer Bodentiefe von 90 cm mit 200ml-Stechzylindern weitestgehend volumengerecht gewonnen wurden, war es auf einfache Weise möglich, flächenbezogene Vorräte austauschbarer Kationen zu berechnen.

In Abbildung 23 werden diese für alle Standorte getrennt nach Elementen und Korngrößenfraktion als Box-Whiskers-Plot dargestellt.

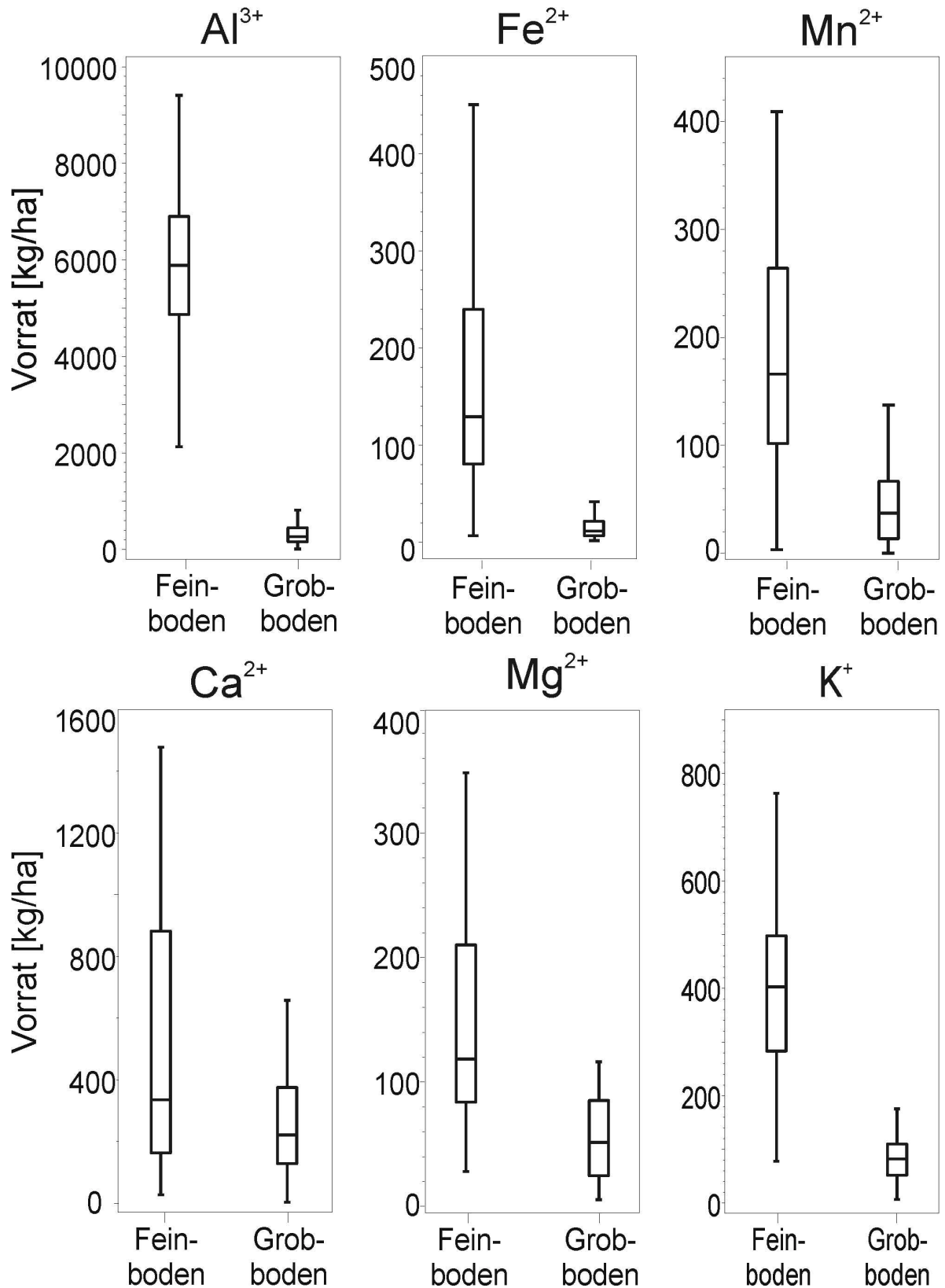


Abb. 23: Median, 25%-Perzentil, 75%-Perzentil und Standardabweichung der austauschbaren Ca-, Mg-, K-, Al-, Fe- und Mn-Vorräte aller Standorte (n=61).

Die untere Begrenzung der Box stellt das 25%-Percentil, die horizontale Linie in der Box den Median und die obere Begrenzung der Box das 75%-Percentil dar. Die an die Box angefügten Linien (Whisker) symbolisieren die Streuung und entsprechen dem Median ab- bzw. zuzüglich der eineinhalbfachen Standardabweichung.

Ca^{2+} ist das Element mit dem größten skelettbürtigen Anteil am Gesamtvorrat im Vergleich aller Elemente. Die berechneten Ca^{2+} -Vorräte stammen zu ca. 62,4% aus dem homogenisierten Feinboden (Median: 332,16 kg/ha) und zu ca. 37,6% aus dem Skelett (Median: 216,13 kg/ha). Die berechneten skelettbürtigen Mg^{2+} -Vorräte betragen ca. 31,8%. Bei Kalium stammen nur noch ca. 14,2% des berechneten Gesamtvorrats aus dem Skelett. Der größte Teil des kurz- und mittelfristig verfügbaren Al^{3+} -, Fe^{2+} - und Mg^{2+} -Vorrats entstammt dem homogenisierten Feinboden. Im Falle von Mg^{2+} steuert das Skelett noch ca. 15,6% zum Gesamtvorrat bei, im Falle von Al^{3+} und Fe^{2+} liegen die skelettbürtigen Anteile am Gesamtvorrat bei nur 4,8%.

3.2. Korngrößenverteilung des Skeletts

In Abbildung 24 ist die Häufigkeitsverteilung der Skelettdurchmesserklassen aller untersuchten Standorte (\emptyset Stechzylinder: 50 cm², Bodentiefe 0-90 cm) mittels Streubalken dargestellt. Die horizontale gestrichelte Linie charakterisiert den arithmetischen Mittelwert einer Durchmesserklasse. Die vertikale durchgezogene Linie eines Balkens symbolisiert die Streuung der Anzahl an Skelettkörnern je Durchmesserklasse und entspricht dem Median ab- bzw. zuzüglich der Standardabweichung.

Die maximale Partikelanzahl der Skelettproben eines Standorts beträgt 4135 Körner (Standort: Regionales Rasternetz 130, Forstamt Todtmoos), die geringste 491 Körner (Standort: Lokales Rasternetz 2, Forstamt Todtnau). Der Mittelwert der Kornzahl sämtlicher Skelettproben aller Standorte liegt bei 1747.

Mit steigendem Durchmesser sinkt die Anzahl der Skelettpartikel. Auch die Streuung der Partikelanzahl aller Proben je Durchmesserklasse sinkt mit steigendem Durchmesser. Skelettpartikel der Durchmesser 1,88-3,25 mm (Durchmesserklassen 1-5), 8,5-25 mm (Durchmesserklassen 12-16) und 35-95 mm (Durchmesserklassen 17-23) kommen in ähnlich hoher mittlerer Anzahl vor.

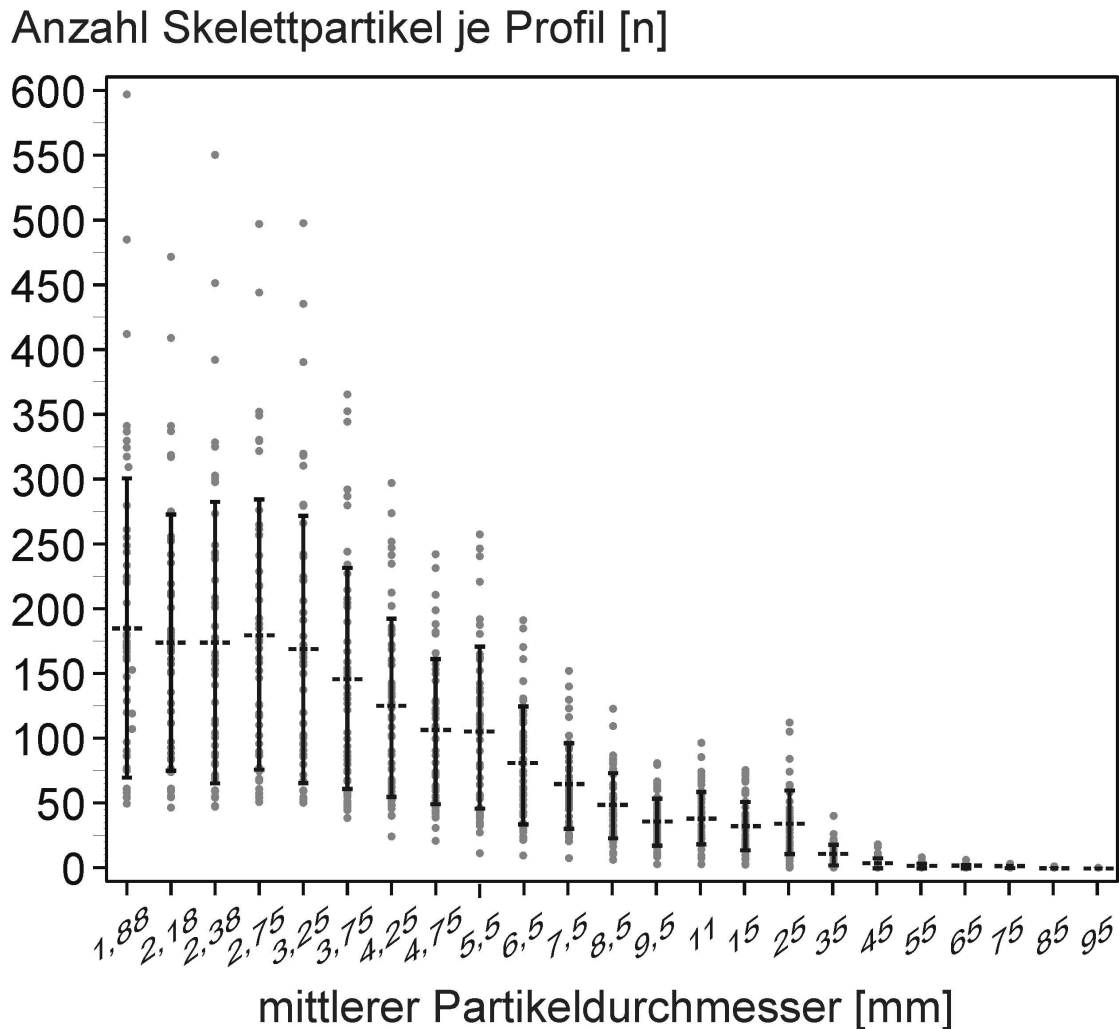


Abb. 24: Durchmesserverteilung des Skeletts aller Standorte, n=61, gestrichelte Linie= Mittelwert.

Für Abbildung 25 wurden die Skelettkörner in vier Durchmesserklassen eingeteilt (mittlerer Ø: 2-3,25 mm, mittlerer Ø: 3,75-6,5 mm, mittlerer Ø: 7,5-25 mm, mittlerer Ø: 35-95 mm) und als prozentualen Anteil an der Gesamtmenge abgetragen.

Es ist zu erkennen, dass die Standardabweichung der gebildeten Klassen stets sehr gering ist.

Die Größenverteilung der vermessenen Skelettkörner über alle Standort hinweg ist also bei unterschiedlicher Gesamtkornzahlen sehr ähnlich.

Sie besteht mit über 90%iger Sicherheit zu 50 % aus Skelettpartikeln mit Durchmesser von 2-3 mm, zu 35,5 % aus Skelettpartikeln mit Durchmesser von 3-6 mm, zu 13 % aus Skelettpartikeln mit Durchmesser von 6 mm bis 2,5 cm und zu 1,5 % aus Skelettpartikeln mit Durchmesser größer 2,5 cm.

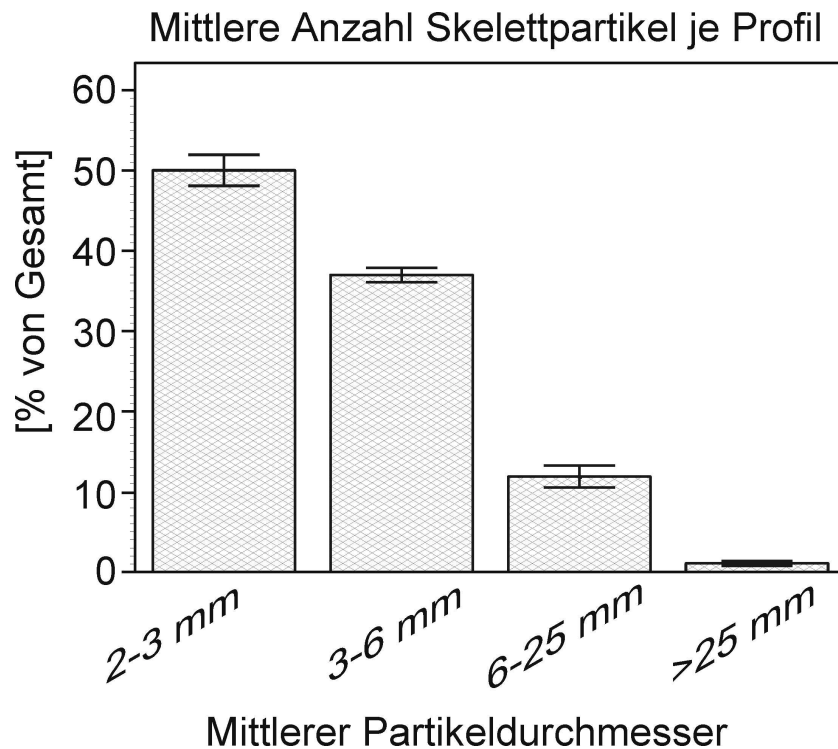


Abb. 25: Mittelwert und Standardabweichung des relativen Anteils der Anzahl der Skelettpartikel, unterteilt in 4 Durchmesserklassen, $n=61$.

3.2.1 Verteilung der Skelettpartikel im Bodenprofil

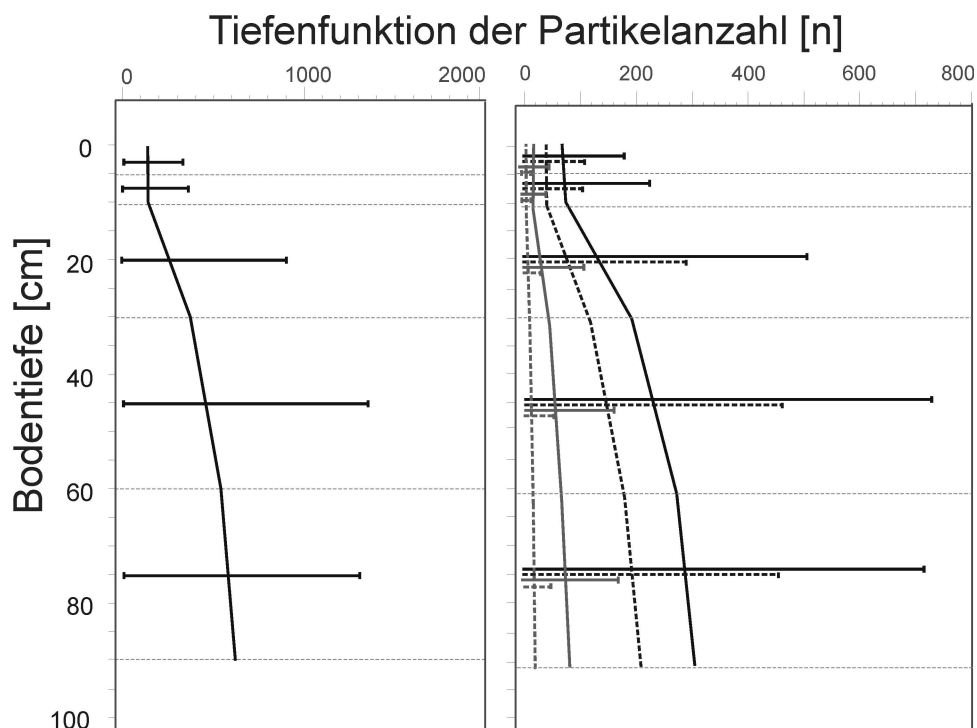


Abb. 26: Tiefenprofile von Mittelwert und Standardabweichung der Gesamtpartikelzahl aller Profile (links) und unterteilt in vier Durchmesserklassen (rechts: \emptyset 2-3,25 mm = durchgezogene schwarze Linie, \emptyset 3,75-6,5 mm = gestrichelte, schwarze Linie, \emptyset 7,5-25 mm = durchgezogene graue Linie, \emptyset 35-95 mm = gestrichelte, graue Linie; $n=61$).

Der in Abbildung 26 dargestellte Tiefenverlauf der Skelettpartikelanzahl zeigt, dass die Anzahl an Skelettkörnern mit zunehmender Bodentiefe ansteigt. Während in den Bodentiefen 0-5 cm und 5-10 cm jeweils 15,1% der Gesamtpartikelmenge eines Profils auftreten (ähnlicher Mittelwert und ähnliche Standardabweichung, steigt die relative Partikelanzahl in der Bodentiefe 10-30 auf 20,6% an. In der Bodentiefe 30-60 cm sind durchschnittlich 29,9% anzutreffen, in der Bodentiefe 60-90 cm ist der relative Anteil mit 34,4% der Gesamtpartikelanzahl eines Profils am höchsten, wobei die Abweichungen vom Mittelwert zunehmen (linker Teil von Abbildung 26).

3.2.3 Verteilung der Skelettpartikel bei regionalem und lokalem Raster

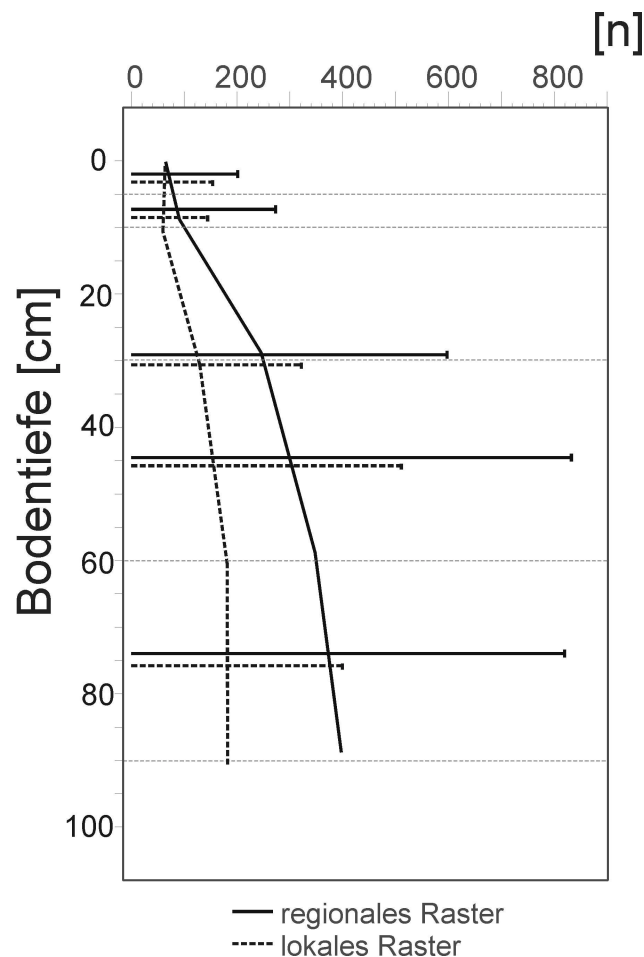


Abb. 27: Tiefenprofile von Mittelwert und Standardabw. der Gesamtkornzahlen aller Standorte, differenziert nach regionalem ($n=31$) und lokalem ($n=30$) Probenahmernetz.

Aus dem in Abbildung 27 dargestellten Vergleich der Partikelanzahlen im Tiefenverlauf zwischen den Profilen des regionalen und lokalen Rasters geht hervor, dass die Profile des lokalen Rasters im Durchschnitt skelettärmer sind. Außerdem ist die Standardabweichung

chung innerhalb des regionalen Rasternetzes größer. Letzteres bestätigt noch einmal die höhere Heterogenität der Ausgangsgesteine im Gebiet des regionalen Messnetzes. Im Bereich der obersten 10 cm ist der Unterschied zwischen der Gesamtpartikelanzahl von Standorten des regionalen und lokalen Rasters gering. Danach steigt die Standardabweichung beider Raster an. Während sich die durchschnittliche Gesamtmenge an Skelettkörnern des lokalen Rasters der Bodentiefen 30-60 cm und 60-90 cm nicht unterscheiden, nimmt die mittlere Kornzahl des regionalen Rasters mit zunehmender Bodentiefe stetig zu.

3.3 Charakterisierung des Kapillarovolumens der Bodensteine

Die relative Größe des Kapillarovolumens des Bodenskeletts wird durch den Wassergehalt der Bodensteine bei pF 4,6 repräsentiert. Als Referenz dienen die bei 105° C getrockneten Skelettproben. Dabei ist mit zunehmender Anlagerung des Wassers bei pF 4,6 von einer zunehmenden Ausdehnung innerer Oberflächen des Grobbodens auszugehen.

Eine Prüfung der an den Grobboden gebundenen Wassermenge bei pF 4,6 (Skelett des gesamten Profils, n=61) durch den Kolmogoroff-Smirnow-Test ergibt, dass die Werte nicht der Normalverteilung folgen. Der Wassergehalt des Grobbodens bei pF 4,6 der meisten Profile liegt im Bereich unterhalb des arithmetischen Mittelwerts.

Parameter	n	Min.	Percentile				Max.	Median
			15%	35%	65%	85%		
H ₂ O-Menge des Grobbodens bei pF 4,6 [mg/g TG]	61	14,30	19,54	26,72	38,29	51,24	164,37	33,41

Tab. 7: Häufigkeitsverteilung des am Grobboden gebundenen Wassers bei pF 4,6 der Gesamtprofile. Referenz: Trocknung bei 105°C.

3.3.1 Kapillarvolumenverteilung des Bodenskeletts im Tiefenverlauf

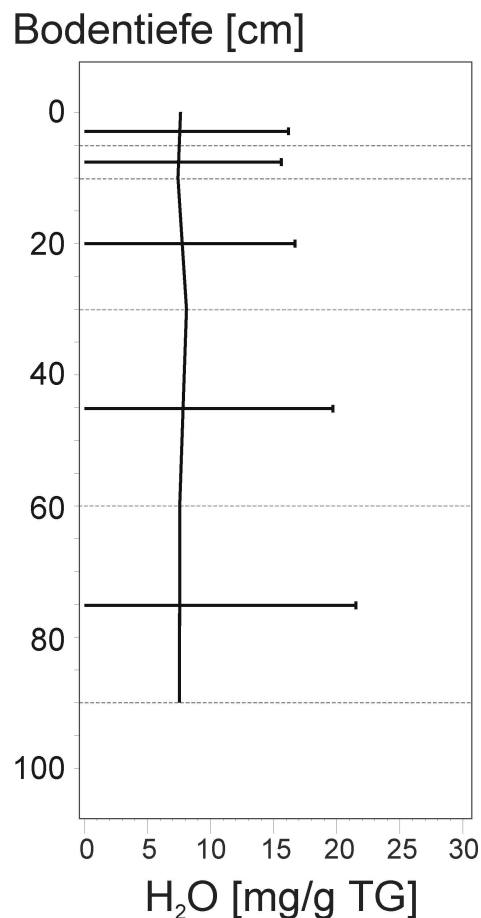


Abb. 28: Tiefenprofile von Mittelwert und Standardabweichung für die Wassergehalte des Skeletts bei pF 4,6 aller Standorte, n=61

Die Betrachtung des kapillaren Volumens des Grobbodens mit abnehmender Bodentiefe zeigt, dass in den Tiefenstufe 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm fast identische Mittelwerte und Standardabweichungen auftreten. In den Bodentiefen 30-60 cm und 60-90 cm steigt die Streuung geringfügig an, während sich der Mittelwert auf nahezu identischen Niveau befindet. Offensichtlich sind die (Entwicklungs-)Bedingungen zur Ausbildung einer inneren Kapillarität des Bodenskeletts weitestgehend unabhängig von der Bodentiefe.

3.3.2 Vergleich von regionalem und lokalem Raster

Für Abbildung 29 werden die Tiefenprofile der Wasserdampfadsorption des Bodenskeletts von regionalem und lokalem Raster gegenübergestellt.

Außer in der Bodentiefe 0-5 cm sind die Mittelwerte der Wasserdampfadsorption des regionalen Raster stets höher als die des lokalen Raster.

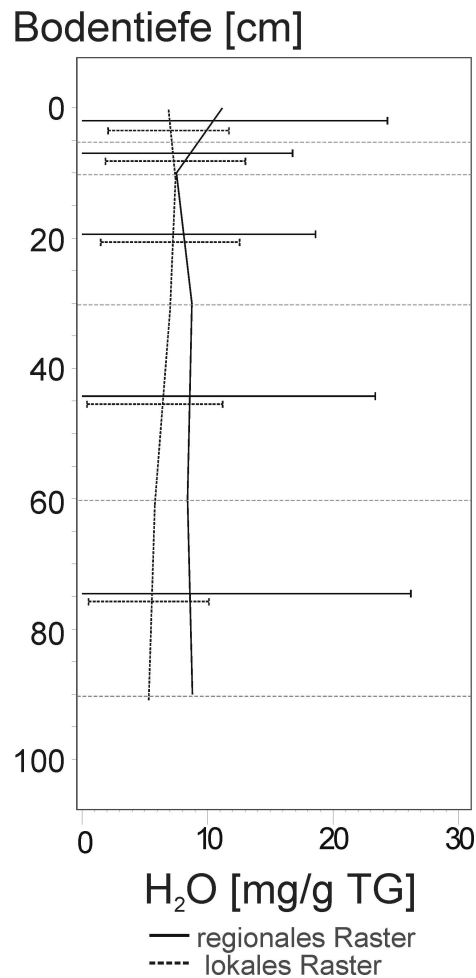


Abb. 29: Tiefenprofile von Mittelwert und Standardabweichung für die Wassergehalte des Skeletts bei pF 4,6, differenziert nach regionalem (n=31) und lokalem (n=30) Probenetz.

Die Abweichung vom Mittelwert des lokalen Netzes liegt über das ganze Profil hinweg auf sehr ähnlichem, niedrigem Niveau. Die Abweichung vom Mittelwert innerhalb des regionalen Rasters ist für alle untersuchten Bodentiefen größer als beim lokalen Probenetz. Die Standardabweichung des regionalen Netzes nimmt ab der Bodentiefe von 5 cm mit der Tiefe zu. Dies bestätigt wiederum die höhere Variabilität der Skelettfraktion im regionalen Messnetz.

3.4 Mineralogische und röntgendiffraktometrische Untersuchungen

Von elf ausgewählten BZE-Standorten (laut geologischer Karte 5x dunkle Gneise, z.T. als Hangschutt, 3x Granite/helle Gneise, z.T. als Hangschutt, 1x Sandstein, 1x feinlehmbeeinflusster Buntsandstein, 1x Moräne, GEOLOGISCHES LANDESAMT 1990) im Südschwarzwald wurden Gesteinsproben aus den Tiefenstufen 10-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm gewonnen und deren Mineralbestand durch Röntgenbeugung bestimmt. Dabei war darauf zu achten das Untersuchungsmaterial nicht bei 105 °C zu trocknen, um die Struktur von hitzeempfindlichen Tonmineralen wie Vermiculiten zu erhalten. Die relativen Mineralanteile der Proben sind im Anhang aufgeführt (Anhang III).

Die beiden Standorte mit Ausgangsgestein ‚feinlehmbeeinflusster Buntsandstein‘ und ‚Sandstein‘ enthalten Quarz, Illit und Kaolinit. Das Alumosilikat Kaolinit entsteht bevorzugt unter tropischem bis subtropischem, warmhumidem Klima (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2002). Dies kann als Hinweis dafür gewertet werden, dass diese Substrate bereits seit dem Tertiär der Verwitterung unterliegen.

Die Mineralzusammensetzung der neun Standorte mit Ausgangsgestein ‚Granit/heller Gneis‘, ‚dunkler Gneis‘ und ‚Moräne‘ ist heterogener als die der Standorte auf Sandstein und Feinlehm. Alle neun Proben enthalten Quarz, Feldspat und Plagioklas, teilweise als reiner Plagioklas oder als Plagioklas/Orthoklas-Mischung. Weitere Komponenten sind Glimmer und Tonminerale, die röntgendiffraktometrisch nur sehr schwer differenziert werden konnten. Hierzu zählen Muscovit, Sericit und Illit. Diese Minerale unterscheiden sich im wesentlichen in ihrer Korngröße und sind Kalium-Lieferanten (NEWMANN 1987). Als weiteres primäres Mineral ist bei allen Vertretern der Gruppe das Schichtsilikat Chlorit nachweisbar, wobei die Chlorit-Gehalte der Einzel-Standorte mit Ausgangsgestein ‚dunkler Gneis‘ stark variieren. Chlorit verwittert zu Vermiculit und gibt dabei Fe^{2+} und Mg^{2+} in die Bodenlösung ab (BARNHISEL & BERTSCH 1989). Darüber hinaus konnte in den neun Proben Biotit identifiziert werden, der wie Chlorit Fe^{2+} und Mg^{2+} freisetzt und ähnlich schnell zu Vermiculit verwittert (NEWMANN 1987). Amphibole, Pyroxene oder Cordierit wurden in den Proben nicht nachgewiesen. Alle bisher identifizierten Minerale – bis auf Chlorit - sind typische Bestandteile von jungen unverwitterten Graniten und Gneisen. Unterliegen diese Substrate jedoch einer auch nur minimalen Metamorphose, so kann bei der Verwitterung innerhalb geologischer Zeiträume ebenfalls das Schichtsilikat Chlorit entstehen (BARNHISEL & BERTSCH 1989).

Bei acht der neun Standorte der Ausgangsgesteine ‚Granit/heller Gneis‘, dunkler Gneis‘ und ‚Moräne‘ wurde darüber hinaus Kaolinit festgestellt. CRITELLI et al. (1991) und MONGELLI et al. (1998) wiesen für Gneis-Standorte in Kalabrien (Süditalien) nach, dass bei den dort herrschenden Bedingungen der Verwitterung aus Gneis auch Kaolinit entsteht. Sie schließen daraus, dass die Verwitterungsprodukte aus einer länger zurückliegenden Periode stammen müssen. Sie nehmen an, dass sie aus dem Pleistozän oder älter sind. Eine genaue Datierung ist nicht möglich, da Kaolinit unter einer Vielzahl von klimatischen Bedingungen entsteht (GERRARD 1994, HARRIS & ADAMS 1966). Diese Ergebnisse zeigen, dass alle in der vorliegenden Arbeit untersuchten Substrate schon seit dem Tertiär der Verwitterung ausgesetzt sein könnten.

In sechs der neun Proben sind anteilig Vermiculite im Mineralbestand nachgewiesen worden. Dabei war das Ausgangsgestein bei drei Proben ‚dunkler Gneis‘, bei zwei Proben ‚Granit/heller Gneis‘ und bei einer Probe ‚Moräne‘. Vermiculit entsteht durch rezente Verwitterung sowohl aus Illiten als auch aus Chloriten. Bei den Illiten verläuft die Verwitterung unter K-Freisetzung über das Wechsellagenmineral Illit/Vermiculit. Bei den Chloriten ist die Weiterentwicklung von der Fe-Belegung abhängig. Chlorit verwittert deshalb über das Wechsellagenmineral Chlorit/Vermiculit zu Vermiculit oder Vermiculit entsteht direkt aus Chlorit (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2002). Ob der Vermiculit der vorliegenden Proben aus Illiten oder Chloriten oder beiden Mineralen entstanden ist, konnte nicht festgestellt werden. In sechs der neun Proben kommt Vermiculit in Wechsellagen gemeinsam mit Chlorit vor. Dabei ist eine Probe dem Ausgangsgestein ‚Granit/heller Gneis‘ zuzuordnen. Alle anderen Proben entstammen ‚dunklem Gneis‘. Treten im Skelett Vermiculitanteile auf (auch als Wechsellagenmineral), ist von einer rezente Verwitterung und damit einhergehender Freisetzung basischer Kationen aus dem Skelett auszugehen (KOHLER 2001, NEWMANN 1987).

In einer der sechs vermiculithaltigen Gesteinsproben wurde röntgendiffraktometrisch auch Smectit identifiziert. Smectit repräsentiert ein weiteres Verwitterungsstadium als Vermiculit und kommt daher eigentlich nur im Feinboden und nicht im Grobboden vor. Die smectithaltige Skelettprobe enthält als einzige auch Al-Vermiculit. Die Bildung von Al-Vermiculit erfolgt durch die Einlagerung von Al-Hydroxo-Verbindungen in die Zwischenschichten von Vermiculit bei einem pH-Wert des Bodens im Bereich von 4-5 (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2002). Sinkt der pH-Wert unter 4, wird Al aus den Zwischenschichten des Minerals wieder herausgelöst und es entsteht sogenannter de-Al-

chloritisiertes Al-Vermiculit, welcher eine ähnlich niedrige Schichtladung besitzt wie Smectit (schriftl. Mitteilung Dr. BUTZ-BRAUN). Es ist deshalb auch möglich, dass es sich bei dem in dieser Probe identifizierten Smectit um de-Al-chloritisiertes Al-Vermiculit mit sehr niedriger Schichtladung handelt.

Die Unterscheidung der Ausgangsgesteine anhand ihrer Mineralzusammensetzung ist aufgrund der vorgestellten Befunde nicht möglich. Eine Differenzierung der Gesteine in ‚dunkler Gneis‘ und ‚heller Gneis/Granit‘ war mit Röntgendiffraktometrie nicht nachweisbar. Auch eine statistische Prüfung der Gesteinsmerkmale ‚Farbe‘, ‚Gehalt an dunklen Mineralien‘, und ‚okular bestimmbarer Grad der Verwitterung‘ aller Standorte lässt nicht auf einen Zusammenhang zwischen den dokumentierten Nährelementpotenzialen des Grobbodens und den unterschiedenen Ausgangsgesteinen ‚dunkler Gneis‘ und ‚heller Gneis/Granit‘ schließen. Die skelettbürtige Austauschkapazität von Standorten auf Granit und hellem Gneis lässt sich nicht deutlich unterscheiden von Standorten auf dunklem Gneis (Abbildung 30).

Beitrag des Skeletts zur Gesamtsumme austauschbar gebundener M_b -Ionen ($\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$, $n=61$)

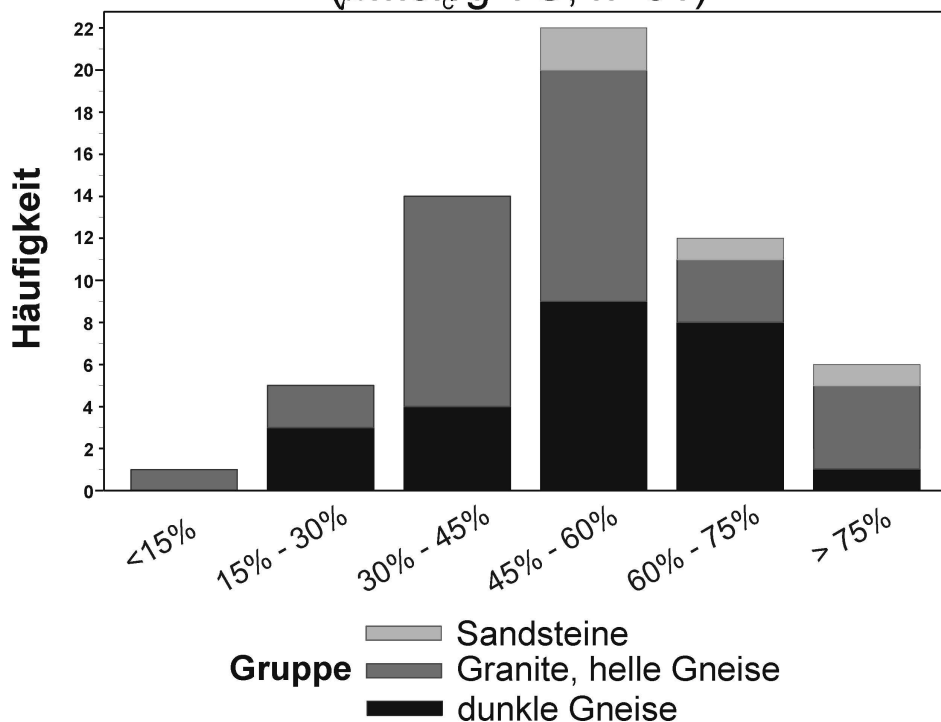


Abb. 30: Beitrag des Skeletts zur effektiv austauschbaren M_b -Gesamtmenge, gruppiert nach den beprobten Ausgangsgesteinen, $n=61$.

Damit muss jedoch die Ausgangshypothese eines signifikanten Einflusses der Mineralzusammensetzung im Untersuchungsgebiet auf das kurz- und mittelfristig austauschbare skelettbürtige Nährelementpotenzial verworfen werden. Mittels okular bestimmbarer Gesteinseigenschaften wie der Farbe, dem Anteil an dunklen Mineralien oder dem Verwitterungsgrad sowie anhand der röntgendiffraktometrischen Untersuchungen kann die Menge und Zusammensetzung austauschbarer Ionen von Steinen des Südschwarzwaldes nicht vorhergesagt werden.

Es ist wahrscheinlich, dass tektonische, pneumatologische und hydrothermale Prozesse im Laufe der Erdgeschichte zu Mineralumwandlungen im Untersuchungsgebiet geführt haben, welche die Mineralzusammensetzung des Bodenskeletts veränderten. So ist der Südschwarzwald z.B. von zahlreichen tektonischen Bruchlinien durchzogen, was dazu führt, dass Gesteine sehr unterschiedlicher Entstehungsgeschichte (z.B. anatektische oder diatektische Überformung) unmittelbar nebeneinander vorkommen können (MÄCKEL et al. 1992). Eine Unterscheidung der untersuchten Substrate nach dem geologischen Ausgangsmaterial ist nicht möglich.

4 Räumliche Muster der Austauschereigenschaften der Skelettfraktion

Ziel einer räumlichen Darstellung des Ernährungspotenzials der Skelettfraktion im Südschwarzwald ist es zum einen, den aktuellen Beitrag des Skeletts zum Nährstoffkreislauf von Waldböden der Region zu ermitteln, und zum anderen, Zusammenhänge zu finden, bei denen die KAK_{eff} der Skelettfraktion mit einfach zu bestimmenden Standortparametern gekoppelt ist. Die aufgrund der Datenbasis ermittelten Beziehungen (z.B. zwischen Ca^{2+} oder Mg^{2+} des Feinbodens und der KAK_{eff} des Skeletts) können zur Prognose skelettbürtiger Nährelementpotenziale herangezogen werden, um zukünftig für nicht beprobte Orte des Südschwarzwaldes die skelettbürtigen Nährelementpotenziale auf einfache Weise vorherzusagen. Der Übergang vom Punkt zur Fläche soll mittels belastbarer, kausalanalytisch fundierter stochastischer Pedo-Transferfunktionen durchgeführt werden. Ein hierfür entwickeltes multiples lineares Regressionsmodell (FAHRMEIER 2003, SCHÖNWIESE 2000) ermöglicht es darüber hinaus, die 'skelettkorrigierte' Kationenaustauschkapazität von Waldböden im Südschwarzwald anderen bodenchemischen Prognosemodellen zugänglich zu machen.

4.1 Quantifizierung des skelettbürtigen Ernährungspotentials

In Abbildung 31 ist der prozentuale Anteil von Skelett- und Feinerdefraktion am effektiv austauschbaren Gesamtionenvorrat in kg/ha (gesamte Kreisfläche = Summe aus feinboden- und skelettbürtigem Calcium) für jedes beprobte Profil dargestellt. In gleicher Weise wird bei Abbildung 32 für Magnesium und Abbildung 33 für die KAK_{eff} verfahren.

Die Kennzeichnung der Gruppe Granite, Gneise und Paragneise ist eine dem Standort unterlegte dunkelgraue Kreisfläche. Feinlehmbeeinflusste Buntsandstein-Standorte sind in den Abbildungen als umrandete Sechsecke gekennzeichnet. Diese Profilgruppe weist die höchsten Vorräte skelettbürtiger Nährelemente und die breiteste Streuung zwischen den betrachteten Standorten auf. Es wurden dort keine Kalkungen vorgenommen.

Die Abbildungen 31, 32 und 33 verdeutlichen, dass das Bodenskelett im Falle von Ca und Mg einen erheblichen Beitrag zum Nährstoffhaushalt von Waldböden im Südschwarzwald liefert. Im Bereich des lokalen Netzes, das durch ein sehr niedriges Niveau der Nährstoffausstattung des Feinbodens gekennzeichnet ist, umfasst der skelettbürtige Ca-Anteil an der Gesamtaustauschkapazität eines ungekalkten Standortes häufig mehr als 50 %.

Abb. 31:

Abb. 32:

Abb. 33:

4.2 Regionalisierung des skelettbürtigen Ernährungspotenzials

Bei Messdaten von Punkterastern sind die Werte von Messpunkten geringerer räumlicher Distanz oft ähnlicher als solche von Messpunkten großer Distanz (=räumliche Autokorrelation). Die Steuerung der Variabilität relevanter Prozessfaktoren durch die Anordnung im Raum wird im Rahmen geostatistischer Untersuchungen angewandt und zur Regionalisierung genutzt (Semi-Variogramme, Kriging; z.B. JANSEN 2002, FOHRER et al. 1999, HEINRICH 1994, WEBSTER 1985). Die bisherigen Auswertungen verdeutlichen, dass klassische Verfahren der Punkt-/Raum-Statistik zur Regionalisierung von Punktinformationen des Grobbodens wenig aussichtsreich sind. Die Heterogenität der bodenbildenden Gesteine im Südschwarzwald ist sehr hoch. Bei Rasterweiten im Kilometerbereich können daher räumliche Autokorrelationen nährstoffrelevanter skelettbürtiger Eigenschaften unterschiedlicher Ausgangsgesteine nicht mit der notwendigen Präzision differenziert werden. Ein weiteres geowissenschaftliches Problem besteht darin, dass im Beziehungsgefüge eines Waldbodens Abhängigkeiten zwischen einer Vielzahl nicht exakt erfassbarer Einflussgrößen der Prozessdynamik bestehen, die sich teilweise überlagern oder in Beziehung zueinander treten. Dies führt zu Abhängigkeiten innerhalb von Stichprobenkollektiven. Deshalb sollten Messdaten nur dann zueinander in Beziehung gesetzt werden, wenn ein kausalanalytischer Zusammenhang besteht (SCHÖNWIESE 2001, BACKHAUS 2000, BECHER, 1999). Die Untersuchungsergebnisse werden daher über einen regressionsanalytischen Ansatz regionalisiert, d.h. mit Hilfe von belastbaren, kausalanalytisch fundierten stochastischen Pedo-Transferfunktionen.

In einem ersten Schritt wird für die Parametergruppen ‚alle Standorte‘ und ‚ungekalkte Standorte kristalliner Ausgangsgesteine‘ eine Regressionsanalyse durchgeführt, um die Standorteigenschaften mit einer straffen Beziehungen zur Kationenaustauschkapazität des Skeletts zu erfassen. Mit diesem Arbeitsschritt soll darüber hinaus geprüft werden, inwiefern sich Unterschiede zwischen den beiden oben genannten Kollektiven feststellen lassen. Im Anschluss daran wird ein lineares Regressionsmodell erstellt.

4.2.1 Regressionsanalyse des Datenmaterials

Eine Korrelationsanalyse der Daten ergibt, dass zwischen der Wasserdampfadsorption des Bodenskeletts und der KAK_{eff} des Grobbodens sowie zwischen den Austau-

schereigenschaften von Fein- und Grobboden statistische Beziehungen bestehen, die auch sachlogisch plausibel erscheinen. Diese werden im folgenden genauer vorgestellt.

4.2.1.1 Zusammenhang zwischen Wasserdampfadsorption und KAK_{eff} des Grobbodens

Die Beziehung zwischen der Ausdehnung innerer Oberflächen (Wassergehalt pro g TG) und dem Gehalt an effektiv austauschbaren Kationen pro g TG des Grobbodens eines Profils ist straff ($n=61$, $r^2= 0,69$). In Abbildung 34 werden nur Standorte ohne Kalkung betrachtet ($n=39$). Das Bestimmtheitsmaß steigt auf $r^2= 0,80$.

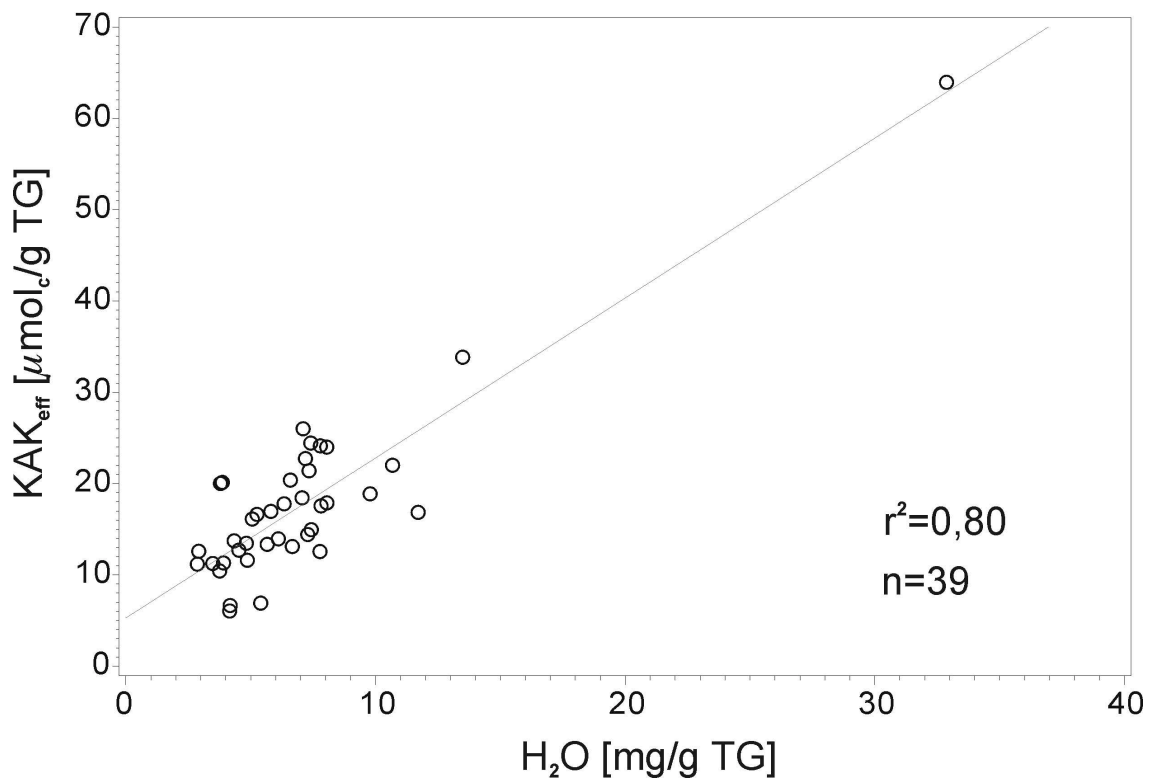


Abb. 34: Beziehung zwischen effektiv austauschbaren skelettbürtigen Kationen und der Wasserdampfadsorption der Skelettpartikel aller Standorte ohne Kalkung.

Die gekalkten Profile verzerren offenbar den Bezug zwischen den einbezogenen Parametern. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Probenmaterial trotz der Ultraschallreinigung nicht völlig frei von organischem Material war. Bei 47 von 61 Probepunkten wiesen die äußeren Oberflächen des Skeletts Feinwurzeln und/oder Rhizomorphen auf, welche die Tendenz zeigen, in Hohlräume der Steine einzuwachsen. (Abbildung 35). Dieses organische Material, das an der Skelettkornoberfläche gebunden ist, besitzt ebenfalls eine Kationenaustauschkapazität. Kalkungen verändern die Menge

und das Verteilungsmuster von Feinwurzeln und Pilz-Hyphen in Waldböden (Schack-Kirchner et al. 2000). Wurden die beprobten Standorte einer Kalkung unterzogen, so können Änderungen der Mengen anhaftender Feinwurzeln und/oder Rhizomorphen zu einer kalkungsbedingten Verzerrung der Austauschereigenschaften von Skelettpartikeln führen.

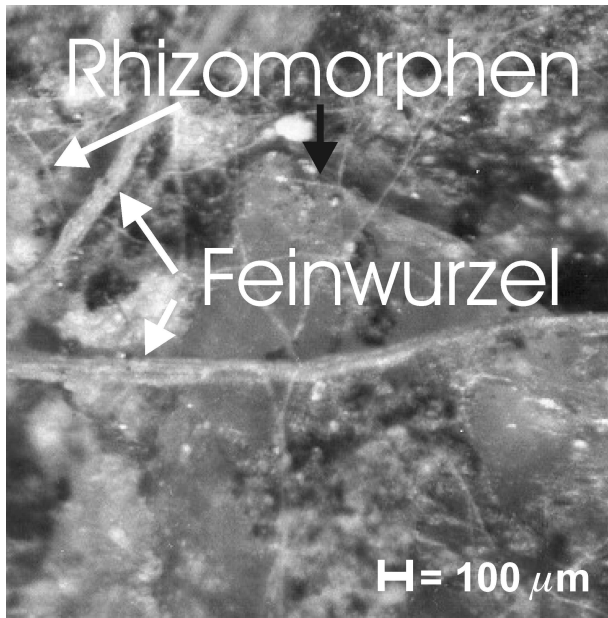


Abb. 35: 30fache Vergrößerung der Oberfläche eines Skelettpartikels der Größe 3 x 1 cm des BZE-Rasterpunktes St. Blasien (Tiefe 30-60 cm). Unter dem Mikroskop sind trotz Ultraschallreinigung Wurzeln und Rhizomorphen zu erkennen, welche die Tendenz zeigen, in Hohlräume der Steine einzuwachsen.

Um den Einfluss einer Kalkung auf die Grundgesamtheit näher quantifizieren zu können, müsste die Anzahl anthropogen veränderter Profile ($n=20$) größer sein. Bei der Entwicklung einer Pedo-Transfer-Funktion im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden deshalb Standorte, die in der Vergangenheit einer Kalkung unterzogen wurden ausgeschlossen.

Werden nur die ungekalkten Standorte kristalliner Ausgangsgesteine in die Regression einbezogen (Abbildung 36), beträgt die Anpassung der Daten an die Ausgleichsfunktion immer noch 45%.

Anhand der Untersuchungen wird deutlich, dass die wassererreichbaren Oberflächen des Grobbodens eine wichtige Einflussgröße für die Vorhersage der Menge skelettbürtiger kurz- und mittelfristig gespeicherten Kationen darstellen. Diese Kenngröße kann in Analogie zu den Tonmineralen oder Huminstoffen im Feinboden (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2002) als Adsorbent für die kurz- und mittelfristig verfügbare skelettbürtige Menge an Kationen eines Bodens interpoliert werden.

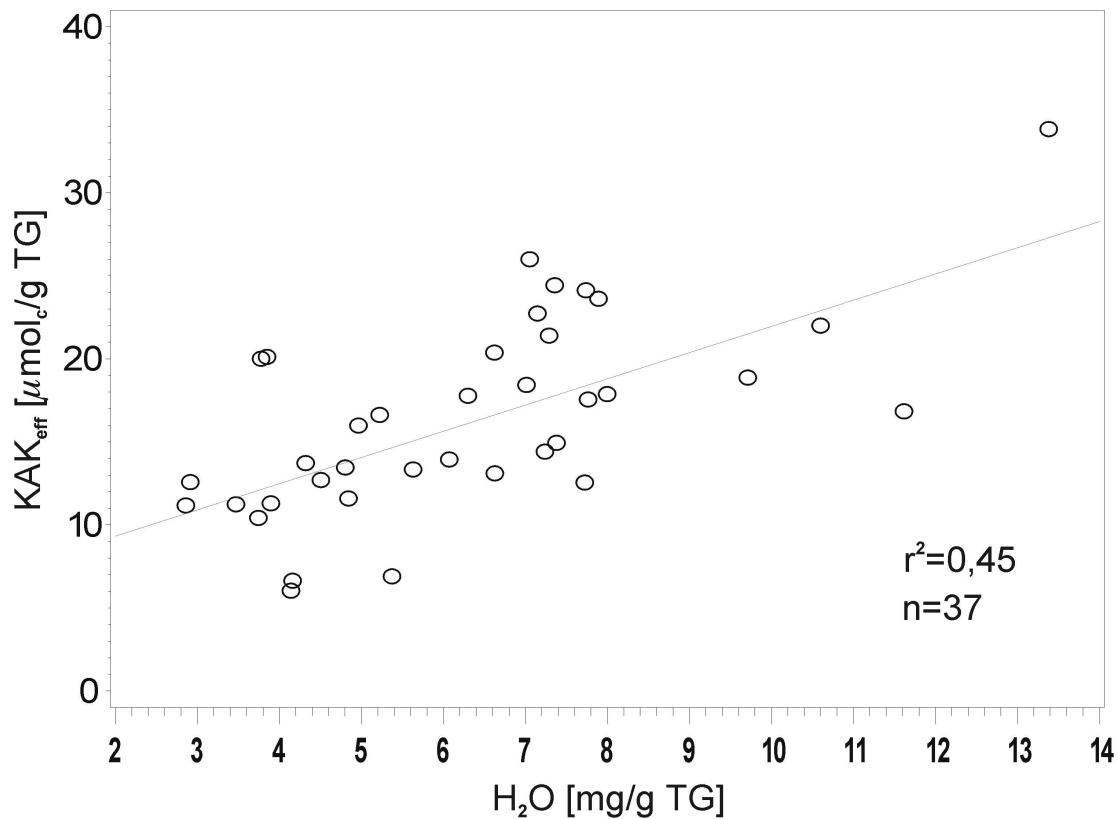


Abb. 36: Beziehung zwischen effektiv austauschbaren skelettbürtigen Kationen und der Wasserdampfadsorption der Skelettpartikel ungekalkter, kristalliner Standorte.

Bemerkenswert ist, dass sich die Bestimmtheit der Beziehung zwischen Wasserdampfadsorption und KAK_{eff} des Grobbodens unter Einbeziehung aller Bodenausgangsgesteine verbessert gegenüber der alleinigen Betrachtung der kristallinen Standorte. Die Größe und Art der Ausdehnung von Oberflächen, welche als Austauschfläche für effektiv austauschbare Ionen fungieren, scheint durch die Eigenschaft des Ausgangsgesteins nur in geringem Maße beeinflusst zu werden.

4.2.1.2 Beziehung zwischen Austauschereigenschaften von Fein- und Grobboden

Ein Vergleich der KAK_{eff} von Feinboden- und Skelettfraction derselben Standorte lässt nicht auf eine wechselseitige Abhängigkeit schließen, wenn alle Rasterpunkte berücksichtigt werden (Bestimmtheitsmaß $r^2 < 0,1$; $n=61$).

Werden nur Probepunkte kristalliner Standorte ohne Kalkung berücksichtigt, ist ein Zusammenhang zwischen den austauschbaren M_b -Kationen der Feinboden- und Skelettfraction zu erkennen (Abbildung 37).

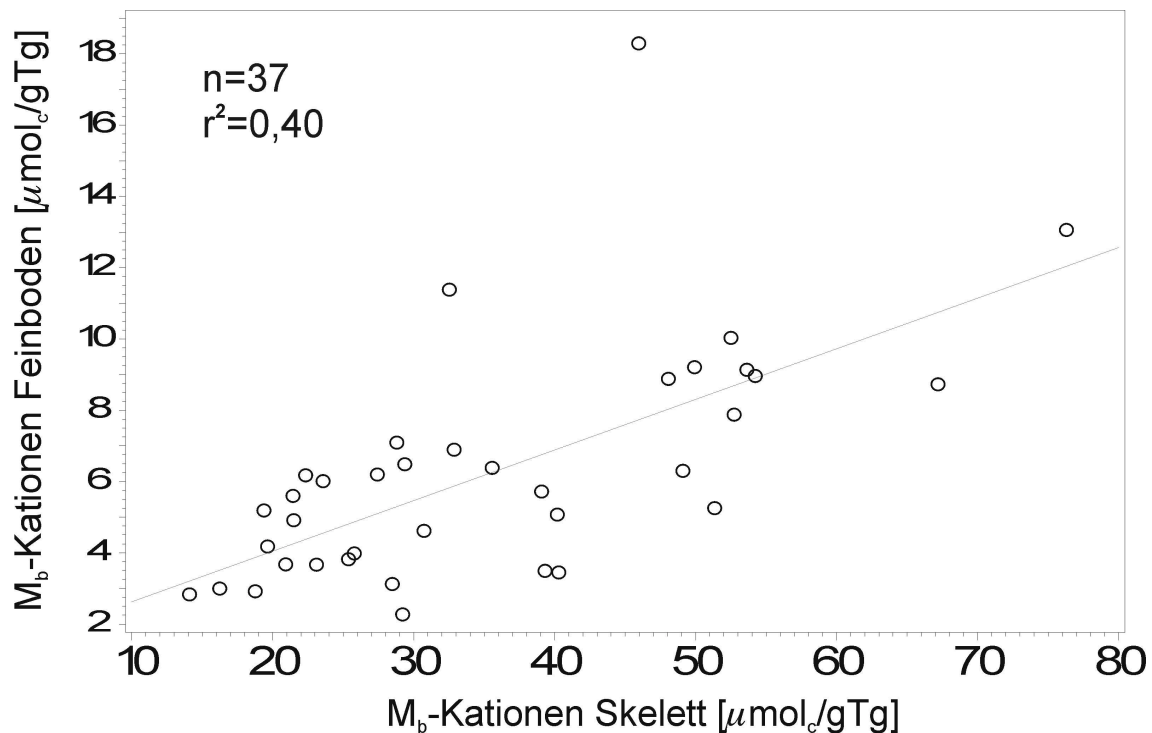


Abb. 37: Gegenüberstellung der austauschbaren M_b -Kationen von Feinboden und Skelett ungekalkter Standorte kristalliner Ausgangsgesteine.

Die Regression der austauschbaren M_a -Kationen von Skelett- und Feinbodenfraktion zeigt bei der Betrachtung der Parametergruppe ‚kristalline Standorte ohne Kalkung‘ keine wechselseitigen Abhängigkeiten (r^2 jeweils $< 0,15$).

In Abbildung 38 werden die M_b - und M_a -Kationen zwischen Skelett- und Feinbodenfraktion ungekalkter Standorte des lokalen Netzes mit niedrigem Austauschniveau ($sKAK < 10 \mu\text{mol}_c/\text{g TG}$ ab 30 cm Bodentiefe, vgl. Tabelle 6) verglichen. Bei dieser Parametergruppe kann für basische und saure Kationen eine Beziehung zwischen den Korngrößenfraktionen festgestellt werden ($n=15$, $r^2=0,43$).

Die Beobachtungen deuten darauf hin, dass zwischen den feinboden- und skelettbürtigen Elementpotenzialen eines Waldbodens Interaktionen bestehen. Die lockeren stochastischen Beziehungen können als Hinweis dafür gewertet werden, dass beide Ionenpools von ähnlichen Standortfaktoren, wie z.B. dem Umfang der Versauerung beeinflusst werden. Möglicherweise ist der Versauerungsprozess der Austauscheroberfläche der Skelettfraction jedoch zeitlich verzögert gegenüber dem Versauerungsprozess der Austauscheroberflächen im Feinboden. Das könnte z.B. dann der Fall sein, wenn es nur relativ wenige Diffusionsbrücken zwischen Austauscheroberflächen von Skelett und Feinboden gibt.

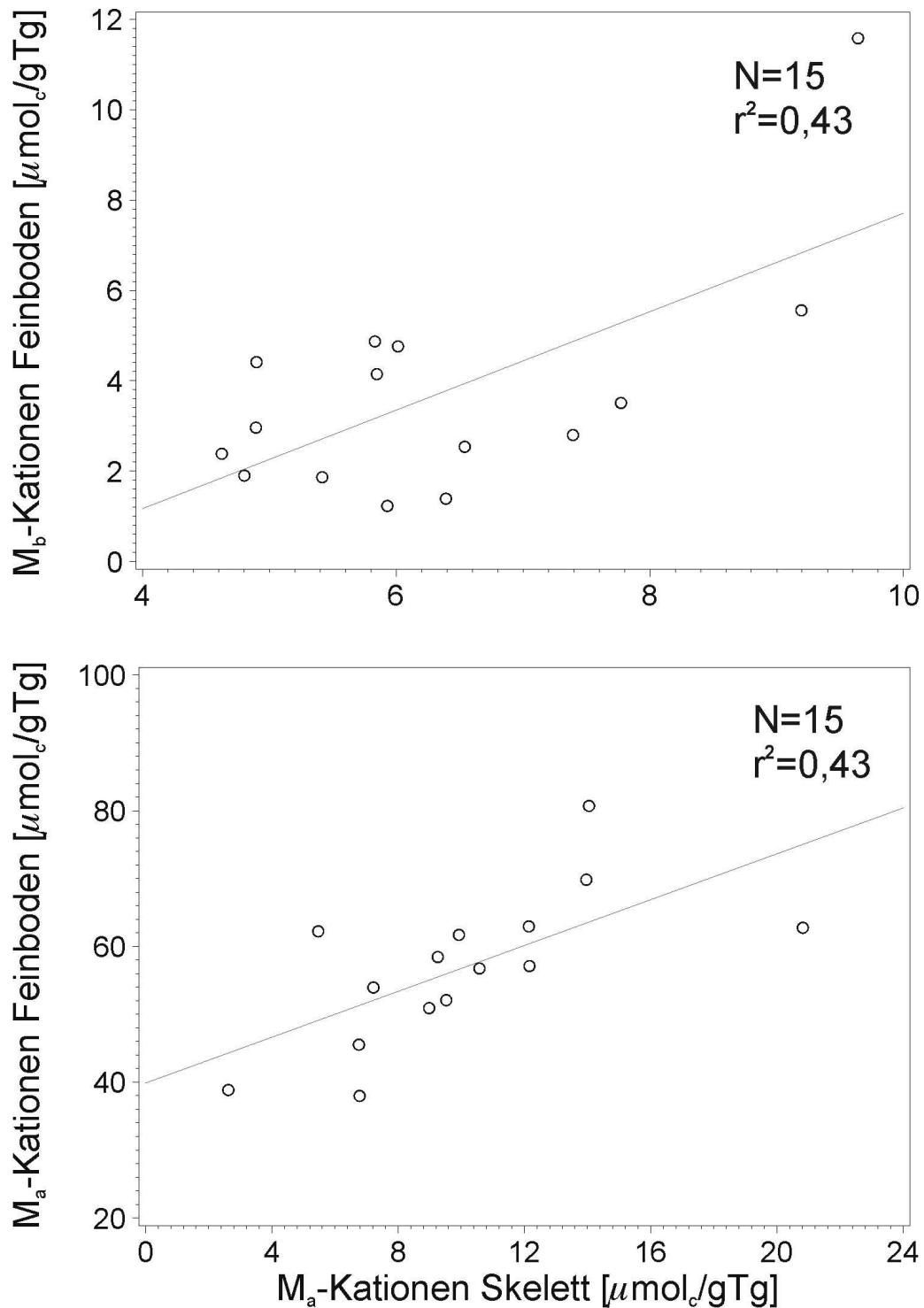


Abb. 38: Vergleich der Gehalte austauschbarer M_b- und M_a-Kationen von Feinboden und Skelett der ungekalkten, kristallinen Standorte mit weniger als 10 $\mu\text{mol}_c/\text{g}$ TG M_b-Ionen in der Skelettfraction ab einer Bodentiefe von 30 cm.

In diesem Zusammenhang ist eine Auswertung der Summenhäufigkeitsverteilung des Aziditätsgrades (Anteil der austauschbar gebundenen sauren Kationen an der Kationensumme) der Bodenlösung von 69 bundesdeutschen Monitoring-Standorten sehr auf-

schlussreich (KÖLLING & v. WILPERT 2000). Sie zeigt, dass auch in extrem sauren Bodenlösungen immer noch ein Restbestand an M_b -Kationen enthalten ist. In den Austauscherlösungen war der ermittelte Anteil saurer Kationen stets kleiner 80%. Die verbleibenden sog. ‚vagabundierenden‘ Restbestände an M_b -Kationen der Bodenlösung entsprechen in der Größenordnung den atmosphärischen M_b -Kationeneinträgen und/oder speisen sich aus Mineralisierungs- und Auflösungsprozessen im Boden. Im Zusammenhang mit den hier vorgestellten Ergebnissen ist diese Untersuchung deshalb interessant, weil die Gehalte austauschbar gebundener M_b -Kationen von Skelett und Feinerde der sehr sauren Standorte des lokalen Rasters nahezu identisch sind. (Abbildung 38 oben). Für die ökochemisch aktiven Oberflächen von Feinboden und Grobboden stark versauerter Standorte im Raum Todmoos/Todtnau scheint eine Nivellierung der Kationenbindung auf dem Niveau ‚vagabundierender‘ M_b -Kationen-Restbestände der Bodenlösung schon eingetreten zu sein, während andere Standorte des lokalen und regionalen Rasters diesen Zustand der Versauerungsgeschichte noch nicht erreicht haben. Das könnte eine Erklärung dafür sein, dass die Beziehung zwischen Kationenbeständen von Fein- und Grobboden der am stärksten versauerten Waldstandorte des Untersuchungsgebietes (Abbildung 38) eine bessere Korrelation aufweist gegenüber der Betrachtung aller kristallinen Standorte (Abbildung 37).

4.2.2 Entwicklung einer Pedo-Transferfunktion zur Prognose der KAK_{eff} von Waldböden im kristallinen Südschwarzwald

Aufgrund der ermittelten Zusammenhänge wird unter Einbezug standörtlicher Prädiktoren ein multiples lineares Regressionsmodell zur Prognose des Nährelementpotenzials der Skelettfraktion erstellt. Die Qualität eines Modells bemisst sich vor allem nach dem Anteil an erklärter Varianz (SCHUEMER et al. 1990). Zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen den Zielvariablen und den metrischen Prädiktoren wurde die multiple Regressionsanalyse nach der Methode der kleinsten Quadrate gewählt (Prozedur REG; RSQUARE-Verfahren, SAS INSTITUTE 1990). Zur Vermeidung allzu großer Probleme durch Interaktionen zwischen den Regressoren und zur Sicherstellung eines übersichtlichen und interpretierbaren, möglichst einfachen Modells wurde die Zahl der verwendeten Variablen gering gehalten. Es wurden ausschließlich solche Variablen im Zuge der multiplen linearen Regression in das Modell aufgenommen, die das Bestimmtheitsmaß um mindestens 5% erhöhen konnten und zumindest nominell auf dem 1 %- Niveau signifikant waren.

Es werden folgende Untersuchungsergebnisse berücksichtigt:

- Zusammenhang zwischen Wasserdampfadsorption, der KAK_{eff} des Grobbodens und anderen, allgemein verfügbaren Standorteigenschaften
- Zusammenhang zwischen der Sättigung austauschbarer M_b -Ionen von Fein- und Grobboden.

Um die skelettbürtigen Nährelementmengen im Südschwarzwald mit diesen deterministischen, statistisch geprüften Beziehungen unter den Prädiktoren abzuleiten, wurde eine zweistufige Pedo-Transferfunktion erstellt:

- Schritt 1: Modellierung der sKAK [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$] aus den Merkmalen „Wasserdampfadsorption [$\text{mg}/\text{g TG}$]“ und „durchschnittlicher Jahresniederschlag [mm]“
- Schritt 2: Modellierung skelettbürtiger Mengen von austauschbarem Ca^{2+} und der Summe effektiv austauschbarer skelettbürtiger M_b -Ionen [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$] mit den Prädiktoren „modellierte sKAK [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]“ und „feinbodenbürtiger kurz- und mittelfristig austauschbarer Mg^{2+} -Gehalt [$\mu\text{mol}_c/\text{g TG}$]“.

Jedes Regressionsmodell kann durch Ausreißer beeinträchtigt werden (GRAF & ORTSEIFEN 1995). Eine Residuenanalyse und die D-Statistik von COOK (1979) wurden benutzt, um ‚auffällige‘ Beobachtungen (Werte zwischen zwei- und dreifacher Standardabweichung) und tatsächliche Ausreißer (Werte über der dreifachen Standardabweichung) zu identifizieren. Nur bei Schritt 2 der Modellentwicklung kamen tatsächliche Ausreißer (1 bzw. 2 Standorte des regionalen Rasters) vor. Die hohen Abweichungen konnten auf extreme Unterschiede in der Nährelementausstattung von Fein- und Grobboden zurückgeführt werden. Sie basieren vermutlich auf methodischen (Mess-)Fehlern bei der Perkolations.

Voraussetzung für die Entwicklung eines multiplen Regressionsmodells ist neben einer ausreichenden Größe des Stichprobenumfangs (lt. SCHÖNWIESE sollte n min. größer gleich 30 sein) eine Normalverteilung der Prädiktoren sowie des Regressanden (Varianzhomogenität). Werden alle Standorte berücksichtigt, ist diese Voraussetzung nicht erfüllt.

Eine Überprüfung anhand des Kolmogorov-Smirnov-Tests (FAHRMEIER 2003) ergibt, dass für den ersten Regressionsschritt das Kollektiv aller nichtgekalkten Ausgangsgesteine diese Bedingung erfüllt, während beim zweiten Regressionsschritt nur die nichtgekalkten, kristallinen Ausgangsgesteine in die Betrachtung miteinbezogen werden dürfen. Für die Berechnungen des Modells stehen deshalb für Regressionsschritt 1 alle ungekalkten Standorte zur Verfügung, bei welchen alle in das Modell einbezogene Parameter erhoben waren (37 Probepunkte). In Regressionsschritt 2 werden nur die ungekalkten Standorte kristalliner Ausgangsgesteine abzüglich der Ausreißer einbezogen (36 bzw. 35 Probepunkte).

4.2.2.1 Modellierung der sKAK

Die Modellierung der KAK_{eff} des Skeletts erreicht die beste Anpassung, wenn neben dem Parameter „Wasserdampfadsorption pro g TG“ das Merkmal „durchschnittlicher Jahresniederschlag“ als unabhängige standörtliche Variable in die Berechnungen eingeht. Das lineare Regressionsmodell erklärt dann 83% der beobachteten Varianz bei ausgezeichnetem F-Wert und Variationskoeffizient (Tabelle 8).

Dabei muss der Prädiktor „durchschnittlicher Jahresniederschlag“ als Stellvertreter für ein Faktorenbündel verstanden werden. So hat der jährliche Niederschlag nicht nur einen entscheidenden Einfluss auf die Verwitterung von Bodensteinen (WHITE 1995, ROBINSON 1994) sondern ist an einem Standort des Südschwarzwald auch eng mit z.B der Temperatur, der Meereshöhe und der Lage im Raum (Ost-West-Gradient des Niederschlags) korreliert. Auch die Depositionsrates besitzt eine vertikale Komponente (FOHRER et al. 1999) und ist so indirekt mit dem Niederschlag verbunden. Selbst bodenbildende Prozesse wie z.B. die Ausbildung tiefgründig verwitterter Fließserden im Südschwarzwald sind höhenabhängig, da Fließserden an Hängen der angrenzenden Randbereiche außerhalb des Glazialgebietes vorkommen (STAHR 1979). ZIRLEWAGEN (2002) kommt bei einer Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften im Südschwarzwald zu dem Schluss, dass die Verwendung von Niederschlagsdaten aufgrund des Zusammenhangs mit einer Vielzahl regionalspezifischer Gradienten den Gültigkeitsbereich und die Verallgemeinerbarkeit von Regressionsmodellen innerhalb der Region erhöhen kann. Leider liegen für das Untersuchungsgebiet (noch) keine regionalisierten Niederschlagsdaten vor, sodass im Modell die sehr allgemeinen Werte des Deutschen Wetterdienstes benutzt werden.

Regressionsanalyse sKAK _{Modell}						
n	FG	r ²	adj. r ²	p>F	RMSE	STD
2	35	0,83	0.82	0.0001	4.19	17.66

Tab. 8: Statistische Kennziffern (n = Anzahl Regressoren, FG = Freiheitsgrade, r² = Bestimmtheitsmaß, adj.r² = adjustiertes Bestimmtheitsmaß, p>F = Signifikanzschwelle, RMSE = Standardschätzfehler d. Modells, STD = Standardabweichung) der multiplen linearen Regression zur Modellierung der skelettbürtigen KAK [$\mu\text{mol/g TG}$].

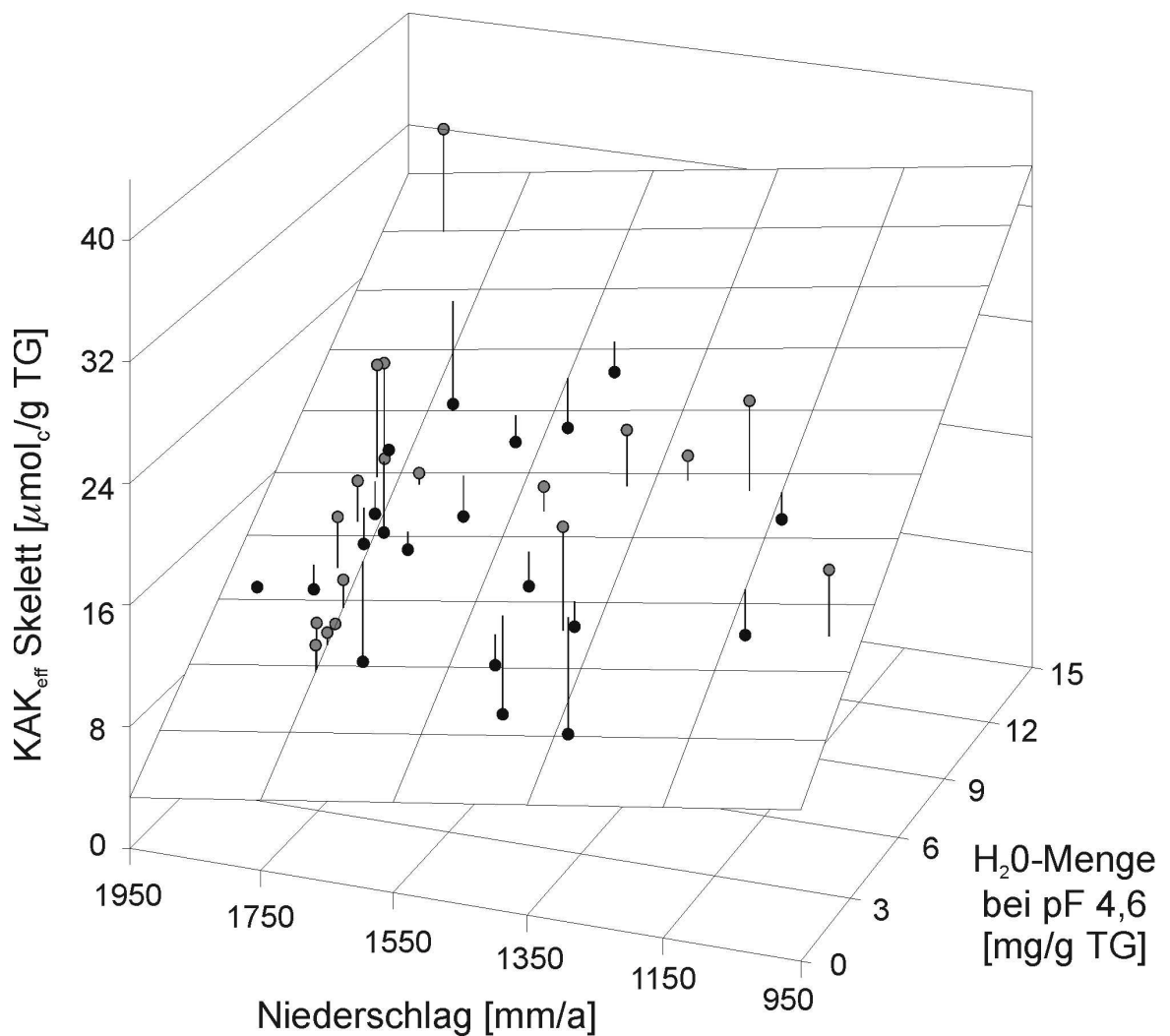


Abb. 39: Beziehung zwischen der Wasserdampfadsorption bei pF 4,6 [mg/g TG], dem Niederschlag [mm/a] und der KAK_{eff} [$\mu\text{mol/g TG}$] des Skeletts.

Wenn der gemessene Wert < kalkulierter Modellwert, wird er als **schwarzer Punkt** dargestellt. Wenn der gemessene Wert > kalkulierter Modellwert, wird er als **grauer Punkt** dargestellt. Die **Linie** entspricht dem Umfang des Unterschieds.

Modell: $\text{sKAK} (\mu\text{mol/g TG}) = a + b \text{ „H}_2\text{O-Gehalte bei pF 4,6 (mg/g TG)“} - c \text{ „Niederschlag (mm/a)“}$, (a=15,62, b=1,68, c=0,0063), n=37.

4.2.2.2 Modellierung effektiv austauschbaren Mengen aller skelettbürtiger M_b -Kationen und von skelettbürtigem Ca

Der aus obiger Gleichung abgeleitete Wert der $sKAK_{Modell}$ [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$] wird in zweite Pedo-Transferfunktion eingesetzt, um die skelettbürtigen kurz- und mittelfristig austauschbaren Mengen der Summe effektiv austauschbarer M_b -Kationen und von Ca^{2+} [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$] ermitteln zu können.

Als Prädiktor wird neben der modellierten KAK des Skeletts [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$] eine feinbodenbürtige Austauschkapazität herangezogen. Der Gehalt an austauschbarem Mg^{2+} des Feinbodens stellt sich - gemeinsam mit der modellierten Austauschkapazität - als bester Prädiktor zur Schätzung austauschbarer M_b -Ionen der Skelettfraktion heraus. Im Falle der Summe effektiv austauschbarer M_b -Kationen erklärt das Modell dann 52% und im Falle von Ca^{2+} 36% der beobachteten Varianz bei akzeptablen statistischen Kennwerten.

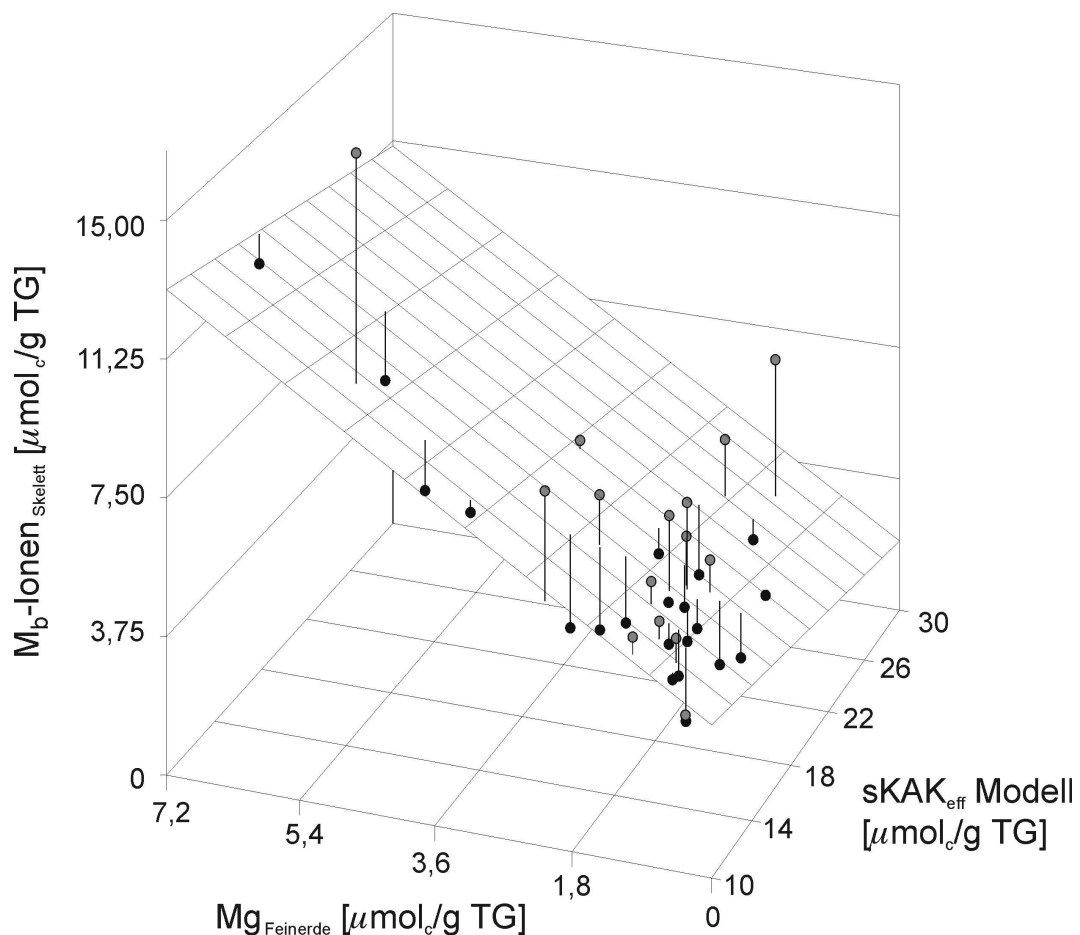


Abb. 40: Beziehung zwischen der modellierten KAK_{eff} [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$] des Skeletts, des Mg^{2+} -Gehaltes der Feinerde [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$] und des M_b -Gehaltes des Skeletts [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$], Modell: $sM_b\text{-Kationen} (\mu\text{mol}/\text{g TG}) = a - b sKAK_{Modell} (\mu\text{mol}/\text{g TG}) + c Mg_{Feinboden} (\mu\text{mol}/\text{g TG})$ ($a=5,024$, $b=0,1016$, $c=1,2662$, $n=36$)

Regressionsanalyse skelettbürtiger Kationen							
Variante	n	FG	r ²	adj. r ²	p>F	RMSE	STD
sM _b -Kationen	2	34	0,52	0,49	0,001	2,01	5,78
sCa ²⁺	2	33	0,36	0,32	0,001	2,20	3,83

Tab. 9: Statistische Kennziffern der multiplen linearen Regression zur Modellierung effektiv austauschbarer M_b-Kationen [$\mu\text{mol/g TG}$] (Abkürzungen siehe Tabelle 8).

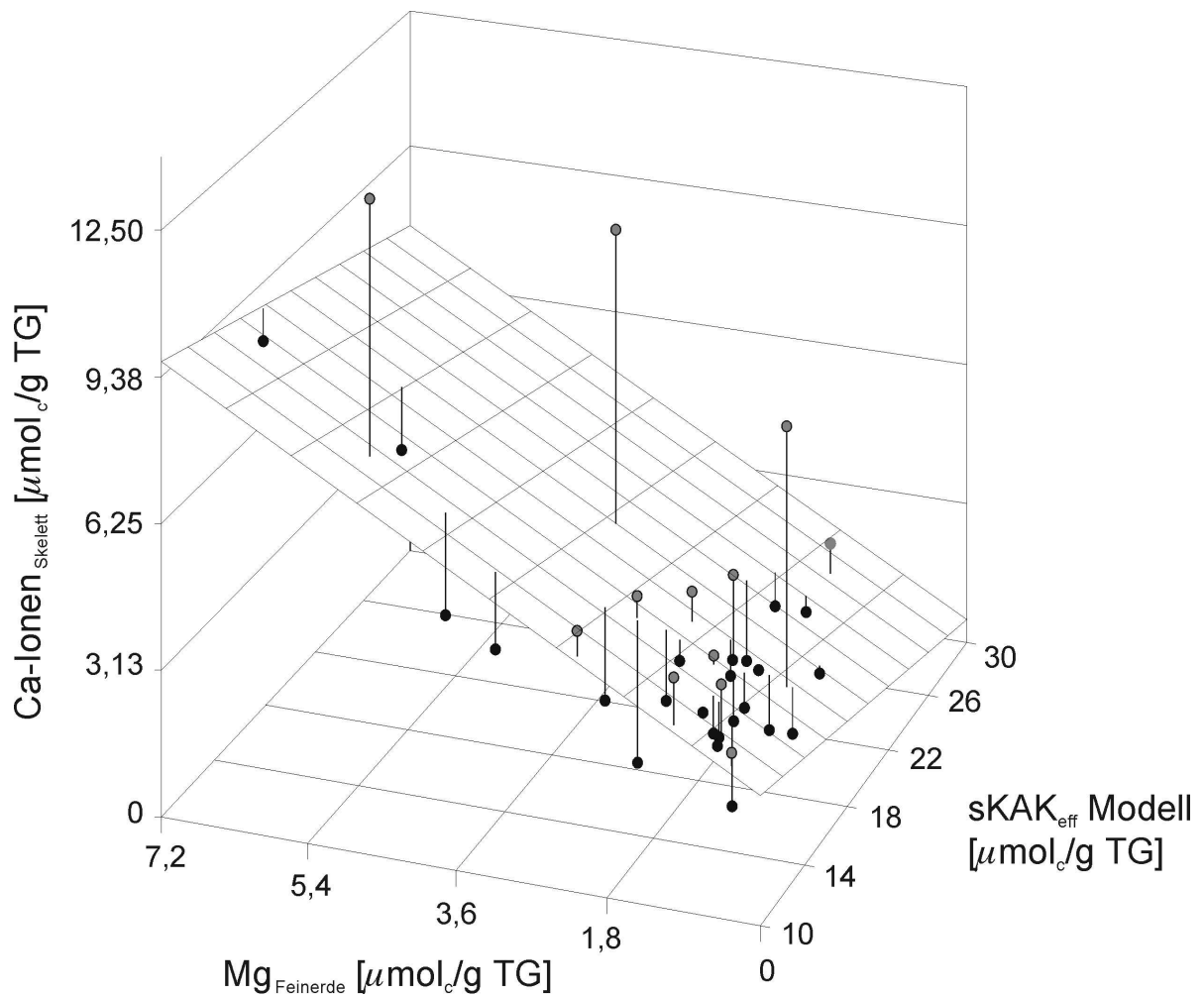


Abb. 41: Beziehung zwischen der modellierten KAK_{eff} [$\mu\text{mol/g TG}$] des Skeletts, des Mg²⁺-Gehaltes der Feinerde [$\mu\text{mol/g TG}$] und des Ca²⁺-Gehaltes des Skeletts [$\mu\text{mol/g TG}$], Modell: $s\text{Ca}^{2+} (\mu\text{mol/g TG}) = a - b \text{sKAK}_{\text{Modell}} (\mu\text{mol/g TG}) + c \text{Mg}_{\text{Feinboden}} (\mu\text{mol/g TG})$ ($a=3,7706$, $b=0,1085$, $c=0,974$, $n=35$)

Dies könnte damit erklärt werden, dass Mg²⁺ auf Veränderungen des chemischen Bodenzustandes sehr empfindlich reagiert. Z.B. wird Mg²⁺ im Zuge von Versauerungsvorgängen aufgrund seiner relativ geringen Eintauschstärke besonders leicht ausgewaschen (KÖLLING 1999, v. WILPERT et al. 1996). Daher ist Mg²⁺ in stark sauren Waldböden auch ein chronisches Mangel-element (RIEK & WOLFF 1998a, RASPE et al. 1998, FEGER 1997, Bosch et al. 1983). CURRIE et al. (1999) konnten in einem zweijährigen Zeitvergleich der

Nährstoffauswaschung in Stickstoff gesättigten Waldböden zeigen, dass eine positive Korrelation zwischen dem Grad der Stickstoffmobilität und der Auswaschung der Nährelemente Ca^{2+} , Mg^{2+} und Na^+ aus dem Oberboden besteht. Die Autoren konnten in 2 Jahre andauernden Versuchen zeigen, dass bei episodischen Phasen hoher Nitratmobilität auch die Auswaschung der genannten Nährelemente aus dem Oberboden ansteigt. Dieser Zusammenhang war bei Mg^{2+} deutlicher als bei Ca^{2+} und K^+ . Mg^{2+} tritt besonders häufig als Begleiter mobiler Anionen in der Bodenlösung auf und die Menge an austauschbarem Mg^{2+} kann als Indikator von Versauerungsprognosen angesehen werden (HILDEBRAND 1986). Mg^{2+} gibt daher als ausreichend präzise reagierender Prädiktor die aktuellen feinbodenbürtigen Nährstoffverhältnisse der Standorte im Südschwarzwald am besten wieder.

Um die Stabilität der bei den einzelnen Arbeitsschritten erzielten Regressionskoeffizienten zu gewährleisten, müssen alle Prädiktoren des Modells möglichst unabhängig voneinander sein (SHAW & WHEELER 1984). Eine zu starke Abhängigkeit zwischen den Prädiktoren untereinander (Multikollinearität) wurde ausgeschlossen, indem multiple Korrelationen zwischen den Prädiktoren berechnet und neue Variablen nur dann aufgenommen wurden, wenn die Toleranz ($1-r^2$) nicht kleiner 0,1 ist (Option COLLIN / TOL, Anweisung MODELL in der Prozedur REG, SAS INSTITUTE 1999). Tabelle 10 gibt einen Überblick über die Interkorrelation zwischen den Prädiktoren. Hohe Korrelationen zwischen den untersuchten Parametern bzw. eine Überschreitung des Grenzwerts von $r=0,8$ treten nicht auf.

H ₂ O-Menge bei pF 4,6 (mg/g TG)	0,12	-0,18
Mg _{Feinboden} ($\mu\text{mol}/\text{g}$ TG)		-0,32
	Mg _{Feinboden} ($\mu\text{mol}/\text{g}$ TG)	Niederschlag (mm/a)

Tab. 10: Matrix der Produktmoment-Korrelationskoeffizienten nach PEARSON der für die multiplen Regressionen ausgewählten Prädiktoren, $n=36$.

Die vorgestellten Pedo-Transferfunktionen ermöglichen somit erstmals Schätzungen des M_b -Kationenpotenzials vom Bodenskelett. Dazu ist es notwendig, das relativ aufwändige Verfahren zur Bestimmung gaserreichbarer Oberflächen von Bodensteinen durch die praxistaugliche, kostengünstige und routinefähige Methode der „Bestimmung wassererreichbarer innerer Skelettoberflächen durch Wasserdampfadsorption“ zu ersetzen und so zu einer differenzierteren Beurteilung der ökochemisch aktiven Skelettoberflächen zu gelangen. Unter Einbeziehung einfach zu erhebender feinbodenbürtiger (kurz- und mittelfristig verfügbare Mg^{2+} -Gehalte) und standörtlicher Informationen (durchschnittlicher Jahresniederschlag) können die austauschbaren skelettbürtigen Mengen der Summe aller M_b -Kationen und der Menge an Ca^{2+} ($\mu\text{mol/g TG}$) des Bodenskeletts vorhergesagt werden.

Die vorgestellten Pedo-Transferfunktionen gelten nur für ungekalkte Standorte kristalliner Herkunft, denn nur für diese Gruppe waren die Bedingungen und Vorhersagewahrscheinlichkeiten des Modells zufriedenstellend. Die erläuterten Unterschiede zwischen groß- und kleinmaßstäblichem Raster (Kapitel 3) legen außerdem den Schluss nahe, dass regionale Einflussfaktoren einen maßgeblichen Einfluss auf die in das Modell einbezogenen Parameter besitzen. Die Gültigkeit der Berechnungen beschränkt sich deshalb auf den kristallinen Südschwarzwald.

5.0 Diskussion

5.1 Die Bedeutung von Steinen der Böden im Südschwarzwald als Nährelementspeicher

Die Bedeutung von Steinen als Speicher für kurz- und mittelfristig verfügbare Nährelemente ist im mediterranen Raum schon länger bekannt. UGOLINI bemerkte, dass Wurzeln Bodensteine aktiv aufsuchen und umwachsen, um die dort mobilisierten Nährelemente direkt abschöpfen zu können (1996). Trotzdem wurde die Bedeutung des Bodenskeletts zur Waldernährung und zum Stoffkreislauf bisher nur in einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Studien untersucht.

Eine ausführliche Literaturübersicht zum Thema findet sich bei KOHLER (2001), der für 3 Waldstandorte des Schwarzwalds auf Gneis (Conventwald), Granit (Schluchsee) und Buntsandstein (Altensteig) das gereinigte Bodenskelett, den Feinboden und den natürlich gelagerten Gesamtboden auf kurz- bis mittelfristige Ionenspeicher- und Ionenmobilisierungspotenziale untersuchte. KOHLER kam zu dem Ergebnis, dass das Bodenskelett unterhalb des Ah-Horizontes entweder der „Hauptspeicher“ (Standort Conventwald) oder ein ökochemisch nicht zu vernachlässigender „Zusatzspeicher“ (Standorte Schluchsee und Altensteig) für das Gesamtangebot an austauschbar gebundenen Nährelementen im Boden ist. Die in Abhängigkeit des Standorts sehr unterschiedliche ökochemische Bedeutung des Grobbodens zeigt, dass die bisher unberücksichtigte Nährelementquelle „Skelettfraktion“ auf der räumlichen Integrationsebene ‚Wuchsgebiet‘ betrachtet werden muss, um das Nährelementpotenzial im Rahmen bodenkundlicher Darstellungen und waldbaulicher Planungen genauer beurteilen zu können.

Eine Quantifizierung skelettbürtiger Nährelementpotenziale gewinnt vor allem vor dem Hintergrund des Nährstoffverlustes in Waldböden an Bedeutung. Dabei konnte festgestellt werden, dass ca. 60% der europäischen und über 2/3 der deutschen Level-II-Standorte Nettoverluste an Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ aufweisen, d.h. diese Waldböden verlieren mehr M_b -Kationen als sie durch Regenwasser und Stäube zugeführt bekommen (DIETRICH et al. 2001, BMELF 1999, AUGUSTIN & BÜTTNER 1997). Eine Vielzahl weiterer Untersuchungen belegen die fortschreitende Verarmung vieler Waldstandorte Zentral- (HEISNER et al. 2003, FEGER 1997, MATZNER & MURACH 1995, ULRICH 1994, ULRICH 1991; ULRICH et al.

1989) und Nord-Europas (BILLET et al. 1990, HALLBÄKEN 1992, HALLBÄKEN & TAMM 1986) an wichtigen Pflanzennährstoffen. Die Auswertung zur Ernährungssituation der Hauptbaumarten europäischer Level-II-Standorte zeigt zwar eine großflächige Abnahme der Schwefeleinträge, aber auch einen Trend zunehmender Stickstoffeinträge in europäischen Waldbeständen (DIETRICH et al. 2001, POSCH et al. 1997). Die zunehmende Belastung vieler europäischer (Wald)Böden mit Stickstoff wird als treibende Kraft der derzeitigen anthropogenen Bodenversauerung angesehen (ULRICH 1999, VERHOFF et al. 1996).

Die Fruchtbarkeit von Waldböden oder ihre Fähigkeit, nachhaltig wüchsige, vitale und stabile Waldbestände zu tragen, lässt sich durch Kennwerte des Waldwachstums oder der Produktivität (z.B. Höhenbonität) beschreiben. Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurde in weiten Teilen Europas (Mittel- und Südeuropa sowie südliche Regionen Nordeuropas) ein verstärktes Wachstum der Waldbestände festgestellt (PRETZSCH et al. 2000, SPIEKER 1996). Als mögliche, aber noch nicht genauer erforschte Ursachen dieser Entwicklung werden zeitlich und räumlich variierende Veränderungen der Landnutzung, Art der Waldbewirtschaftung, Witterung sowie die Zunahme der N-Depositionen, die erhöhte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und die globale Klimaerwärmung angenommen (SPIEKER et al. 1996).

Die Wuchsleistung einer bestimmten Baumart oder eines Waldbestandes wird durch die Verfügbarkeit von Wachstumsfaktoren und die Anwesenheit bzw. das Fehlen von Schadfaktoren und Krankheitserregern bestimmt. Wachstumsfaktoren sind entweder atmogen (z.B. Strahlung, Wärme und CO₂-Konzentration) oder bodenbürtig (z.B. Wasser, Nährstoffe und Sauerstoff für die Wurzeln). Es ist ein scheinbarer Widerspruch, dass die Zuwächse unserer Waldbestände aufgrund von atmogenen Standortveränderungen im Durchschnitt in großregionaler Ausprägung seit mehreren Jahrzehnten ansteigen, obwohl gleichzeitig das (fein)bodenbürtige Nährstoffangebot abnahm bzw. sich auf niedrigem Niveau stabilisierte. Dieser Widerspruch kann zumindest im Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit mit der Speicherfunktion der Bodensteine für austauschbar gebundene Nährelemente erklärt werden. Die Quantifizierung des Nährelementpotenzials zeigt, dass im Südschwarzwald der skelettbürtiger Ca²⁺-Anteil am Gesamtvorrat (Summe aus Feinboden und Skelett) im Mittel ca. 40% beträgt, die durchschnittlichen skelettbürtigen Mg²⁺-Vorräte ca. 30% betragen und der mittlere K⁺-Vorrat zu ca. 15% aus dem Skelett

stammt. Der Grobboden stellt somit ein bodenökologisch bedeutsames Reservoir verfügbarer basischer Kationen der Waldböden des Südschwarzwalds dar.

Weitere ungeklärte Aspekte der Waldschadensforschung lassen sich unter Einbezug der hier vorgestellten Ergebnisse ebenfalls erklären. So wird als eine sehr wichtige Voraussetzung der montanen Vergilbung von Fichtenbeständen seit Beginn der 80er Jahre die Armut der Waldböden an leicht pflanzenverfügbarem Mg^{2+} bei gleichzeitig hoher Al^{3+} -Sättigung der Bodenaustauscher genannt (EVERS 1994, LIU & TRÜBY 1989, HOFMANN-SCHIELLE 1984). Sowohl epidemiologische Studien im Freiland (RASPE et al. 1998, NEBE et al. 1987, ZÖTTL & MIES 1983, BOSCH et al. 1983) als auch Laborexperimente (BOSCH et al. 1986) bestätigen diesen Sachverhalt. Geringe Gehalte an austauschbarem Mg^{2+} im Boden führen jedoch keineswegs in jedem Fall zu der charakteristischen montanen Vergilbung. Im inneren Bayrischen Wald stocken bisher gesunde, dicht benadelte, grüne Altfichten auf Böden, die mit austauschbarem Mg^{2+} genauso schlecht ausgestattet sind wie die Standorte unmittelbar benachbarter an montaner Vergilbung erkrankter Stangenhölzer (REHFUESS & BOSCH 1986, BOSCH 1986, EVERS 1979). Eine Erklärung dafür könnte sein, dass nur der umfangreichere Wurzelapparat der Altfichten gemeinsam mit vergesellschafteten Hyphen und Mikroorganismen in der Lage ist, das skelettbürtige Nährelementpotenzial auch tieferer Bodenschichten zu nutzen. Vorstellbar ist in diesem Zusammenhang auch, dass zur Erschließung des Bodenskeletts durch Hyphen und Rhizomorphen der Faktor Zeit und damit das Alter von Beständen eine wichtige Rolle einnimmt. Auch im Conventwald nahe Freiburg zeigt dort aufstockender Buchen-Mischbestand gute Wuchsleistungen und keine Nährstoffmangel-Erscheinungen, obwohl die Basensättigung der Feinerde unterhalb des Ah-Horizontes mit Werten $< 5\%$ ein alarmierendes Niveau erreicht haben (ZIRLEWAGEN et al. 1997). Das Bodenskelett besitzt dort in allen Bodentiefen signifikant höhere Basensättigungen als der Feinboden (KÖHLER 2000).

Aktuelle vegetationskundliche Untersuchungen zum ökologischen Verhalten der Waldvegetation weisen auch Plausibilitätsdefizite auf. Die Zeigerwerte von Artengruppen stimmen häufig nicht mehr mit den heute herrschenden Bodenbedingungen überein. Nicht selten sind auf Waldböden Arten zu beobachten, die auf Grund des gemessenen niedrigen pH-Wertes nicht zu erwarten wären (SCHÖNHAR 2000, ZIMMERLI & SCHÜTZ 1995, MÖLLER 1987, SCHÖNHAR 1955). Der auf Erfahrungswissen basierende Zusammenhang über die Wechselwirkungen zwischen der Vegetation und den Bodenbedingungen scheint außer

Kraft gesetzt. Die Fehlerhaftigkeit des ökologischen Aussagewertes von Bodenpflanzen bezüglich der Bodenacidität wird auf unterschiedliche Ca/Al- oder M_b/Al -Verhältnisse in der Bodenlösung zurückgeführt (SEIDLING & ROHNER 1993). Ebenfalls sollen die im Boden vorhandenen Vorräte an Mineralstickstoff (NO_3^- und/oder NH_4^+) den Zeigerwert von Pflanzen für die Azidität nicht unerheblich beeinflussen (ELLENBERG et al. 1991, GÖNNERT 1989). Jedoch gilt dieser Sachverhalt als nicht abgesichert, da es erst wenige exakte Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Stickstoffsättigung und dem Artenspektrum der Bodenvegetation gibt. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass der Vorrat an austauschbaren M_b -Ionen der Skelettfraktion gerade in den sehr sauren Böden oft genauso hoch oder sogar höher ist als der aus dem Feinboden. Die aktuell fehlende Korrelation zwischen dem pH-Wert eines Bodens und dem Zeigerwert der Flora könnte deshalb auch damit erklärt werden, dass die austauschbar gespeicherten Nährstoffvorräte des Bodenskeletts der Vegetation ebenfalls zur Verfügung stehen, jedoch nicht in die bisherigen Betrachtungen miteinbezogen wurden.

Eine Voraussetzung zur Nutzung des Nährelementpotenzials von Bodensteinen ist, dass Pflanzen dazu in der Lage sind, skelettbürtige Nährelementquellen zu erschließen und die dort kurz- und mittelfristig gebundenen Nährelementen von den Austauschflächen zu lösen. Dazu gibt es in der Literatur eine Vielzahl von Hinweisen, die im Folgenden genauer vorgestellt werden.

Die chemischen Bedingungen der Rhizosphäre unterscheiden sich deutlich von denen des Restmineralbodens. GÖTTLEIN et al. (1999) wiesen nach, dass die Nährelement-Konzentration der Bodenlösung von Ca^{2+} und Mg^{2+} in der Nähe lebender Eichen-Wurzeln abfällt, während die Konzentration von Al^{3+} signifikant ansteigt. WANG et al. (2000) konnten zeigen, dass die Protonen-Abgabe der Wurzeln zu einer Erniedrigung des pH-Wertes, einer Freisetzung geringer Mengen an freiem Al^{3+} und damit zu einer verstärkten Mineralverwitterung führt. Dies zeigte sich auch an einer Erhöhung von KAK und Basensättigung im Wurzelbereich. FRAZIER & GRAHAM (2000) untersuchten den Felsuntergrund südkalifornischer Granitstandorte und fanden in allen untersuchten Tiefenstufen bis 1,25 Meter Wurzeln, die in Hohlräume und Risse des verwitterten Untergrundes eingewachsen waren. Die mikromorphologische Untersuchungen scheinbar unverwitterter Quarze des Felsuntergrundes zeigten, dass die Minerale Mikrorisse aufweisen. Die Gesteine waren von inter-, intra- und transmineralen Hohlraumnetzwerken sowie Wurzelkanälen durchzogen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden alle Gesteinsproben unter dem Binokular auf die Anwesenheit von Wurzeln und Feinwurzeln überprüft. Trotz einer vorangegangenen Ultraschallreinigung konnten bei 47 der 61 beprobten Standorte an den äußeren Oberflächen des Gesteinsmaterials anhaftende Feinwurzeln und/oder Rhizomorphen festgestellt werden.

Wurzelhaare, bzw. mit ihnen vergesellschaftete Pilz-Hyphen sind in der Lage, kleinste Risse, Poren und Hohlräume der sie umgebenden Böden zu erreichen (MISRA et al. 1988). Wurzelhaare sollen sogar bis zu einer Tiefe von 0,5 mm in Tonmineralien einwachsen können (CHAMPION & BARLEY 1969). Wurzelhaare und Pilz-Hyphen geben Wurzel-exsudate ab und sind dadurch in der Lage Nährelemente an Austauscheroberflächen zu mobilisieren. Exsudate werden von Pflanzen insbesondere in Bereiche abgegeben, von denen sie leicht zu den Wurzeloberflächen zurückdiffundieren können, um von der Pflanze aufgenommen zu werden (MICHAEL 1990). Werden Boden-Hyphen in einem Nährmedium kultiviert, tendieren sie dazu, sich verstärkt in der Nähe von Nährelement-Quellen anzusiedeln (CRAWFORD et al. 1993). SCHACK-KIRCHNER et al. (2000) stellten fest, dass Hyphen und Wurzelhaare bzw. Feinwurzeln häufig gemeinsam die gleichen Mikrokompimente (wie z.B. Makroporen) besiedeln. Ergebnisse von JONGMANS et al. (1997) belegen, dass auf Granitstandorten Hyphen von Mykorrhiza-Pilzen das Mikroporensystem von Feldspäten oder Hornblenden erschließen und auf diesem Wege Nährelemente wahrscheinlich direkt aus dem Gesteinsinneren aufnehmen können („rock-eating fungi“). KOHLER et al. (2001) konnten bei der mikroskopischen Betrachtung von Gesteinsanschliffen im Conventwald in einer Bodentiefe von 10 cm (Bv-Horizont) Pilz-Hyphen beobachten, die ohne das Vorhandensein von erkennbaren Verwitterungszonen in den Mineralverband der Steine eindringen („Primär-Besiedlung“). VAN BREEMEN et al. (2000a) gehen davon aus, dass Pilz-Myzelien sich zur Nährelementaufnahme durch Ausscheidung von organischen Säuren aktiv in Minerale „hineinbohren“ und über die Schaffung eines Mikroporensystems die Verwitterung in den Steinen antreiben. Dieses Verhalten entspricht einem „Bypass-Effekt“, da die Bodenlösung der Makroporen bei der Nährelementassimilation umgangen wird.

Sind die Nährelementpotenziale der Bodensteine tatsächlich pflanzenverfügbar, wird bei einer ausschließlichen Betrachtung von Ionenmengen bzw. -vorräten aus dem Skelett die ökochemische Bedeutung der Bodensteine für die Waldernährung mit hoher Wahrscheinlichkeit erheblich unterschätzt. Da die Basensättigung in der Skelettfraction wesentlich hö-

her ist als im Feinboden, kann die Nährelementaufnahme durch Pflanzen effektiver erfolgen. Die Austauschereigenschaften skelettbürtiger Oberflächen stellen deshalb für nährstoffadsorbierende Gewebe eine ernährungsphysiologisch wesentlich günstigere Umgebung dar als Austauscheroberflächen des Feinbodens.

Sowohl bei den Beobachtungen der vorliegenden Arbeit als auch bei der oben zitierten Literatur handelt es sich um rein explorative, qualitative Befunde, über deren allgemeine Gültigkeit nichts bekannt ist. Zuverlässige Aussagen über den tatsächlichen Beitrag des Bodenskeletts bei der Nährelementaufnahme durch Wurzeln, Feinwurzeln und mit diesen vergesellschaftete Pilz-Hyphen und Mikroorganismen sind nicht möglich, da es bis heute keine spezifischen bodenanalytischen Verfahren gibt, welche die Nährstoffaufnahme der mykorrhizierten Wurzeln von verschiedenen Baumarten korrekt simulieren könnte. Dies bedeutet, dass auch die Frage, ob Feinwurzeln und/oder Pilz-Hyphen gezielt skelettbürtige „hot spots“ der Nährelementspeicherung aufsuchen, nicht abschließend beantwortet werden kann. Das in den verschiedenen Untersuchungen auftretende Plausibilitätsdefizit zwischen extrem niedrigen bodenchemischen Kennwerten des Feinbodens einerseits und gutem Bestandeswachstum andererseits deutet allerdings auf eine Ersatzfunktion des Bodenskeletts für die Bestandesernährung hin. Die Nutzung von Steinen als Nährelementspeicher durch Wurzeln, Rhizomorphen und mittels vergesellschafteter Hyphen und Mikroben könnte im Rahmen der Prozesshierarchie von Waldökosystemen (ULRICH 1993) möglicherweise als Anpassungsreaktion des Systems an ungünstige bodenchemische Eigenschaften der Feinerde gewertet werden.

Folglich sollte versucht werden, zukünftig nicht nur feinbodenbürtige Gesamtgehalte oder -vorräte einzelner Nährelemente als Fruchtbarkeitsindikatoren eines Bodens zu betrachten, sondern auch skelettbürtige Nährelementpotenziale in die Betrachtungen mit einzu beziehen. Die Gesamtgehalte des Feinbodens scheinen mit den nicht direkt ermittelten Gehalten der jeweiligen pflanzenverfügbaren Anteile korreliert zu sein. Dafür lassen sich schon seit geraumer Zeit Belege in der Literatur finden (NEBE & HOFMANN 1982; FIEDLER et al. 1976, TÖLLE 1976, HILDEBRAND 1976). Speziell für saure Waldböden haben sich die KAK_{eff} , die Gehalte an austauschbaren Basen- und Säuren-Kationen und die entsprechenden Sättigungsindizes (v.a. der Basensättigungsgrad) als aussagekräftiger Fruchtbarkeitsparameter bewährt (BLOCK et al. 2000, RIEK & WOLFF 1998b, RASPE 1997, BUBERL et al. 1994). Die Arbeit von KOHLER (2001) sowie die vorliegende zeigen, dass es möglich ist mit der Methode der Perkolation (HILDEBRAND 1994) dieselben Parameter

auch für das Bodenskelett zu erheben, und somit einen Vergleich der Nährelementpotenziale von Fein- und Grobboden zu ermöglichen. Allerdings sind die dazu erforderlichen Feld- und Laborarbeiten sehr aufwändig. Deshalb war eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit, Pedo-Transferfunktionen zu entwickeln, die es ermöglichen, aussagekräftige skelettbürtige Fruchtbarkeitsparameter aus anderen leichter zu erhebenden Parametern zu berechnen, um skelettbürtige Nährelementpotenziale für den Südschwarzwald regionalisieren zu können.

5.2 Probeflächenauswahl und Probenahmetechnik

Für die Qualität von flächenbezogenen Untersuchungsergebnissen sind die Anzahl und die räumliche Anordnung der Probenahmestellen sowie die Probenahmetechnik zur Erhebung bodenkundlicher Kennwerte von Bedeutung (z.B. BURROUGH & McDONNELL 1998, WAGNER 1995, WEBSTER & OLIVER 1990, LASLETT & McBRATNEY 1990, LASLETT et al. 1987). Daher sind für die Bestimmung des Probenahmeumfangs und der Auswahl geeigneter Beprobungskonzepte zur Erhebung von Bodeneigenschaften zahlreiche Verfahren und Empfehlungen entwickelt worden. Prinzipiell werden Messnetze unterschieden, die auf einer zufälligen Probenahme basieren oder bei denen vorhandenes Wissen stratifizierend eingesetzt wird. (BURROUGH & McDONNELL 1998, WEBSTER & OLIVER 1990). Gitterartige Messnetze werden in der bodenkundlichen Praxis sehr häufig eingesetzt, da der Aufbau dieser Beprobungsschemata einfach und leicht reproduzierbar ist (SCHMOTZ 1996). Die Probenahmestellen sind dabei im Allgemeinen in der Form eines Quadrat- oder Hexagonalrasters aufgebaut und können innerhalb oder an den Schnittpunkten der Rasterzellen regelmäßig oder unregelmäßig angeordnet sein. Neben der Rasterbeprobung existieren Verfahren zur vollständig zufälligen Auswahl von Probenahmestellen. Solche Zufallsmessnetze sollen eine stochastisch unabhängige (MIEHLICH 1976) und vom Anwender unbeeinflusste Verteilung der Probenahmestellen gewährleisten (BURROUGH 1993). Geschichtete Zufallsmessnetze (z.B. SCHMOTZ 1996, HERTLING et al. 1995, KUHN 1994, WEBSTER & OLIVER 1990) kombinieren die Eigenschaften der Raster- und der Zufallsmessnetze. Zu ihrer Erzeugung wird das Untersuchungsgebiet zunächst in ein Raster eingeteilt. Anschließend werden innerhalb einer oder mehrerer Rasterzellen zufällig angeordnete Punkte für die Beprobung ausgewählt. Dieses Verfahren wurde auch für die vorliegende Arbeit verwendet, um herauszufinden, ob es signifikante Unterschiede zwischen

regionaler und lokaler Ausprägungen der Skeletteigenschaften gibt. Als Rasternetz wurden die Probepunkte der Bodenzustandserhebung (BUBERL et al. 1994) im Südschwarzwald ausgewählt. Das Zufallsmessnetz repräsentiert Standorte auf Granit/hellem Gneis und dunklem Gneis aus der Grundgesamtheit der Probepunkte der forstlichen Betriebsinventur (Rasterung=200x100 m) im Bereich der Forstämter Todtmoos, Todtnau und Kandern.

Es wurde festgestellt, dass die effektive Kationenaustauschkapazität der Skelettfractionen des regionalen und lokalen Rasters sich nicht signifikant voneinander unterscheidet. Jedoch ist bei den Merkmalen „Nährelementverteilung in Grob- und Feinboden“, „Korngröße“ und „Kapillarvolumen“ die Abweichung vom Mittelwert des regionalen Rasters immer größer als die des lokalen Probenetzes. Dies zeigt eine höhere Heterogenität der Proben des regionalen Messnetzes gegenüber dem lokalen Messnetz an.

Als bodenkundlich relevante Vorinformationen des Zufallsmessnetzes wurde der Faktor ‚Ausgangsgestein‘ (Granite/helle Gneise und dunkle Gneise) gewählt, da angenommen wurde, dass das Ausgangsgestein ein wesentlicher Indikator für das Nährelementpotenzial von Bodensteinen ist. So zeigen z.B. die Untersuchungen von KOHLER (2001), dass die KAK-Werte des Skeletts eines Buntsandstein- (Altensteig) und eines Granit-Standortes (Schluchsee) deutlich geringer sind als bei einem tiefgründig verwitterten basenreichen Paragneisstandort (Conventwald). Auch die Ergebnisse der Modellentwicklungen zur Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften im Südschwarzwald (ZIRLEWAGEN 2002) lassen erkennen, dass Böden aus dunklem, besser mit M_b Kationen ausgestattetem Urgesteinsmaterial (dunkle Gneise) eine andere räumliche Verteilung bodenchemischer Parameter aufweisen als Böden aus hellem, mit weniger M_b -Kationen ausgestattetem Substraten (helle Gneise/Granite). Durch die Stratifizierung der Zufallsstichproben des lokalen Rasters stand ein geeigneter Stichprobenumfang zur Verfügung, um den Zusammenhang zwischen Ausgangsgestein und skelettbürtigem Nährelementpotenzial untersuchen zu können. Überraschenderweise war eine Unterscheidung des Ausgangsmaterials anhand der Mineralzusammensetzung nicht möglich. Eine Differenzierung der gereinigten Proben im Labor in „dunkler Gneis“ und „heller Gneis/Granit“ war okular in den meisten Fällen nicht durchführbar. Auch aus den röntgendiffraktometrischen Auswertungen und den statistischen Untersuchungen der Beziehung skelettbürtiger Nährelementpotenziale (KAK, Basensättigung) zum Ausgangsgestein konnten keine signifikanten Beziehungen abgeleitet werden. Selbst bei einer statistischen Prüfung der dokumentierten

Gesteinsmerkmale ‚Farbe‘ und ‚Gehalt an dunklen Mineralien‘ der gereinigten Proben zeigten sich keine Zusammenhänge zu den unterschiedenen Ausgangssubstraten „dunkler Gneis“ und „heller Gneis/Granit“, obwohl genau diese Gesteinseigenschaften bei geologischen und bodenkundlichen Feldaufnahmen zur Charakterisierung des Urgesteins verwendet werden.

Böden entwickeln sich selten aus dem geologischen Ausgangssubstrat, das unter dem Solum ansteht. In den Mittelgebirgen Mitteleuropas bilden periglaziale Fließerden, die als unterschiedlich geschichtete Deckschichtentypen in schutt- und feinmaterialreiche Fließerden vorliegen, das Ausgangsmaterial. Nach STAHR (1979) sind die Hochlagen des Südschwarzwaldes hauptsächlich von glazialen Sedimenten bedeckt, während die Böden tieferer Lagen sich hauptsächlich aus periglazialen Schuttdecken entwickelt haben. Der Südschwarzwald ist zudem von zahlreichen tektonischen Bruchlinien durchzogen, was dazu führt, dass Gesteine sehr unterschiedlicher Entstehungsgeschichte (z.B. durch anatektische oder diatektische Überformung) unmittelbar nebeneinander vorkommen können (MÄCKEL et al. 1992). Die Verwitterung von Gneisanatexiten im Südschwarzwald verläuft sehr unterschiedlich und wechselt stark mit dem Grad der anatektischen Überprägung (METZ & REIN 1958). Bei den Graniten gibt es schon innerhalb der Zweiglimmergranite hinsichtlich Quarzgehalt und Basenausstattung erhebliche Unterschiede (WIMMENAUER & SCHREINER 1981). Eine der Ursachen für das Fehlen statistisch signifikanter Zusammenhänge zwischen Ausgangsgestein und skelettbürtigen Nährelementpotenzialen kann die sehr heterogene Mineralzusammensetzung der Ausgangssubstrate im Südschwarzwald sein. Wenn sich zwischen der KAK bzw. der Basensättigung des Skeletts und der Art des Ausgangsgesteins keine Zusammenhänge zeigen, muss es andere Einflussfaktoren geben, die die Höhe von skelettbürtigen Fruchtbarkeitsparametern im Südschwarzwald steuern. Mikropedologische Analysen von KOHLER et al. (2000) zeigen, dass die skelettbürtige KAK des Paragneis-Standorts Conventwald auf Feinmaterial zurückgeführt werden kann, dass sich in Fissuren der Skelettpartikel (10 – 100 µm) anreichert. Eine röntgen-diffraktometrische Untersuchung des Materials aus den Skelettkavitäten zeigt, dass es reich an Vermiculiten ist (KOHLER et al. 2000, KOHLER 2001). Vermiculit als typisches Verwitterungsprodukt von Biotit kann sowohl in hellen Gneisen als auch in dunklen Gneisen und Graniten gebildet werden. Diese Ergebnisse können als Indiz dafür gewertet werden, dass die Nährelementpotenziale des Skeletts im Untersuchungsgebiet also eher von

den standörtlichen Verwitterungsbedingungen als von der Art des Ausgangssubstrats kontrolliert werden. Dafür spricht auch, dass die Beziehung der skelettbürtigen KAK zur Wasserdampfadsorption der Bodensteine hochsignifikant ist (Kapitel 4.2.1.1).

5.3 Regionalisierung

Unter Regionalisierung wird die „Generalisierung oder flächenhafte Verallgemeinerung von naturwissenschaftlichen Größen, Verfahren, Modellen und Modellparametern vom Punkt auf die Fläche, von einer kleinen auf eine größere Fläche (oder umgekehrt)“ und damit ganz allgemein „deren Übertragung von einer Fläche auf eine andere“ verstanden (KLEEBERG 1992). Der Vorgang der Regionalisierung umfasst im vorliegenden Falle nicht das Aggregieren oder Disaggregieren von Information, was stets mit einem Skalenwechsel verbunden wäre, sondern meint das Interpolieren oder Bilden von Parametergruppen, das heißt Bestimmen von flächenmäßigen Verteilungen einer Größe, wobei in der Regel kein Skalenwechsel stattfindet (BECKER 1992, S. 18 ff).

Dazu werden die ökosystemar wichtigen Austauschereigenschaften des Grobbodens anhand vorliegender oder leicht zu ermittelnder Standort- und Skelettinformationen sowie Routineanalysen des Feinbodens geschätzt. In der Bodenkunde werden Pedotransferfunktionen schon seit längerem als bewährtes und erfolgreiches Werkzeug eingesetzt, um flächenhaft schwer messbarer Bodenkennwerte mittels vorhandener, einfach und günstig zu ermittelnder Standortparameter vorhersagen zu können (SCHAAP et al. 1998, GONCALVES et al. 1997, BELL & KEULEN 1995, TIETJE & TAPKENHINRICHS 1993, VERECKEN 1992, BOUMA 1989, VAN GENUCHTEN 1980). Bei der Anwendung der hier ermittelten Pedo-Transferfunktionen auf der Fläche ist es aufgrund des standörtlichen Bezuges zwingend erforderlich, die Grenzen der messtechnisch erschlossenen Region (hier: ‚Südschwarzwald‘) einzuhalten, um Skalenunabhängigkeit zu garantieren (BECKER 1992, S.22).

Die Pedo-Transferfunktionen zur Interpolation von Bodenkennwerten werden auf nicht beprobte Areale zumeist mit Regressionsmodellen erstellt. Die Regressionsmodelle beschreiben dabei einen logisch plausiblen und statistisch nachweisbaren Zusammenhang zwischen den tatsächlich gemessenen Werten und den vorliegenden Informationen von Bodenkennwerten und/oder der Geomorphometrie (z.B. ZIRLEWAGEN 2002, SZIBALSKI 2000, MCKENZIE & RYAN 1999, BELL & KEULEN 1995, BLENNOW & PERSSON 1998,

FELBERMEIER 1994, KLEIN 1994, BANZHAF 1994, TIETJE & TAPKENHINRICHS 1993, VENT-SCHMIDT 1985). Im vorliegenden Fall können die unbekannt metrisch skalierten Werte des Grobbodens über vorliegende ebenfalls metrisch skalierte Boden- und Standortfaktoren berechnet werden. Der Zusammenhang zwischen den Zielvariablen und den eingesetzten Prädiktoren war sowohl statistisch nachweisbar als auch durch bodenkundliches Expertenwissen begründbar (top-down logic, BURROUGH & McDONNELL 1998).

Für das Verhalten der Nährelementpotenziale von Bodensteinen in natürlichen Systemen sind immer mehrere Einflussgrößen maßgebend. Wenn mehrere Einflussgrößen gleichzeitig berücksichtigt werden sollen, bieten sich multiple Regressionsmodelle als Diagnostool an (GÖTZ 1984). Sie werden deshalb bevorzugt als Modellansatz verfolgt, weil sie einerseits zur Erklärung, wie z.B. im vorliegenden Fall dem besseren Verständnis der Austauschereigenschaften von Steinen benutzt werden können, und andererseits eine Vorhersage skelettbürtiger Nährelementpotenziale durch einfach zu ermittelnde Standortfaktoren ermöglichen. Da viele Schlüsselprozesse in bezug auf die Skelettfraktion in Waldböden noch nicht gut verstanden werden, stellen die hier entwickelten Regressionen gleichzeitig Basiswissen für zukünftige Forschungsarbeiten dar.

Aufgrund der praktischen Handhabung wurden in den Modellen nur solche Größen berücksichtigt, die einfach und reproduzierbar ermittelt werden können. Von den im Sinne der Präzision (Bestimmtheitsmaß) relevanten und nominell signifikanten Zusammenhängen des für eine Regionalisierung verwendeten Datenkollektivs wird gefordert, dass sie vor dem Hintergrund des vorhandenen Fachwissens plausibel erscheinen (GÜßEFELDT 1997, FRÄNZLE 1989, S. 66 ff.). Die Plausibilität ist gewährleistet, weil als Modellprädiktoren nur interpretierbare physikalische Größen eingesetzt wurden, die nach derzeitigem Fachwissen in direktem Zusammenhang mit der Ausprägung der Zielvariablen stehen.

Zur Prognose des Ernährungspotenzials des Grobbodens erwiesen sich die meisten der zur Verfügung stehenden Skelett- und Standortmerkmale (wie z.B. das Ausgangsgestein, die Mineralzusammensetzung, okular bestimmbare Gesteinseigenschaften wie der Verwitterungsgrad oder die Farbe, Jahresmitteltemperatur, die Hangneigung oder die Bestockung eines Standorts) als wenig geeignet.

Ein geeigneter Prädiktor der KAK_{eff} des Bodenskeletts ist die Wasserdampfadsorption des Grobbodens. Sie kann in einfacher Weise über den Wassergehalt des Skeletts bei pF 4,6 ermittelt werden und weist eine deterministisch geprüfte, sachlogisch plausible und statis-

tisch signifikante Beziehung zur skelettbürtigen KAK_{eff} auf (Kapitel 4.2.1.1). Der Koeffizient des Kapillarvolumen in der Regressionsgleichung ist erwartungsgemäß positiv, d. h. mit einem Anstieg des Kapillarvolumens ist eine Zunahme der durch das Skelett austauschbar gebundenen Ionen verbunden.

Das Austausch-Gleichgewicht zwischen den feinboden- und skelettbürtigen basischen Kationen ist ebenfalls statistisch signifikant und sachlogisch erklärbar (Kapitel 4.2.1.2). Je mehr M_b -Kationen der Feinboden aufweist, desto mehr sind auch im Skelett vorhanden (positiver Koeffizient in der Regressionsgleichung). Die austauschbar gebundene M_b -Kationen-Menge des Feinbodens wird bei den meisten Bodenuntersuchungen routinemäßig erhoben und stellt damit einen weiteren geeigneten Prädiktor dar, um skelettbürtige Nähr-elementpotenziale zu schätzen.

Die kausalanalytische Beziehung des Standortmerkmals ‚Niederschlag‘ zum Regressanden ist komplex, da die jährliche Niederschlagsmenge als summarischer Faktor betrachtet werden muss. Der Koeffizient des Niederschlags in der Regressionsgleichung ist negativ. Dies bedeutet, dass mit steigender Jahres-Niederschlagsmenge die Summe austauschbarer skelettbürtiger Ionen sinkt. Dies erscheint plausibel, da mit steigendem Niederschlag auch die Depositionen im Südschwarzwald zunehmen und die Bodenversauerung begünstigt wird. Da Skelett und Feinboden über Diffusionsbrücken miteinander verbunden sind, vermindert ein Verlust basischer Kationen im Feinboden langfristig auch den Gehalt austauschbarer M_b -Ionen im Bodenskelett (Interaktion zwischen Fein- und Grobboden, Kapitel 4.2.1.2.). Jedoch ist nicht gesichert, ob diese im Südschwarzwald gefundene Beziehung generelle Gültigkeit besitzt oder nur für das Untersuchungsgebiet gilt. So geht im Mittelgebirge ein ansteigender Niederschlag mit ansteigender Höhe über NN und damit abfallender Temperatur einher. Unter der Annahme, dass die Entstehung metastabiler Tonminerale in Fissuren und Hohlräumen von Skelettpartikeln einer Optimum-Kurve folgt, steigt bei ansteigenden Niederschlägen und sinkender Temperatur die skelettbürtige KAK aufgrund der dann höheren physikalischen und chemischen Verwitterungsrate (WHITE 1995, ROBINSON 1994). Die Frage, ob höhere Niederschläge zu einer verstärkten Bildung vermiculierter Kavitäten und damit zu zunehmender KAK der Bodensteine führt oder ob die mit den Niederschlägen mitgeführten sauren Depositionen eine Senkung der skelettbürtigen KAK aufgrund von Auswaschungsvorgängen hervorrufen, kann nicht grundsätzlich beantwortet werden.

Mit den vorgestellten Prädiktoren konnte eine zweistufige Pedo-Transferfunktion erstellt werden, die skelettbürtige Nährelementgehalte für die Region Südschwarzwald berechnet. In einem ersten Schritt wird mit den Merkmalen „Wasserdampfadsorption [mg/g TG]“ und „durchschnittlicher Jahresniederschlag [mm]“ die skelettbürtige KAK_{eff} [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$] modelliert. In einem zweiten Schritt wird die in Schritt eins errechnete skelettbürtige KAK_{eff} [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$] gemeinsam mit dem Prädiktor „feinbodenbürtige kurz- und mittelfristig austauschbare Mg-Menge [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$]“ eingesetzt, um die skelettbürtige Austauschmenge von Ca^{2+} und der Summe effektiv austauschbarer M_b -Ionen [$\mu\text{mol}/\text{g TG}$] vorherzusagen. Die Größe der KAK_{eff} des Bodenskeletts wird vom Regressionsmodell mit einer Sicherheit von 83% vorhergesagt. Im Falle der Summe effektiv austauschbarer M_b -Kationen erklärt das Modell 52% und im Falle von Ca 36% der beobachteten Varianz bei akzeptablen statistischen Kennwerten, wobei der Einfluss der feinbodenbürtigen Mg^{2+} -Gehalte für die modellierte Summe der skelettbürtigen M_b -Kationen geringer ausfällt als für die modellierten Ca^{2+} -Mengen des Skeletts.

Sicherlich könnte das Bestimmtheitsmaß der Regressionsmodelle noch gesteigert werden. Für die Beziehung zwischen Niederschlag und spezifischer innerer Oberfläche wären qualitative Verbesserungen möglich, indem regionalisierte Niederschlagsdaten verwendet würden, wie sie z.B. von NIEDERBERGER (2000) entwickelt wurden, anstatt die zur Verfügung stehenden sehr allgemeinen Daten des Deutschen Wetterdienstes einzusetzen. Solche Daten lagen allerdings für das Untersuchungsgebiet während des Auswertungszeitraums dieser Arbeit noch nicht vor. Auch beträgt der Zeitraum zwischen den Erhebungen der Nährelementpotenziale von Fein- und Grobboden im Falle des regionalen Rasters 10 Jahre, was zu Unschärfen dieser Beziehung führt (Kapitel 4.2.2). Aufgrund des erheblichen Arbeitsaufwandes war es jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, die chemischen Analysen des Feinbodens für das regionale Raster zu wiederholen.

Da bisher noch keine geeigneten Modelle zur Beschreibung des skelettbürtigen Nährelementgehaltes vorliegen, sollten die entwickelten Transfer-Funktionen im Südschwarzwald als Grundlage für weitere Entwicklungen benutzt werden. Es scheint darüber hinaus grundsätzlich möglich, die angewendete Regionalisierungsmethode auf andere, für die Forstplanung relevante Regionen und Ausgangsgesteine zu übertragen. Voraussetzungen hierzu sind die Bestimmung der inneren Oberflächen der Skelettproben sowie der KAK_{eff}

des Feinbodens an geeigneten Probenkollektiven. Mit diesem Datenmaterial könnte eine Pedo-Transferfunktion zur Regionalisierung des skelettbürtigen Nährelementpotenzials auch für andere Gebiete und/oder Ausgangssubstrate durch Regressionsanalysen in der hier vorgestellten Form abgeleitet werden.

Es bietet sich an, die bei der Probennahme auf bodenkundliche Rasteruntersuchungen und Inventuren, wie z.B. mit der periodisch durchgeführten BZE (BMELF 1997) zurückzugreifen, um Synergien zu nutzen und den Aufwand zur Gewinnung der Proben zu minimieren. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten so als Werkzeug zur Vorhersage skelettbürtiger Nährelementpotenziale bundesweit Eingang in praxisorientierte bodenkundliche Aufnahmeanleitungen wie die BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1994) oder die FORSTLICHE STANDORTSAUFNAHME (1996) finden und vorhandene Standarddaten (z.B. die forstliche Standortskartierung) ergänzen.

5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

War unter Nachhaltigkeit traditionell ein Prinzip oder Mittel zur Bewirtschaftung knapper erneuerbarer Ressourcen zu verstehen, ist die ökologisch nachhaltige Forstwirtschaft heute nicht primär ertragsorientiert, sondern vielmehr bestrebt, funktionierende Waldökosysteme zu erhalten oder zu schaffen. Dies ist eine unabdingbare Voraussetzung auch für die Realisierung der ökonomischen Waldfunktionen (WOLFF 2001). Auf der zweiten Ministerkonferenz zum Schutz der Wälder in Europa 1993 in Helsinki wurden daher Leitlinien für die nachhaltige Waldbewirtschaftung erarbeitet sowie eine, inzwischen auch in das deutsche nationale Forstprogramm (BMVEL 2000) übernommene Definition von „Nachhaltigkeit“ beschlossen (Resolution H1): „Nachhaltige Waldbewirtschaftung ist die Betreuung und Nutzung von Wäldern und Waldflächen auf eine Weise und in einem Ausmaß, dass deren biologische Vielfalt, Produktivität, Verjüngungsfähigkeit und Vitalität erhält sowie deren Potenzial, jetzt und in Zukunft die entsprechenden ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Funktionen auf lokaler, nationaler und globaler Ebene zu erfüllen, ohne anderen Ökosystemen Schaden zuzufügen.“

Ausgangspunkt für die künftige Waldforschung ist also ein Nachhaltigkeitskonzept, das alle Leistungen und Funktionen des Waldes beinhaltet. Eine umfassend definierte Nachhaltigkeit zu optimieren, erfordert fachliches Wissen, Konzepte und Umsetzung durch die Forstwirtschaft.

Die Tatsache, dass das Bodenskelett geochemisch relevante Austauschereigenschaften besitzt, sollte zukünftig bei der nachhaltigen forstlichen Bewirtschaftung von Waldökosystemen Beachtung finden. So könnte dieses Wissen in die waldbauliche Praxis im Sinne des von RADEMACHER et al. (1999) vorgeschlagenen „Nachhaltigen Nährstoffmanagements“ einfließen, nämlich über eine besonders humusschonende Bewirtschaftung mit Förderung von Baumarten mit leicht zersetzbarer Streu und tiefer Durchwurzelung. Auf diese Weise kann das Nährstoffpotenzial des Skeletts genutzt, erhalten und gegebenenfalls erhöht werden. Z.B. bewirkt die Wiedereinführung von Bergahorn, Linde, Buche und Tanne im Zuge der Rückumwandlung reiner Fichtenbestände in aus Laub- und Nadelwald gemischte Wälder einen Anstieg der Basensättigung des Feinbodens (HEITZ 1998). Aufgrund der nachgewiesenen Interaktionen zwischen Fein- und Grobboden (Kap. 4.2.1.2) gilt dieser Sachverhalt langfristig voraussichtlich auch für das Bodenskelett. Bei der Aufstellung von Kalkungskonzepten z.B. skelettreicher Standorte könnte das Speicherpotenzial von Bodensteinen zukünftig in die Überlegungen miteinbezogen werden. Damit könnte ein Beitrag zur Erhaltung der standörtlichen Vielfalt geleistet werden, mit dem Ziel Waldbestände vor der nivellierenden Wirkung der Deposition zu schützen (SCHÜLER 2001, HILDEBRAND 2000 u. 1996).

6. Zusammenfassung

Zur Quantifizierung skelettbürtiger Nährelementpotenziale im Südschwarzwald wurde in Laborversuchen gereinigtes Bodenskelett von 61 Standorten eines regionalen (8x8 km, 31 Probeentnahmen) und eines lokalen Rasters (200x100 m, 30 Probeentnahmen) auf kurz- bis mittelfristige Ionenspeicher- und Ionenmobilisierungspotenziale mittels einer neu entwickelten Methode zur Bestimmung der Wasserdampfadsorption in einem definierten Spannungsbereich sowie der Korngrößenverteilung des Bodenskeletts untersucht. In einem offenen Perkolationsystem wurden unter kontrollierten Wasserspannungen die austauschbaren Kationen extrahiert. Die relative Größe der zum Austausch befähigten Oberflächen wurde durch Wasserdampfadsorption des Skeletts bei pF 4,6 ermittelt. Als Referenz dazu dienten die bei 105° C getrockneten Proben. Durch ein laseroptisches Messgerät wurde die Korngrößenverteilung der Skelettpartikel aller Standorte vermessen. Zusätzlich dazu wurde die Farbe, der Gehalt an dunklen Mineralen, der okular bestimmbare Grad der Verwitterung, das Vorkommen von Feinwurzeln und Rhizomorphen aller Skelettproben sowie der Mineralbestand 11 ausgesuchter Skelettproben röntgendiffraktometrisch untersucht.

Die Ergebnisse der Modellversuche zeigen, dass die ökochemische Bedeutung des Bodenskeletts zur Nährstoffversorgung, insbesondere bei basenarmen, skelettreichen Standorten nicht zu vernachlässigen ist. Eine Quantifizierung des Nährelementpotenzials ergab, dass im Südschwarzwald der skelettbürtige Ca^{2+} -Anteil am Gesamtvorrat (Summe aus Feinboden und Skelett) im Mittel ca. 40%, der Mg^{2+} -Anteil ca. 30% und der K^+ -Anteil ca. 15% beträgt. Das an vielen Standorten des Südschwarzwaldes beobachtete Plausibilitätsdefizit zwischen guten Wachstumsleistungen der stockenden Bestände bei gleichzeitig alarmierendem Niveau der Nährstoffversorgung des Feinbodens kann (unter der begründeten Annahme, dass dieses Nährstoffreservoir pflanzenverfügbar ist) mit der Speicherfunktion der Bodensteine für austauschbar gebundene Nährelemente erklärt werden.

Um eine Interpolation der Austauschereigenschaften des Bodenskeletts auch auf nicht beprobte Areale zu übertragen, wurden aus dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial über multiple Regressionsmodelle belastbare, kausalanalytisch fundierte, stochastische

Pedo-Transferfunktion für die effektive Kationenaustauschkapazität sowie für die Summe austauschbar gebundener M_b -Kationen und Ca^{2+} -Ionen des Skeletts abgeleitet. Dazu erfolgte eine statistische und sachlogische Überprüfung der Beziehungen zwischen dem Nährelementpotenzial der Skelettfraktion und allen anderen Skelett- bzw. Standortmerkmalen. Die meisten Parameter, wie z.B. die Art des Ausgangsgesteins, die Mineralzusammensetzung, die Korngrößenverteilung, okular bestimmbare Gesteinseigenschaften wie der Verwitterungsgrad oder die Farbe, die Jahresmitteltemperatur, die Hangneigung oder die Bestockung eines Standorts erwiesen sich als wenig geeignet zur Prognose des Ernährungspotenzials des Grobbodens. Die Wasserdampfadsorption der Skelettkörner, die Beziehung zwischen feinboden- und skelettbürtigen basischen Kationen und der jährliche standörtliche Niederschlag stellten sich demgegenüber als geeignete Prädiktoren zur Berechnung der Kationenaustauschkapazität des Bodenskeletts heraus. Die dabei erzielte Güte der Anpassung zur Prognose der skelettbürtigen KAK_{eff} betrug 83%, für die Prognose der Summe effektiv austauschbarer M_b -Kationen des Bodenskeletts 52% und für die Prognose der skelettbürtig effektiv austauschbar gebundene Ca^{2+} -Gehalte 36%.

Die entwickelten Pedo-Transferfunktionen stellen ein erstes, praxistaugliches Werkzeug dar, um skelettbürtige Nährelementpotenziale bisher nicht beprobter Standorte im Südschwarzwald vorherzusagen. Damit besteht die Möglichkeit, Austauschereigenschaften des Grobbodens in praxisorientierte Konzepte zur Bewertung des Nährstoffhaushalts in Böden einfließen zu lassen. Darüber hinaus bieten die vorgestellten Regressionsmodelle solide Grundlagen für weitere Modellentwicklungen.

Abstract

In order to quantify the nutrient stock of the skeleton in the southern Black Forest (isolated and purified skeletal fractions of forest soils from a regional 8x8 km, 31 sampling points) and a local grid (200x100 m, 30 sampling points) were laboratory examined and tested for the capacity of cation-storage and potential of ionic mobilization as well as the extent of the capillary volume within a defined suction gradient and the distribution of grain sizes. The exchangeable cations were extracted in an open percolation system under controlled tensions of water. The relative size of the capillary volume of skeletal soil is determined at pF 4.6 through measurement of the water holding capacity. The samples dried at 105° C were used as a reference. The diameter of skeleton particles of every site was measured

with a laser optical measuring device. In addition to that, the colour, the content of dark minerals, the ocular determinable degree of weathering and the occurrence of fine roots and/or fungal rhizomorphae of every skeleton sample were investigated. X-ray-diffraction analysis of the mineral content from 11 selected skeleton samples was determined, too.

The results of the experiments to the nutrient supply proves the conclusion, that the ecological importance of skeleton fraction for sites, poor in basic nutrients and rich in skeleton is remarkable. By quantifying the nutrient element potential, it could be shown, that the skeleton's content of exchangeable basic cations [Σ (Ca, Mg, K)] can exceed the amount of basic cations, held by the fine earth. We think these findings to close the gap of plausibility, which arises in forest soils, if extremely poor nutrient supply of the fine earth is related to normal tree nutrition.

As the surface activ area of the skeletal fraction is known, supplies of exchangeable nutrients per ha in the rooted soil space (0-90 cm depth) could be calculated. By developing pedo-transfer-functions with stochastic relationships between the exchangeable amount of cations and easily measurable site parameters in the southern Black Forest, we are now able to predict the contribution of stones to nutrient-cycling on the spatial scale of regions. Surprisingly no difference could be noticed according to the nature of the parent material (granite, gneiss, triassic sandstone), neither due to CEC nor due to base saturation of the skeleton fraction. The effective cation exchange capacity (CEC_{eff}) of the skeletal fraction in southern Black Forest is reasonably predictable ($r^2=0,83$) if the variables (1) water vapour adsorption of the skeleton at suction difference of pF 4.6 and 105 °C dryness and (2) site specific annual precipitation are considered in a multiple regression modell. Thus models are a first approach to establish causally well-founded pedo-transfer-functions for predicting the skeleton nutrient stock with the aid of easily measurable site parameters.

LITERATURVERZEICHNIS

AG BODENKUNDE (1965-1996): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Aufl., ber. Nachdr. Stuttgart: Schweizerbart, 392 S.

ARBEITSKREIS STANDORTKARTIERUNG (1996): Forstliche Standortaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (Hrsg.), IHW-Verlag Eching, 352 S.

AUGUSTIN, S.; BÜTTNER, G. (1997): Auswertung der Waldschadensforschungs-Ergebnisse (1982-1992) zur Aufklärung komplexer Ursache-Wirkungsbeziehungen mit Hilfe systemanalytischer Methoden. In: Forstbodenkunde. Ber. Umweltbundesamt 6, Erich-Schmidt Verlag Berlin, 148-227.

BACKHAUS, K. (2000): Multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung, 9. überarb. und erw. Aufl., Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 661 S.

BARNHISEL, R.I.; BERTSCH P.M. (1989): Minerals in soil environments. Soil Sci. Soc. Am., Madison (Wisc.), 537-623.

BANZHAF, E. (1994): Die Regionalisierung der Wärmebelastung in Mainfranken anhand von Geofaktoren. In: Goßmann H. (Hrsg): Freiburger Geographische Hefte 43, 109 S.

BECHER, G. (1999): Waldzustandsanalyse mit multivariaten Verfahren: theoretische Grundlagen und Anwendungen, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 312 S.

BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: KLEEBERG, H. B. (Hrsg.): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung. DFG, Weinheim, 16-32.

BELL, M.A.; VAN KEULEN, H. (1995): Soil pedotransfer functions for four mexican soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 59, 865-871.

BILLET, M.E.; PARKER-JEWIS, F.; FITZPATRICK, E.A.; CRESSER, M.S. (1990): Forest soil chemical changes between 1949/50 and 1987. J.SoilSci. 41, 133-145.

- BLENNOW, K.; PERSSON P. (1998): Modelling local-scale frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agricultural and Forest Meteorology* 89, 59-71.
- BLOCK, J.; BOPP, O.; GATT, M. (1991): Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz, Mitt. d. FVA Rheinland-Pfalz, Heft 17, 237-241.
- BLOCK, J.; EICHHORN, J.; GEHRMANN, J.; KÖLLING, C.; MATZNER, E.; MEIWES, K.J.; WILPERT, K. v.; WOLFF, B. (2000): Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotenzials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Dauerbeobachtungsflächen. BMVEL (Hrsg.), Bonn.
- BMELF (1994): Bund-/Länderarbeitsgruppe BZE: Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) Arbeitsanleitung. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.), 158 S.
- BMELF (1997): Dauerbeobachtungsflächen zur Umweltkontrolle im Wald. Level II – Erste Ergebnisse. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.), 148 S.
- BMELF (1999): Bericht über den Zustand des Waldes 1999, BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.), Bonn.
- BMELF (2000): Nationales Forstprogramm Deutschland - Ein gesellschaftspolitischer Dialog zur Förderung nachhaltiger Waldbewirtschaftung im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.), Bonn.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, E. (1958): Gases in multimolecular layers. *J. Amer. Chem. Soc.*; 60, 309-319.
- BOSCH, C.; PFANNKUCH, E.; BAUM, U.; REHFUESS, K.-E. (1983): Über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayrischen Waldes. *Forstwi. Cbl.* 102, 167-181.

- BOSCH, C. (1986): Einfluß einer Düngung mit Magnesium und Calcium, von Ozon und saurem Nebel auf Frosthärte, Ernährungszustand und Biomasseproduktion junger Fichten (*Picea abies* Karst.). Forstwiss. Centralblatt 105, 218-229.
- BOUMA, J. (1989): Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science* 9 177-213.
- BUBERL, H.G.; WILPERT, K. v.; TREFZ-MALCHER, G. und HILDEBRAND, E.E. unter Mitarbeit von WIEBEL, M. (1994): Der chemische Zustand von Waldböden in Baden-Württemberg, Mitt. d. FVA Baden-Württemberg, Heft 182, 99 S.
- BURROUGH, P.A. (1993): Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers*, 56/5, 529-560.
- BURROUGH, P.A.; McDONNELL, R.A. (1998): *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford, 333 S.
- CHAMPION, R.A.; BARLEY, K.P. (1969): Penetration of clay by root hairs. *Am. J. Soil Sci.* 108, 402-407.
- COOK, R.D. (1979): Influential observations in linear regression. *Journal of American Statistical Association* 74, 169-174.
- CRAWFORD, J.W.; RITZ, K.; YOUNG, I.M. (1993): Quantifikation of fungal morphology, gaseous and microbial dynamics in soil: An integrated framework utilising fractal geometry. *Geoderma* 56, 173-178.
- CRITELLI, S.; DI NOCERA, S.; LE PERA E. (1991): Approccio metodologico per la valutazione petrografica del grado di alterazione degli gneiss del massiccio silano (Calabria settentrionale). *Geol. Appl. Idrogeol.* 26, 41-70.
- CURRIE, W.S.; ABER, J.D.; DRISCOLL, C.T. (1999): Leaching of nutrient cations from the forest floor: effects of nitrogen saturation in two long-term manipulations, *Can.J.For.Res.* Vol. 29, 609-620.
- DEUTSCHMANN, G. & LUDWIG, B. (2000): Exchangeable cations in rock fractions and fine earth in soil profiles of different genesis. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 183-189.

- DIETRICH, H.-P.; RIEK, W.; BLOCK, H.J.; KALLWEIT, R.; LEUBE, F.; RADEMACHER, P. (2001): Die Ernährung der Hauptbaumarten an den Level II Standorten – Beurteilung von Ernährungsstörungen und Einordnung der Befunde, Arbeitskreis –D der Bund/Länder AG, Level II.
- DI GLERIA, J.; KLIMES-SZMIK, A.; DVORACSEK, M. (1962): Bodenphysik und Bodenkolloidik. Fischer-Verlag Jena, 795 S.
- DUVENHORST, J. (2001): Ecological conversion of forests dominated by Norway spruce – Possibilities and consequences from an interdisciplinary point of view, Proceedings of the International Conference Forest Research: A Challenge For an Integrated European Approach', Vol. 1, 37-42.
- ELLENBERG, H.; WEBER, H.E.; DÜLL, R.; WIRTH, V.; WERNER, W.; PAULISSEN, D. (1991): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobot. 18, Göttingen, 248 S.
- EVERS, F.H. (1979): Über bleibende Differenzierungen im Mineralstoffgehalt der Nadeln bei verschiedenen Klonen der Fichte (*Picea abies* Karst.). Mitt. Ver. Forstl. Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung 27, 60-74.
- EVERS, F.H. (1994): Magnesiummangel, eine verbreitete Erscheinung in Waldbeständen – Symptome und analytische Schwellenwerte. Mitt. Ver. Forstl. Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung 37, 7-16.
- FAHRMEIR, L. (2003): Statistik : der Weg zur Datenanalyse, 4. verb. Aufl., Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 608 S.
- FELBERMEIER, B. (1994): Die klimatische Belastbarkeit der Buche. Forstw. Cbl. 113, 152-174.
- FEGER, K.H. (1997): Biogeochemistry of magnesium in forest ecosystems. In: HÜTTL, F.; SCHAAF, W. (eds.): Magnesium Deficiency in Forest-Ecosystems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 67-99.
- FIEDLER, H.J.; HOFMANN, W.; HUNGER, W.; MAI, H.; NEBE, W. (1976): Aktuelle Fragen der Bodenfruchtbarkeit in Fichtenbeständen. Arch. Acker, Pflanzenbau u. Bodenkunde 20, Berlin, 681-693.

- FOHRER, N.; GÖBEL, B.; HAVERKAMP, S.; BASTIAN, P.; FREDE, H.G. (1999): Regionalisierungsansätze bei der GIS-gestützten Modellierung des Landschaftswasserhaushaltes im SFB 299: Landnutzungskonzepte für periphere Regionen. In: STEINHARDT, U.; VOLK, M. (eds.): Regionalisierung in der Landschaftsökologie. Forschung – Planung – Praxis, Teubner-Verlag Stuttgart, 96-108.
- FRAZIER, C.S.; GRAHAM, R.C. (2000): Pedogenic Transformation of Fractured Granitic Bedrock, Southern California. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60 2057-2069.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1990): Geologische Karte von Baden-Württemberg, 1:25000, 2. verb. Aufl., 1 Karte.
- GERRARD, J. (1994): Weathering of granitic rocks: environment and clay mineral formation. In: Coleman, S.M., Dethier, D.P. (Eds.): Rates of Chemical Weathering of Rock and Minerals, Academic Press, Orlando, 21-40.
- GONCALVES, M.C.; PEREIRA, L.S.; LEIJ F.J. (1997): Pedo-transfer functions for estimating unsaturated hydraulic properties of Portuguese soils. *Europ. J. Soil Sci.* 48, 387-400.
- GÖNNERT, T. (1989): Ökologische Bedingungen verschiedener Laubwaldgesellschaften des nordwestdeutschen Tieflandes. *Dissert. Bot* 136, 224 S.
- GÖTTLEIN, P.L.; HEIM, A.; MATZNER, E. (1999): Mobilization of aluminium in the rhizosphere soil solution of growing tree roots in an acidic soil. *Plant and Soil* 211, 41-49.
- GÖTZ, R. (1984): Multivariate Verfahren zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen hydrochemischen, -bakteriologischen und -biologischen Güte Merkmalen. *Vom Wasser* 62, 63-75.
- GRAF, A.; ORTSEIFEN, C. (1995): Statistische und graphische Datenanalyse mit SAS. Spektrum Akad.-Verlag Heidelberg-Berlin-Oxford, 385 S.
- GÜßEFELDT, J. (1997): Grundsätzliche Überlegungen zu Regionalisierungsmodellen, *Geographische Zeitschrift* 45, Heft 1, 1-19.
- HALLBÄCKEN, L. & TAMM, C.O. (1986): Changes in Soil Acidity from 1927 to 1982-84 in a Forest Area of South-West Sweden, *Scan.J.For. Res.* 1, 219-232.

- HALLBÄCKEN, L. (1991): Long Term Changes of Base Cation Pools in Soil and Biomass in a Beech and a Spruce Forest of Southern Sweden, *Z.Pflanzenern.Bodenk.*, 155, 51-60.
- HARRIS, R.C.; ADAMS, J.A. (1966): Geochemical and mineralogical studies on the weathering of granitic rocks. *Am. J. Sci.* 264, 146-173.
- HEINRICH, U. (1994): Flächenhafte Ableitung der Klimaparameter Niederschlag und Temperatur mittels geostatistischer Verfahren. In: Schröder, W. et al.: *Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie*. Vieweg Verlag.
- HEISNER, U.; WILPERT, K. v.; HILDEBRAND, E.E. (2003): Vergleich aktueller Messungen zum Aziditätsstaus südwestdeutscher Waldböden mit historischen Messungen von 1927. *AFJZ* 174, 41-44.
- HEITZ (1998): Umbau von Fichtenreinbeständen in naturnahe Mischwälder – Auswirkungen auf bodenchemischen Zustand und Bioelementhaushalt, Diss. München, 152 S.
- HERTLING, T.H.; KUHN, G.; SCHMOTZ, W. (1995): Verfahren zur regional repräsentativen Untersuchung von Bodenbelastungen. UVP-Report, 3/95, 117-123.
- HILDEBRAND, E.E.; BLUM, W.E. H.; DIETRICH, A.B. (1976): Methodology for sampling and chemical analysis of needles of *Araucaria angustifolia*. *Florestal* 1976, 7: 2, 9-15
- HILDEBRAND, E.E. (1986): Zustand und Entwicklung der Austauschereigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen. *Forstw. Cbl.* 105, 60-76.
- HILDEBRAND, E.E. (1991): Die chemische Untersuchung ungestört gelagerter Waldbodenproben. Methoden und Informationsgewinn. Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung. Forschungsbericht KfK-PEF 85, 201 S.
- HILDEBRAND, E.E. (1994): The Heterogeneous Distribution of Mobile Ions in the Rhizosphere of Acid Forest Soils: Facts, Causes and Consequences. *J. Environ. Sci. Health A* 29(9), 1973-1992.
- HILDEBRAND; E.E. (1996): Warum müssen wir Waldböden kalken? *Agrarforschung in Baden-Württemberg* 26, 53-65.

- HILDEBRAND, E.E. (1999): Vom Punkt zur Fläche – Neue Wege. In: FVA Bden-Württemberg (eds.): Stoffhaushalt vom Punkt zur Fläche; Chemische Trends in Waldböden. Gemeinsames Kolloquium des Arbeitskreises „Waldböden“ der DBG und der Sektion „Wald und Wasser“ im Deutschen Verband Forstlicher Versuchs- und Forschungsanstalten in Freiburg vom 19.-20.4.1999. Berichte Freiburger Forstlicher Forschung 7, 1-6.
- HILDEBRAND, E.E.; SCHACK KIRCHNER, H. (2000): Initial effects of lime and rock powder application on soil solution chemistry in an dystric cambisol – results of model experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, 69-78.
- HOFMANN-SCHIELLE, C.L. (1988): Bodenkundliche Untersuchungen in den Hochlagen des Bayrischen Waldes unter besonderer Berücksichtigung des Mineralkörpers. Diss. Univ. München, 85 S.
- JANSEN, M.; JUDAS, M.; Saborowski, J. (2002): Spatial modelling in forest ecology and management, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 225 S.
- JONGMANS, A.G.; VAN BREEMEN, N.; LUNDSTÖM, U.; van HEES, W.; FINLAY, R.; SRINIVASAN, N.; UNESTAM, T.; GIESLER, R.; MELKERUD, P.A.; OLSON, M. (1997): Rock eating fungi. *Nature* 389, 682-683.
- KLEEBERG, H.B. (Hrsg.) (1992): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung. DFG, Weinheim, 444 S.
- KLEIN, G. (1994): Regionalisierung von Niederschlag mit Hilfe digitaler Geländeinformationen: Entwicklung eines geoökologischen Modells zur routinemäßigen Ableitung hochauflösender Niederschlagskarten. In: Goßmann H. (Hrsg): Freiburger Geographische Hefte 44, 112 S.
- KOHLER, M.; WILPERT, K. v.; HILDEBRAND, E.E. (2000): The soil skeleton as a source for the short-term supply of base cations in forest soils of the Black Forest (Germany). *Water, Air and Soil Pollution* 1222, 37-48.
- KOHLER, M. (2001): Ionenspeicher- und Ionenmobilisierungspotenziale der Skelettfraktion von Waldböden im Schwarzwald. Freiburger Bodenkundl. Abhandlg. Heft 39, 158 S.

- KÖLLING, C. (1999): Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen auf die Wälder Bayerns. Berichte aus der LWF 22, 1-46.
- KÖLLING, C.; WILPERT, K.v. (2000): Kennwerte zum Säurestatus der Bodenlösung. Forstarchiv 71, 49-54.
- KOHLRAUSCH, F. (1996): Praktische Physik, 24. Neubearb. u. erw. Auflage, B.G. Teubner-Verlag Stuttgart, 629 S.
- KUHNT, G. (1989): Die großräumige Vergesellschaftung von Böden - rechnergestützte Erfassung pedogenetischer Zusammenhänge, dargestellt am Beispiel der Bundesrepublik Deutschland. Erdkunde, 43, 170-179.
- LAPLACE (1878): Oeuvres complètes; Publ. sous les auspices de l'Académie des Sciences / Pierre S. de Laplace. - Paris : Gauthier-Villars.
- LASLETT, G.M. & MCBRATNEY, A.B.; PAHL, P.J. & HUTCHISON, M.F. (1987): Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. Journal of Soil Science, 38, 325-341.
- LASLETT, G.M.; MCBRATNEY, A.B. (1990): Estimation and implications of instrumental drift, random measurement, error and nugget variance of soil attributes - a case study for soil pH. Journal of Soil Science, 41, 451-471.
- LIU, J.C. & TRÜBY, P. (1989): Bodenanalytische Diagnose von K- und Mg-Mangel in Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.). Z.Pflanzenernährung.Bodenk. 152, 307-311.
- MÄCKEL, R.; METZ, B.; GENSER, H. (1992): Naturraum des Mittleren und Südlichen Schwarzwaldes und des Oberrheintieflandes, Einführung in das Exkursionsgebiet In: MÄCKEL, R.; METZ, B. (Hrsg.): Schwarzwald und Oberrheintiefland: Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau., Freiburger Geographische Hefte, 1-103.
- MARTIN-GARCIA, J.M.; DELGADO, D.; PARRAGA, J.F.; GAMIZ, E.; DELGADO, R. (1999): Chemical, mineralogical and micromorphological study of coarse fragments in mediterranean red soils. Geoderma 90, 23-47.
- MATZNER, E.; MURACH, D. (1995): Soil changes induced by air pollutant deposition and their implication for forests in central Europe. Water, Air and Soil Pollution 85, 63-76.

- McKENZIE, N.J.; RYAN, P.J. (1999): Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89, 67-94.
- MEIWES, K.-J.; KÖNIG, N.; KHANNA, P.K.; PRENZEL, J.; ULRICH, B. (1984): Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralböden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Univ. Göttingen* 7, 67 S.
- METZ, R. & REIN, G. (1958): Erläuterungen zur geologisch-petrographischen Übersichtskarte des Südschwarzwaldes. *Moritz Schauenburg-Verlag Lahr/Schwarzwald*, 134 S.
- MIEHLICH, G. (1976): Homogenität, Inhomogenität und Gleichheit von Bodenkörpern. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 5, 597-609.
- MICHAEL, G. (1990): Vorstellungen über die Regulation der Wurzelhaarbildung. *Kali-Briefe (Büntehof)* 20, 411-429.
- MISRA, R.K.; ALSTON, A.M.; DEXTER, R.A. (1988): Role of root hairs in phosphorus depletion from a macrostructured soil. *Plant and Soil* 107, 11-18.
- MÖLLER, H. (1987): Beziehungen zwischen Vegetation und Humuskörper in der Eilenriede (Hannover), einem Stadtwald mit menschlich beeinflussten Böden. *Tuexenia* 7, 427-446.
- MONGELLI, G.; CULLERS, R. L.; DINELLI, E.; ROTTURA, A. (1998): Elemental mobility during weathering of exposed lower crust: the kinzigitic paragneiss from the Serre, Calabria, southern Italy. *Terra Nova* 10, 190-195.
- NEWMANN, A.C.D. (1987): *Chemistry of clays and clay minerals*. Min.Soc. London, 308 S.
- NEBE, W.; FIEDLER, H. J.; ILGEN, G.; HOFFMANN, W. (1987): Immissionsbedingte Ernährungsstörungen der Fichte (*Picea abies* Karst.) in Mittelgebirgslagen. *Flora* 179, 453-462.
- NEBE, W. & HOFMANN, W. (1982): Der Gesamt-Ca-Gehalt des Bodens als wesentliche Fruchtbarkeitskennziffer forstlicher Standorte. *Arch. Naturschutz und Landschaftsforschung Berlin* 22, 19-25.

- NIEDERBERGER, J. (2000): Räumliche Interpolation von Niederschlag und Klimadaten. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, 105 S.
- POSCH, M.; HETTELINGH, J.-P.; DE SMET, P.A.M.; DOWNING, R.J. (1997): Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. Status Report, Nat. Inst. Of Publ. Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands, 212 S.
- PRETZSCH, H.; DURSKY, J.; POMMERING, A.; FABRIKA, M. (2000): Waldwachstum unter dem Einfluss großregionaler Standortveränderungen. Forst und Holz 55, Nr. 10, 307-313.
- RADEMACHER, P.; Buß, B.; MÜLLER-USING, B. (1999): Waldbau und Nährstoffmanagement als integrierte Aufgabe in der Kiefernwirtschaft auf armen pleistozänen Sanden. Forst und Holz 54, 330-335.
- RASPE, S.; FEGER, K.-H.; ZÖTTL, H.-W. (1998): Ökosystemforschung im Schwarzwald – Auswirkungen von atmosphärischen Einträgen und Restabilisierungsmaßnahmen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Fichtenwäldern. Verbundprojekt ARINUS, ecomed-Verlags AG Landsberg, 553 S.
- REHFUESS, K.E.; BOSCH, C. (1986): Experimentelle Untersuchungen zur Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) auf sauren Böden der Hochlagen: Arbeitshypothese und Versuchsplan. Forstwiss. Centralblatt. 105, 201-206.
- RIEK, W.; WOLFF, B. (1998a): Magnesiumversorgung von Fichtenbeständen im Ursachenkomplex „neuartige Waldschäden“ – Erste Ergebnisse der integrierenden Auswertung bundesweiter Waldzustandsinventurdaten. Forst und Holz 53, 471-476.
- RIEK, W.; WOLFF, B. (1998b): Integrierende Auswertung bundesweiter Boden-, Kronenzustands- und Baumernährungsdaten - Möglichkeit zur multifaktoriellen Beurteilung des Waldzustandes. AFZ/Der Wald 10, 511-513.
- RIVARD, R.; DE KIMPE, C.R. (1980): Propriétés de quelques sols riches en graviers dans la région de Québec. Can. J. Soil Sci. 60, 263-273.
- ROBINSON, D.A. (1994): Rock weathering and landform evolution, Verlag Chichester Wiley, 519 S.

-
- RODE, A.A. (1959): Das Wasser im Boden, Akademie-Verlag Berlin, 1959, 464 S.
- SACHS, L. (2002): Angewandte Statistik, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 889 S.
- SAS Institut Inc. (1990): SAS/STAT User`s Guide. Vol. 2, Version 6, fourth edition, Cary, North Carolina, USA, 846 S.
- SAS Institut Inc. (1999): SAS/OnlineDoc: version eight. Cary, North Carolina, USA.
- SCHACK KIRCHNER, H.; WILPERT, K.v.; HILDEBRAND, E.E. (2000): The spatial distribution of hyphae in structured forest soils. *Plant and Soil* 224 (2), 195-205.
- SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J. (1998): Database-related accuracy and uncertainty of pe-dottransfer functions. *Soil Science* 163, 765-779.
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum-Verlag Heidelberg-Berlin., 15. Aufl., 593 S.
- SCHMOTZ, W. (1996): Entwicklung und Optimierung von Verfahren zur flächenhaften Erfassung der Schadstoffgehalte in Böden. In: ECOSYS – Beiträge zur Ökosystemforschung 17, Kiel.
- SCHOFIELD, R.K. (1935): The pF of the water in soil, Third Intern. Congr. of Soil Science, Vol 2.
- SCHÖNHAR, S. (1955): Untersuchungen über das mengenmäßige Auftreten von Nitrat- und Ammoniumstickstoff in Böden verschiedener Waldstandorte. *Forstwissensch. Centralblatt*. 74, 129-145.
- SCHÖNHAR, S. (2000): Untersuchungen über das ökologische Verhalten von Gefäßpflanzen und Moosen der Waldbodenvegetation in Südwestdeutschland. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 172, 2,34-39.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, 3. verb. und erw. Aufl., Borntraeger-Verlag Berlin Stuttgart, 298 S.

SCHUEMER, R.; STRÖHLEIN, G.; GOGOLOK, J. (1990): Datenverarbeitung und statistische Auswertung mit SAS. Band 2: Komplexe statistische Analyseverfahren, Gustav-Fischer-Verlag Stuttgart-New York, 437 S.

SCHÜLER, G (2001): Schutz versauerter Böden in nachhaltig bewirtschafteten Wäldern – Ergebnisse aus 10-jähriger interdisziplinärer Forschung. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 173 (1), 1-7.

SHAW, G.; WHEELER, D. (1984): Statistical techniques in geographical analysis. Chichester, Wiley, 364 S.

SPIECKER, H. (1996): Growth trends in European Forests. Proceedings IUFRO Conference, Bergießhübel/Dresden Sept. 23-27: 228-236.

SPIECKER, H.; MIELIKÄINEN, K.; KÖHL, M.; SKOVSGAARD, J. (1996): Growth trends in European Forests. Studies from 12 countries. EFI Research Report 5, Springer-Verlag Berlin, 372 S.

STAHR, K. (1979): Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standorteigenschaften im Südschwarzwald. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen 9, 273 S.

SZIBALSKI, M. (2000): Großmaßstäbliche Regionalisierung labiler Bodenkennwerte in standörtlich hochdiversen Kulturlandschaften, Diss. Universität Gießen, 160 S.

THOMAS, M. D. (1921): Aqueous vapor pressure of soils, Soil Science Vol. 11.

TIETJE, O.; TAPKENHINRICHS, K. (1993): Evaluation of pedotransfer functions. Soil Sci. Soc. Am. J. 65, 869-878.

UGOLINI, F.; CORTI, G.; AGNELLI, A.; PICCARDI, F. (1996): Mineralogical, physical and chemical properties of rock fragments in soil. Soil Science 161 Vol. 8, 521-542.

ULRICH, B.; MEYER, H.; JÄNICH, K.; BÜTTNER, G. (1989): Basenverluste in den Böden von Hainsimsen-Buchenwäldern in Südniedersachsen zwischen 1954 und 1986, Forst und Holz 44, 10, 251-253.

ULRICH, B. (1991): Folgerungen aus 10 Jahre Waldökosystem- und Waldschadensforschung. Forst und Holz 46, 21, 3-12.

- ULRICH, B. (1993): Prozeßhierarchie in Waldökosystemen, *Biologie in unserer Zeit* 23, 5, 322-329.
- ULRICH, B. (1999): Entwicklungsprognosen für Waldökosysteme aus der Sicht der Hierarchietheorie. *Forstw. Cbl.* 118, 118-126.
- VAN BREEMEN, N.; LUNDSTRÖM, U.; JONGMANS, A.G. (2000a): Do plants drive podzolization via rock-eating mycorrhizal funghi? *Geoderma* 94, 163-171.
- VAN BREEMEN, N.; FINLAY, R.; LUNDSTRÖM, U.; JONGMANS, A.G.; GIESLER, R.; OLSSON, M. (2000b): Mycorrhizal weathering: A true case of mineral plant nutrition? *Biogeochemistry* 49, 53-67.
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980): A closed-form equation für predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- VEERHOFF, M.; ROSCHER, S.; BRÜMMER, G. (1996): Ausmass und ökologische Gefahren der Versauerung von Böden unter Wald. Forschungsbericht 107 02 004/14 des UBA, Berichte 1/96, Erich Schmidt Verlag Berlin, 364 S.
- VENT-SCHMIDT, V. (1985): A regression model for the calculation of the spatial distribution of mean air temperatures using an orographic data base. *Meteorologische Rundschau* 38 (6). 185-187.
- VERECKEN, H. (1992): Derivation and validation of pedotransfer functions for soil hydraulic properties. In VAN GENUCHTEN et al.: *Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. University of California, Riverside, C.A. 473-488.
- WAGNER, G. (1995): Basis approaches and methods for quality assurance and quality control in sample collection and storage for environmental monitoring. *The science of the total environment*, 176, 63-71.
- WANG, Z.; GÖTTLEIN, A.; BARTONEK, G. (2000): Effects of growing roots of Norway spruce (*Picea abies Karst.*) and European beech (*Fagus sylvatica L.*) on rhizosphere soil solution chemistry. *J.Plant Nutr. Soil Sci.* 164, 35-41.

- WEBSTER, R. (1985): Quantitative Spatial Analysis of Soil in the Field. In: STEWART B. A. (eds.): *Advances in Soil Science*. Springer-Verlag New York-Berlin-Heidelberg-Tokyo, Volume 3, 1-70.
- WEBSTER, R. & OLIVER, M.A. (1990): *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford University Press, New York.
- WHITE, A.F. (1995): Chemical weathering rates of silicate minerals. *Reviews in mineralogy* 31, Mineralogical Society of America, Washington DC, 583 S.
- WILPERT, K.v.; KOHLER, M.; ZIRLEWAGEN, D. (1996): Die Differenzierung des Stoffhaushalts von Waldökosystemen durch die waldbauliche Behandlung auf einem Gneis-Standort des Mittleren Schwarzwaldes. *Mitteilungen der Forstl. Vers. Und Forschungsanst. Baden-Württemberg* 197, 1-94.
- WIMMENAUER, W.; SCHREINER, A. (1981): Erläuterungen zu Blatt 8114 Feldberg. Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, Stuttgart.
- WOLFF, B. (2001): Kriterien und Indikatoren für die nachhaltige Waldbewirtschaftung – welche Informationen können nationale forstliche Monitoringsysteme beitragen. *Forst und Holz* 55, 473-482.
- ZIRLEWAGEN, D.; KOHLER, M.; WILPERT, K.v. (1997): Die Auswirkungen waldbaulicher Strategien auf die chemischen Eigenschaften der Bodenfestphase. *Mittlg. der Deutsch. Bodenkundl. Gesellschaft*, Band 85, III, 1429-1432.
- ZIRLEWAGEN, D. (2002): Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften, Diss. Universität Freiburg, 154 S.
- ZIMMERLI, S.; SCHÜTZ, M (1995): Zur ökologischen Charakterisierung von Waldgesellschaften am Beispiel des Waldsimen-Buchenwaldes (*Luzula-silvaticae*-Fagetum). *Schweiz. Ztschr. F. Forstwes.* 146, 157-179.
- ZÖTTL, H.W.; MIES, E. (1983): Die Fichtenerkrankungen in den Hochlagen des Südschwarzwaldes. *Allgem. Forst- und Jagdzeitung* 154, 110-114.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen Oktober 1999 und September 2003 am Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Universität Freiburg und wurde im Rahmen des interdisziplinären BMBF-Forschungsprogramm „Zukunftsorientierte Waldwirtschaft“ im Projektverbund „Südlicher Schwarzwald“ finanziell gefördert. Dafür bedanke ich mich hiermit.

Herrn Prof. Dr. Hildebrand danke ich für die Überlassung des Themas, die hervorragende und geduldige fachliche Betreuung sowie den großen Freiraum bei der inhaltlichen Ausgestaltung der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Hermann Buberl, Fabio Lemos und Andreas Beckmann. Sie haben mich bei den körperlich sehr anstrengenden Arbeiten zur Gewinnung der Skelettproben in allerbesten Weise unterstützt. Die zahlreichen anregenden Diskussionen zur ‚feldbodenkundlichen Praxis‘ mit Dir werde ich vermissen, Hermann :-)! !

Stellvertretend für alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Labors und des Sekretariats am Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre möchte ich mich beim Laborleiter Herrn Dr. Peter Trüby herzlich bedanken. Nicht nur für die produktive Zusammenarbeit, sondern vor allem auch für die menschliche Anteilnahme und wohltuende Arbeitsatmosphäre, die einem den Stress mit diversen ‚Computerproblemen‘ hat schnell wieder vergessen lassen.

Auch bei Frau Dr. Augustin, Dr. Raber, Dr. Kohler, Dr. Gärtig und Herrn Hoch sowie Dr. Duvenhorst und Frau Dr. Baumgarten möchte ich mich für zahlreiche Anregungen und Tipps, die zum Entstehen dieser Arbeit beitrugen bedanken.

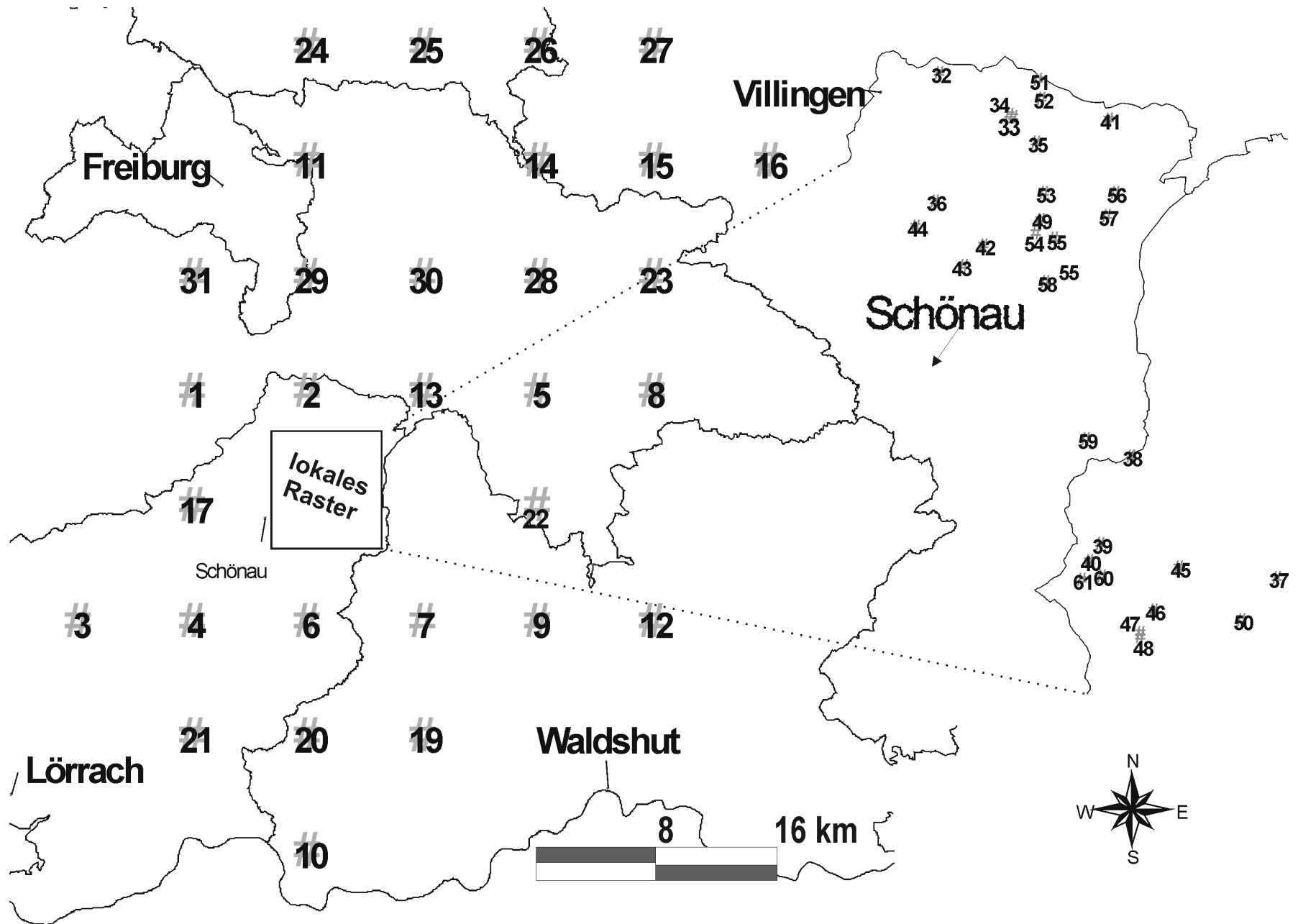
Schließlich möchte ich ganz besonders Latif für die Betreuung unseres Sohnes danken. Du und Tillman, Ihr habt beide viel Geduld gehabt und mir und meiner Arbeit gegenüber enorme Rücksicht aufgebracht, was sicher nicht immer einfach war.

Außerdem haben zahlreiche, hier nicht namentlich erwähnte Personen in vielfältiger Form zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen. Euch allen ebenfalls ein herzliches Dankeschön.

ANHANG

- I. Übersichtskarte der Lage aller Einzelprofile. Sie sind nach chronologischer ID wiederauffindbar (S. 109).
- II. Detailinformationen zu Waldort, geographischer Lage, Höhe über NN, Geländemorphologie, Jahresdurchschnittswerten für Niederschlag und Temperatur, Substrat, Humusform, Kalkungsmaßnahmen u. Standortssiegel der Probenahmeorte aufgelistet (S. 110-113).
- III. Tabelle zu den mineralogischen und röntgendiffraktometrischen Untersuchungsergebnissen (S. 114).
- IV. Graphische Profilbeschreibungen sowie die Tiefenfunktion der M_a - und M_b -Kationen [$\mu\text{mol/g TG}$] von Fein- und Grobböden der Einzelprofile als Vergleichsgrößen (ab S. 115).

(Bei einigen Profilen ist der M_a -Kationen-Gehalt der Feinerde so hoch, dass dieser graphisch nur unter Informationsverlust der anderen Kennwerte hätte abgebildet werden können. Bei diesen Profilen fehlt das verwendete Symbol für M_a -Kationen der Feinerde in der Abbildung.)



ID	Bezeichnung	Forstamt	Rechts-Wert	Hoch-Wert	Höhe (NN)	Exposition	T. (°C./J.)	N.schl. (mm/J.)
1	Regionales Raster 1	Staufen	3412290	5304160	740	West	7,5	1700
2	Regionales Raster 2	Todtnau	3419680	5303820	1160	West	5,9	1785
3	Regionales Raster 3	Kandern	3404037	5287790	855	NordWest	7	1500
4	Regionales Raster 4	Schönau/Schwarzw.	3411650	5287740	800	NordWest	7	1500
5	Regionales Raster 5	Titisee-Neustadt	3436390	5303920	1030	SüdWest	5,8	1200
6	Regionales Raster 6	Schönau/Schwarzw.	3420240	5287650	1020	Nord	6	1700
7	Regionales Raster 8	Todtmoos	3428000	5287990	1000	West	6	1750
8	Regionales Raster 9	Titisee-Neustadt	3443930	5304440	900	NordOst	6	1150
9	Regionales Raster 10	St. Blasien	3436010	5288260	750	West	6	1400
10	Regionales Raster 11	Bad Säckingen	3420190	5271690	520	SüdWest	8,6	1050
11	Regionales Raster 12	Freiburg Stadt	3420090	5319750	670	SüdWest	7	1300
12	Regionales Raster 29	Waldshut-Tiengen	3443830	5288160	830	NordWest	7	1390
13	Regionales Raster 36	Schluchsee	3427990	5303980	1120	NordOst	4,9	1900
14	Regionales Raster 48	Furtwangen	3435980	5320020	850	NordOst	6,1	1600
15	Regionales Raster 49	Furtwangen	3444082	5319755	1050	Süd	5,4	1500
16	Regionales Raster 71	Vill.-Schw. Staat	3452000	5320020	900	Süd	6,2	1050
17	Regionales Raster 132	Schopfheim	3411500	5295292	510	NordWest	6,4	1731
18	Regionales Raster 112	Emmendingen	3420340	5335640	480	NordWest	8,7	1000
19	Regionales Raster 130	Todtmoos	3428000	5280000	810	Ost	6,7	1500
20	Regionales Raster 131	Bad Säckingen	3419930	5279590	520	Nord	9	1400
21	Regionales Raster 134	Schopfheim	3411890	5280310	430	SüdOst	8,9	1154
22	Regionales Raster 137	Schluchsee	3435680	5296400	1150	NordWest	5,7	1500
23	Regionales Raster 138	Stühlingen	3444000	5312000	1020	Süd	5,4	1300
24	Regionales Raster 141	Waldkirch	3420310	5328340	270	West	9,3	1050
25	Regionales Raster 142	Waldkirch	3428140	5327760	900	Nord	6,3	1850
26	Regionales Raster 143	Furtwangen	3435700	5328420	1020	West	5,5	1550
27	Regionales Raster 144	Triberg	3443837	5328171	1015	NordWest	5,5	1480
28	Regionales Raster 145	St. Märgen	3436160	5312340	1000	Süd	5,4	1550
29	Regionales Raster 146	Kirchzarten	3419990	5312090	880	Ost	8,6	1150
30	Regionales Raster 147	Kirchzarten	3428040	5311990	1000	Süd	5,9	1400
31	Regionales Raster 151	Staufen	3412380	5311830	480	West	8,9	1000
32	Lokales Raster 1	Todtnau	3418950	5304600	1130	SüdWest	5,9	1785

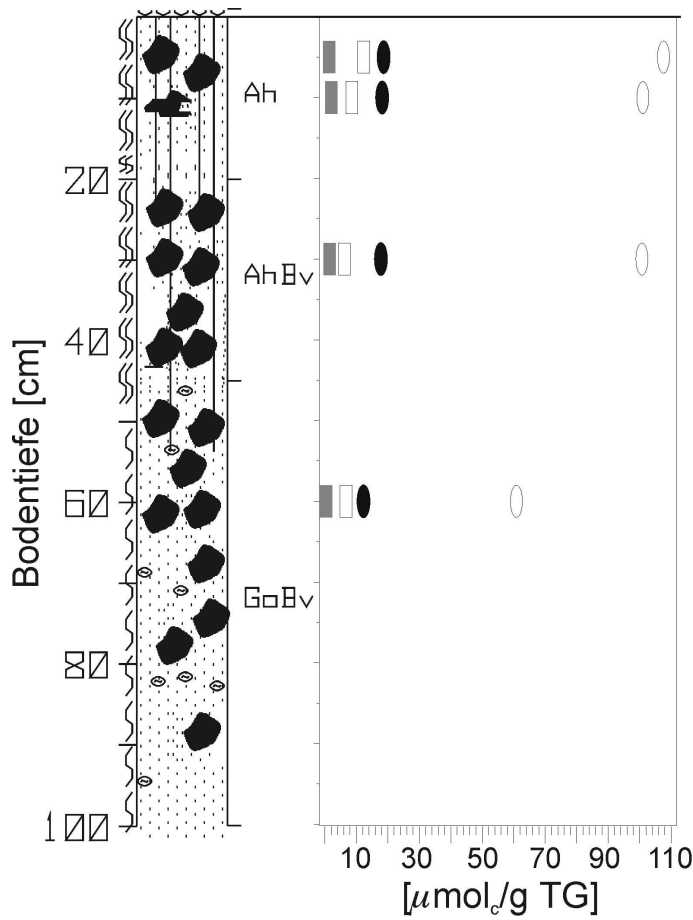
ID	Ausgangsgestein	Humusf.	Kalk.	Standortsiegel
1	dunkle Gneise	mut	1991	Buchen-Traubeneichen-Wald auf mäßig trockenem lehmigem Steinschutt-Sommerhang
2	dunkle Gneise	muf	1996	Buchen-Tannen-Wald auf tiefgründigem Hochlagen-Lehmboden
3	Granite, helle Gneise	muf		Buchen-Tannen-Bergahorn-Wald auf mäßig frischem lehmigem Grusboden
4	Granite, helle Gneise	mut		
5	Granite, helle Gneise	mot		Tannen-Buchen-Wald auf saurem mäßig frischem lehmigem Steinschuttboden
6	Granite, helle Gneise	muf		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmig-grusigem Winterhang
7	Granite, helle Gneise	muf		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Grusboden
8	Granite, helle Gneise	mor		Tannen-Buchen-Wald auf saurem mäßig frischem lehmigem Grusboden
9	Granite, helle Gneise	mut-muf		Buchen-Tannen-Wald auf saurem mäßig frischem lehmigem Steinschutt-Sommerhang
10	Sand- und Schluffgesteine	mou		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem Rötellehm
11	dunkle Gneise	mou-mot		Buchenwald auf mäßig frischem lehmigem Steinschutt-Sommerhang
12	dunkle Gneise	mot-mou		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Grusboden
13	Granite, helle Gneise	mou		Tannen-Fichten-Buchen-Wald auf saurem lehmig-grusigem Hochlagen-Winterhang
14	dunkle Gneise	mor	1992	Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmig-grusigem Winterhang
15	dunkle Gneise	mor-rot		Buchen-Tannen-Wald auf saurem mäßig frischem lehmigem Steinschuttboden
16	Sand- und Schluffgesteine	Wasser		
17	dunkle Gneise	mut	1993	Buchen-Tannen-Wald mäßig trockenem lehmig-grusigem Sommerhang
18	dunkle Gneise	muf-mou	1995	
19	Granite, helle Gneise	rota		
20	dunkle Gneise	muf-muf		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmig-grusigem Winterhang
21	Sand- und Schluffgesteine	muf		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem Sandhang
22	Granite, helle Gneise	mot	1983	Tannen-Fichten-Buchen-Wald auf saurem tiefgründigem Hochlagen-Lehmboden
23	Sand- und Schluffgesteine	rot	1988	Tannen-Fichten-Kiefern-Wald auf stark saurem wechselfeuchtem lehmig-sandigem Boden
24	dunkle Gneise	muf-mou		Buchen-Bergahorn-Wald auf frischem lehmigem Grusboden
25	dunkle Gneise	mot		Buchen-Tannen-Wald auf saurem mäßig frischem lehmigem Steinschutt-Winterhang
26	dunkle Gneise	mot-mor	1989	Traubeneichen-Buchen-Birken-Wald auf saurem mäßig trockenem lehmigem Steinschutt-Sommerhang
27	Granite, helle Gneise	mou-mot	1990	Bergahorn-Eschen-Tannen-Wald auf frischem tiefgründigem Lehmboden
28	dunkle Gneise	mor-mot		
29	Granite, helle Gneise	muf		
30	dunkle Gneise	mut		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmig-grusigem Sommerhang
31	Granite, helle Gneise	muf		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Winterhang
32	dunkle Gneise	muf		Buchen-Tannen-Wald auf saurem tiefgründigem Hochlagen-Lehmboden

ID	Bezeichnung	Forstamt	Rechts-Wert	Hoch-Wert	Höhe (NN)	Exposition	T. (°C./J.)	N.schl. (mm/J.)
33	Lokales Raster 2	Todtnau	3421247	5303227	1200	Ost	5,9	1785
34	Lokales Raster 3	Todtnau	3421131	5303303	1200	SüdWest	5,9	1785
35	Lokales Raster 6	Todtnau	3421957	5302431	1180	West	5,9	1785
36	Lokales Raster 27	Todtnau	3418800	5300600	1120	NordOst	5,9	1785
37	Lokales Raster 72	Todtmoos	3429444	5288871	970	Süd	6	1750
38	Lokales Raster 78	Todtmoos	3424897	5292645	1110	SüdOst	6	1750
39	Lokales Raster 79	Todtmoos	3423960	5289933	940	Süd	6	1750
40	Lokales Raster 83	Todtmoos	3423600	5289400	940	Süd	6	1750
41	Lokales Raster 85	Todtnau	3424221	5303148	1210	Ost	5,9	1785
42	Lokales Raster 90	Todtnau	3420311	5299216	840	NordOst	5,9	1785
43	Lokales Raster 93	Todtnau	3419700	5298600	1000	Ost	5,9	1785
44	Lokales Raster 94	Schönau/Schwarzw.	3418207	5299822	860	West	6,9	1650
45	Lokales Raster 100	Todtmoos	3426400	5289200	1080	West	6	1750
46	Lokales Raster 105	Todtmoos	3425614	5287866	910	NordWest	6	1750
47	Lokales Raster 106	Todtmoos	3425202	5287151	940	West	6	1750
48	Lokales Raster 107	Todtmoos	3425204	5287038	950	West	6	1750
49	Lokales Raster 131	Todtnau	3422084	5300028	695	SüdWest	5,9	1785
50	Lokales Raster 141	Todtmoos	3428350	5287552	940	West	6	1750
51	Lokales Raster 146	Todtnau	3422017	5304379	1290	SüdWest	5,9	1785
52	Lokales Raster 147	Todtnau	3422135	5303793	1275	NordWest	5,9	1785
53	Lokales Raster 149	Todtnau	3422205	5300850	1130	West	5,9	1785
54	Lokales Raster 150	Todtnau	3421945	5299622	770	Nord	5,9	1785
55	Lokales Raster 151	Todtnau	3422511	5299447	790	Nord	5,9	1785
56	Lokales Raster 153	Todtnau	3424420	5300866	1095	NordWest	5,9	1785
57	Lokales Raster 154	Todtnau	3424150	5300141	880	Süd	5,9	1785
58	Lokales Raster 168	Todtnau	3422255	5298091	1010	SüdOst	5,9	1785
59	Lokales Raster 169	Todtnau	3423515	5293198	1030	NordWest	5,9	1785
60	Lokales Raster 172	Todtmoos	3424004	5288925	940	Nord	6	1750
61	Lokales Raster 173	Todtmoos	3423379	5288813	1030	NordWest	6	1750

ID	Ausgangsgestein	Humusf.	Kalk.	Standortsiegel
33	dunkle Gneise	mor	1995	Buchen-Tannen-Wald auf tiefgründigem Hochlagen-Lehmboden
34	dunkle Gneise	rot	1995	Buchen-Tannen-Wald auf tiefgründigem Hochlagen-Lehmboden
35	dunkle Gneise	mot	1994	Buchen-Tannen-Wald auf lehmigem Steinschutt-Hochlagen-Sommerhang
36	dunkle Gneise	mou		Buchen-Tannen-Wald auf lehmig-grusigem Hochlagen-Winterhang
37	Granite, helle Gneise	mor	1992	Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Hochlagen-Sommerhang
38	Granite, helle Gneise	motr		Buchen-Tannen-Wald auf lehmig-grusigem Hochlagen-Sommerhang
39	Granite, helle Gneise	mor		Buchen-Tannen-Wald auf lehmigem Hochlagen-Sommerhang
40	Granite, helle Gneise	mou		Buchen-Tannen-Bergahorn-Wald auf tiefgründigem Hochlagen-Lehmboden
41	dunkle Gneise	mor	1994	Buchen-Tannen-Bergahorn-Wald auf lehmigem Steinschutt-Hochlagen-Winterhang
42	dunkle Gneise	mot		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Steinschutt-Winterhang
43	dunkle Gneise	mota		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig trockenem lehmigem Steinschutt-Winterhang
44	dunkle Gneise	mota		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmig-grusigem Sommerhang
45	Granite, helle Gneise	muf	1999	Buchen-Tannen-Wald auf saurem mäßig frischem lehmigem Grusboden
46	Granite, helle Gneise	motr		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmig-grusigem Winterhang
47	Granite, helle Gneise	mor		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Steinschuttboden
48	Granite, helle Gneise	mor		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Steinschuttboden
49	dunkle Gneise	motr		Buchen-Tannen-Bergahorn-Wald auf frischem lehmigem Steinschutt-Sommerhang
50	Granite, helle Gneise	mota	2000	Buchen-Tannen-Wald auf lehmigem Hochlagen-Sommerhang
51	dunkle Gneise	muf	1995	Buchen-Tannen-Wald auf tiefgründigem Hochlagen-Lehmboden
52	dunkle Gneise	motr	1995	Buchen-Tannen-Wald auf tiefgründigem Hochlagen-Lehmboden
53	dunkle Gneise	mota		Buchen-Eichen-Tannen-Wald auf saurem Hochlagen-Steinschuttboden
54	dunkle Gneise	mor	1997	Buchen-Tannen-Wald auf saurem mäßig frischem lehmig-grusigem Winterhang
55	dunkle Gneise	muf	1997	Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmig-grusigem Winterhang
56	dunkle Gneise	muf		Buchen-Tannen-Wald auf lehmigem Steinschutt-Hochlagen-Winterhang
57	dunkle Gneise	mota		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Steinschutt-Sommerhang
58	Granite, helle Gneise	mota		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmig-grusigem Sommerhang
59	Granite, helle Gneise	muf		Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmig-grusigem Winterhang
60	Granite, helle Gneise	muf		Buchen-Tannen-Bergahorn-Wald auf frischem lehmigem Steinschutt-Winterhang
61	Granite, helle Gneise	muf	1991	Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Hochlagen-Winterhang

Tabelle zu den mineralogischen und röntgendiffraktometrischen Untersuchungsergebnissen (Tonmineralogisches Büro, Dr. R. Butz-Braun)

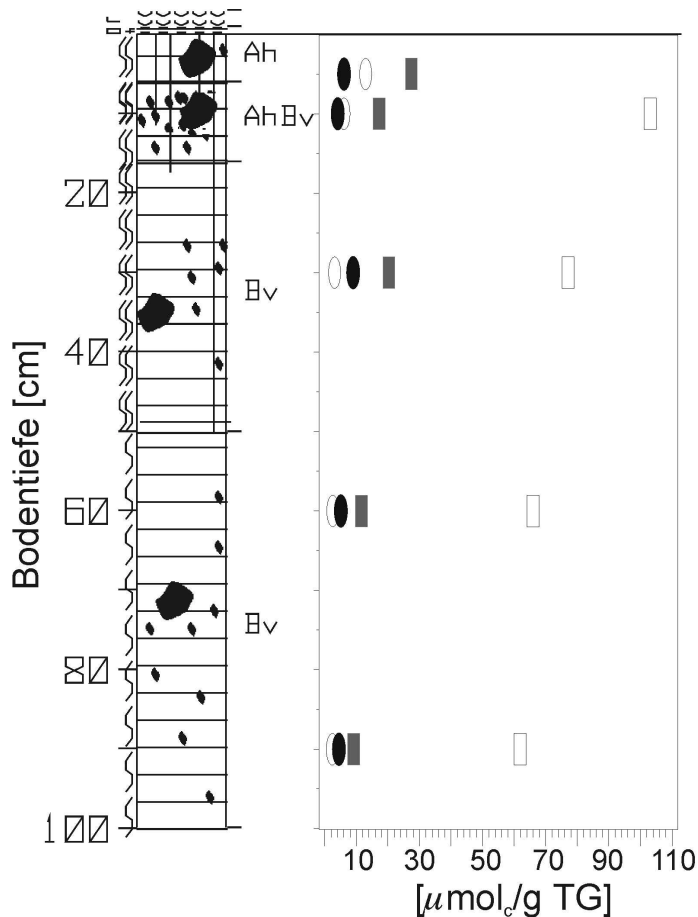
Raster	Ort	Tiefenstufe	Substrat	Smectit	Vermiculit	Aluminium-Vermiculit	Wechsellagen Illit/Vermiculit	Illit	Kaolinit	Chlorid
BZE	2	10-30 cm	dkl. Gneise		8		5	74	5	5
BZE	2	30-60 cm	dkl. Gneise		8		3	79	3	5
BZE	2	60-90 cm	dkl. Gneise		5		3	80	3	7
BZE	12	10-30 cm	dkl. Gneise		5			75	2	10
BZE	12	30-60 cm	dkl. Gneise		2			76	1	15
BZE	12	60-90 cm	dkl. Gneise		3			73		20
BZE	112	10-30 cm	dkl. Gneise		2			74	8	5
BZE	112	30-60 cm	dkl. Gneise		1			76	5	9
BZE	112	60-90 cm	dkl. Gneise		1			77	4	8
BZE	131	10-30 cm	dkl. Gneise					52	8	30
BZE	131	30-60 cm	dkl. Gneise					55	8	31
BZE	131	60-90 cm	dkl. Gneise					54	6	36
BZE	29	10-30 cm	dkl. Gneise, Plutonite , Hangschutt				1	80	6	6
BZE	29	30-60 cm	dkl. Gneise, Plutonite , Hangschutt				1	80	6	7
BZE	29	60-90 cm	dkl. Gneise, Plutonite , Hangschutt				4	76	6	8
BZE	9	10-30 cm	Plutonite	6		10		72	10	2
BZE	9	30-60 cm	Plutonite		6	10		73	10	1
BZE	9	60-90 cm	Plutonite		6	10		71	12	1
BZE	10	10-30 cm	Plutonite		7			73		15
BZE	10	30-60 cm	Plutonite		2			76		20
BZE	10	60-90 cm	Plutonite		2			75		20
BZE	130	10-30 cm	Plutonite					74	6	20
BZE	130	30-60 cm	Plutonite					80	5	15
BZE	130	60-90 cm	Plutonite					70	7	23
BZE	138	10-30 cm	Sandstein					88	12	
BZE	138	30-60 cm	Sandstein					93	7	
BZE	138	60-90 cm	Sandstein					92	8	
BZE	11	10-30 cm	Verwitterungslehm, Rotliegendes					95	5	
BZE	11	30-60 cm	Verwitterungslehm, Rotliegendes					99	1	
BZE	11	60-90 cm	Verwitterungslehm, Rotliegendes					100		
BZE	8	10-30 cm	Moräne		21			65	4	10
BZE	8	30-60 cm	Moräne		15			65	5	15
BZE	8	60-90 cm	Moräne		7			66	4	23



Regionales Raster 1

FA Stäufen

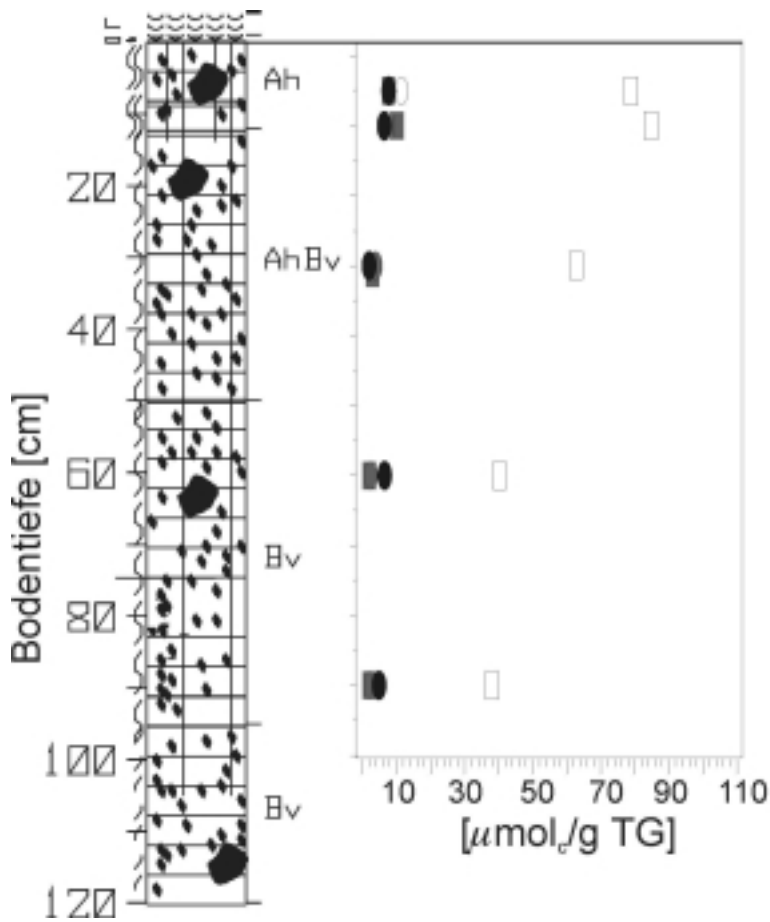
- L-Material
- mittel - stark humos
- sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Sand
- mittel - stark durchwurzelt
- schwach durchwurzelt
- Redoxfleckung
- Steine > 63 mm
- Bodentyp: Hangoles - Braunerde**
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 2

FA Todtnau

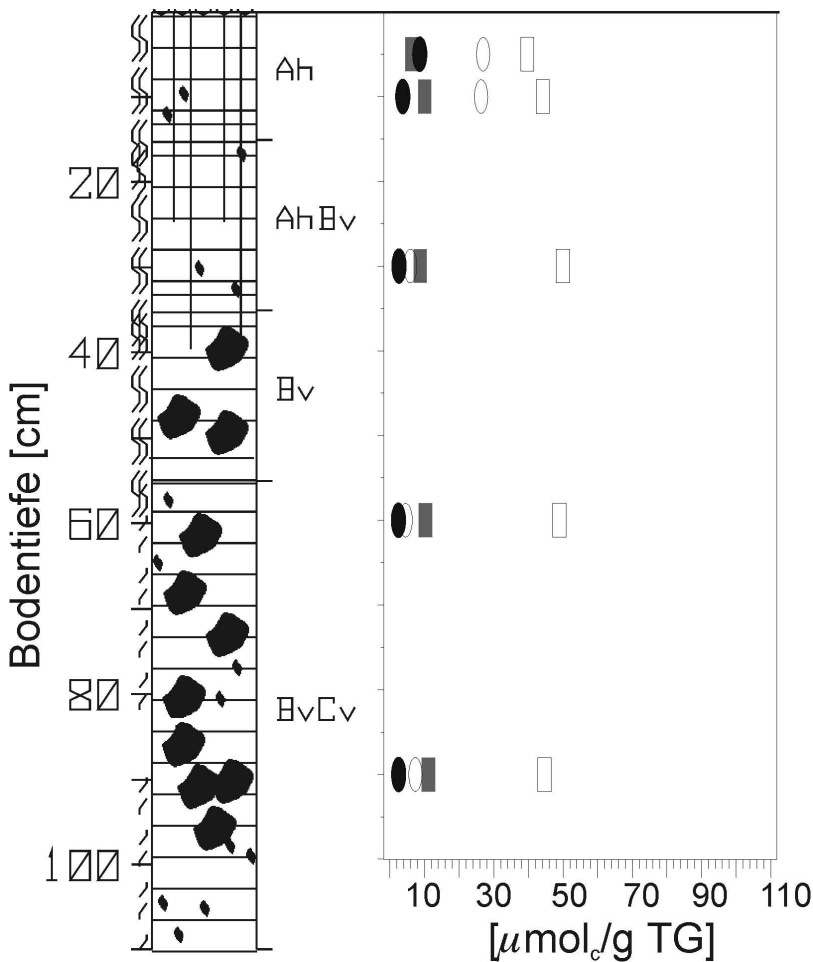
- L-Material
- Of-Material
- mittel - stark humos
- sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Lehm
- mittel - stark durchwurzelt
- schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde**
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 3

FA Kandern

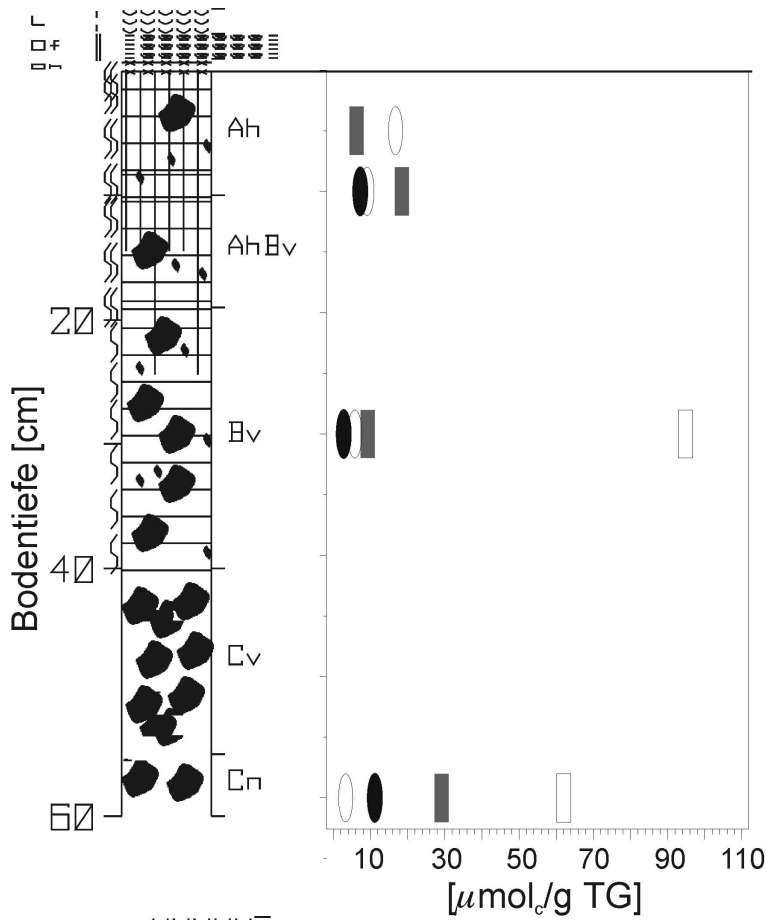
- L-Material
- Of-Material
- mittel - stark humos
 - sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Lehm
- mittel - stark durchwurzelt
 - schwach durchwurzelt
 - sehr schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde**
- Feinerde saure Kationen
 - Stein saure Kationen
 - Feinerde basische Kationen
 - Stein basische Kationen



Regionales Raster 4

FA Schoenau/Schwarzwald

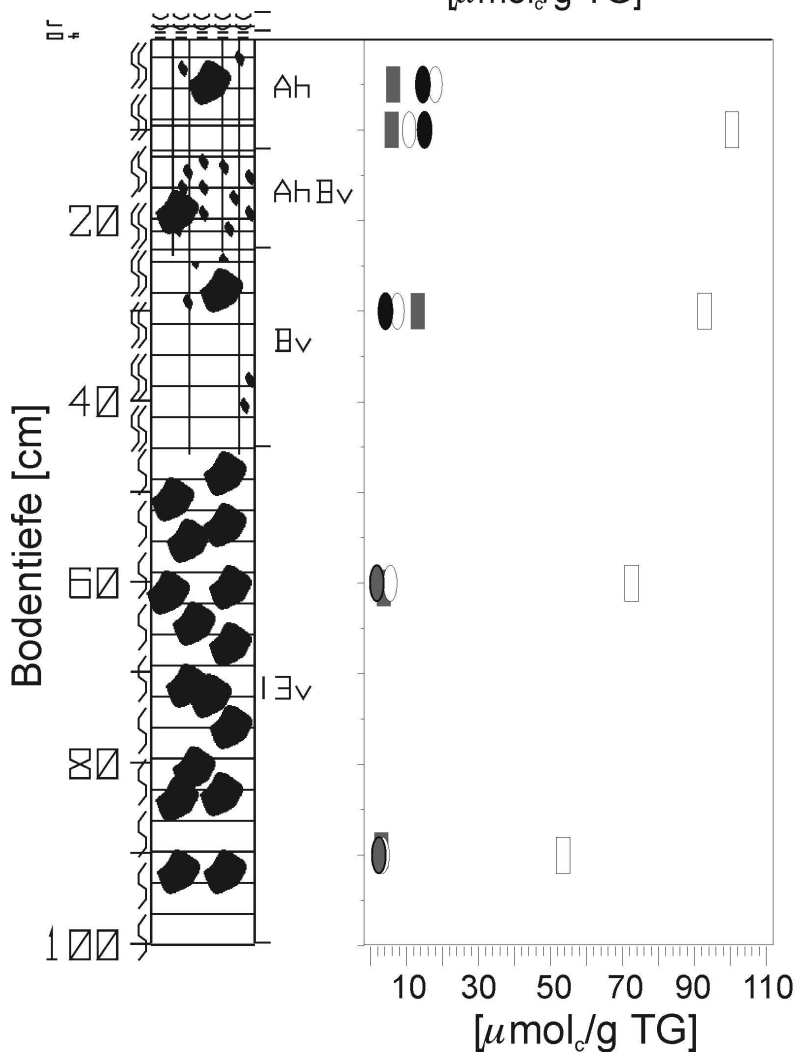
- L-Material
- Of-Material
- mittel - stark humos
 - sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Lehm
- mittel - stark durchwurzelt
 - sehr schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde**
- Feinerde saure Kationen
 - Stein saure Kationen
 - Feinerde basische Kationen
 - Stein basische Kationen



Regionales Raster 5

FA Titisee-Neustadt

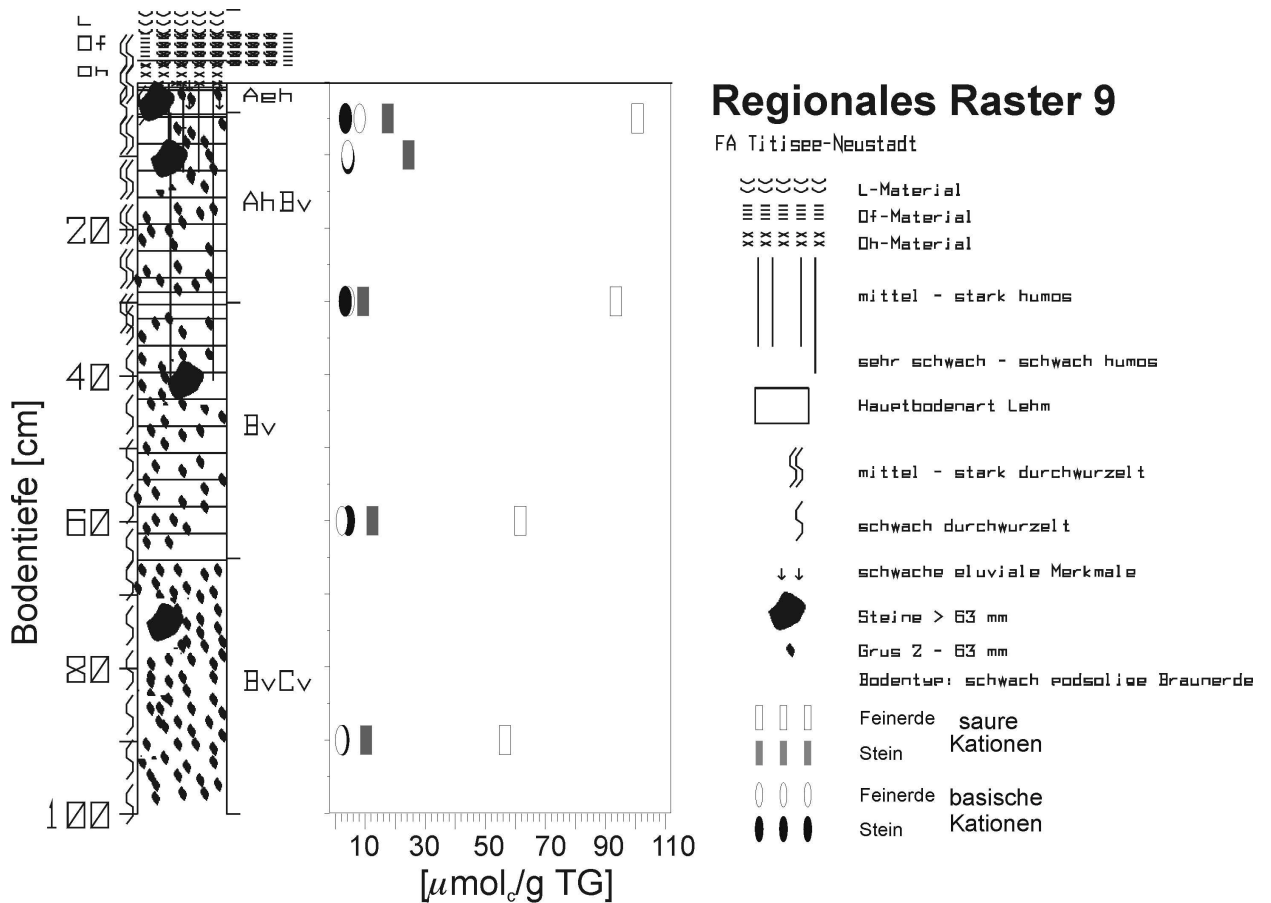
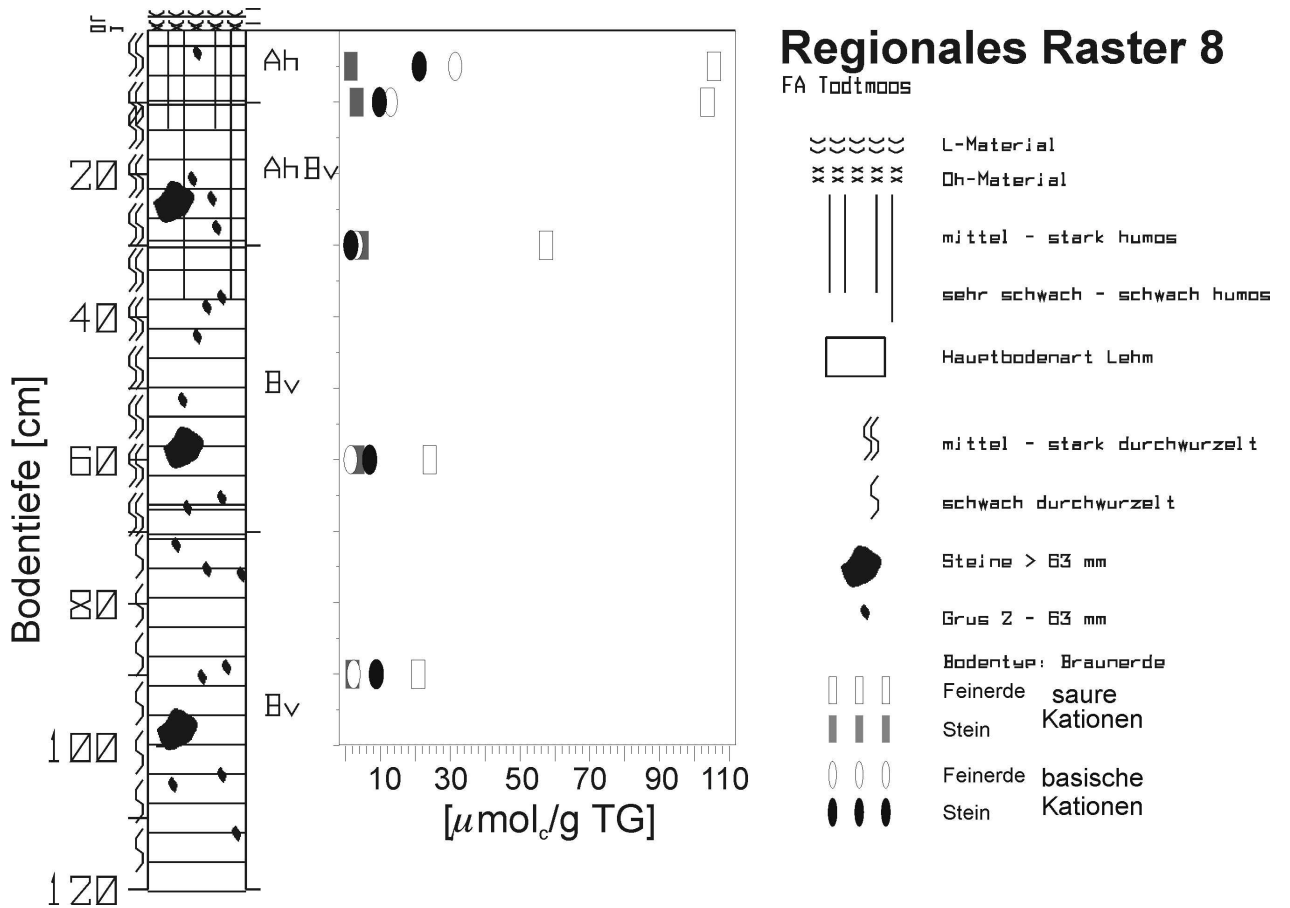
- ⋯ L-Material
- ≡ Of-Material
- xx Oh-Material
- || sehr stark - extrem humos
- || sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Lehm
- ⋈ mittel - stark durchwurzelt
- ⋈ schwach durchwurzelt
- carbonatarm
- carbonatreich
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen

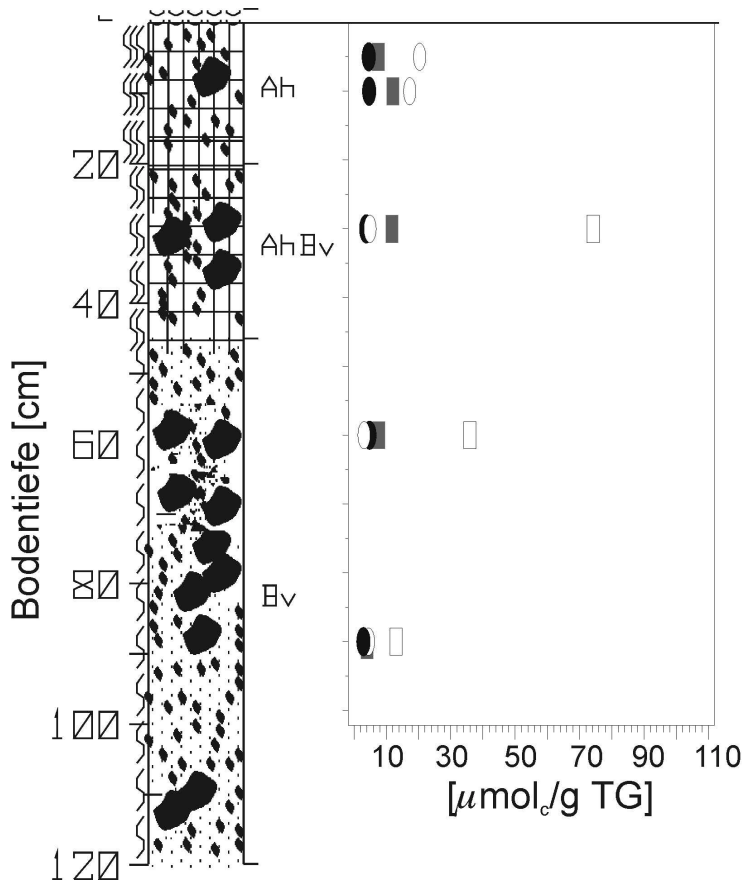


Regionales Raster 6

FA Schoenau/Schwarzwald

- ⋯ L-Material
- ≡ Of-Material
- || mittel - stark humos
- || sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Lehm
- ⋈ mittel - stark durchwurzelt
- ⋈ schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen

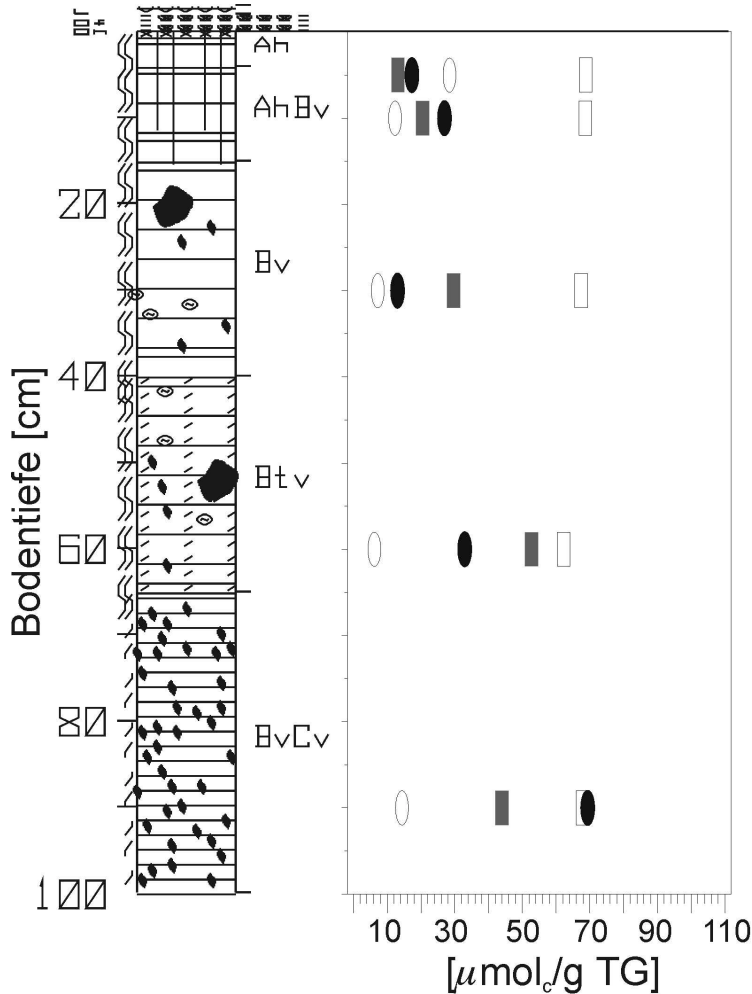




Regionales Raster 10

FA St. Blasien

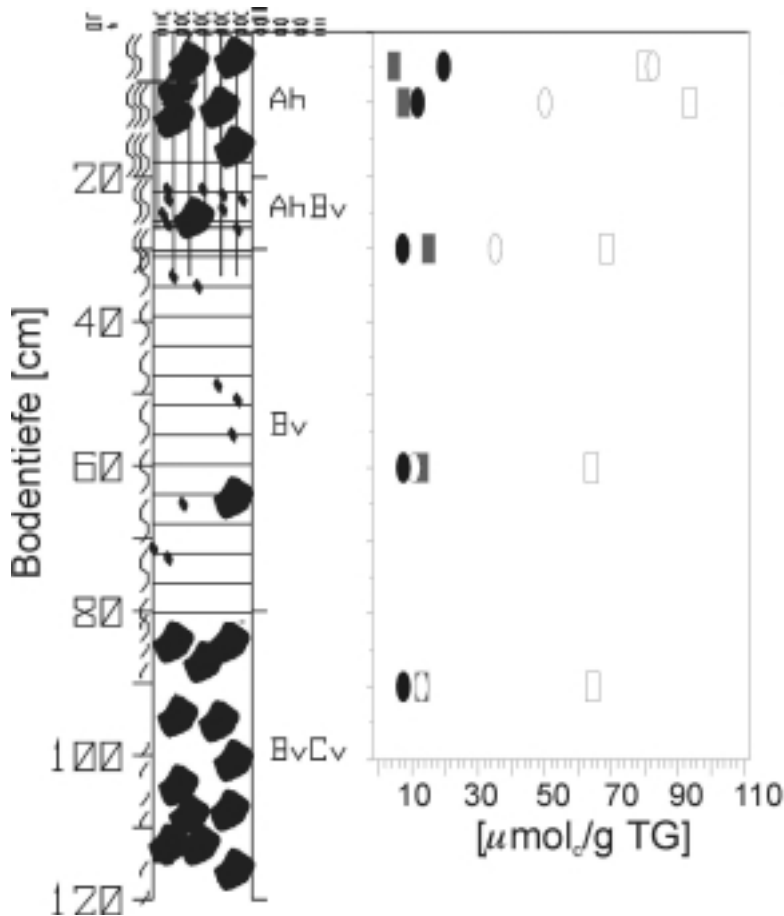
- L-Material
- sehr stark - extrem humos
- mittel - stark humos
- Hauptbodenart Lehm
- Hauptbodenart Sand
- Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- mittel - stark durchwurzelt
- schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 11

FA Bad Säckingen

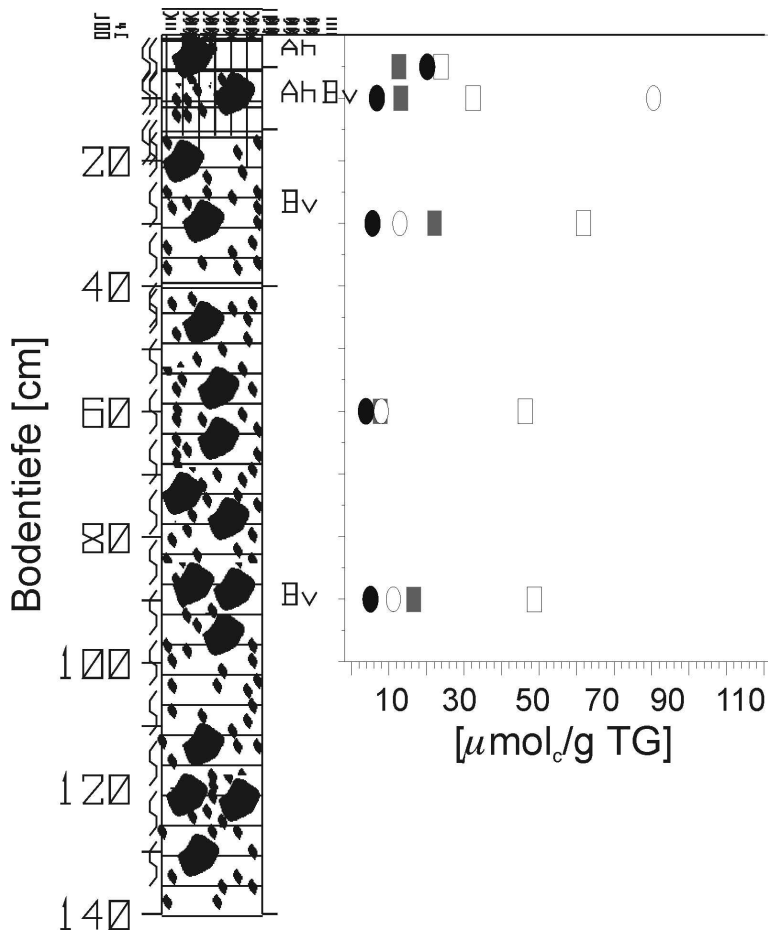
- L-Material
- Of-Material
- Oh-Material
- mittel - stark humos
- sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Ton
- Hauptbodenart Lehm
- mittel - stark durchwurzelt
- sehr schwach durchwurzelt
- Toncutane
- Redoxfleckung
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 12

FA Freiburg Staat

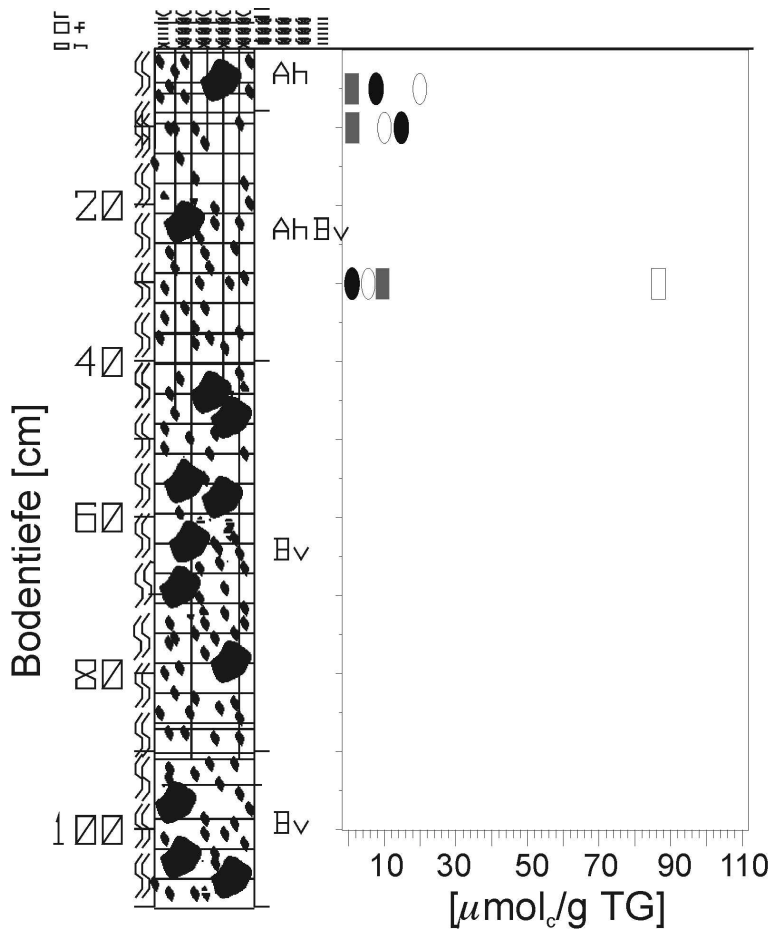
- L-Material
- Of-Material
- sehr stark - extrem humos
- mittel - stark humos
- Hauptbodenart Lehm
- Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- mittel - stark durchwurzelt
- schwach durchwurzelt
- sehr schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde**
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 29

FA Tiengen

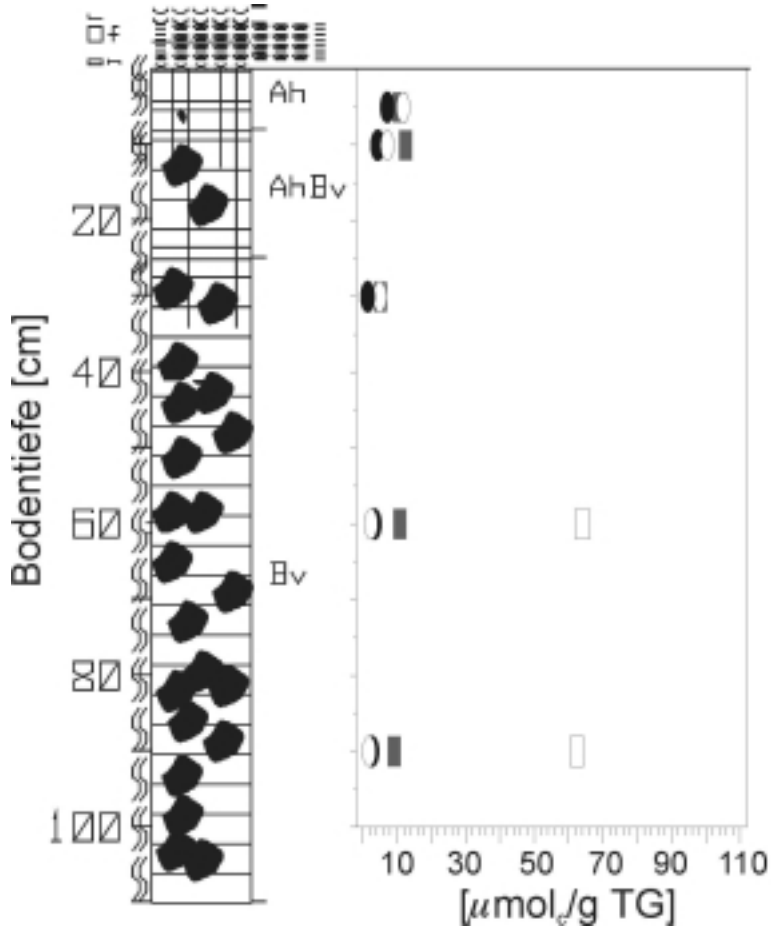
- L-Material
- Of-Material
- Oh-Material
- sehr stark - extrem humos
- sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Lehm
- mittel - stark durchwurzelt
- schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde**
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster36

FA Schluchsee

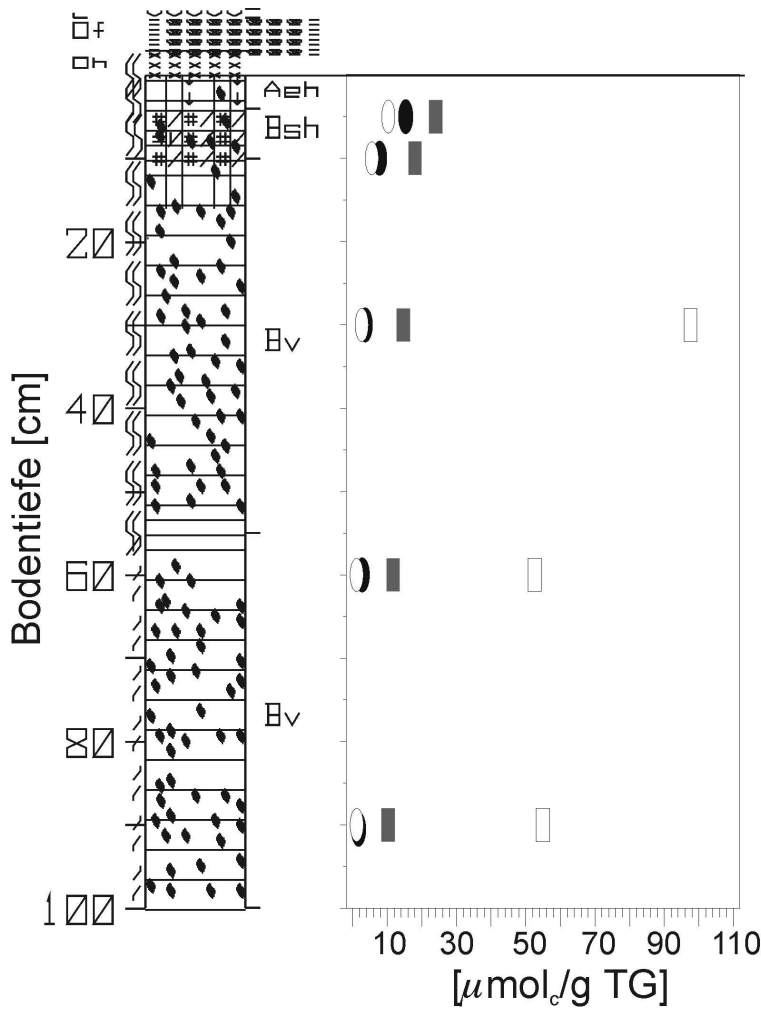
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡ Df-Material
- xx xx xx xx Dh-Material
- ||| mittel - stark humos
- ||| mittel - stark humos
- ||| sehr schwach - schwach humos
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- ⋈ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- ◊ Grus 2 - 63 mm
- ⊠ Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- ▨ Stein
- Feinerde basische Kationen
- Stein



Regionales Raster 48

FA Furtwangen

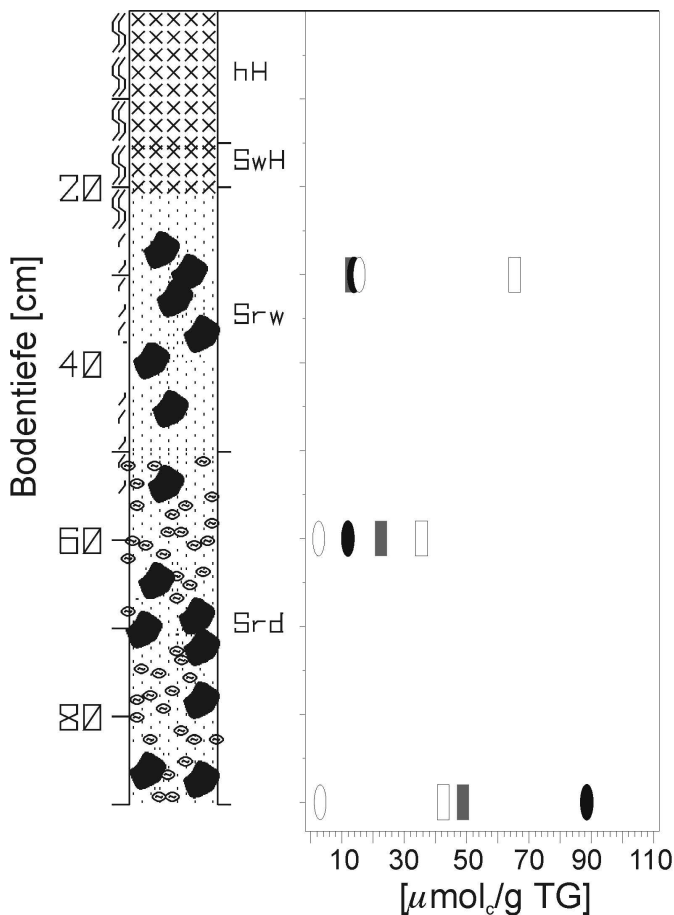
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡ Df-Material
- xx xx xx xx Dh-Material
- ||| mittel - stark humos
- ||| sehr schwach - schwach humos
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- ⋈ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- ◊ Grus 2 - 63 mm
- ⊠ Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- ▨ Stein
- Feinerde basische Kationen
- Stein



Regionales Raster 49

FA Furtwangen

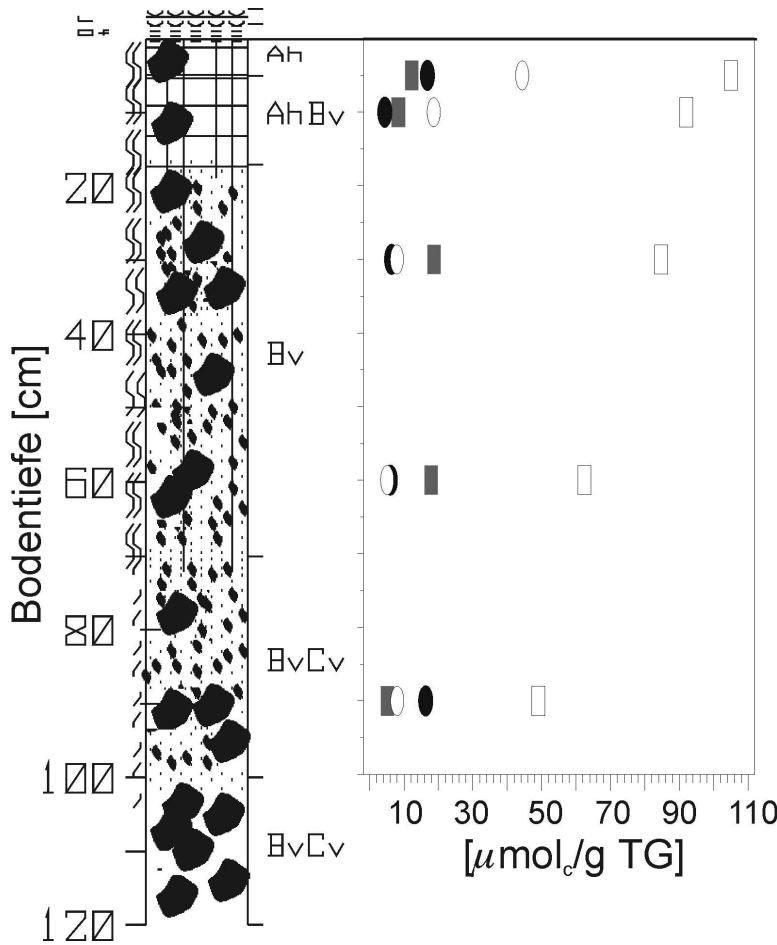
- ((())) L-Material
- (==) Of-Material
- (xxx) Oh-Material
- ||| mittel - stark humos
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- }} mittel - stark durchwurzelt
- / / sehr schwach durchwurzelt
- ↓ ↓ schwache eluviale Merkmale
- # # # Humus Einwaschung
- / / / Sesquioxid Einwaschung
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Podsol - Braunerde
- ▭ Feinerde saure Kationen
- ▭ Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen



Regionales Raster 71

FA Villingen-Schwenningen Staat

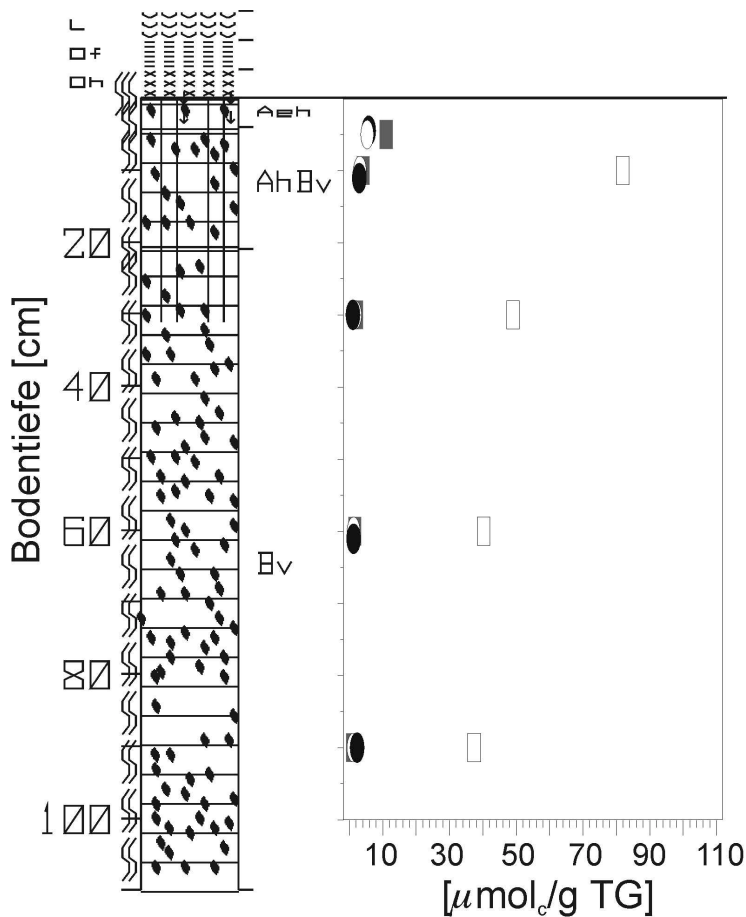
- XXXXXX Torf
- ▭ Hauptbodenart Sand
- }} mittel - stark durchwurzelt
- / / sehr schwach durchwurzelt
- ⊙ Redoxfleckung
- Steine > 63 mm
- Bodentyp: Moor - Staurolele
- ▭ Feinerde saure Kationen
- ▭ Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen



Regionales Raster 112

FA Emmendingen

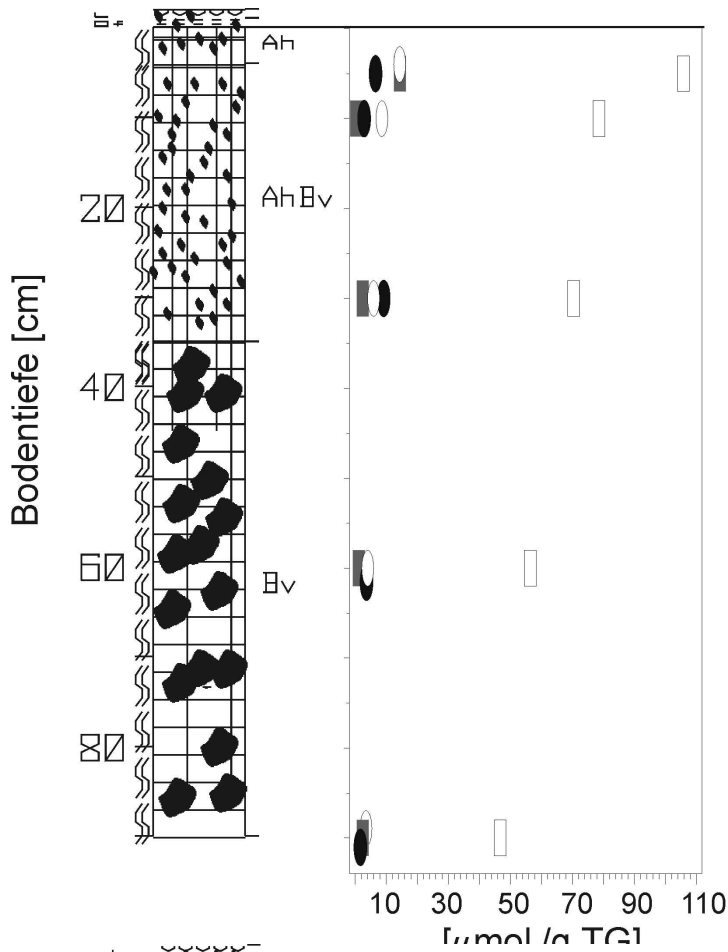
- ⋯⋯⋯⋯ L-Material
- ≡≡≡≡≡ Of-Material
- ||||| mittel - stark humos
- ||||| sehr schwach - schwach humos
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- ▭ Hauptbodenart Sand
- ⋈ mittel - stark durchwurzelt
- ⋈ sehr schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 130

FA Todtmoos

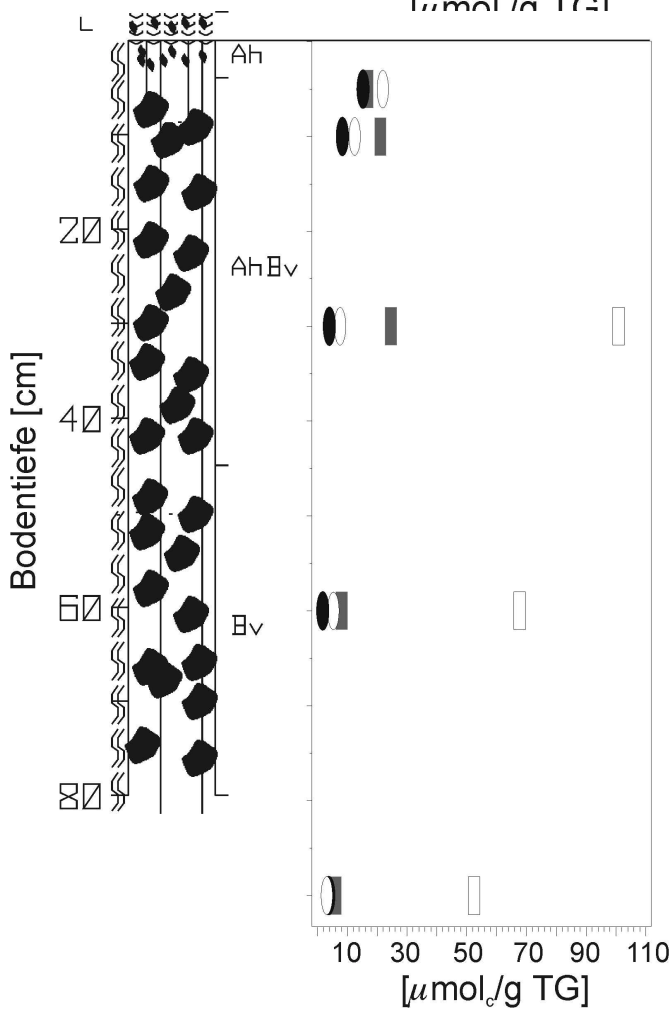
- ⋯⋯⋯⋯ L-Material
- ≡≡≡≡≡ Of-Material
- xx xx xx xx Oh-Material
- ||||| mittel - stark humos
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- ⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⋈ mittel - stark durchwurzelt
- ↓↓ schwache eluviale Merkmale
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: mäßig podsolige Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 131

FA Bad Saeckingen

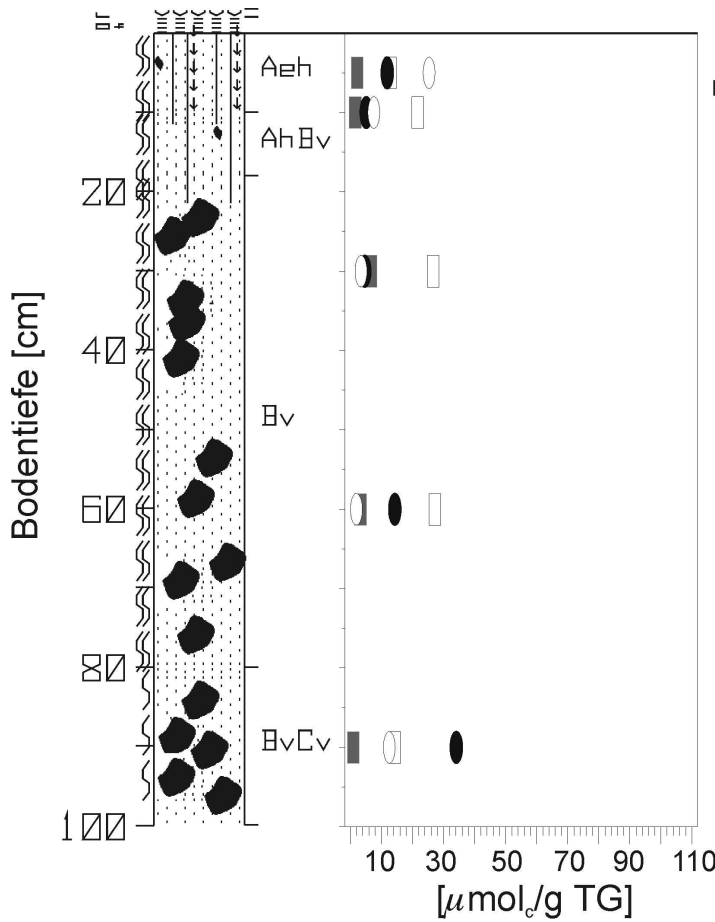
- ~ ~ ~ ~ L-Material
- ≡ ≡ ≡ ≡ Of-Material
- ||| mittel - stark humos
- ||| sehr schwach - schwach humos
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- ⋈ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- ▨ Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 132

FA Schopfheim

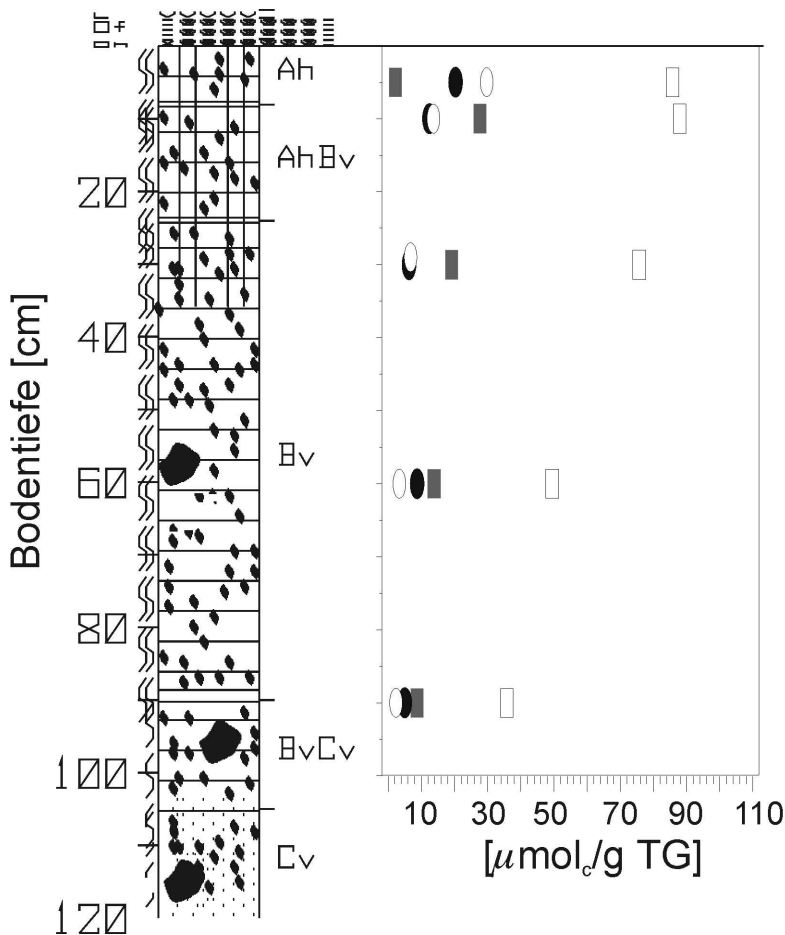
- ~ ~ ~ ~ L-Material
- ||| mittel - stark humos
- ||| sehr schwach - schwach humos
- ▭ Hauptbodenart Schluff
- ⋈ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- ▨ Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 134

FA Schoepfheim

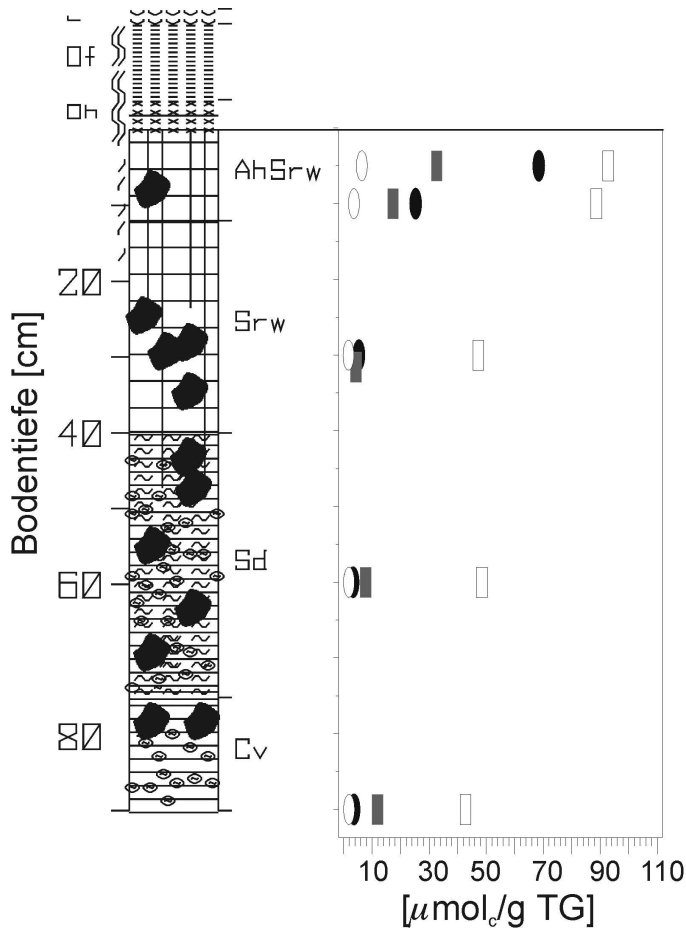
- ~ ~ ~ ~ ~ L-Material
- ≡ ≡ ≡ ≡ ≡ Of-Material
- ||| mittel - stark humos
- ||| sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Sand
- }} mittel - stark durchwurzelt
- } schwach durchwurzelt
- ↓ schwache eJuviale Merkmale
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: mio podsolige Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen



Regionales Raster 137

FA Schluchsee

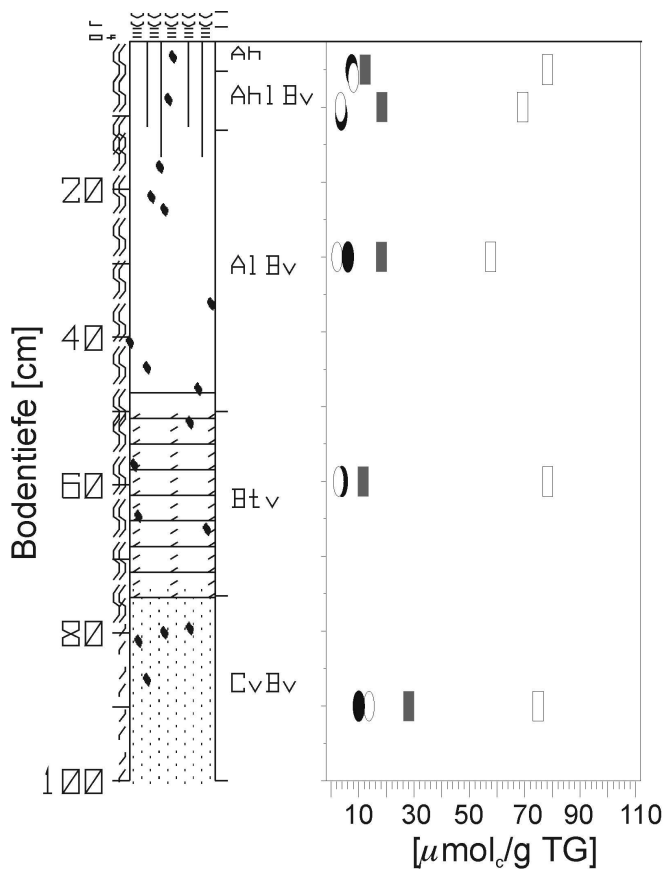
- ~ ~ ~ ~ ~ L-Material
- ≡ ≡ ≡ ≡ ≡ Of-Material
- xx xx xx xx xx Oh-Material
- ||| mittel - stark humos
- Hauptbodenart Lehm
- Hauptbodenart Sand
- }} mittel - stark durchwurzelt
- } schwach durchwurzelt
- ~ sehr schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen



Regionales Raster 138

FA Stühlingen

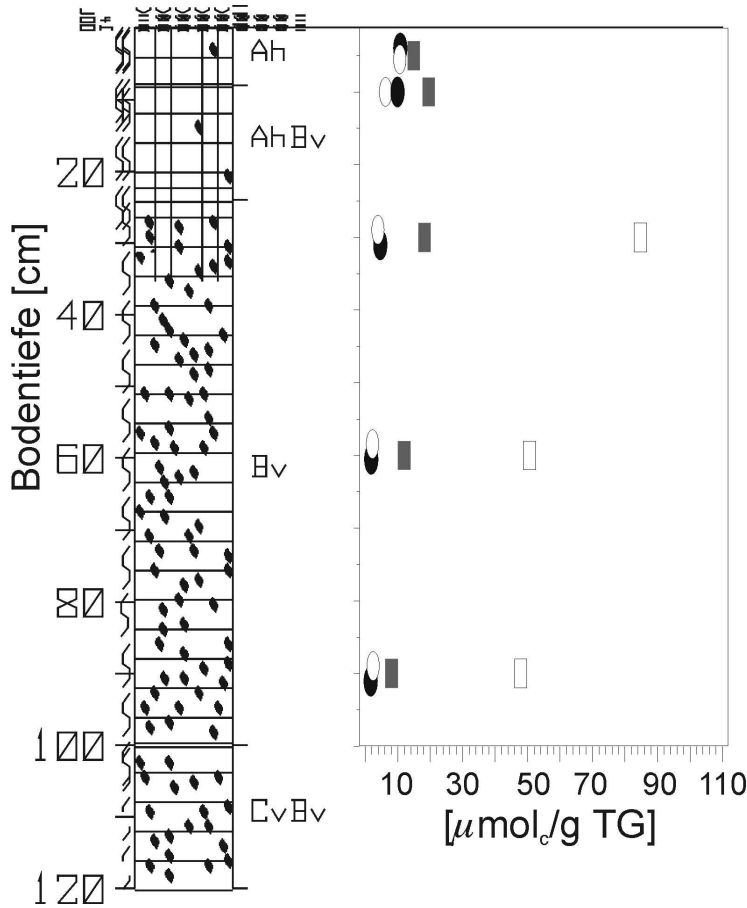
- ~ L-Material
- ≡ Of-Material
- xx Oh-Material
- || mittel - stark humos
- || sehr schwach - schwach humos
- ▭ Hauptbodenart Ton
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- }} mittel - stark durchwurzelt
- / sehr schwach durchwurzelt
- ≈ stauender Horizont
- ⊙ Redoxfleckung
- Steine > 63 mm
- ⊗ Bodentyp: Stagnogley
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 141

FA Waldkirch

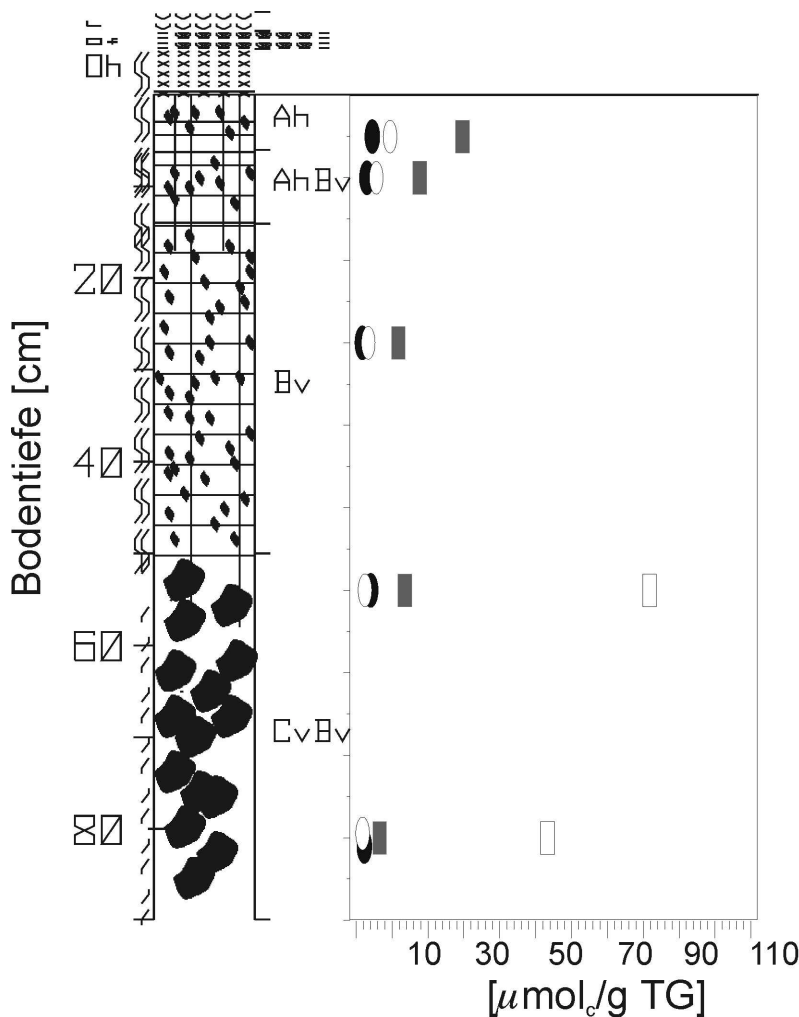
- ~ L-Material
- ≡ Of-Material
- || mittel - stark humos
- || sehr schwach - schwach humos
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- ▭ Hauptbodenart Sand
- ▭ Hauptbodenart Schluff
- }} mittel - stark durchwurzelt
- / sehr schwach durchwurzelt
- //// Toncutane
- Grus 2 - 63 mm
- ⊗ Bodentyp: Parabraunerde - Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 144

FA Triberg

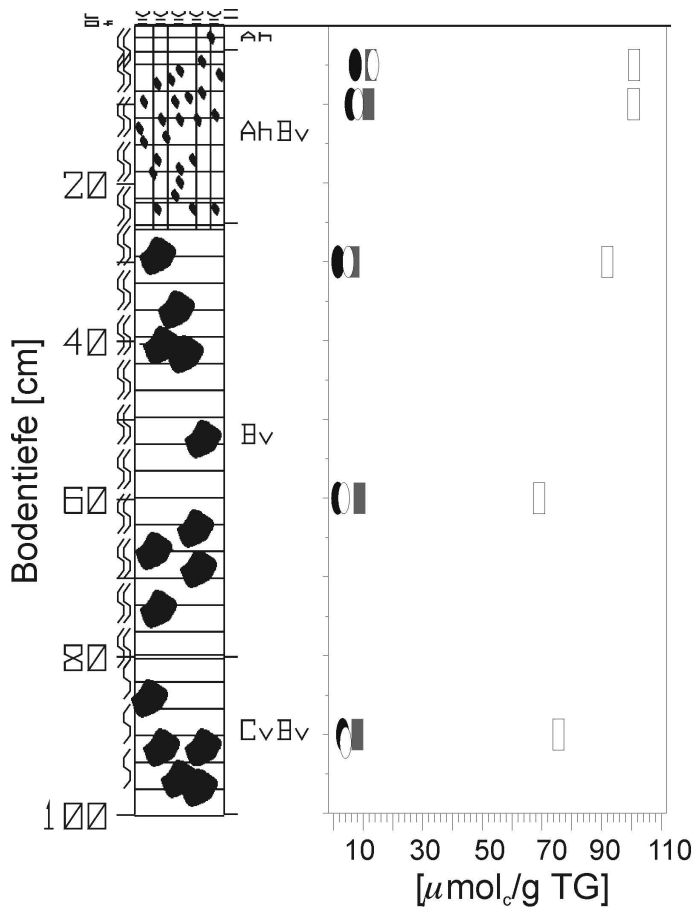
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
- xx xx xx xx Oh-Material
- ||| mittel - stark humos
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- }} mittel - stark durchwurzelt
- { } schwach durchwurzelt
- / / sehr schwach durchwurzelt
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ▭ Feinerde saure Kationen
- ▭ Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen



Regionales Raster 145

FA St. Maergen

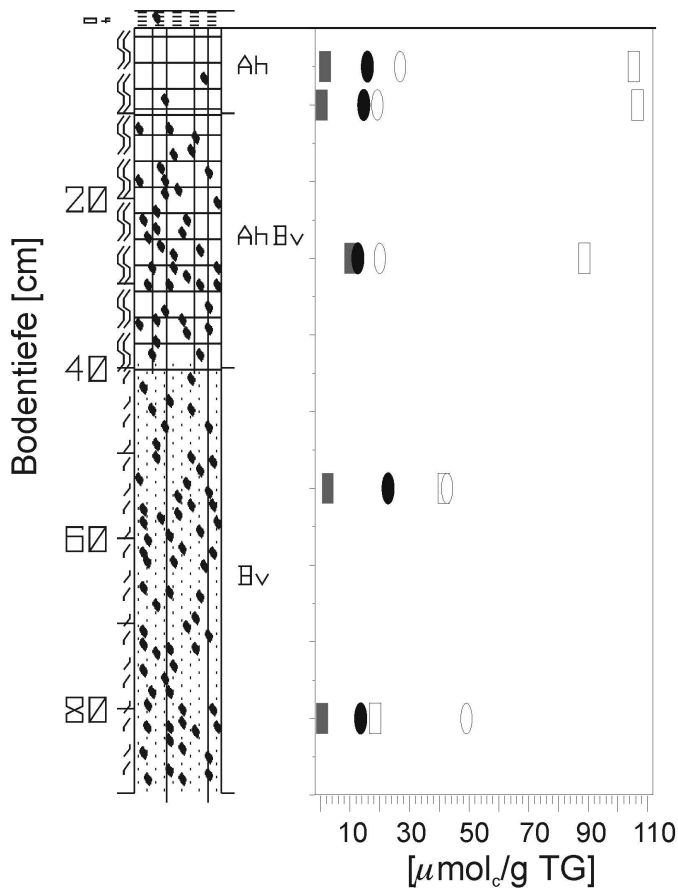
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
- xx xx xx xx Oh-Material
- ||| mittel - stark humos
- ||| sehr schwach - schwach humos
- ▭ Hauptbodenart Lehm
- }} mittel - stark durchwurzelt
- / / sehr schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ▭ Feinerde saure Kationen
- ▭ Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen



Regionales Raster 146

FA Kirchzarten

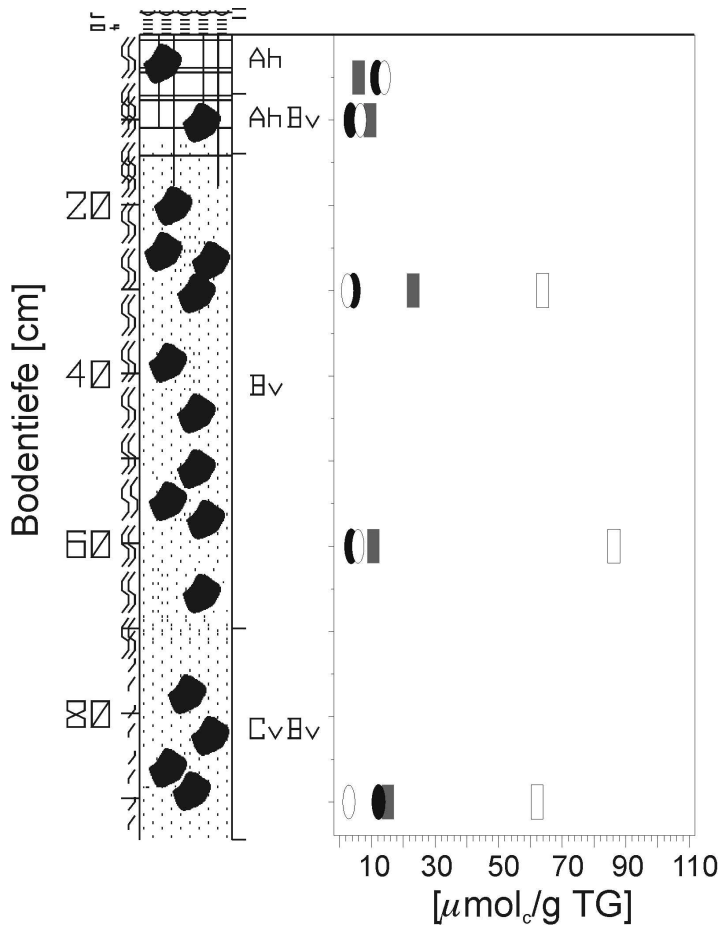
- L-Material
- Of-Material
- mittel - stark humos
- Hauptbodenart Lehm
- mittel - stark durchwurzelt
- schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde**
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 147

FA Kirchzarten

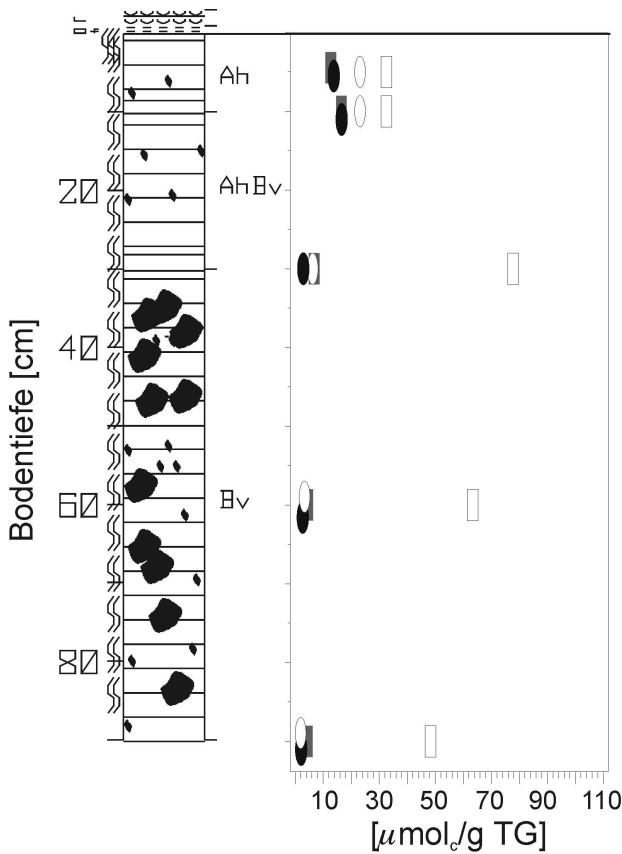
- Of-Material
- mittel - stark humos
- sehr schwach - schwach humos
- Hauptbodenart Sand
- mittel - stark durchwurzelt
- sehr schwach durchwurzelt
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde**
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Regionales Raster 151

FA Freiburg Staat

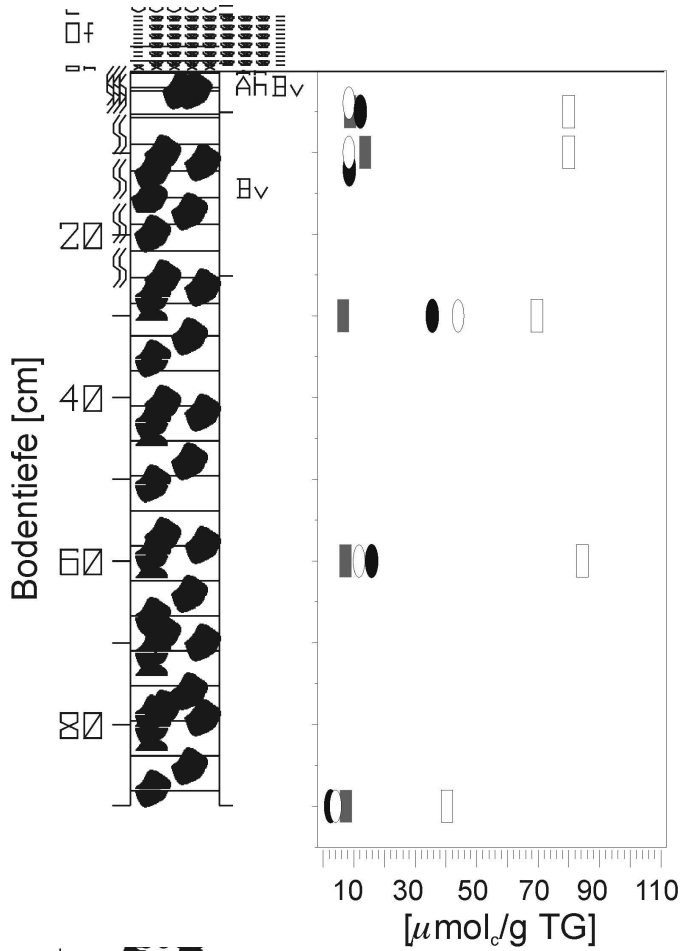
- ~ ~ ~ ~ L-Material
- ≡ ≡ ≡ ≡ Of-Material
- ||| mittel - stark humos
- ||| sehr schwach - schwach humos
- ▭ Hautbodenart Lehm
- ▭ Hautbodenart Sand
- ~ ~ ~ mittel - stark durchwurzelt
- ~ ~ ~ sehr schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ▭ Feinerde saure Kationen
- ▭ Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Lokales Raster 1

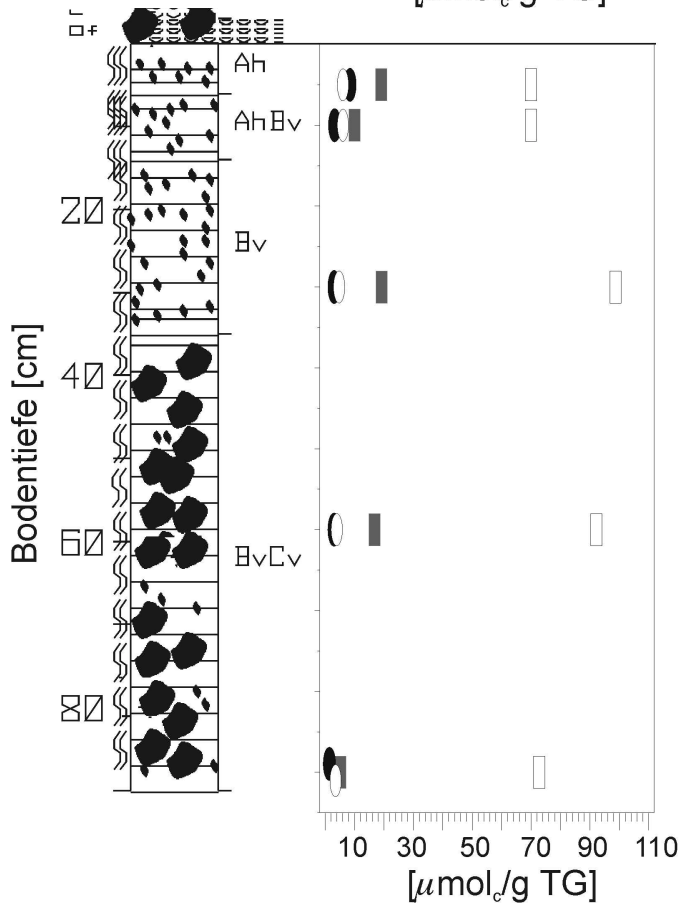
FA Todtnau

- ~ ~ ~ ~ L-Material
- ≡ ≡ ≡ ≡ Of-Material
- ▭ Hautbodenart Lehm
- ~ ~ ~ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ~ ~ ~ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ▭ Feinerde saure Kationen
- ▭ Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



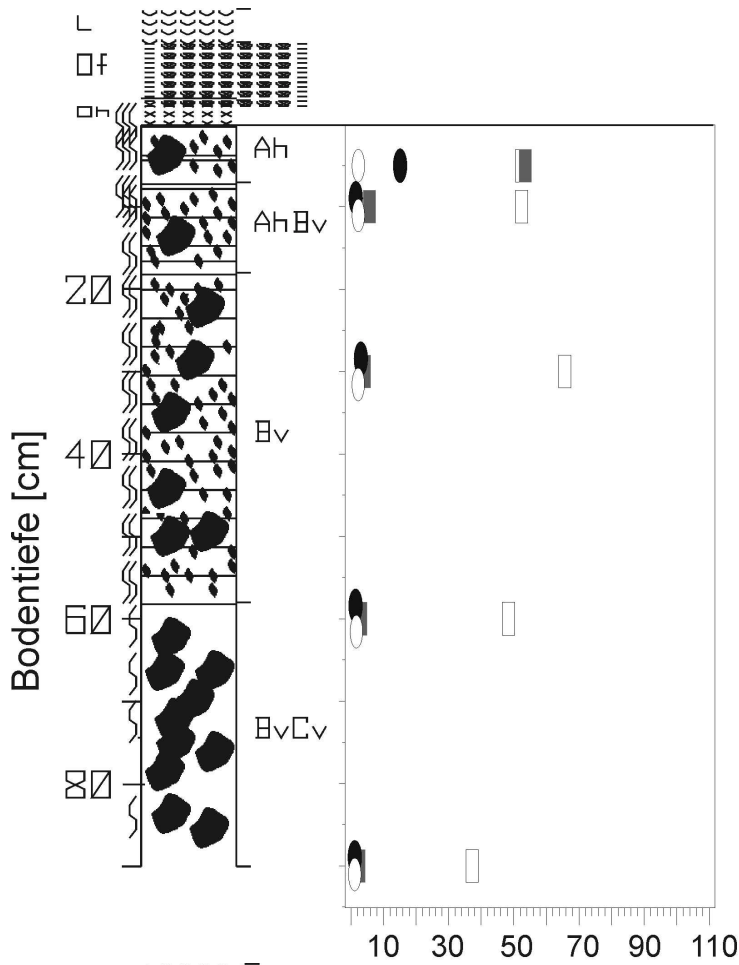
Lokales Raster 6

- FA Todtnau
- ⋯ L-Material
 - ≡≡≡ Of-Material
 - xx xx xx xx Oh-Material
 - ☐ Hauptbodenart Lehm
 - ⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - ⋈ mittel - stark durchwurzelt
 - Steine > 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
 - Stein
 - Feinerde basische Kationen
 - Stein



Lokales Raster 27

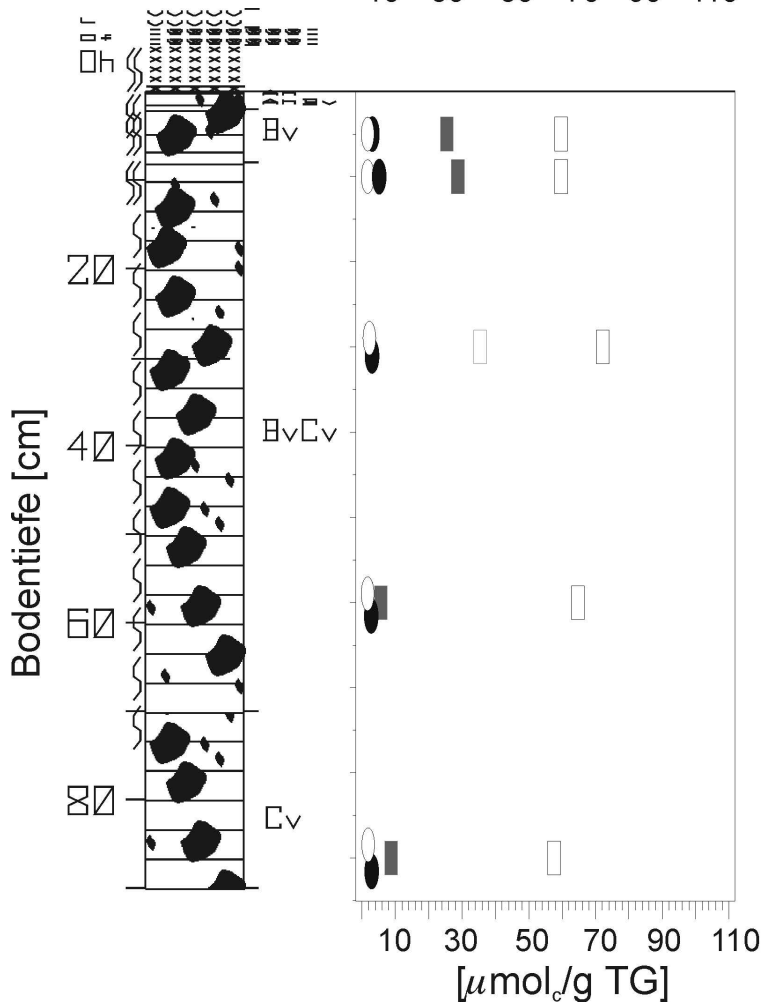
- FA Todtnau
- ⋯ L-Material
 - ≡≡≡ Of-Material
 - ☐ Hauptbodenart Lehm
 - ⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - ⋈ mittel - stark durchwurzelt
 - Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
 - Stein
 - Feinerde basische Kationen
 - Stein



Lokales Raster 72

FA Todtmoos

- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡ Of-Material
- xx xx xx xx Oh-Material
- ☐ Hautbodenart Lehm
- ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
- Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen

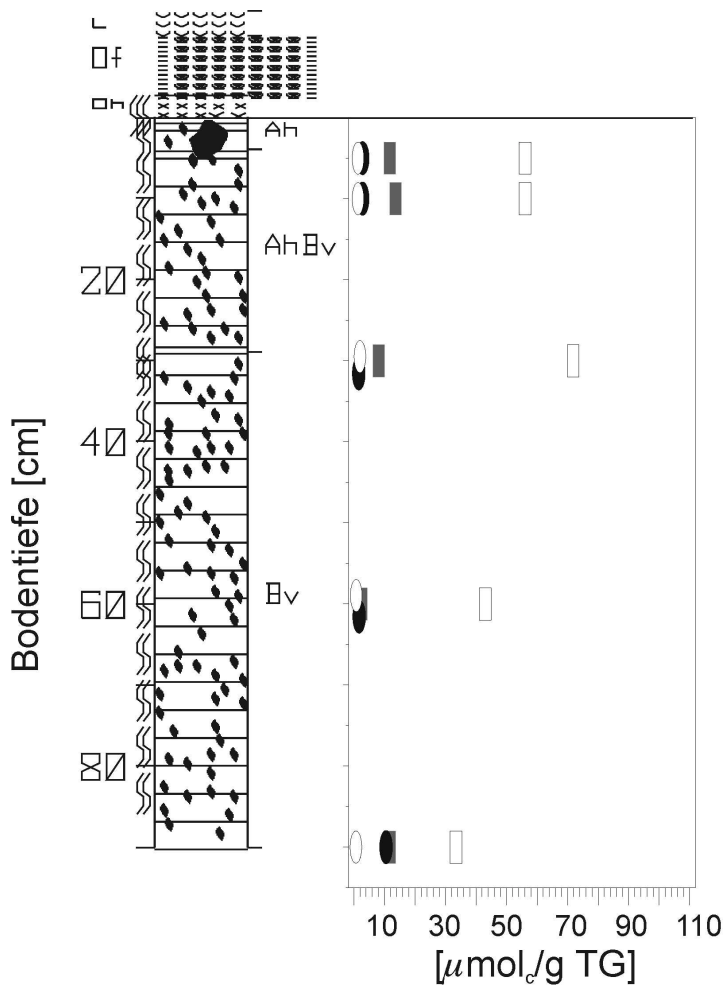


Lokales Raster 78

FA Todtmoos

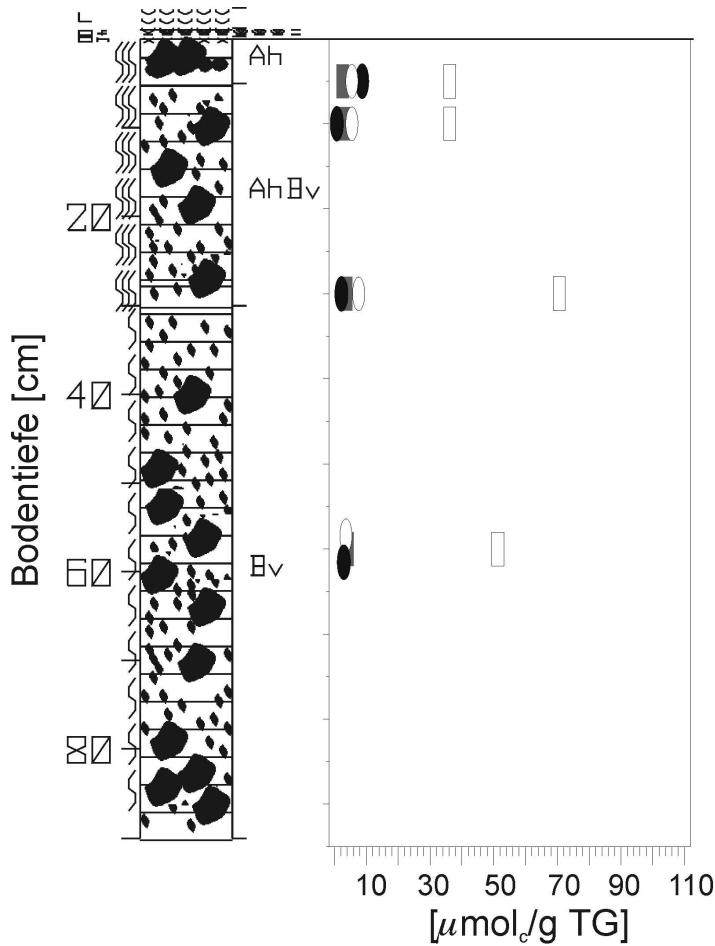
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡ Of-Material
- xx xx xx xx Oh-Material
- ☐ Hautbodenart Lehm
- ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
- Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen

[$\mu\text{mol/g TG}$]



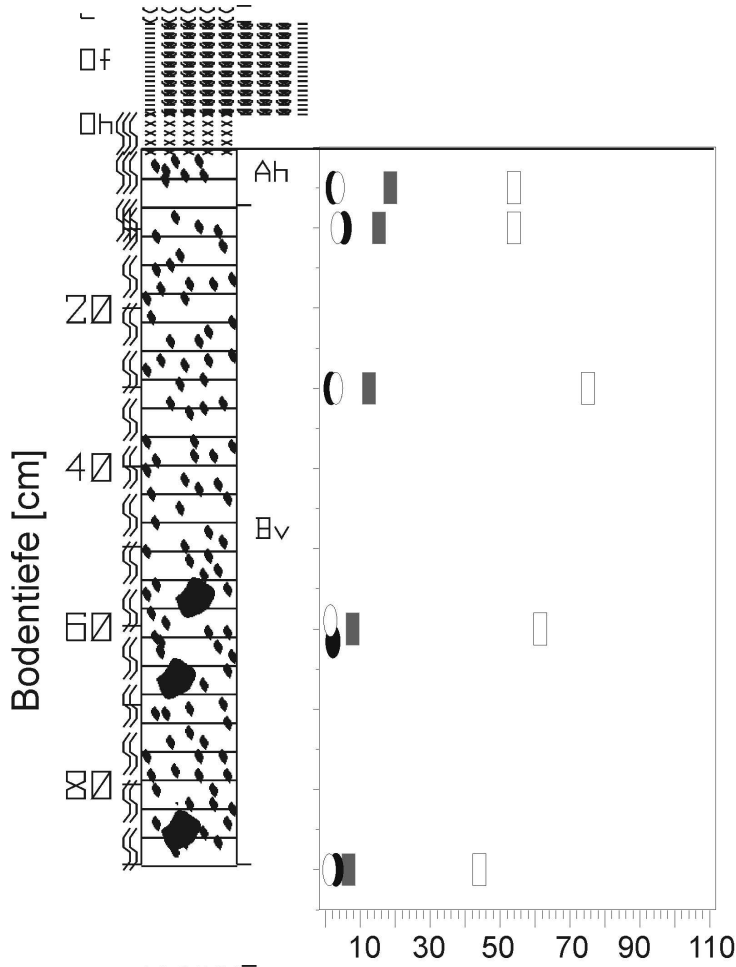
Lokales Raster 79

- FA Todtmoos
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
 - ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
 - xx xx xx xx Oh-Material
 - ▭ Hautbodenart Lehm
 - ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
 - Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
 - Bodentyp: Braunerde
 - ▭ Feinerde saure Kationen
 - ▭ Stein saure Kationen
 - ▭ Feinerde basische Kationen
 - ▭ Stein basische Kationen



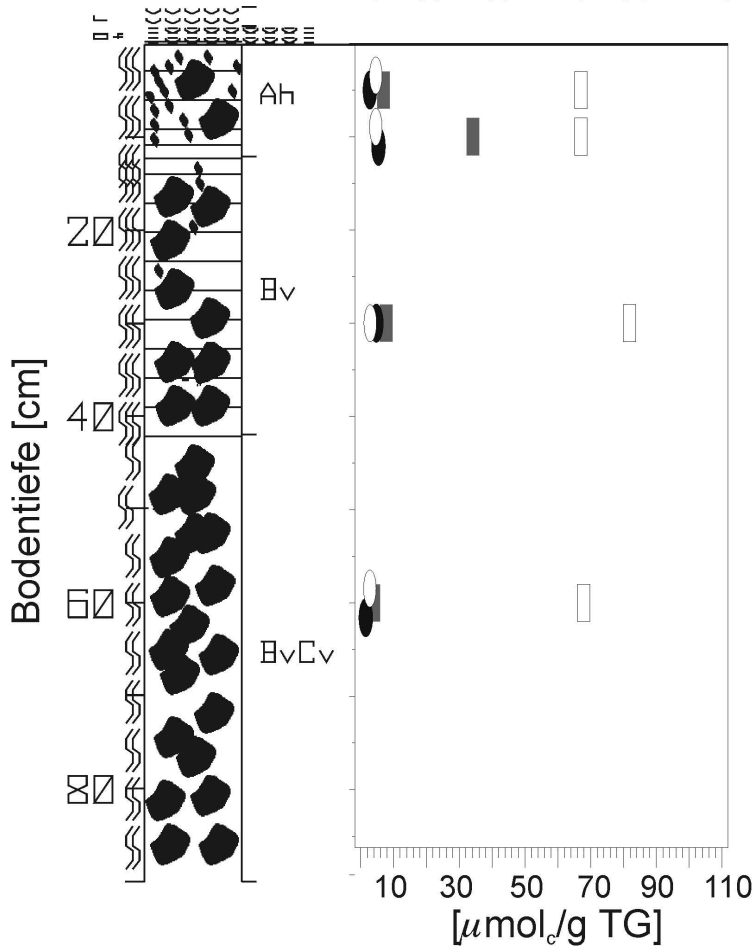
Lokales Raster 83

- FA Todtmoos
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
 - ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
 - xx xx xx xx Oh-Material
 - ▭ Hautbodenart Lehm
 - ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - ⋈⋈⋈⋈⋈ schwach durchwurzelt
 - Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
 - Kies 2 - 63 mm gerundet
 - Bodentyp: Braunerde
 - ▭ Feinerde saure Kationen
 - ▭ Stein saure Kationen
 - ▭ Feinerde basische Kationen
 - ▭ Stein basische Kationen



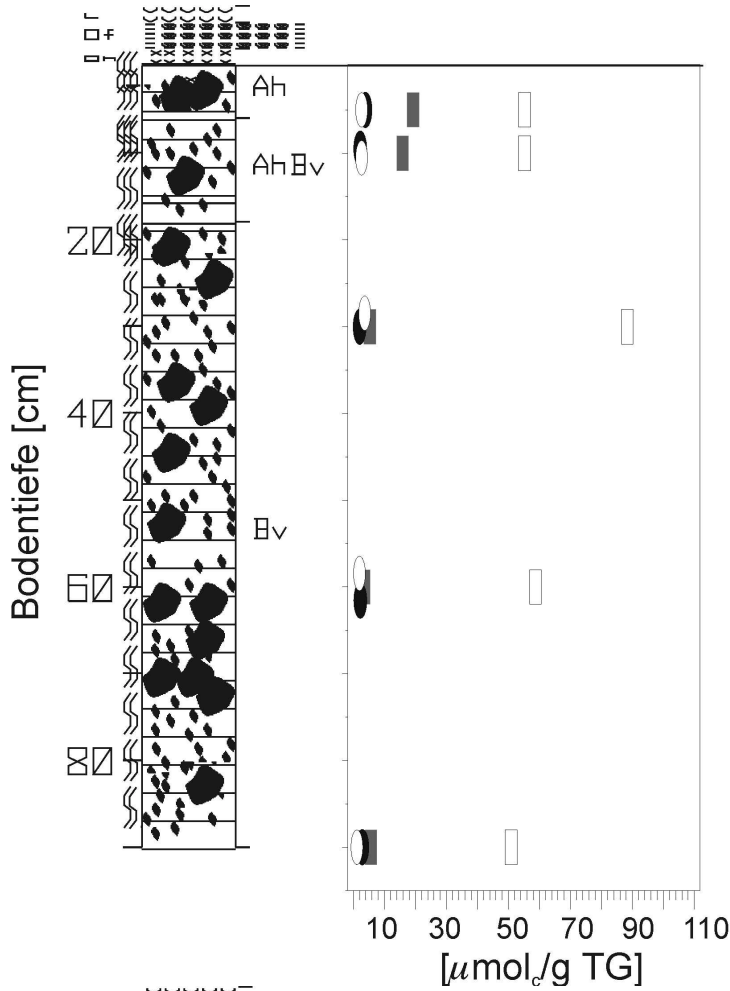
Lokales Raster 85

- FA Todtnau
- ⏟⏟⏟⏟ L-Material
 - ≡≡≡≡ Of-Material
 - xx xx xx xx Oh-Material
 - ▭ Hauptbodenart Lehm
 - ⏟⏟⏟⏟ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - ⏟⏟⏟⏟ mittel - stark durchwurzelt
 - Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
 - Bodentyp: Braunerde
 - ▭ Feinerde saure Kationen
 - ▭ Stein saure Kationen
 - ▭ Feinerde basische Kationen
 - ▭ Stein basische Kationen



Lokales Raster 90

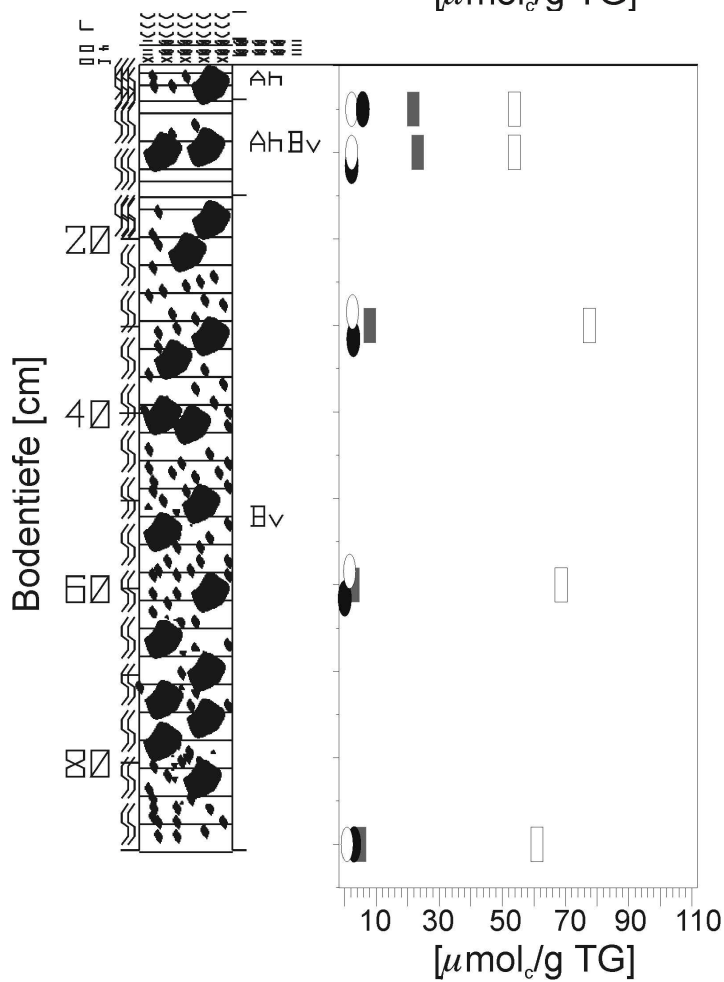
- FA Todtnau
- ⏟⏟⏟⏟ L-Material
 - ≡≡≡≡ Of-Material
 - ▭ Hauptbodenart Lehm
 - ⏟⏟⏟⏟ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - ⏟⏟⏟⏟ mittel - stark durchwurzelt
 - Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
 - Bodentyp: Braunerde
 - ▭ Feinerde saure Kationen
 - ▭ Stein saure Kationen
 - ▭ Feinerde basische Kationen
 - ▭ Stein basische Kationen



Lokales Raster 93

FA Todtnau

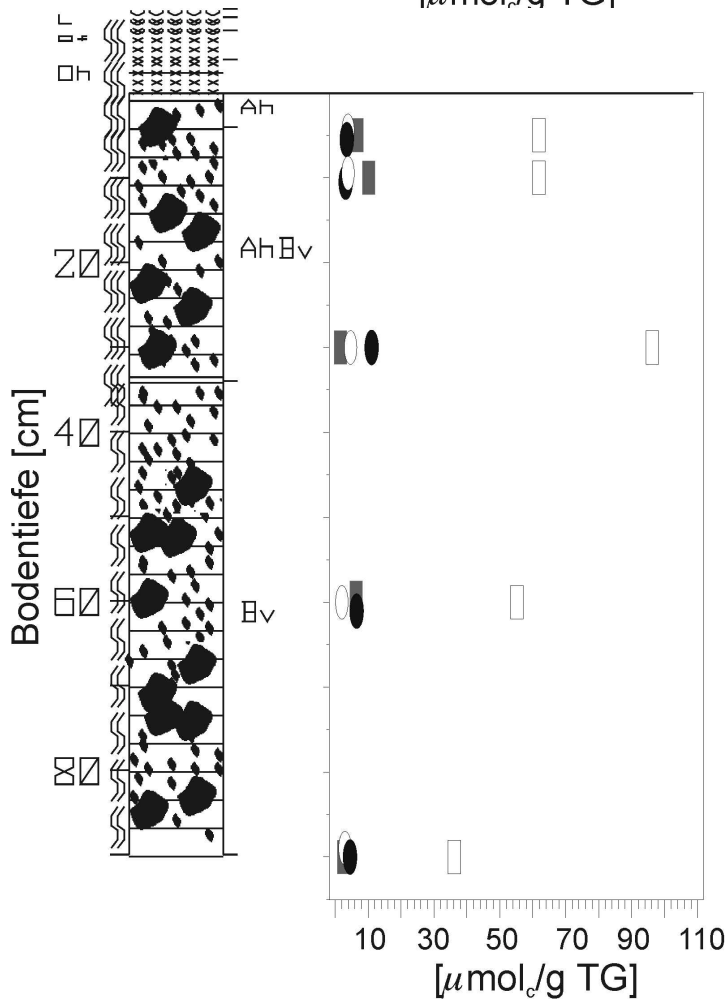
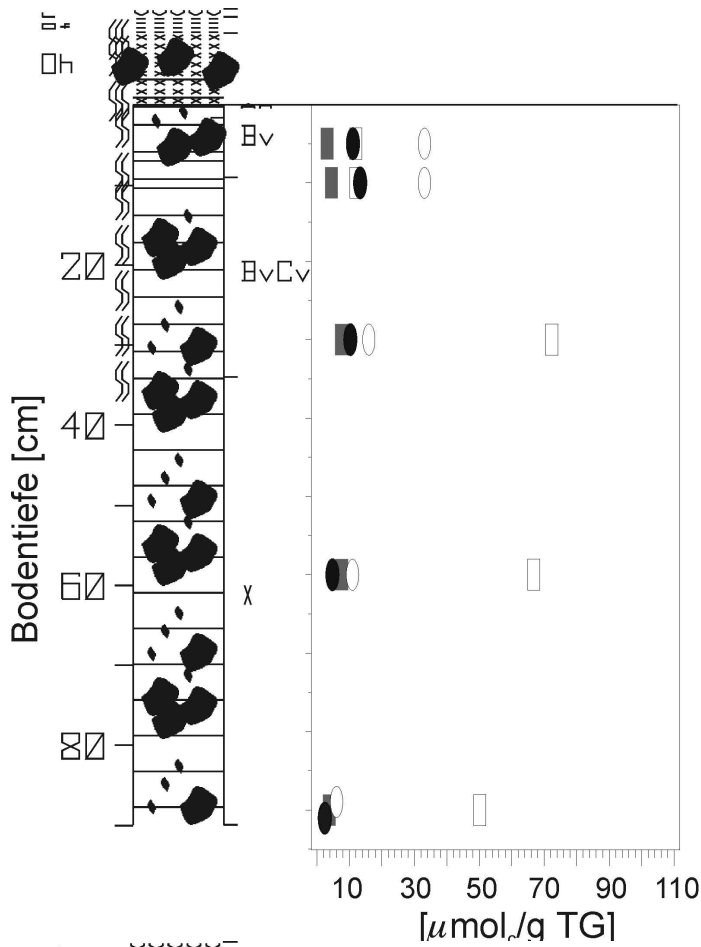
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡≡ Df-Material
- xx xx xx xx Oh-Material
- ☐ Hauptbodenart Lehm
- ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
- Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen

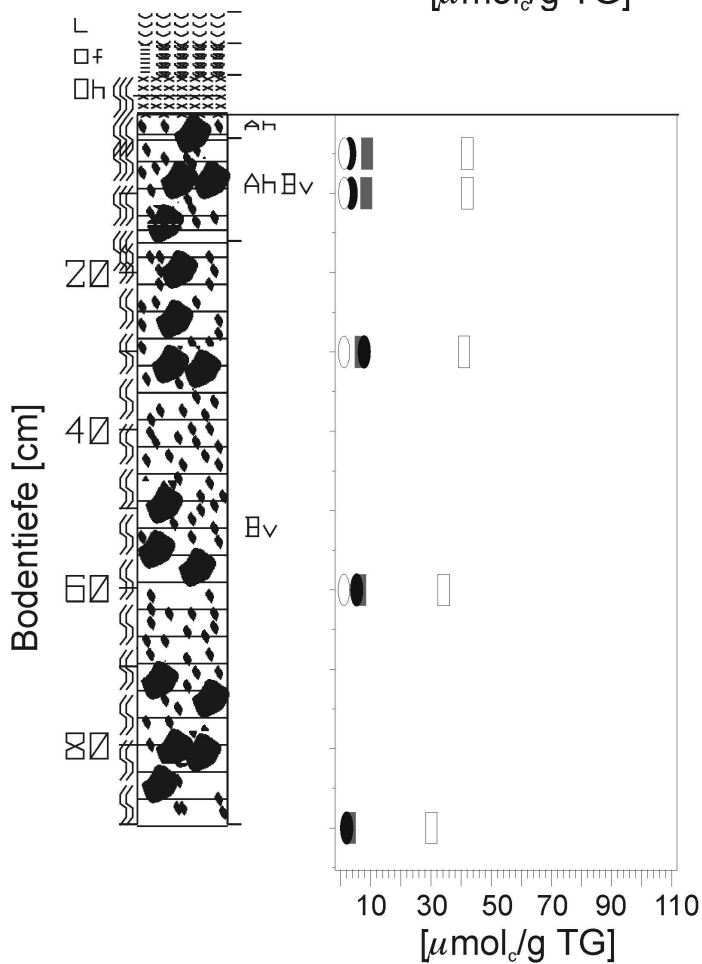
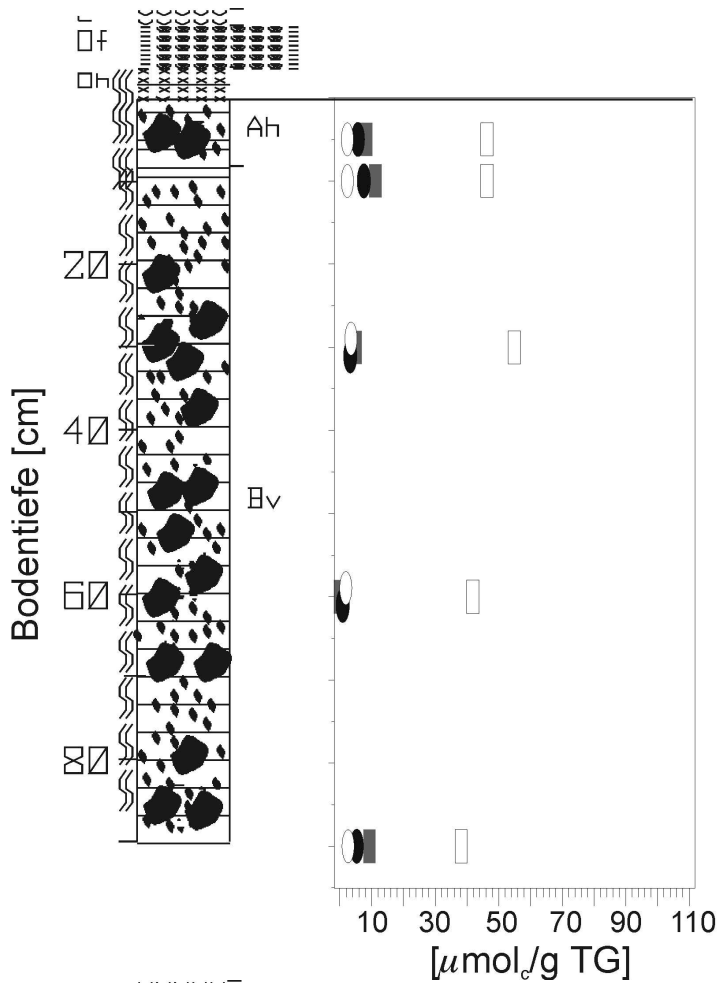


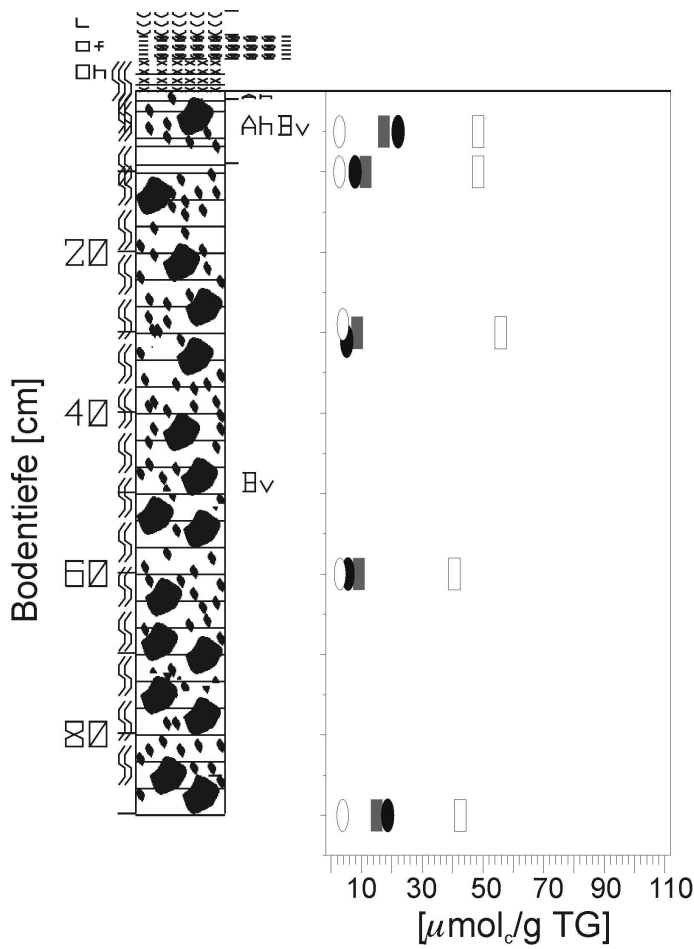
Lokales Raster 94

FA Schoenau/Schwarzwald

- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡≡ Df-Material
- xx xx xx xx Oh-Material
- ☐ Hauptbodenart Lehm
- ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
- Stein Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein Kationen



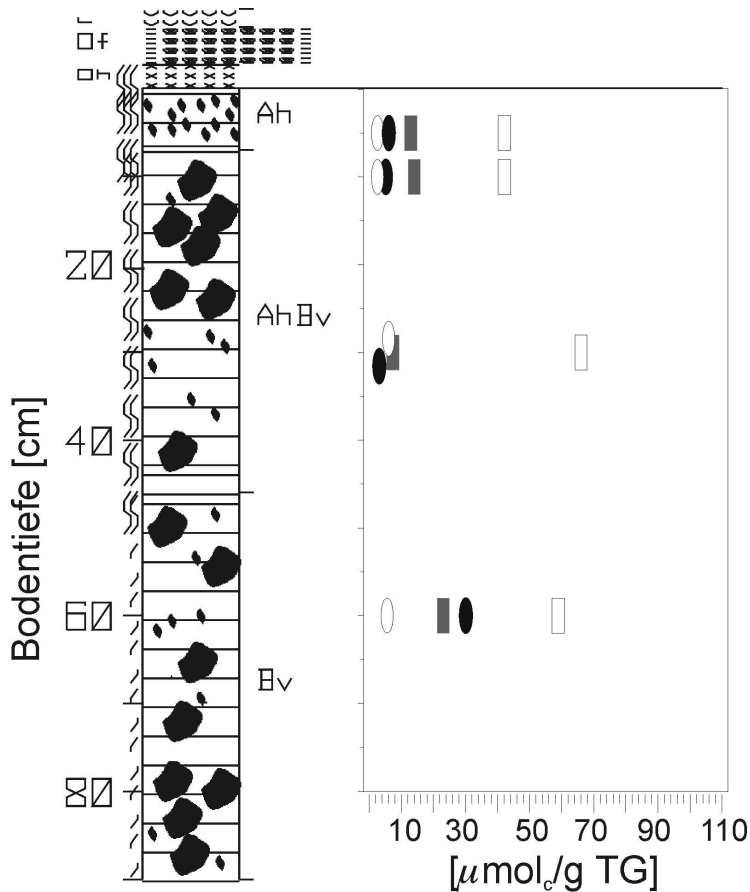




Lokales Raster 131

FA Todtnau

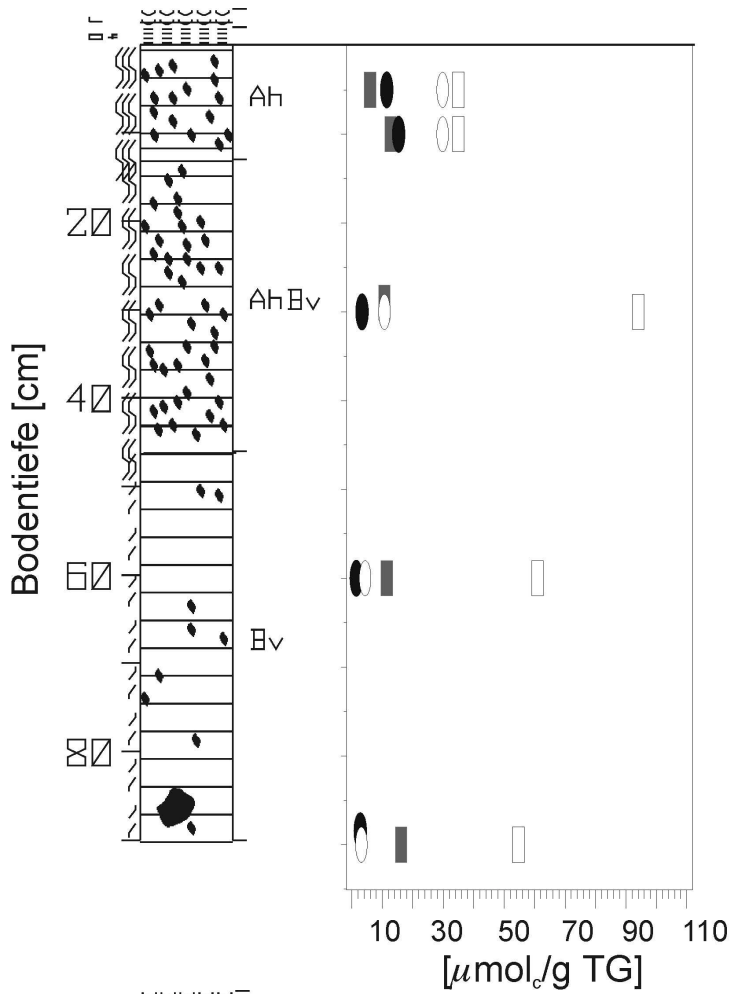
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ⋈⋈⋈⋈⋈ Df-Material
- xx xx xx xx Dh-Material
- ☐ Hauptbodenart Lehm
- ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Lokales Raster 141

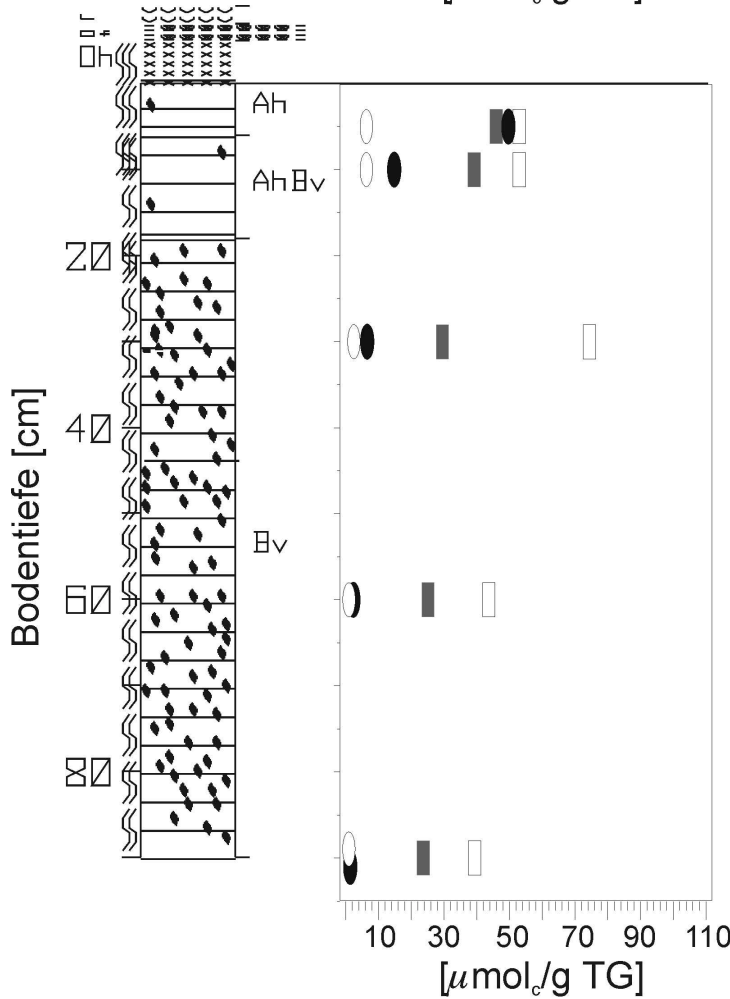
FA Todtnau

- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ⋈⋈⋈⋈⋈ Df-Material
- xx xx xx xx Dh-Material
- ☐ Hauptbodenart Lehm
- ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ sehr schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



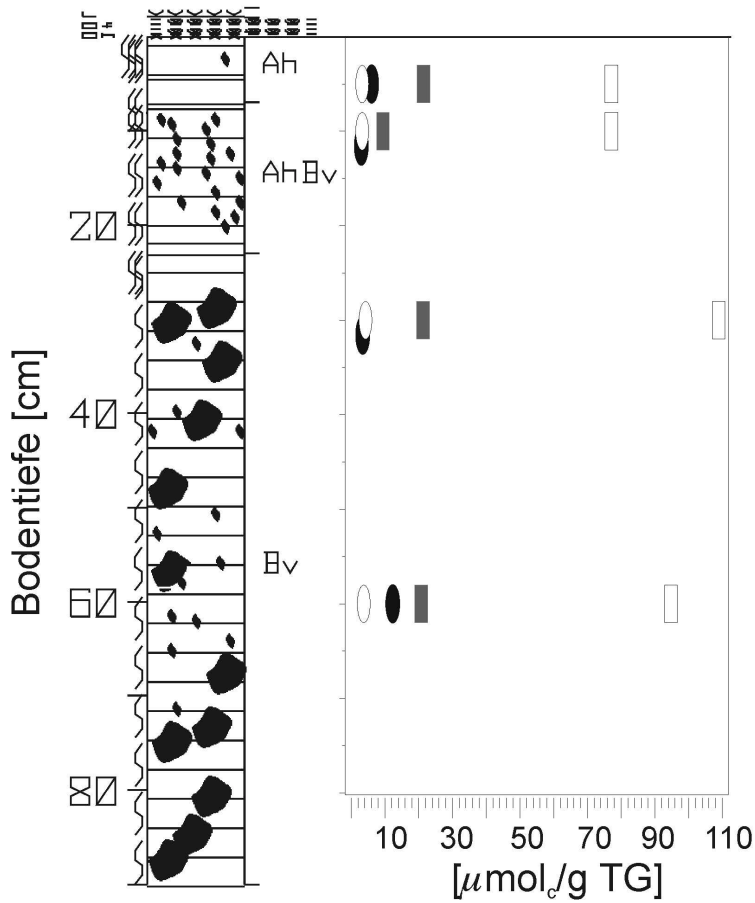
Lokales Raster 146

- FA Todtnau
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
 - ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
 - ▭ Hauptbodenart Lehm
 - ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
 - ⋈⋈⋈⋈⋈ sehr schwach durchwurzelt
 - Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
 - Bodentyp: Braunerde
 - ▭ Feinerde saure Kationen
 - ▭ Stein saure Kationen
 - Feinerde basische Kationen
 - Stein basische Kationen



Lokales Raster 147

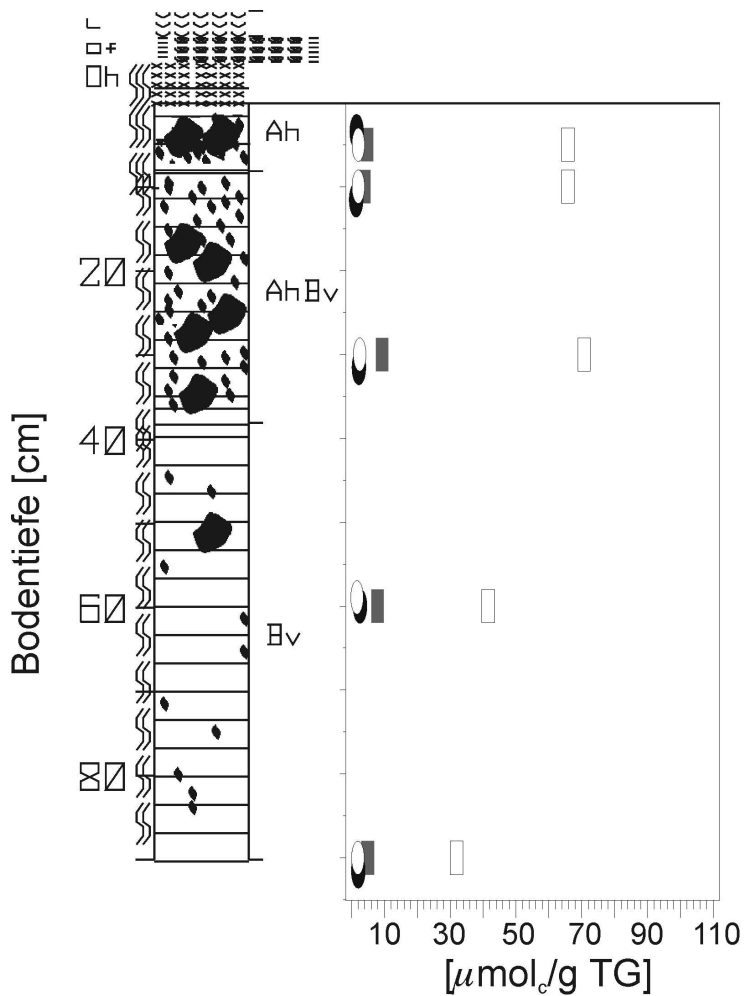
- FA Todtnau
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
 - ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
 - xx xx xx xx Dh-Material
 - ▭ Hauptbodenart Lehm
 - ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
 - Grus 2 - 63 mm
 - Bodentyp: Braunerde
 - ▭ Feinerde saure Kationen
 - ▭ Stein saure Kationen
 - Feinerde basische Kationen
 - Stein basische Kationen



Lokales Raster 149

FA Todtnau

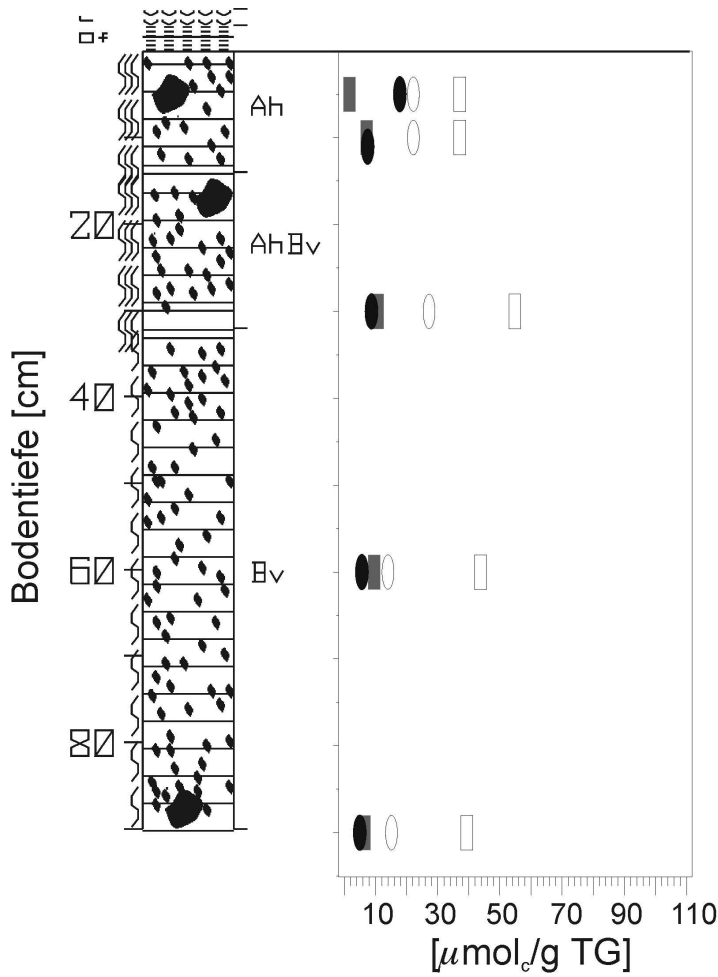
- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
- xx xx xx xx Oh-Material
- ☐ Hautbodenart Lehm
- ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
- Stein
- Feinerde basische Kationen
- Stein



Lokales Raster 150

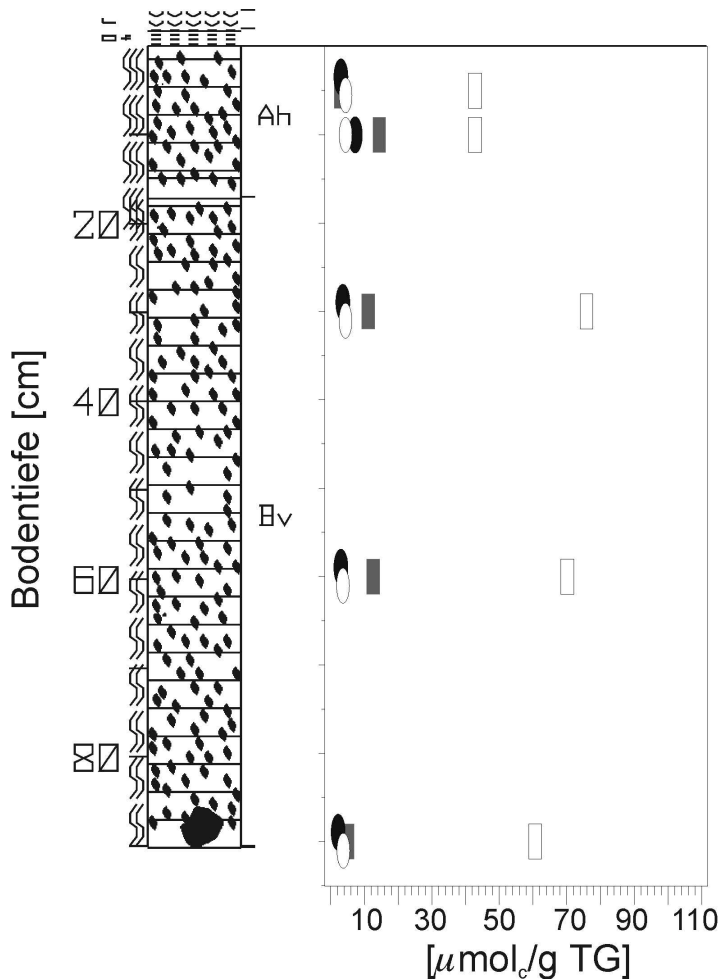
FA Todtnau

- ⋈⋈⋈⋈⋈ L-Material
- ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
- xx xx xx xx Oh-Material
- ☐ Hautbodenart Lehm
- ⋈⋈⋈⋈⋈ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⋈⋈⋈⋈⋈ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐ Feinerde saure Kationen
- Stein
- Feinerde basische Kationen
- Stein



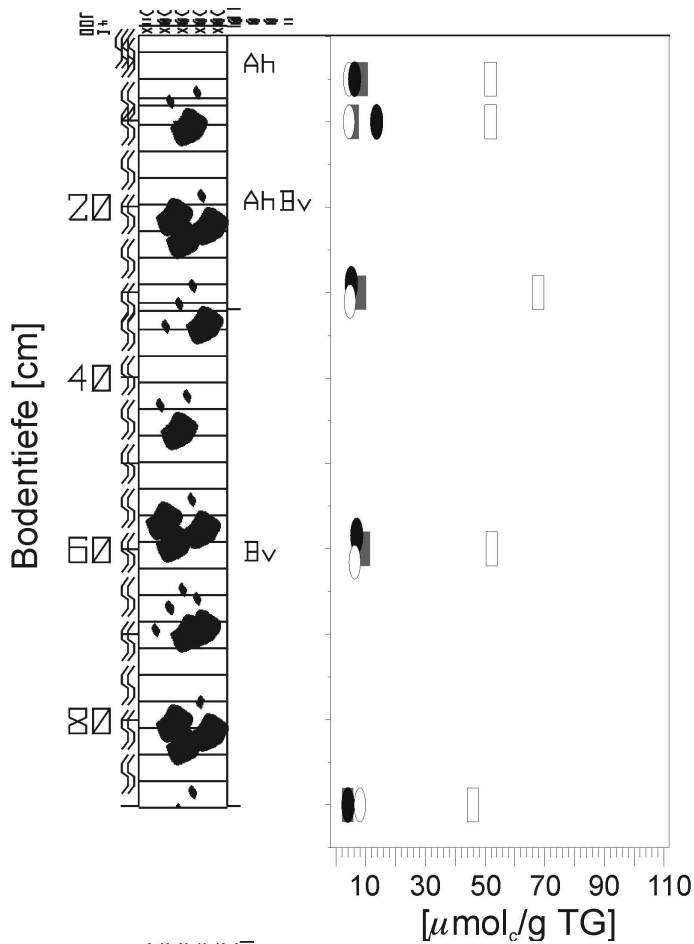
Lokales Raster 151

- FA Todtnau
- L-Material
 - Of-Material
 - Hauptbodenart Lehm
 - Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - schwach durchwurzelt
 - Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
 - Bodentyp: Braunerde
 - Feinerde saure Kationen
 - Stein saure Kationen
 - Feinerde basische Kationen
 - Stein basische Kationen



Lokales Raster 153

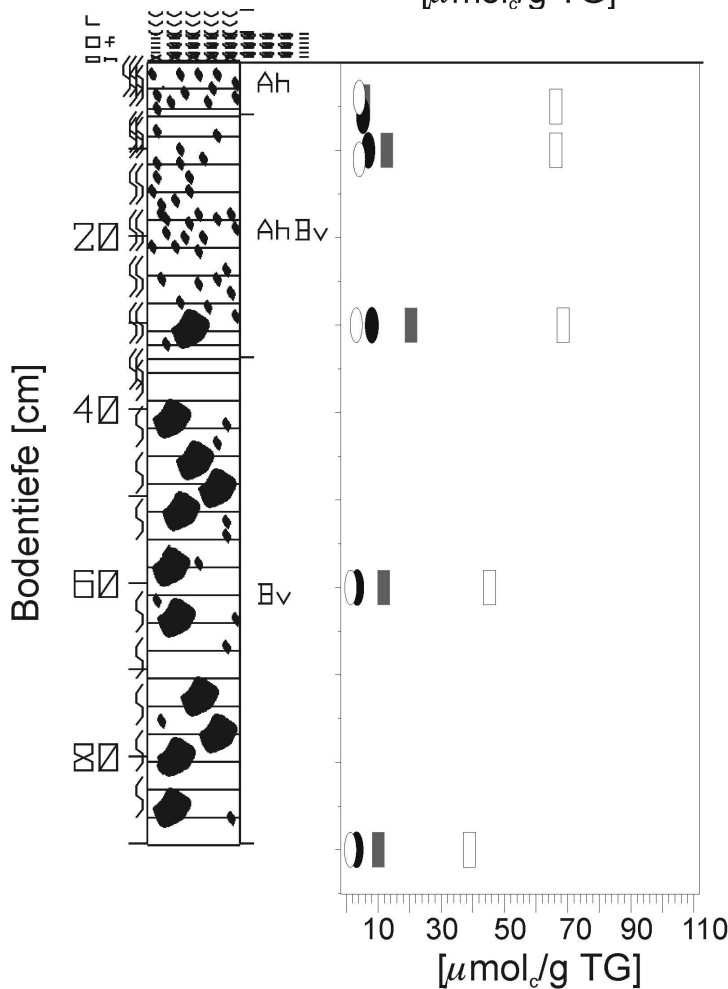
- FA Todtnau
- L-Material
 - Of-Material
 - Hauptbodenart Lehm
 - Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
 - mittel - stark durchwurzelt
 - Steine > 63 mm
 - Grus 2 - 63 mm
 - Bodentyp: Braunerde
 - Feinerde saure Kationen
 - Stein saure Kationen
 - Feinerde basische Kationen
 - Stein basische Kationen



Lokales Raster 154

FA Todtnau

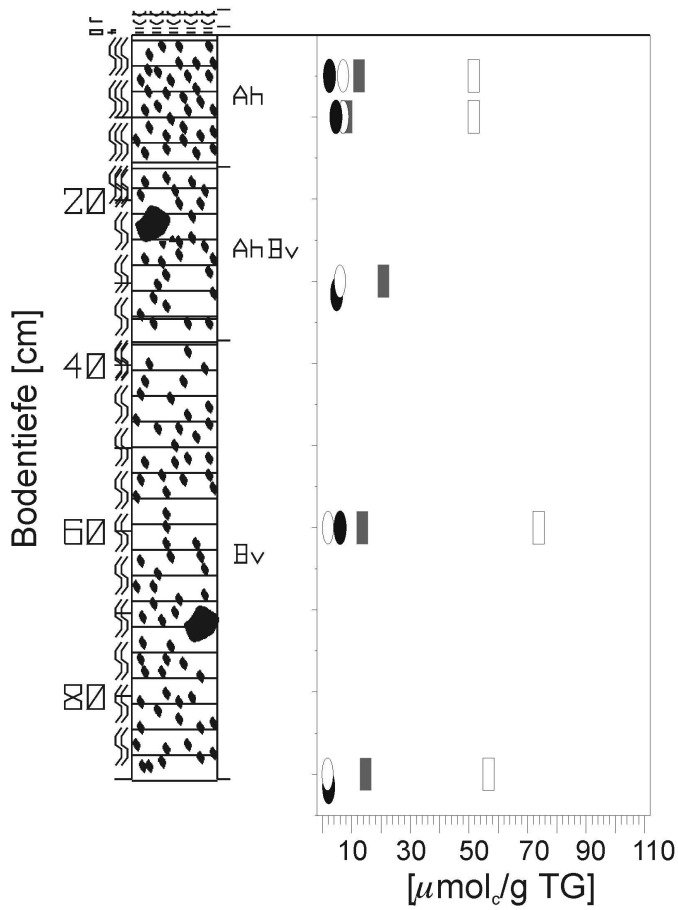
- ⏟⏟⏟⏟⏟ L-Material
- ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
- xx xx xx xx xx Oh-Material
- ☐ Hauetbodenart Lehm
- ⏟⏟⏟⏟⏟ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⏟⏟⏟⏟⏟ mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐☐☐ Feinerde saure Kationen
- ■ ■ Stein Kationen
- ○ ○ Feinerde basische Kationen
- ● ● Stein Kationen



Lokales Raster 168

FA Todtnau

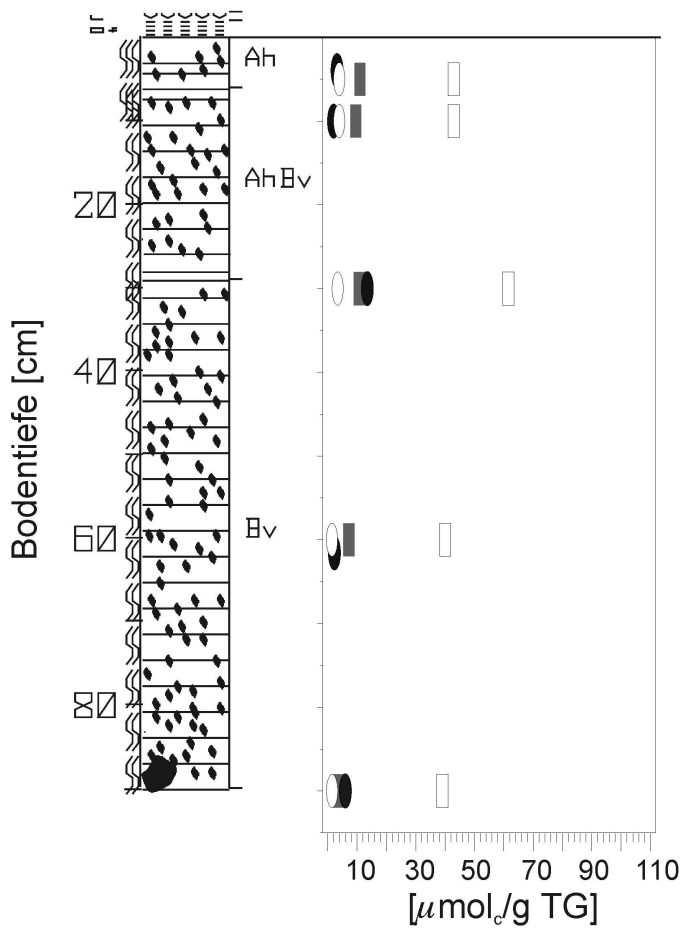
- ⏟⏟⏟⏟⏟ L-Material
- ≡≡≡≡≡≡ Of-Material
- xx xx xx xx xx Oh-Material
- ☐ Hauetbodenart Lehm
- ⏟⏟⏟⏟⏟ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- ⏟⏟⏟⏟⏟ mittel - stark durchwurzelt
- ⏟⏟⏟⏟⏟ schwach durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- ☐☐☐ Feinerde saure Kationen
- ■ ■ Stein Kationen
- ○ ○ Feinerde basische Kationen
- ● ● Stein Kationen



Lokales Raster 169

FA Todtnau

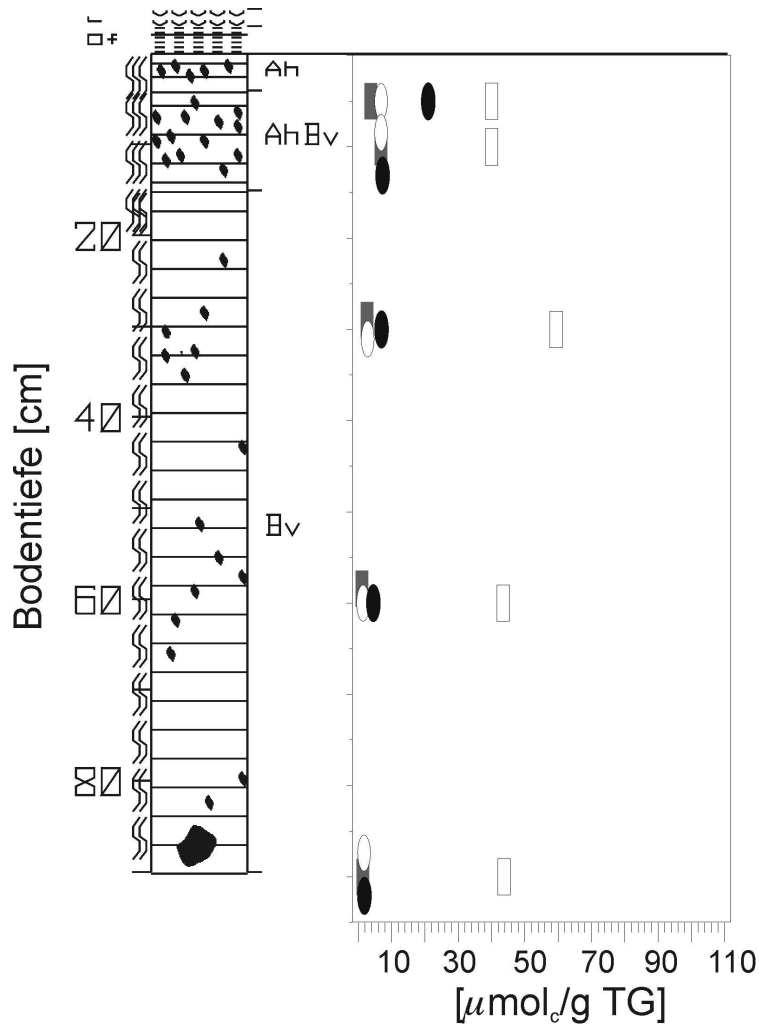
- L-Material
- Of-Material
- Hauptbodenart Lehm
- Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Lokales Raster 172

FA Todtnau

- L-Material
- Of-Material
- Hauptbodenart Lehm
- Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt
- mittel - stark durchwurzelt
- Steine > 63 mm
- Grus 2 - 63 mm
- Bodentyp: Braunerde
- Feinerde saure Kationen
- Stein saure Kationen
- Feinerde basische Kationen
- Stein basische Kationen



Lokales Raster 173

FA Todtmoos

~ ~ ~ ~ ~ L-Material

≡ ≡ ≡ ≡ ≡ Of-Material

▭ Hauptbodenart Lehm

~ ~ ~ ~ ~ Wurzelfilz - sehr stark durchwurzelt

~ ~ ~ ~ ~ mittel - stark durchwurzelt

● Steine > 63 mm

● Grus 2 - 63 mm

Bodentyp: Braunerde

▭ ▭ ▭ Feinerde saure Kationen

▭ ▭ ▭ Stein

○ ○ ○ Feinerde basische Kationen

● ● ● Stein Kationen