

4 ERGEBNISSE DER FREILANDUNTERSUCHUNGEN

4.1 Abiotische Bodenfaktoren

4.1.1 Bodenwassergehalte

An den meisten Standorten lagen die niedrigsten gefundenen Wassergehalte unter 10 %. Für die Flächen mit Minima >10 % (nPCB(+), T 26 und die Forstfläche) liegen nur von zwei bzw. drei Terminen Daten vor (Tab. 15). Im Mineralboden ergaben sich bei vier Flächen Mittelwerte unter 15 %. Die niedrigsten Wassergehalte wurden auf gbB festgestellt. Bei fast allen Böden wurden in den oberen 4 cm höhere Wassergehalte bei gleichzeitig höheren Schwankungsbreiten gemessen als in 4-8 cm Tiefe. Nur der Boden von nPCB(-) ist an der Oberfläche trockener.

Tab. 15: Wassergehalte (% TG) der Probeflächen in zwei Tiefen. n: Probenzahl, Max: Maximalwert, Min: Minimalwert, \bar{x} : Mittelwert, s: Standardabweichung, *: Tiefenstufen einer Fläche signifikant voneinander unterschieden (U-Test Mann-Whitney, $p < 0,05$)

Fläche	Tiefe	n	Max	Min	Median	\bar{x}	s
RefB	0-4 cm	110	65,7	2,8	21,22	22,70 *	14,24
	4-8 cm	110	46,5	2,6	10,84	11,93	7,52
nPAK	0-4 cm	114	70,7	3,3	21,25	21,69 *	12,93
	4-8 cm	115	28,1	3,8	11,40	12,24	5,83
T 14	0-4 cm	115	62,7	7,3	30,30	30,35 *	11,67
	4-8 cm	115	32,9	6,9	21,60	20,70	5,91
nPCB(-)	0-4 cm	95	56,8	1,5	12,70	15,37 *	10,15
	4-8 cm	95	132,3	8,0	16,60	31,18	31,01
nPCB(+)	0-4 cm	10	43,2	19,4	30,20	32,09	9,23
	4-8 cm	10	40,3	6,1	23,15	24,49	12,82
gbB	0-4 cm	25	37,9	2,4	10,80	11,33 *	7,47
	4-8 cm	24	11,6	1,6	4,65	5,16	2,56
T 26	0-4 cm	15	21,6	11,8	16,30	16,63 *	3,02
	4-8 cm	15	19,7	10,6	14,30	14,20	2,89
Forst	0-4 cm	13	153,9	36,8	84,40	85,75 *	35,78
	4-8 cm	13	53,1	12,7	24,80	26,58	13,82

Bei den drei am genauesten untersuchten Flächen zeigen sich Unterschiede in der Bodenfeuchte (Abb. 7-9). Während bei RefB und nPAK an 16 Terminen im Mineralboden Wassergehalte unter 15 % gemessen wurden, lagen bei T 14 die Wassergehalte an 19 Terminen über 15 %. Auch der Minimumwert ist bei T 14 deutlich höher. Bei Betrachtung der 22 gemeinsamen Probenahmeterminen der drei Flächen (Abb. 10) ist T 14 in beiden Tiefenstufen signifikant feuchter als RefB und nPAK. Ein Vergleich der Probenpunkte der Fläche RefB ergibt niedrigere Wassergehalte auf den Wällen ($\bar{x} = 9,88 \%$ TG) als in den Furchen ($\bar{x} = 12,24 \%$ TG). Dieser Unterschied ist allerdings nicht signifikant (14 Termine).

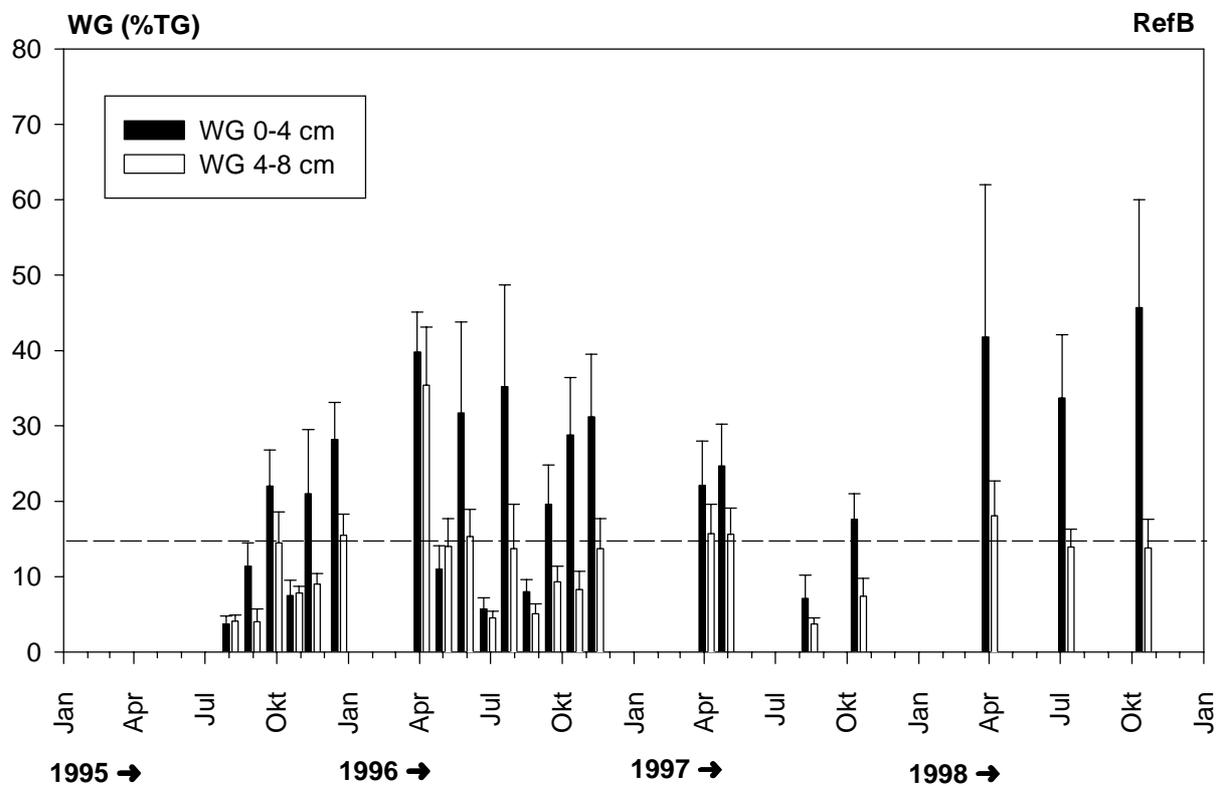


Abb. 7: Bodenwassergehalte (% TG) der Fläche RefB in zwei Tiefen zu 22 Probenahmeterminen (Mittelwerte mit Standardabweichung). Gestrichelte Linie: 15 % Wassergehalt

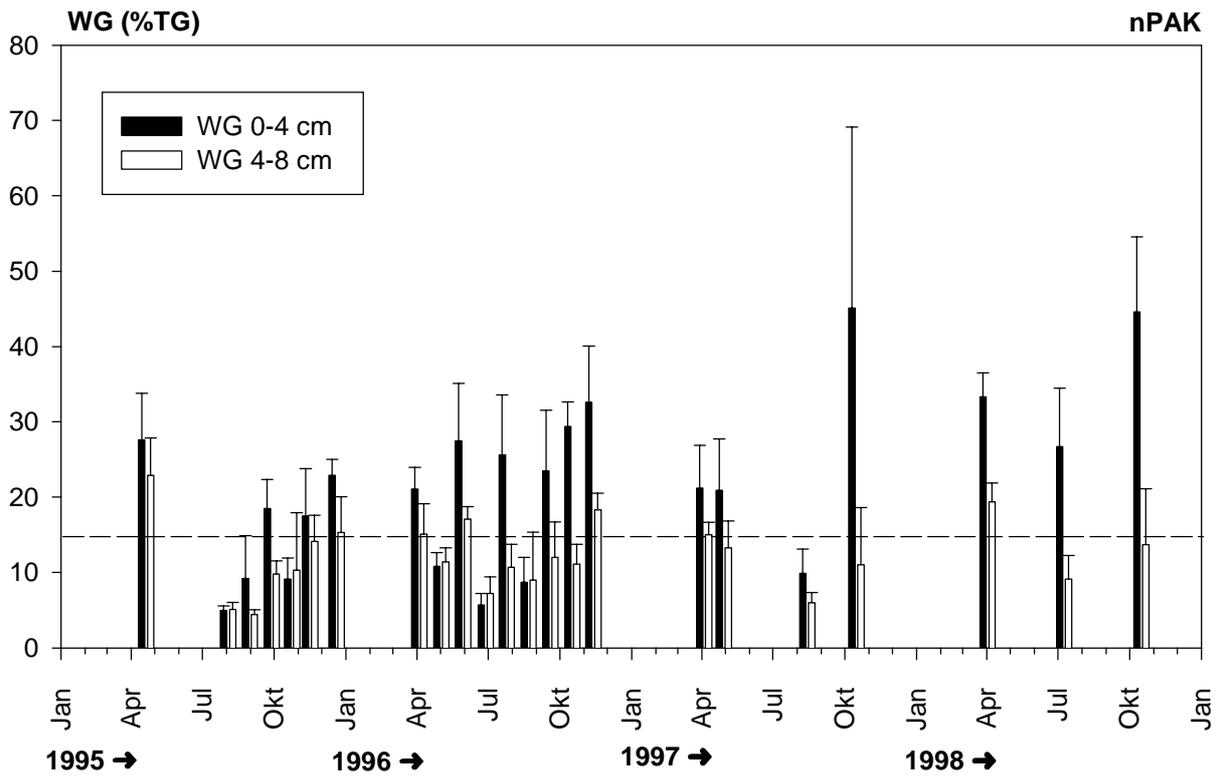


Abb. 8: Bodenwassergehalte (% TG) der Fläche nPAK in zwei Tiefen zu 23 Probenahmeterminen (Mittelwerte mit Standardabweichung). Gestrichelte Linie: 15 % Wassergehalt

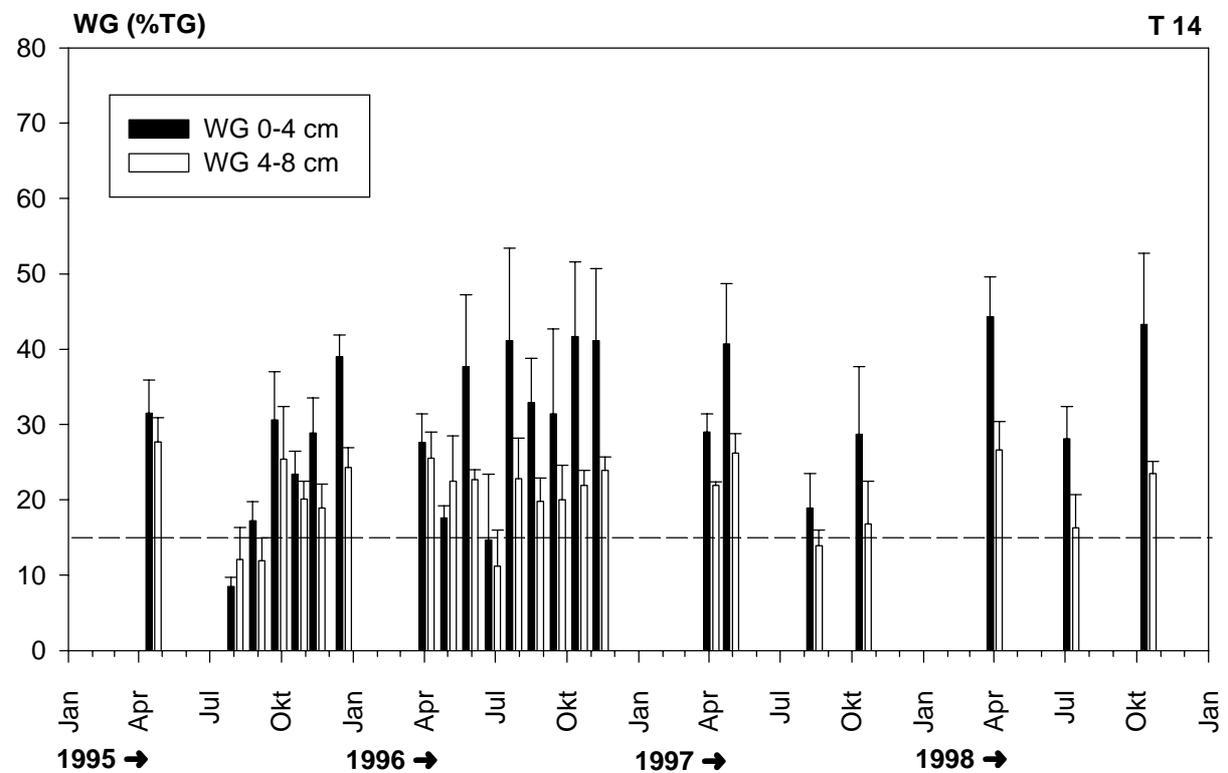


Abb. 9: Bodenwassergehalte (% TG) der Fläche T 14 in zwei Tiefen zu 23 Probenahmeterminen (Mittelwerte mit Standardabweichung). Gestrichelte Linie: 15 % Wassergehalt

Nicht immer treten niedrige bzw. hohe Bodenwassergehalte in Monaten mit geringen bzw. hohen Niederschlägen auf (vgl. Abschnitt 2.2). Eine Korrelation der Wassergehalts- und Niederschlagsdaten wird dadurch erschwert, dass die Bodenwassergehalte die aktuelle Feuchtesituation widerspiegeln, die nicht nur vom Monatsniederschlag abhängt, sondern u. a. auch von Evapotranspiration, Versickerung und dem Zeitpunkt des letzten Niederschlags vor der Probenahme. Zwischen den Niederschlagsdaten und den Bodenwassergehalten besteht bei den Flächen RefB, nPAK, T 14 und nPCB(-) kein signifikanter Zusammenhang (Pearson Produkt-Moment-Korrelation, $r < 0,7$). Für die anderen Flächen wurde der Zusammenhang wegen der geringen Datenmenge nicht geprüft.

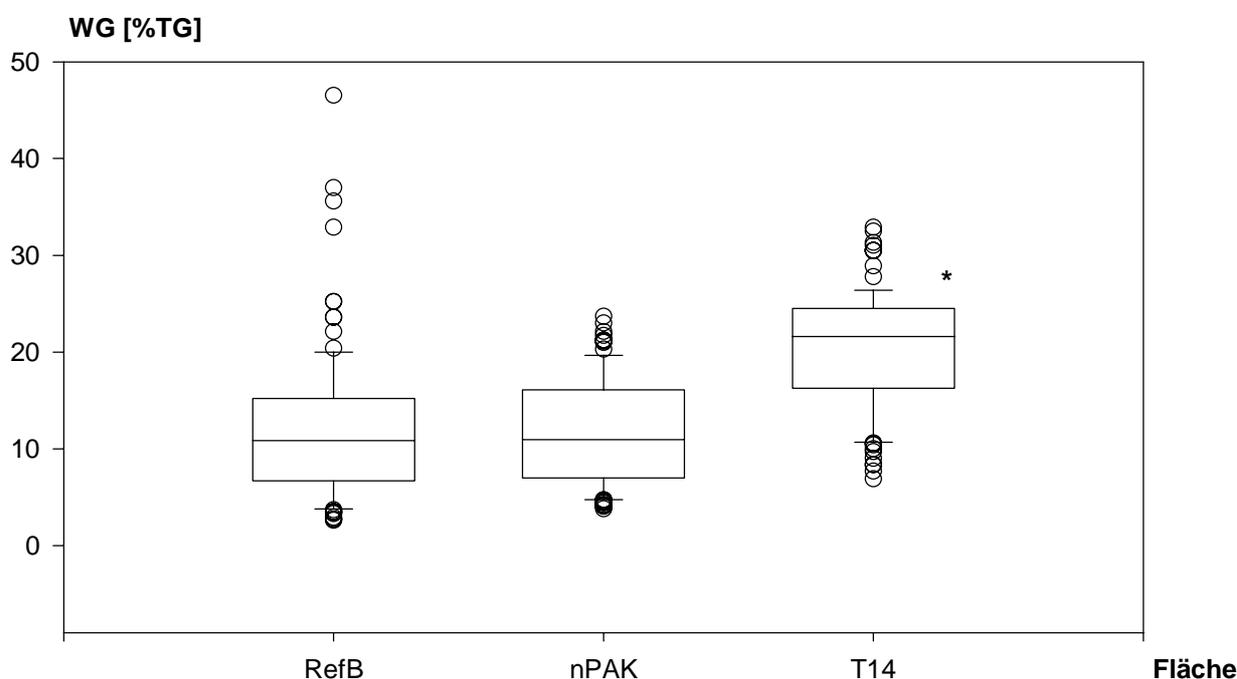


Abb. 10: Bodenwassergehalte (% TG) von drei Flächen (22 bzw. 21 (T 14) Probenahmeterminen).
 *: signifikant abweichend (Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse, Dunn´s Test)

4.1.2 Wasserhaltekapazität

Im Rahmen der Freilanduntersuchungen wurden die Bodenwassergehalte bestimmt, um diesbezüglich Unterschiede zwischen den Flächen festzustellen. Für Bodenorganismen entscheidend ist streng genommen die Wasserspannung, da sie Aussagen zur Verfügbarkeit des Bodenwassers erlaubt. Aus dem Wassergehalt lässt sich die Wasserspannung des Bodens allerdings nicht ohne weiteres ableiten, da sich die Wasserspannungskurven verschiedener Böden in Abhängigkeit von Bodenart und

Humusgehalt unterscheiden. Um die Bodenfeuchte der verschiedenen Böden besser vergleichen zu können, wurde die Wasserhaltekapazität (WHK) der Böden ermittelt. Die Wassergehalte können dann auch in Prozent der jeweiligen WHK ausgedrückt und einander gegenübergestellt werden. Auch in ökotoxikologischen Tests wird der Wassergehalt im Allgemeinen in Prozent der WHK des verwendeten Substrats (hier LUFA 2.2) angegeben. Die Wasserhaltekapazität der Rieselfeldböden liegt zwischen 25,1 % (gbB) und 45,7 % (T 14) im Mineralboden. Nur im Bucher Forst wurde eine höhere WHK als beim Standardboden LUFA 2.2 gemessen (Tab. 16).

Tab. 16: Wasserhaltekapazität (WHK) des LUFA 2.2 Standardbodens und der Rieselfeldböden in % TG sowie vier verschiedene Wassergehalte (WG) ausgedrückt in % der WHK. n: Zahl der Messungen

Boden	WHK (%)	n	WG in % der WHK bei			
	4-8 cm		WG 5 %	WG 10 %	WG 15 %	WG 20 %
RefB	38,3	3	13,1	26,1	39,2	52,2
nPAK	37,3	3	13,4	26,8	40,3	53,7
T 14	45,7	2	10,9	21,9	32,8	43,8
nPCB(-)	33,5	2	14,9	29,9	44,8	59,7
gbB	25,1	2	20,0	39,9	59,9	79,8
T 26	30,6	2	16,3	32,7	49,0	65,4
Bucher Forst	57,5	2	8,7	17,4	26,1	34,8
LUFA 2.2	47,8	10	10,5	20,9	31,4	41,8

4.1.3 Humusgehalt

Die tote organische Substanz (Humus) im Boden stellt Bindungsplätze für Metallkationen zur Verfügung. In reinen Sandböden liefert die organische Substanz oft einen höheren Anteil der Kationenaustauschkapazität als die mineralischen Bestandteile (AG BODEN 1994). Der Humusgehalt eines Bodens muss daher in Betrachtungen zu Mobilität und Verfügbarkeit von Schwermetallen mit eingehen. Die Humusgehalte der untersuchten Rieselfeldböden sind Tabelle 17 zu entnehmen. Die Zuordnung der verschiedenen Humusstufen erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994). Fünf der Rieselfeldböden sind mindestens in den oberen 4 cm stark humos und haben damit zwar einen ähnlichen Humusgehalt wie der Standardboden LUFA 2.2, jedoch bei höherer Schwankungsbreite. Der Boden der Fläche gbB weist in 4-8 cm Tiefe einen geringen Humusgehalt auf.

Tab. 17: Gehalte organischer Substanz der untersuchten Rieselfeldböden sowie des Standardbodens LUFA 2.2 als Glühverlust in % der Trockenmasse für zwei Tiefenstufen. PN: Anzahl Probenahmeterminale, KA 4: Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage

Boden	Organische Substanz (% TG)		Einstufung nach KA 4 (AG BODEN 1994)		PN
	0-4 cm	4-8 cm	0-4 cm	4-8 cm	
RefB	5,5-6,1	4,6-5,3	stark humos	mittel humos - stark humos	3
nPAK	5,4-7,1	4,8-6,8	stark humos	mittel humos - stark humos	3
T 14	6,5-6,9	5,7-6,3	stark humos	stark humos	3
nPCB(-)	6,4-6,7	4,8-7,7	stark humos	mittel humos - stark humos	2
nPCB(+)	9,3	7,9	stark humos	stark humos	1
gbB	3,2-3,7	0,8-1,2	mittel humos	sehr schwach - schwach humos	2
T 26	3,4-3,5	2,5-3,8	mittel humos	mittel humos	2
Bucher Forst	52,7	14,2	organisch	sehr stark humos	1
LUFA 2.2	5,3		stark humos		2

4.1.4 Bodenreaktion

Die pH-Werte der untersuchten Rieselfeldböden finden sich in Tabelle 18. Die Zuordnung der verschiedenen pH-Stufen erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994). Die Rieselfeldböden sind danach im Oberboden überwiegend als stark sauer bis sehr stark sauer anzusprechen. Eine Ausnahme macht der Boden gbB mit etwas höheren pH-Werten (mittel sauer). Der zum Vergleich herangezogene Forstboden zeigt eine niedrigere Bodenreaktion als die Rieselfeldböden. Der für die Laborversuche verwendete Boden LUFA 2.2 zeigt eine ähnliche Bodenreaktion wie gbB und ist damit weniger sauer als die meisten der Rieselfeldböden.

Tab. 18: pH-Werte (CaCl₂) der untersuchten Rieselfeldböden für zwei Tiefenstufen. PN: Anzahl Probenahmeterminale, KA 4: Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage

Boden	pH-Wert (CaCl ₂)		Einstufung nach KA 4 (AG BODEN 1994)	PN
	0-4 cm	4-8 cm		
RefB	4,7-5,0	4,7-4,9	stark sauer	5
nPAK	4,3-4,5	3,7-4,9	stark sauer - sehr stark sauer	5
T 14	4,4-4,7	4,1-4,3	stark sauer	5
nPCB(-)	3,9-4,0	3,6-4,6	stark sauer - sehr stark sauer	3
nPCB(+)	4,1	4,2	stark sauer	1
gbB	5,3-6,0	4,9-5,2	mittel sauer	3
T 26	4,9	4,8	stark sauer	1
Bucher Forst	3,0-3,2	3,0-3,1	sehr stark sauer	2
LUFA 2.2	5,0-5,8		mittel sauer	> 10

4.1.5 Bodenart

Die untersuchten Böden gehören alle zur Bodenartenhauptgruppe „Sand“, wobei ein reiner Sand nur auf der Fläche gbB vorkommt. Alle anderen Böden wurden als schwach lehmiger Sand (SI2) angesprochen, einschließlich des Standardbodens, der für die Laborversuche herangezogen wurde (Tab. 19).

Tab. 19: Bodenart der untersuchten Flächen sowie des Standardbodens LUFA 2.2 im Vergleich. Sandgehalt und Kurzzeichen gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung (AG BODEN 1994)

Fläche	Bodenart	Kurzzeichen	% Sandgehalt
RefB	schwach lehmiger Sand	SI2	67-85
nPAK	schwach lehmiger Sand	SI2	67-85
T 14	schwach lehmiger Sand	SI2	67-85
nPCB(-)	schwach lehmiger Sand	SI2	67-85
nPCB(+)	schwach lehmiger Sand	SI2	67-85
gbB	Sand	Ss	85-100
T 26	schwach lehmiger Sand	SI2	67-85
Bucher Forst	schwach lehmiger Sand	SI2	67-85
LUFA 2.2	schwach lehmiger Sand	SI2	67-85

4.1.6 Temperatur

Die Bodentemperaturen wurden in drei Tiefenstufen gemessen. Die in Tabelle 20 angegebenen Mittelwerte entsprechen nicht dem Jahresmittel, da die Temperatur nicht monatlich gemessen wurde (s. Anhang 2). Innerhalb einer Tiefenstufe unterscheiden sich die Werte für die vier untersuchten Flächen nicht signifikant (Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse). Da die Messung an einem Probenahmetermin auf den verschiedenen Flächen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander erfolgte, sind die Werte zwischen den Flächen allerdings auch nur eingeschränkt vergleichbar. Die Temperaturen an der Bodenoberfläche liegen im Mittel um 15 °C, im Mineralboden erwartungsgemäß darunter. Auf der Fläche nPCB(-) kommt es in den vegetationsfreien Bereichen im Sommer bei direkter Sonneneinstrahlung zu Spitzenwerten von über 40 °C.

Tab. 20: Temperaturen der untersuchten Rieselfeldböden für drei Tiefenstufen. Mittelwert (Minimum – Maximum). PN: Summe der Probenahmeterminale in den Jahren 1995 und 1996

Boden	Temperatur °C			PN
	Bodenoberfläche	5 cm	10 cm	
RefB	14,8 (8,7 – 24,3)	11,5 (0,6 – 17,0)	11,1 (0,7 – 16,3)	14
nPAK	16,4 (8,1 – 27,8)	13,0 (4,1 – 19,6)	12,0 (2,8 – 17,3)	14
T 14	15,3 (8,5 – 24,1)	11,1 (1,9 – 15,5)	10,7 (1,4 – 14,8)	13
nPCB(-)	18,5 (7,5 – 45,9)	14,0 (4,1 – 24,3)	12,6 (2,1 – 21,4)	14

4.1.7 Schwermetallgehalte

Die Ergebnisse der Messungen des Königswasseraufschlusses werden im Folgenden als „Gesamtgehalte“, die des Ammoniumnitrat-Aufschlusses als „mobile Fraktion“ bezeichnet (vgl. Abschnitt 6.4). Die untersuchten Flächen lassen sich anhand der Schwermetallgehalte in gering belastete (T 26, gbB, Forst) und in deutlich belastete (RefB, nPAK, T 14, nPCB) unterscheiden (Abb. 11-14). Die höchsten Schwermetallgehalte wurden bei nPCB(+) (mit Vegetation) gemessen. Die Zink-Gesamtgehalte nehmen in der Reihenfolge RefB > nPAK > T 14 > nPCB(-) ab. Der Wert für nPCB(+) liegt mehr als doppelt so hoch wie der für nPCB(-) (ohne Vegetation). Die Fläche T 26 nähert sich bezüglich Zink der Gruppe der stärker belasteten Böden an. Der mobile Zinkanteil beträgt zwischen 15 und 33 % des Gesamtgehaltes (s. a. Anhang 3). Die Cadmium-Gesamtgehalte der höher belasteten Flächen liegen zwischen 4,5 und 18 mg/kg (TG) (Abb. 12). Als mobile Fraktion liegen zwischen 9 und 24 % des Gesamtgehalts vor. Die Kupfer-Gesamtgehalte liegen für die Flächen RefB, nPAK, T 14 und nPCB(-) auf gleichem Niveau (130-153 mg/kg). Auch hier liegen die Werte von nPCB(+) weit darüber, die der anderen drei Flächen deutlich darunter (Abb. 13). Die mobilen Cu-Anteile betragen zwischen 0,6 und 2,1 %. Die höchsten Chrom-Gehalte wiesen nPCB(+) (948 mg/kg) und RefB (577 mg/kg) auf (Abb. 14). nPAK, T 14 und nPCB(-) lieferten Werte zwischen 250 und 360 mg/kg. Für die anderen drei Flächen wurden Werte von ≤ 20 mg/kg ermittelt. Der mobile Anteil am Gesamtgehalt war für Kupfer bei der Forstfläche am höchsten, gefolgt von gbB. Für Zink und Cadmium zeigt T 14 die höchsten mobilen Anteile am Gesamtgehalt. Eine Analyse des Zusammenhangs zwischen mobilen Schwermetallgehalten und den pH-Werten ergab eine signifikante, negative Korrelation bei Cadmium ($r = -0,85$) und Zink ($r = -0,92$) (Pearson Produkt-Moment-Korrelation). Kein signifikanter Zusammenhang bestand dagegen zwischen den mobilen Gehalten von Zink, Cadmium und Kupfer einerseits und dem Gesamtgehalt des jeweiligen Metalls oder dem Humusgehalt des Bodens andererseits.

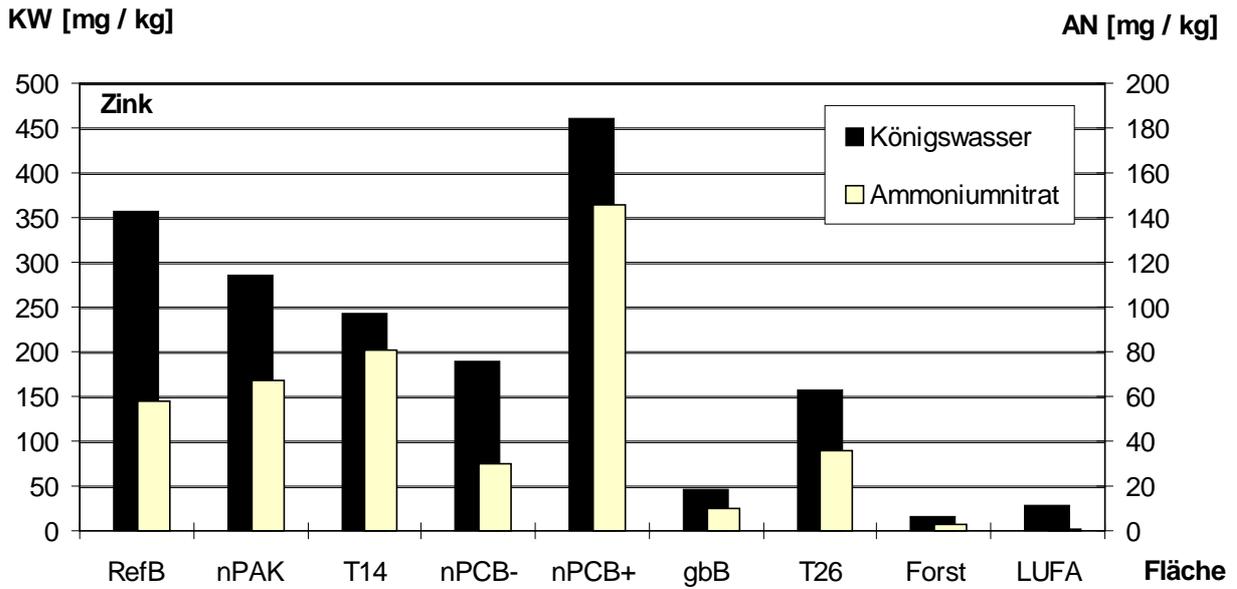


Abb. 11: Zinkgehalte der untersuchten Standorte: Königswasseraufschluss (KW, Skala links) und Ammoniumnitrat-Aufschluss (AN, Skala rechts), in mg/kg (TG)

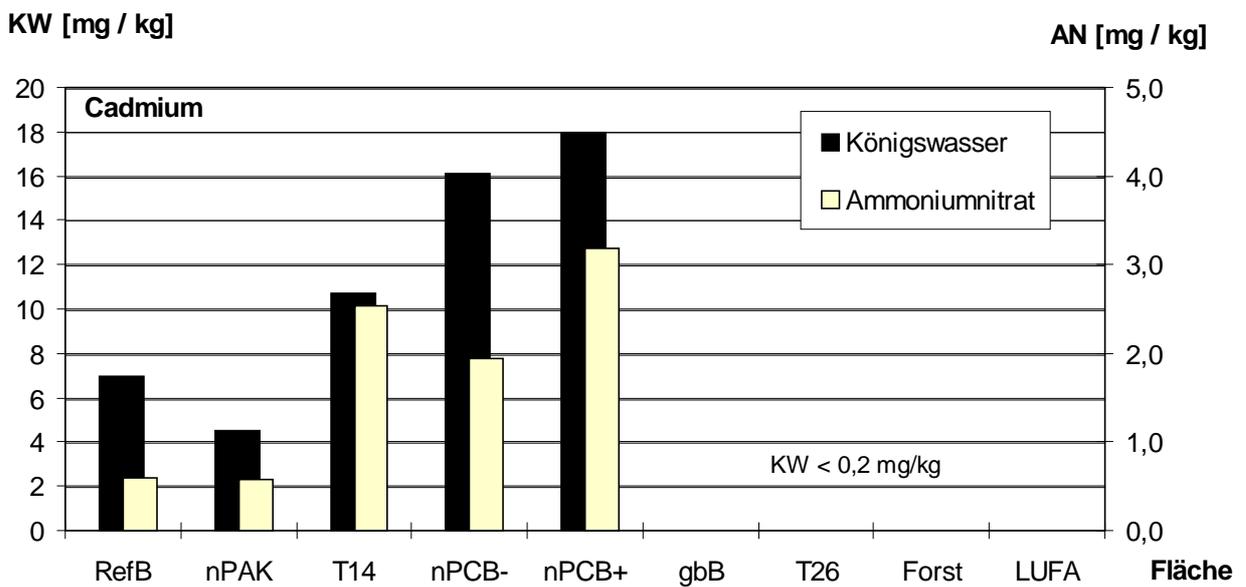


Abb. 12: Cadmiumgehalte der untersuchten Standorte: Königswasseraufschluss (KW, Skala links) und Ammoniumnitrat-Aufschluss (AN, Skala rechts), in mg/kg (TG)

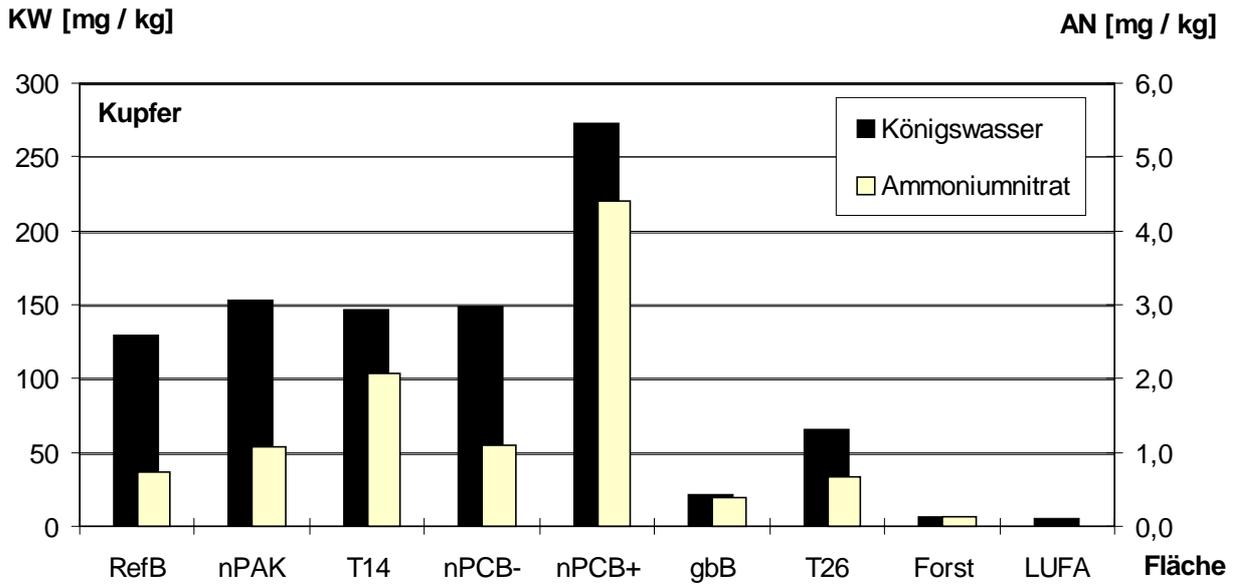


Abb. 13: Kupfergehalte der untersuchten Standorte: Königswasseraufschluss (KW, Skala links) und Ammoniumnitrat-Aufschluss (AN, Skala rechts), in mg /kg (TG)

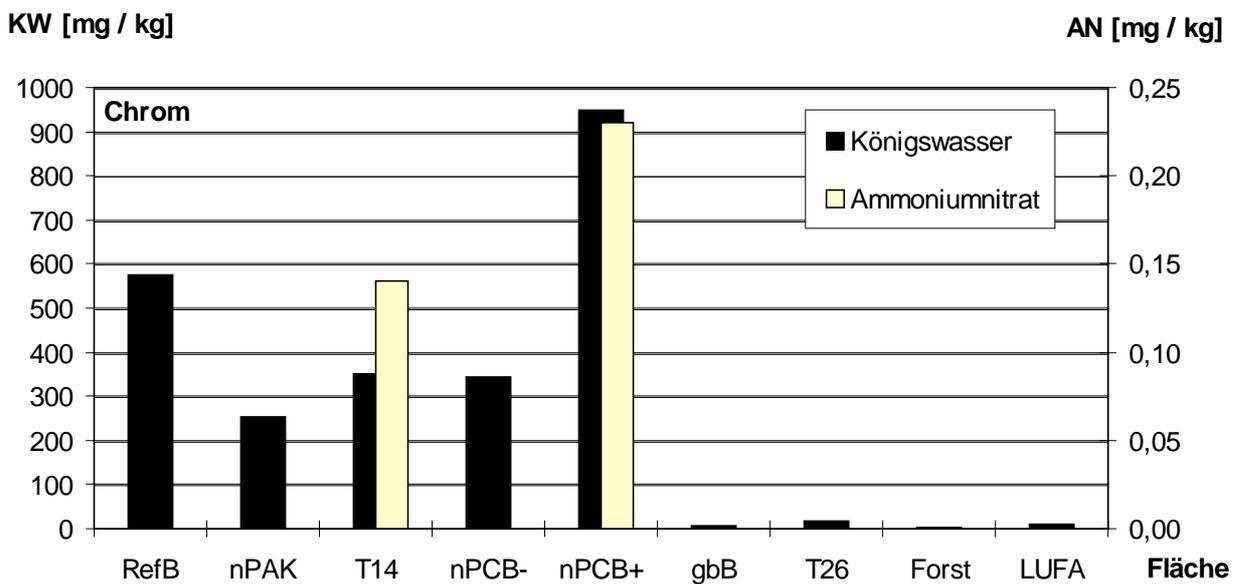


Abb. 14: Chromgehalte der untersuchten Standorte: Königswasseraufschluss (KW, Skala links) und Ammoniumnitrat-Aufschluss (AN, Skala rechts), in mg /kg (TG). Ammoniumnitrat-Aufschluss nur bei T 14 und nPCB(+) über der Nachweisgrenze von 0,1 mg / kg

4.2 Enchytraeiden

4.2.1 Enchytraeidenarten der untersuchten Flächen

Insgesamt wurden 15 Arten bzw. Unterarten gefunden. Da die Taxonomie der Familie Enchytraeidae Unsicherheiten und Probleme aufweist und viele Arten noch nicht beschrieben sind (SCHMELZ ET AL. 1999, SCHMELZ 1996), konnten nicht alle Tiere bis zur Art bestimmt werden. Insbesondere juvenile oder beschädigte Tiere wurden manchmal nur bis zur Gattung bestimmt, da die Geschlechtsorgane bei den meisten Arten wesentliche Bestimmungsmerkmale zeigen. Die gefundenen Taxa sollen hier kurz kommentiert werden (Tab. 21). Reaktions- und Feuchtezeigerwert sowie Lebensform- und Strategietyp der Arten sind in Tabelle 23 angegeben, soweit bekannt (nach GRAEFE & SCHMELZ 1999, GRAEFE & BELOTTI 1999).

Tab. 21: Kommentierte Liste der gefundenen Taxa

Art	Bemerkungen
<i>Achaeta aberrans</i> Nielsen & Christensen, 1961	keine
<i>Achaeta affinis</i> Nielsen & Christensen, 1959	spermathekenlose Form; Länge des Samentrichters abweichend von der Beschreibung $\frac{2}{3}$ des Körperdurchmessers
<i>Achaeta brevivasa</i> Graefe, 1980	keine
<i>Cognettia sphagnetorum</i> (Vejdovský, 1877)	Vermehrung hauptsächlich durch Fragmentation nicht geschlechtsreifer Tiere. Bestimmung der Juvenilen / Fragmente möglich. Besonderheit hier: Das Auftreten eines adulten Tieres im Nov. 1996, denn: „...mature animals are exceedingly rare...“ NIELSEN & CHRISTENSEN (1959, S. 43)
<i>Enchytraeus buchholzi</i> Vejdovský, 1879	Möglicherweise Artengruppe aus morphologisch kaum unterscheidbaren Arten (ROTA & HEALY 1994). In Proben von 1995 zusammengefasst mit <i>E. christenseni</i>
<i>Enchytraeus christenseni christenseni</i> Dózsa-Farkas, 1992	(= <i>Enchytraeus minutus minutus</i> Nielsen & Christensen, 1961). Borstenformel (gemäß NIELSEN & CHRISTENSEN 1959): 2-2,3:2,3-3. Möglicherweise Artengruppe aus morphologisch kaum unterscheidbaren Arten (SCHMELZ ET AL. 1999)
<i>Enchytraeus christenseni bisetosus</i> Rota & Healy, 1994	Borstenformel: 2-2:2-2. Vereinzelt Auftreten von Adulten ohne Spermatheke, beschrieben bei ROTA (1994) sowie ROTA & HEALY (1994), kann hier bestätigt werden. Sonst wie <i>E. chr. christenseni</i>

Tab. 21 (Fortsetzung): Kommentierte Liste der gefundenen Taxa

<i>Enchytraeus norvegicus</i> Abrahamsen, 1969	keine
<i>Enchytraeus sp. (RefB5)</i>	Merkmalskombination dieser Art konnte keiner der vorliegenden Beschreibungen zugeordnet werden: Länge: 29-34 Segmente, 4-7 mm (Zuchttiere bis 44 Segmente und 14 mm). Borstenformel: 2-2,3:2,3-3. Coelomocyten fein granuliert/gerieft, Granula nicht lichtbrechend. Samenblase groß. Länge Samentrichter $\frac{2}{3}$ – $\frac{3}{4}$ des Körperdurchmessers. Ausmündung der Spermatheke und ektaler Gang mit Drüsen, Ampulle eiförmig
<i>Enchytraeus sp.</i>	Arten, die aufgrund fehlender (juvenile Tiere) bzw. nicht erkennbarer Merkmale nicht bestimmt werden konnten. Häufig nur einzelne Exemplare
<i>Fridericia bulbosa</i> (Rosa, 1887), sensu Nielsen & Christensen, (1959)	Bestimmung beruht auf den Angaben von NIELSEN & CHRISTENSEN (1959), welche sich wahrscheinlich auf eine andere Art beziehen, als die Originalbeschreibung von Rosa (SCHMELZ, mündl. Mitt.)
<i>Fridericia sp. (gran)</i>	Art bisher ohne gültige Beschreibung, aber aus anderen Untersuchungen bekannt (GRAEFE 1997b)
<i>Fridericia sp.</i>	Arten, die aufgrund fehlender (juvenile Tiere) bzw. nicht erkennbarer Merkmale nicht bestimmt werden konnten. Häufig nur einzelne Exemplare
<i>Henlea perpusilla</i> Friend, 1911	keine
<i>Henlea ventriculosa</i> (d'Udekem, 1854)	keine
<i>Mesenchytraeus glandulosus</i> (Levinsen, 1884)	keine
<i>Oconorella cambrensis</i> (O'Connor, 1963)	(= <i>Marionina cambrensis</i> O'Connor, 1963)

Die Arten *E. buchholzi* und *E. christenseni* wurden im Wesentlichen anhand der Coelomocyten unterschieden. Während die Coelomocyten bei *E. buchholzi* locker mit lichtbrechenden Granula gefüllt sind, sind sie bei *E. christenseni* dichtgepackt mit nicht-lichtbrechenden Granula (Wabenmuster). Es wurden außerdem Exemplare der Gattung *Enchytraeus* mit sehr fein gepunkteten Coelomocyten gefunden. Da jedoch in einigen Fällen im selben Tier feingepunktete Coelomocyten und solche mit Wabenmuster gefunden wurden, wurden alle Tiere mit fein gepunkteten Coelomocyten *E. christenseni* zugeordnet. Die Artengruppe *E. buchholzi* / *E. christenseni* bedarf der taxonomischen Überarbeitung. Zurzeit besteht weder Einigkeit darüber,

welche Merkmale für die Unterscheidung der Arten relevant sind, noch welcher Merkmalskombination welcher Artname zuzuordnen ist (SCHMELZ ET AL. 1999).

4.2.2 Abundanzen und Artenspektrum

Einen ersten Überblick über die Besiedlung der untersuchten Flächen mit Enchytraeiden geben die Mittelwerte der Gesamtabundanzen aus allen Probenahmetermeninen (Abb. 15). Die Abundanzen liegen bei allen Rieselfeldflächen unter 7000 Ind./m² und unterscheiden sich im Flächenvergleich nicht wesentlich. Nur auf der Forstfläche ist eine deutlich höhere Individuendichte nachzuweisen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Probenahmen nicht auf allen Flächen gleichzeitig erfolgten und die Zahl der Probenahmen je Fläche unterschiedlich war (vgl. Tab 3). Auf nPCB(-) wurden an drei von vier Terminen keine Tiere gefunden. Bei der vierten Probenahme lieferte eine Probe fünf tote Tiere, die während der Extraktion verendet waren. Bei nPCB(+) betrug die Abundanz an einem Termin 2036 Ind./m². An einem weiteren Termin wurden in einer Probe 73 tote Tiere gefunden sowie ein lebendes in einer weiteren Probe. Der Mittelwert beider Termine unter Berücksichtigung der verendeten Tiere ist in Abbildung 15 dargestellt. Ansonsten wurde die Fläche nPCB bei den folgenden Darstellungen nicht berücksichtigt.

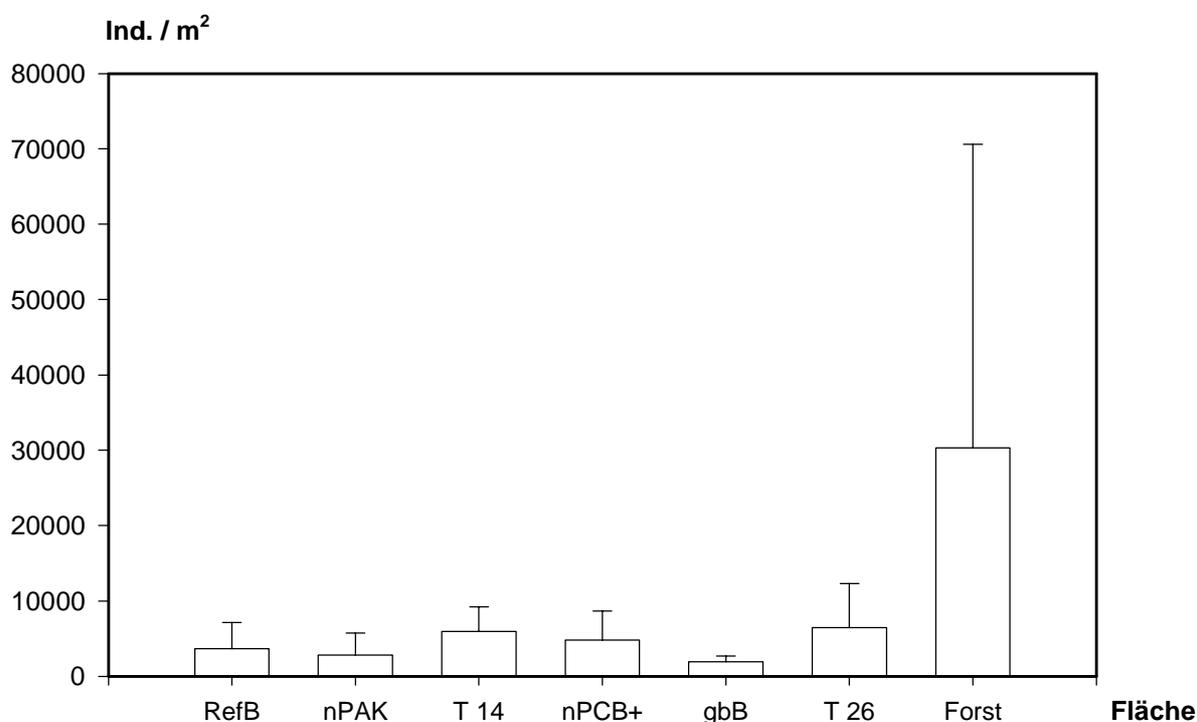


Abb. 15: Gesamtabundanzen der Standorte (Mittelwerte aus allen Probenahmetermeninen und Standardabweichung). Zahl der Probenahmetermine je Standort s. Tab. 3.

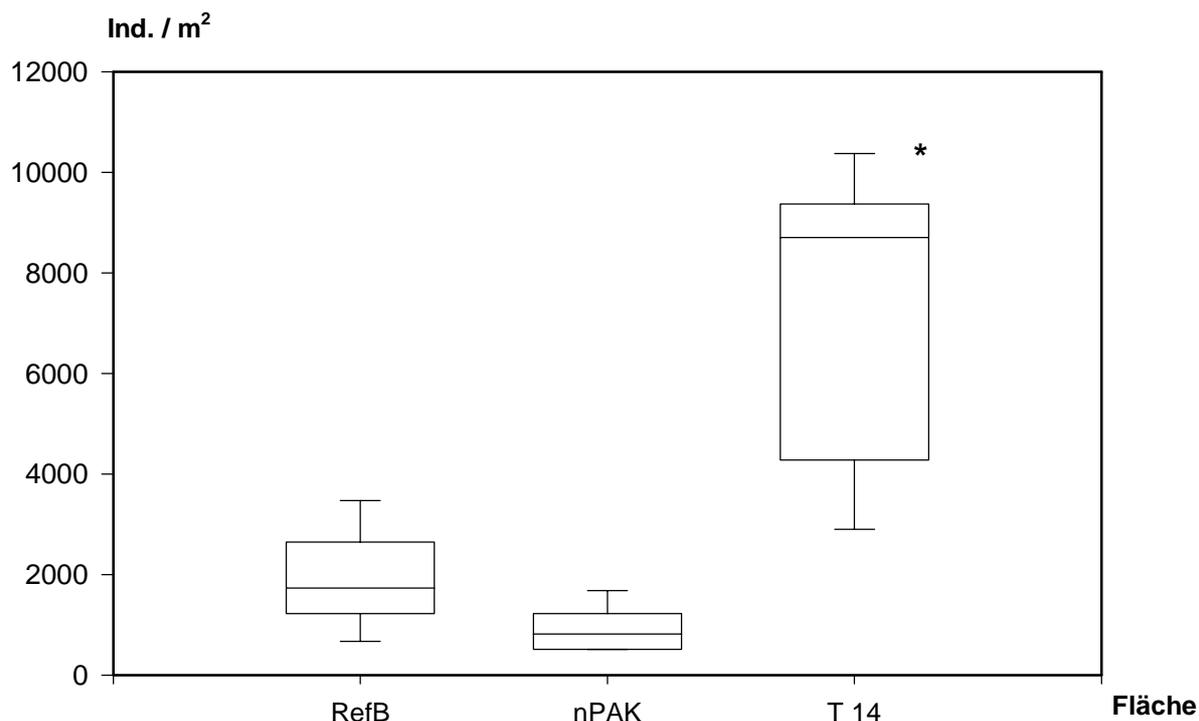


Abb. 16: Gesamtabundanzen von drei Flächen zu sechs Probenahmeterminen. * signifikant abweichend (ANOVA, Tukey Test)

Vergleicht man die Daten von sechs gleichzeitigen Probenahmeterminen der drei am intensivsten untersuchten Flächen, ergibt sich ein etwas anderes Bild: Die Abundanzen auf T 14 erweisen sich als signifikant höher als auf RefB und nPAK (Abb. 16). In der Zahl der gefundenen Taxa unterscheiden sich die Rieselfeldflächen nur wenig (Tab. 22). Die gefundenen Arten sind überwiegend Schwachsäurezeiger, so dass die mittleren Reaktionszeigerwerte zwischen 6 und 7 liegen. Bemerkenswert ist auf drei der Flächen das vereinzelte Vorkommen von einigen Mäßig- bis Starksäurezeigern (*Achaeta brevivasa*, *Oconnorella cambrensis*, *Enchytraeus norvegicus*). Bezüglich der Bodenfeuchte sind die gefundenen Arten entweder indifferent oder Frischezeiger. Auf RefB dominiert *Enchytraeus christenseni* mit über 50 %, während *E. buchholzi* etwa ¼ der gefundenen Tiere stellt (Abb. 17). Annähernd umgekehrt ist das Verhältnis der beiden Arten auf T 14, während auf nPAK beide Arten etwa zu gleichen Teilen vertreten sind (Abb. 18-19). Damit dominieren auf diesen drei Flächen r-Strategen der Gattung *Enchytraeus*. Gleichzeitig zeigt sich aber bei nPAK, ebenso wie bei gbB (Abb. 20), ein deutlicher Anteil an K-Strategen der Gattungen *Fridericia* und *Henlea* (> 40 %). Das Artenspektrum der Forstflächen unterscheidet sich grundlegend von dem der Rieselfeldflächen, da hier nur säurestresstolerante Arten vorkommen. Die mittlere Reaktionszahl liegt entsprechend

Tab. 23: Artenliste mit Zeigerwerten (GRAEFE & SCHMELZ 1999), Lebensformtypen (GRAEFE & BELOTTI 1999) sowie Angaben zur Häufigkeit. Unter Charakterart ist die durch die Art charakterisierte Zersetzergesellschaft angegeben (GRAEFE 1994). Legende s. Tab. 6, 24 und 25

Art	F	R	S-Typ	H-Typ	Charakterart	Häuf.
<i>Achaeta aberrans</i>	5	3	s	2-4c	2. 1 1	6
<i>Achaeta brevivasa</i>	5	1	s	2-4cd	2. 1 1	6
<i>Cognettia sphagnetorum</i>	x	2	s/f	12b-d	2.	9
<i>Enchytraeus buchholzi</i>	x	7	r	2-4a	1.	9
<i>Enchytraeus christenseni</i>	x	7	r	2-4a	1.	9
<i>Enchytraeus norvegicus</i>	5	5	s	4bc	-	5
<i>Fridericia bulbosa</i>	x	7	k	4a	1.	5
<i>Henlea perpusilla</i>	x	7	k	2-4a	3.	9
<i>Henlea ventriculosa</i>	x	7	k	2-4a	-	8
<i>Mesenchytraeus glandulosus</i>	5	5	s/j	1a-c	-	6
<i>Oconorella cambrensis</i>	5	4	s	2-4bc	-	6

Tab. 24: Legende zu Tab. 22 und 23: Ökologisches Verhalten der Enchytraeiden: Definition der Feuchte- und Reaktionszeigerwerte (nach GRAEFE & SCHMELZ 1999)

F	Feuchtezahl – Vorkommen im Gefälle der Bodenfeuchtigkeit
5	Frischezeiger, Schwergewicht in mittelfeuchten Böden, in nassen Böden fehlend
7	Feuchtezeiger, Schwergewicht in gut durchfeuchteten, aber nicht nassen Böden
9	Nässezeiger, Schwergewicht in oft durchnässten (luftarmen) Böden
11	aquatische Art
R	Reaktionszahl – Vorkommen im Gefälle der Bodenreaktion und des Kalkgehaltes
1	Starksäurezeiger, niemals in schwach sauren bis alkalischen Böden vorkommend
3	Säurezeiger, Schwergewicht in sauren Böden, ausnahmsweise auch bis in den neutralen Bereich
5	Mäßigsäurezeiger, in stark sauren wie in neutralen bis alkalischen Böden selten
7	Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger, niemals in stark sauren Böden
9	Basen- und Kalkzeiger, stets in kalkreichen Böden

gerade Zahlen für Zwischenstufen
x indifferentes oder ungeklärtes Verhalten
umF, umR ungewichtete mittlere Zeigerwerte

Tab. 25: Legende zu Tab. 23: Lebensformtypen der Enchytraeiden und Häufigkeitskennwerte (nach GRAEFE & SCHMELZ 1999, GRAEFE & BELOTTI 1999)

S-Typ Strategietypen der Enchytraeidenarten	
r	r-selektierter Opportunist mit rascher Entwicklung und hoher Fortpflanzungsrate (geschlechtlich oder ungeschlechtlich)
k	K-selektierte persistente Art mit langsamer Entwicklung und einer der Umweltkapazität angenäherten Fortpflanzungsrate
s	an Säurestress angepasste stresstolerante Art
f	Art mit ungeschlechtlicher Vermehrung durch Fragmentation
j	Art mit jahreszeitlich festgelegtem Entwicklungszyklus
H-Typ Vorkommen der Arten im Kontinuum der Humushorizonte und Humusformen	
1	im L-Horizont, Streubewohner
2	im Of-Horizont (Vermoderungshorizont)
3	im Oh-Horizont (Humusstoff-Horizont)
4	im Ah-Horizont, Mineralbodenbewohner
a	in A-Mull, L-Mull und F-Mull (MU)
b	in A-Moder (MOM)
c	in H-Moder (Typischer Moder: MO)
d	in F-Moder (Rohhumusartiger Moder oder Rohhumus: RO)
Häufigkeit des Auftretens im zugehörigen Zersetzergesellschaftstyp (norddeutsche Region)	
1	äußerst selten
2	sehr selten
3	selten
4	mäßig selten
5	weder selten noch häufig
6	mäßig häufig
7	häufig, aber keineswegs überall
8	sehr häufig
9	fast überall

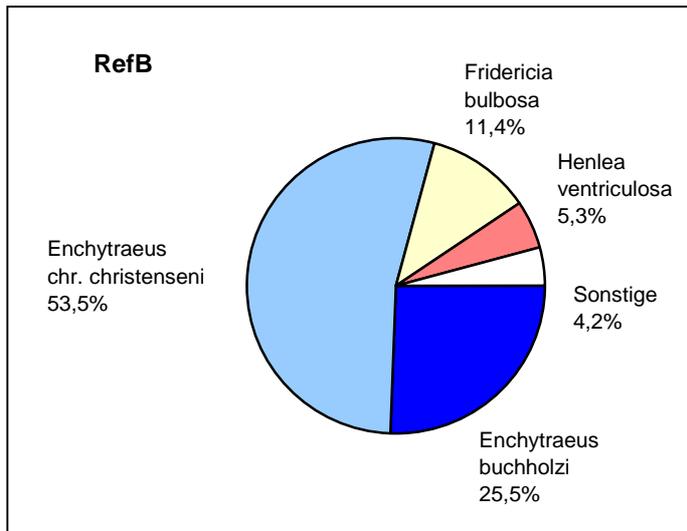


Abb. 17: Mittlere Dominanzen der Fläche RefB aus den Probenahmen 1996-1998

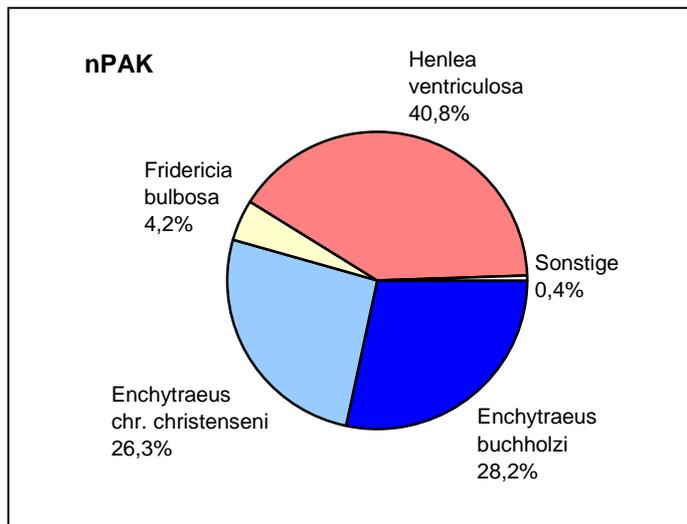


Abb. 18: Mittlere Dominanzen der Fläche nPAK aus den Probenahmen 1996-1998

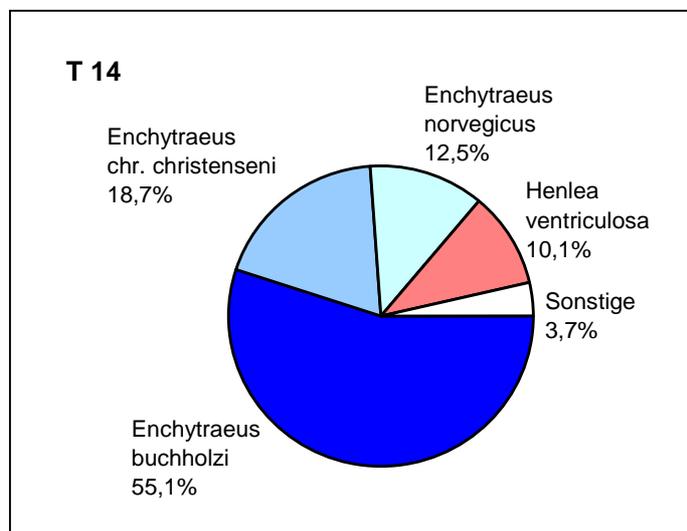


Abb. 19: Mittlere Dominanzen der Fläche T 14 aus den Probenahmen 1996-1998

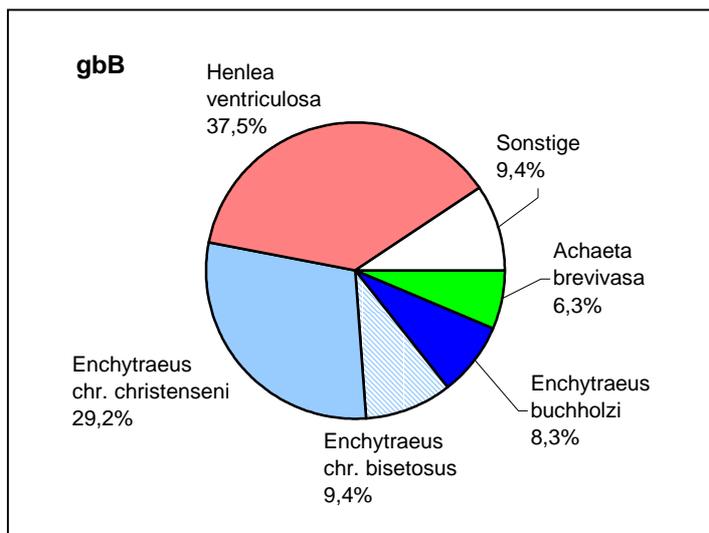


Abb. 20: Mittlere Dominanzen der Fläche gbB aus den Probenahmen 1996-1998

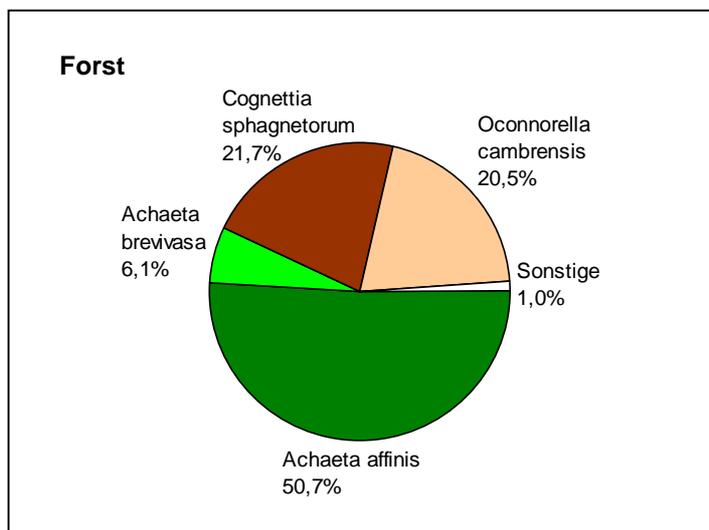


Abb. 21: Mittlere Dominanzen der Fläche Forst aus den Probenahmen 1996 und 1998

4.2.3 Saisondynamik und Populationsstruktur

Der Anteil juveniler Enchytraeiden an der Gesamtpopulation liegt auf den Rieselfeldflächen zwischen 45 % (T 26) und 65 % (T 14). Auf der Forstfläche ist er mit 75 % höher (Abb. 22). Allerdings wird die Fraktion der Juvenilen hier überwiegend durch Fragmente von *Cognettia sphagnetorum* gestellt. Abbildungen 23 und 24 zeigen Veränderungen der Abundanzen über den Untersuchungszeitraum für die beiden Hauptuntersuchungsflächen. Durch monatliche Probenahmen werden 1996 saisonale Schwankungen deutlich, die in den anderen Jahren bei geringerer Probenfrequenz nicht erfasst werden. Beiden Flächen gemeinsam ist eine maximale Abundanz im Juli 1996. Im April/Mai 1996 ist bei RefB ein Dichtegipfel festzustellen, der bei nPAK fehlt. Andererseits tritt ein deutliches Herbstmaximum nur bei nPAK auf.

Die hohen Gesamtabundanzen im Herbst 1996 bei nPAK werden durch einen hohen Anteil juveniler Tiere hervorgerufen. Auf beiden Flächen sind an mehreren Terminen extrem niedrige Abundanzen zu verzeichnen. An solchen Terminen waren in mindestens einer Probe überhaupt keine Tiere zu finden. Für den Untersuchungszeitraum ist keine zu- oder abnehmende Tendenz der Abundanzen erkennbar.

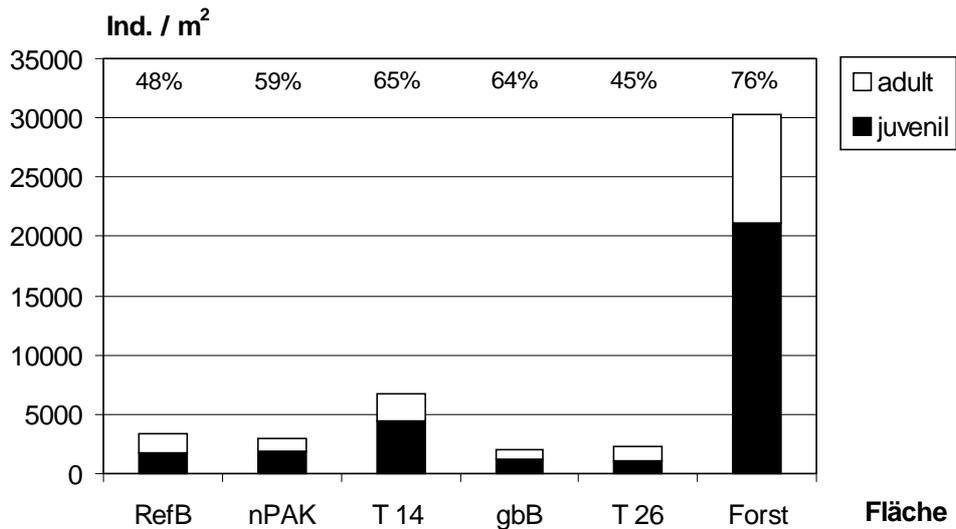


Abb. 22: Anteile der Juvenilen (auch in % über den Balken) und der Adulten an der Gesamtpopulation von sechs untersuchten Flächen (Mittelwerte aus allen Terminen)

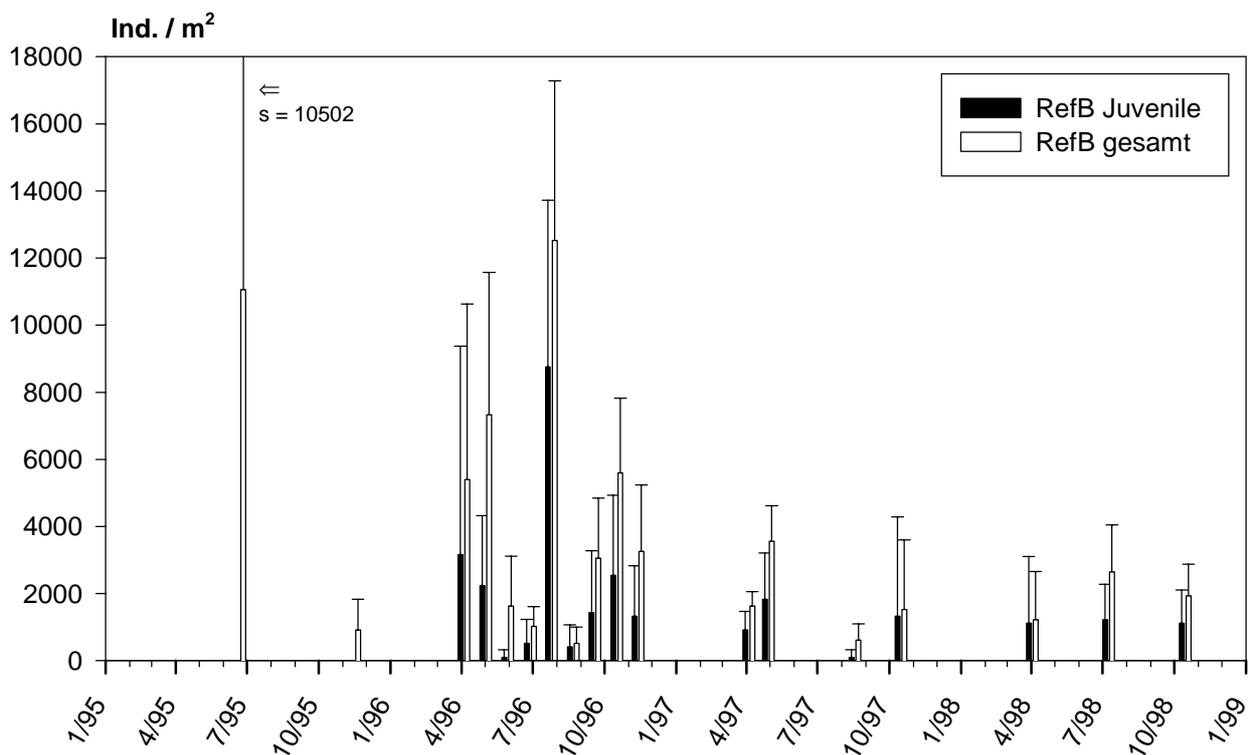


Abb. 23: Gesamtabundanzen und Abundanzen der juvenilen Enchytraeiden für die Fläche RefB über den gesamten Untersuchungszeitraum. s: Standardabweichung

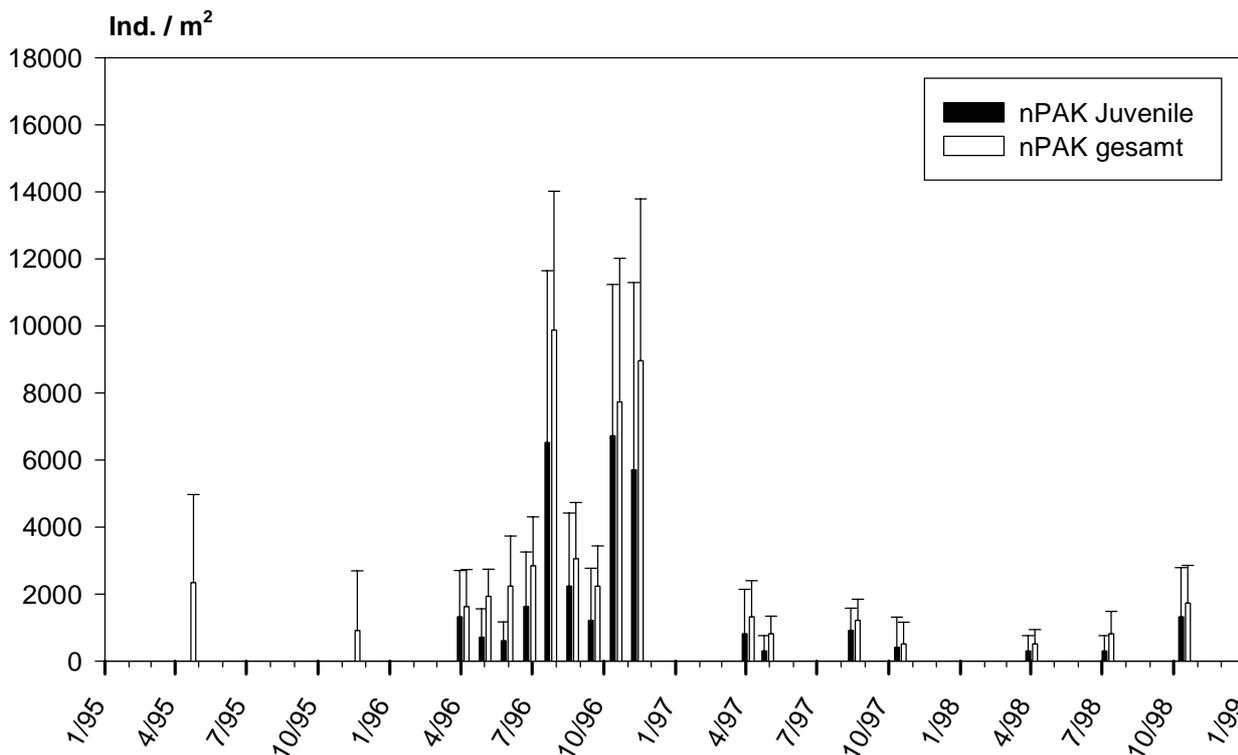


Abb. 24: Gesamtabundanzen und Abundanzen der juvenilen Enchytraeiden für die Fläche nPAK über den gesamten Untersuchungszeitraum.

4.2.4 Vertikalverteilung

Die Abundanzen der Enchytraeiden auf den beiden Hauptuntersuchungsflächen nehmen im Allgemeinen von der Bodenoberfläche nach unten ab (Abb. 25-26). Abweichungen davon ergeben sich bei RefB nach längeren Frostperioden (4/96) oder bei starker Austrocknung des Bodens (6/96, 8/96). Bei nPAK ist der Anteil der in den oberen 4 cm gefundenen Tiere oft deutlich höher als bei RefB, selbst in Phasen mit geringen Wassergehalten. Eine Korrelation mit den Wassergehalten derselben Probenpunkte besteht nicht (Pearson Produkt-Moment-Korrelation, $r < 0,3$).

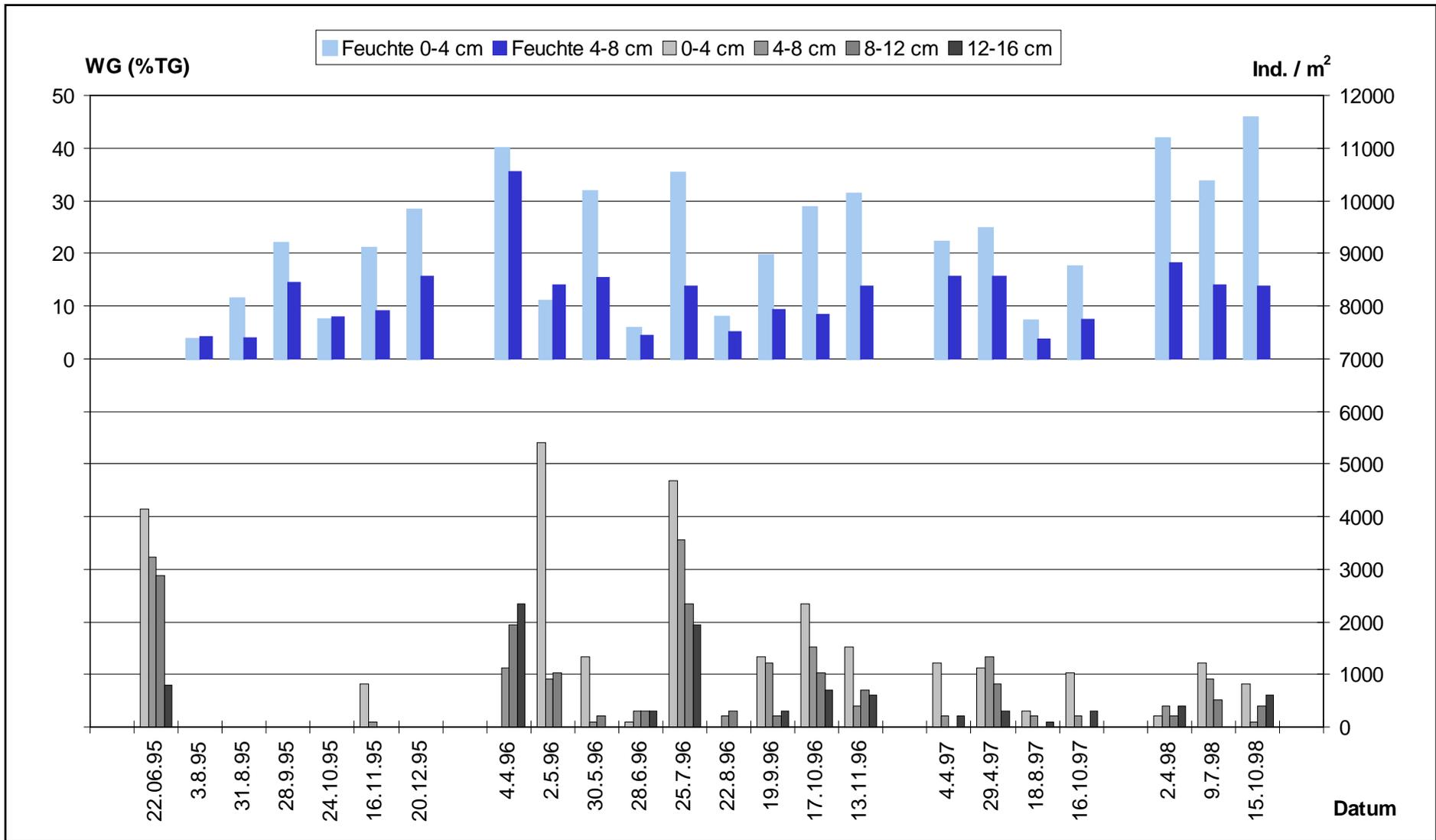


Abb. 25: Wassergehalte (oben) und Vertikalverteilung der Enchytraeiden (unten) der Fläche RefB. WG: Wassergehalt TG: Trockengewicht

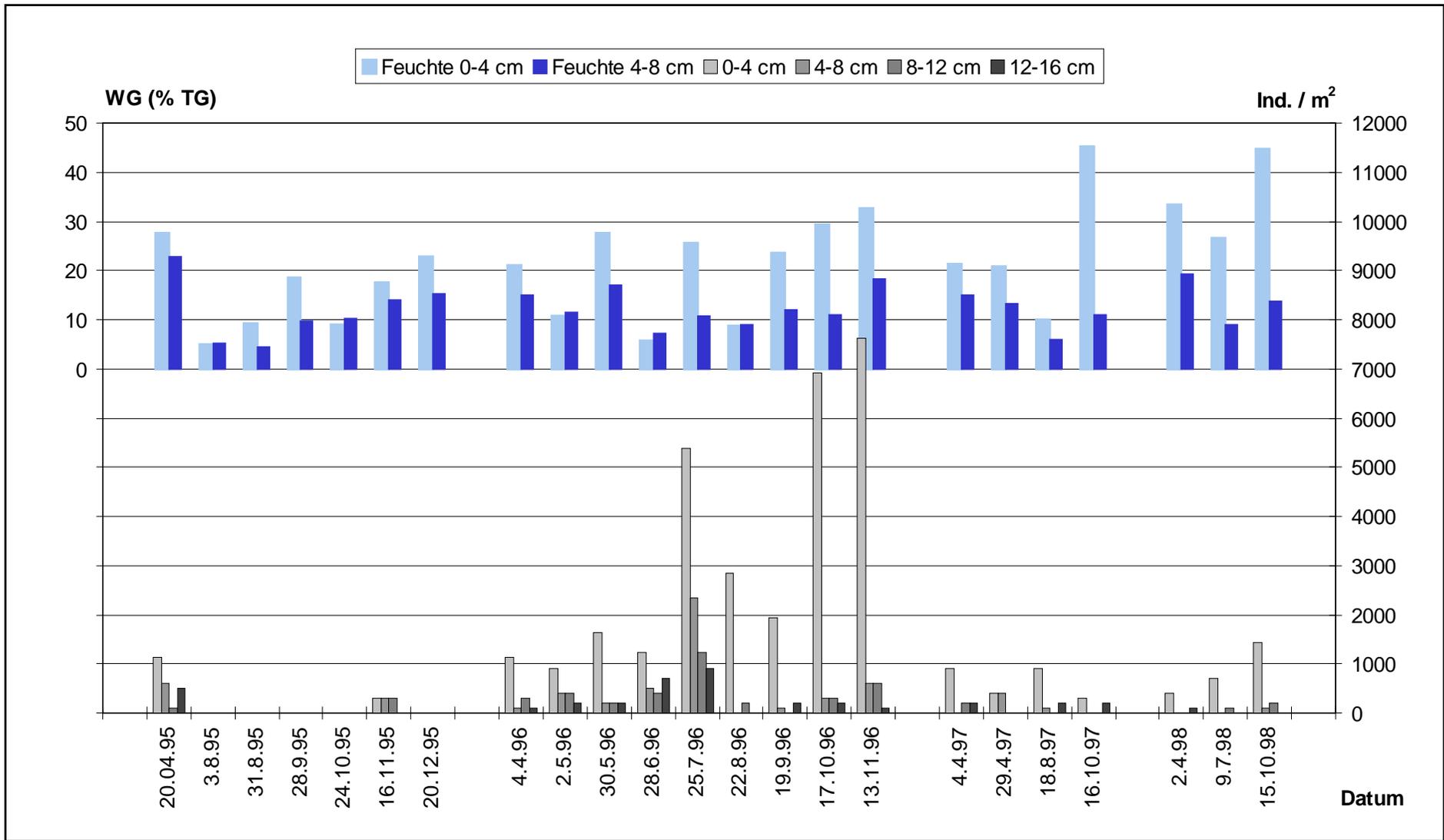


Abb. 26: Wassergehalte (oben) und Vertikalverteilung der Enchytraeiden (unten) der Fläche nPAK. WG: Wassergehalt TG: Trockengewicht

4.2.5 Segmentzahlen der Adulten

Bei den häufigeren Arten wurde die Segmentzahl der adulten Tiere erfasst. Da in den Reproduktionstests im Labor die Segmentzahl als ein zusätzlicher Testendpunkt mit aufgenommen wurde, sollten auch die Tiere der Freilandflächen bezüglich dieses Parameters verglichen werden. Die Segmentzahlen schwankten bei *Enchytraeus christenseni* zwischen 19 und 29, bei *Enchytraeus buchholzi* zwischen 22 und 29 Segmenten (Tab. 26). Die Mittelwerte liegen für beide Arten bei den vier hierauf untersuchten Flächen in einem sehr ähnlichen Bereich. Auch bei *Henlea ventriculosa* scheint es keine Unterschiede zwischen den untersuchten Flächen zu geben, während *Fridericia bulbosa* anscheinend auf nPAK eine etwas höhere Segmentzahl aufweist. An vielen Terminen war die Zahl der gefundenen Adulten aller Arten auf den Untersuchungsflächen allerdings sehr unterschiedlich oder es wurden von einer oder mehreren Arten überhaupt keine Adulten nachgewiesen. Ein statistischer Vergleich der Segmentzahl auf den verschiedenen Flächen zum gleichen Termin ist daher nur in den seltensten Fällen möglich. Eine exemplarische Berechnung für die Segmentzahl von *E. christenseni* im Juli 1997 ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen RefB und nPAK. Eine Zusammenfassung der Daten mehrerer oder aller Termine erschien nicht sinnvoll, da saisonal unterschiedliche Werte denkbar sind. Ob die Segmentzahlen einer Art auf einer Fläche im Jahresverlauf unterschiedlich sind, war aufgrund der geringen Individuenzahlen jedoch auch nicht statistisch überprüfbar.

Tab. 26: Segmentzahlen der Adulten von vier Arten aus den Freilandpopulationen. n: Zahl der untersuchten Tiere; \bar{x} : arithmetisches Mittel; s: Standardabweichung; Max: Maximum; Min: Minimum

Fläche /Art	n	Max	Min	\bar{x}	s
<i>Enchytraeus chr. christenseni</i>					
RefB	71	28	20	25,24	1,83
nPAK	35	29	19	25,29	2,15
T 14	19	28	23	25,95	1,35
gbB	10	28	22	25,30	2,31
<i>Enchytraeus buchholzi</i>					
RefB	14	29	24	26,71	1,68
nPAK	34	28	23	25,38	1,37
T 14	53	29	22	26,28	1,59
gbB	2	27	24	25,50	2,12
<i>Fridericia bulbosa</i>					
RefB	13	36	27	32,15	2,94
nPAK	11	38	31	34,64	2,73
<i>Henlea ventriculosa</i>					
nPAK	14	47	39	42,64	2,13
gbB	6	47	37	42,33	3,67

4.3 Besiedlungsversuche mit Enchytraeiden im Freiland

4.3.1 Versuchsfläche RefB

Auf der Referenzboden-Fläche wurde die Einwanderung von Enchytraeiden in Testbehälter mit Material des Mineralbodens der nPCB-Fläche (ohne Vegetation) untersucht. Begleitend zur Untersuchung der Einwanderungsaktivität der Kleinringelwürmer wurden als wesentliche abiotische Faktoren Wassergehalt und pH-Wert des Testgefäßinhalts und des angrenzenden Bodens erfasst. Bei der Ausbringung der Testbehälter am 8.11.1995 lagen die Wassergehalte des Behälterinhalts beider Versuchsvarianten bei etwa 25 % (TG). Die Wassergehalte des umgebenden Bodens der Versuchsfläche waren mit hoher Wahrscheinlichkeit niedriger (vgl. Abb. 7). Am Auswertungstermin unterschieden sich die Wassergehalte in den Testgefäßen der beiden Varianten nicht nennenswert und auch die Differenzen zum darunter liegenden Boden waren gering (Tab. 27).

Bei Versuchsende lag der pH-Wert im nPCB-Testgefäß deutlich niedriger als im RefB-Testgefäß (Tab. 27). Auch oberhalb und unterhalb des Testbehälters lagen die pH-Werte bei der nPCB-Variante unter denen der RefB-Variante. Die Gehalte organischer Substanz zeigten bei der nPCB-Variante etwas höhere Werte als bei der RefB-Variante. Nichtsdestoweniger sind die Proben aller Varianten und Tiefenstufen als stark humos einzuordnen (AG BODEN 1994). Die Größenordnung der Schwermetall-Belastung des Testmaterials (Mineralboden) ist Tabelle 28 zu entnehmen. Bei nPCB(-) lagen die Cadmium- und Kupfergehalte höher als bei RefB, während sich die Zink- und Chromgehalte auf ähnlichem Niveau befanden.

Tab. 27: pH-Werte, Wassergehalte und Gehalte organischer Substanz der Böden und des Testgefäßinhalts nach Abschluss des Versuchs auf der Fläche RefB (Kontrollvariante und Variante mit nPCB-Material). Standardabweichungen kursiv in Klammern. n. u.: nicht untersucht

Probe	pH (CaCl ₂)	Wassergehalt (% TG)	Gehalt org. Substanz (% TG)
RefB 2-4 cm	4,4	23,2 (4,98)	5,6
RefB Testgefäß	4,4	19,8 (0,54)	6,0
RefB 6-8 cm	4,6	16,7 (1,69)	5,3
nPCB 2-4 cm	4,1	28,7 (2,97)	n. u.
nPCB Testgefäß	3,9	18,8 (0,78)	6,4
nPCB 6-8cm	4,3	19,3 (1,72)	n. u.

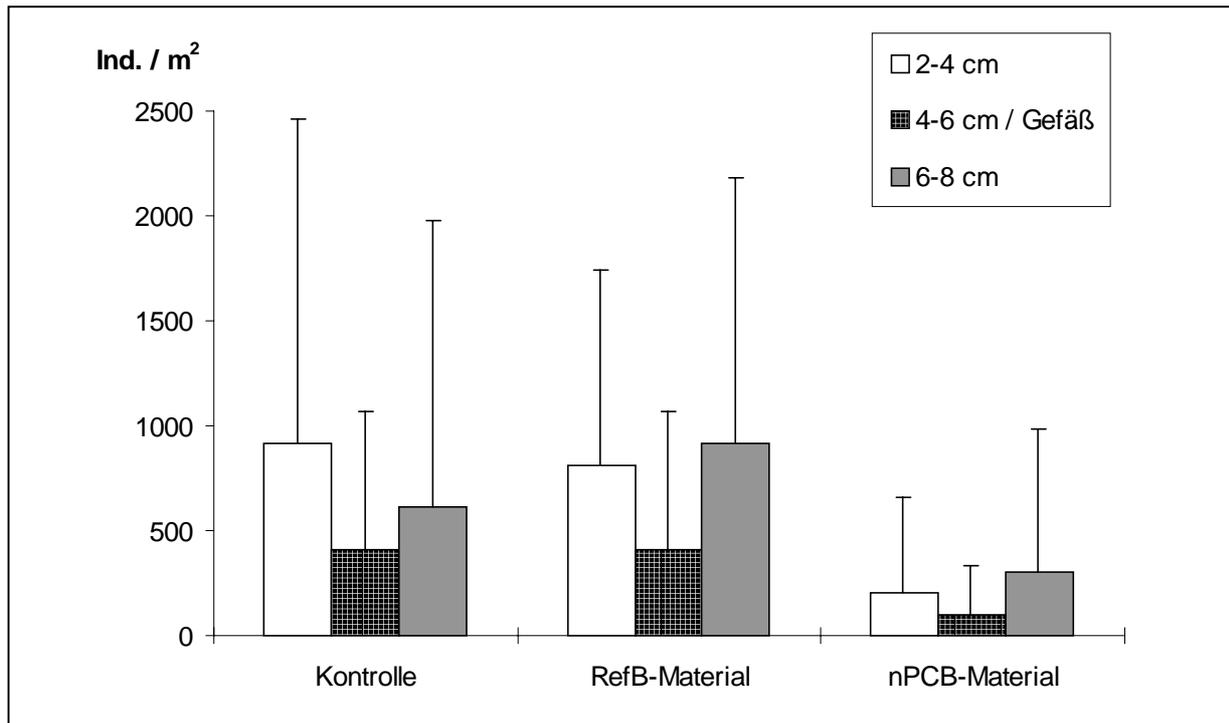


Abb. 27: Abundanzen der Enchytraeiden in den verschiedenen Tiefenstufen bzw. in den Testgefäßen (Mittelwerte) auf der RefB-Versuchsfläche zu Versuchsende. Kontrolle: ohne Testgefäß, RefB-Material: Kontrolle mit RefB-Material im Testgefäß, nPCB-Material: nPCB-Material im Testgefäß. n = 5

Eine Woche nach Versuchsbeginn betrug die mittlere Siedlungsdichte auf der RefB-Fläche (außerhalb der gezäunten Versuchsfläche) 916 Ind./m² (vgl. Abb. 23). Nimmt man diesen Wert als Schätzwert für die Situation zu Versuchsbeginn an, so liegt zum Zeitpunkt der Versuchsauswertung die Abundanz der Enchytraeiden in der Kontrolle ohne Testbehälter (1934 Ind./m²) höher als zu Versuchsbeginn. Zwischen den Kontrollen mit und ohne Testbehälter bestehen keine deutlichen Unterschiede (Abb. 27). Im Testgefäß wurden genauso viele Tiere gefunden wie in der entsprechenden Tiefenstufe der Variante ohne Testgefäß. Die Variante nPCB-Material zeigt sowohl im Testgefäß als auch oberhalb und unterhalb davon geringere Abundanzen als die beiden Kontrollen. Diese Abweichungen sind jedoch wegen der starken Streuung der Daten nicht signifikant (Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse). In den Testgefäßen wurde ausschließlich *Enchytraeus buchholzi* gefunden. Oberhalb und unterhalb der Testgefäße sowie in der Kontrolle ohne Testgefäß wurden außerdem *Enchytraeus christenseni* und *Enchytraeus sp. (RefB5)* gefunden. Andere Gattungen traten nicht auf.

Tab. 28: Gehalte ausgewählter Schwermetalle in den Substraten, die zur Befüllung der Testgefäße verwendet wurden. Angaben in mg/kg (TG). (Daten für nPCB(-) und Forst: Biologische Bundesanstalt Berlin-Dahlem, Institut für ökologische Chemie)

Probe	Cd	Ni	Zn	Cu	Cr	Pb
RefB (Kontrolle Mineralb.)	7,0	-	358	130	577	-
nPCB(-) (Mineralb.)	27,0	21	327	225	578	104
Forst (Kontrolle organisch)	0,6	6,6	64	39	14	71
nPCB(-) (organisch)	102,0	90,0	1321	1090	2487	423

4.3.2 Versuchsfläche Forst

Bei der Ausbringung der Testgefäße am 8.8.1996 lagen die Wassergehalte des Testmaterials im Mittel bei 95,7 % (TG) (Variante nPCB) bzw. 82,1 % (TG) (Variante Of/Oh-Material). Die Wassergehalte des Bodens der Versuchsfläche lagen zur gleichen Zeit bei 105,2 % (TG) (0-4 cm: org. Auflage) bzw. 22,7 % (TG) (4-8 cm: org. Auflage/Mineralboden). Zu Versuchsende unterschieden sich die Wassergehalte des Materials in den Testgefäßen nur wenig (Tab. 29). Die Wassergehalte in 6-8 cm Tiefe schwankten in allen Varianten stark wegen der unterschiedlichen Anteile an organischem Material in den Proben. Die pH-Werte lagen oberhalb der Testbehälter bei 3,7, unterhalb derselben bei 3,1 bzw. 3,2. Im nPCB-Testbehälter wurde mit einem Messwert von 3,7 ein etwas höherer pH-Wert als im Forstboden-Behälter gemessen. Die Gehalte organischer Substanz waren in den Testgefäßen mit Forstboden tendenziell niedriger als in denen mit nPCB-Material, entsprachen jedoch in beiden Fällen denen eines organischen Bodenhorizontes.

Tab. 29: pH-Werte, Wassergehalte und Gehalte organischer Substanz (Spannweiten) der Böden und des Testgefäßinhalts nach Abschluss des Versuchs auf der Fläche Forst. Standardabweichungen kursiv in Klammern. n. u.: nicht untersucht

Probe	pH (CaCl ₂)	Wassergehalt (% TG)	Gehalt org. Substanz (% TG)
Kontrolle 2-4 cm	Mischprobe:	209,9 (27,91)	n. u.
Kontrolle 4-6 cm	3,0	164,7 (52,63)	59,4 - 67,2
Kontrolle 6-8 cm		111,7 (48,40)	37,6 - 39,4
Of/Oh 2-4 cm	3,7	216,4 (33,78)	69,7 - 79,9
Of/Oh Testgefäß	3,5	120,7 (05,58)	39,0 - 45,2
Of/Oh 6-8 cm	3,2	75,8 (55,60)	16,7 - 21,2
nPCB 2-4 cm	3,7	246,8 (59,35)	76,8 - 84,5
nPCB Testgefäß	3,7	124,8 (06,96)	42,1 - 58,2
nPCB 6-8cm	3,1	92,6 (63,78)	18,8 - 21,5

Die Differenzen der stofflichen Belastung zwischen den beiden Versuchsvarianten waren deutlich größer als auf der RefB-Versuchsfläche (Tab. 28). Die Abundanzen

der Enchytraeiden betragen zu Versuchsbeginn unmittelbar neben den Versuchspartellen 90398 Ind./m². Bei Versuchsende lagen die Abundanzen in der Kontrolle dagegen bei nur etwa 15 % dieses Wertes und auch niedriger als in den beiden Testgefäß-Varianten (Abb. 28). Im nPCB-Testgefäß wurden mehr Tiere gefunden als im Of/Oh-Testgefäß und über dreimal so viele wie im ungestörten Boden in der entsprechenden Tiefe. Die Individuendichte in 6-8 cm Tiefe war in der Of/Oh-Variante am höchsten. Die Testgefäße zeigten also hier, ebenso wie im Versuch auf der RefB-Fläche, eine niedrigere Besiedlung mit Enchytraeiden als der Boden darüber und darunter. Im Gegensatz zur RefB-Fläche wurde im Forst jedoch das nPCB-Material stärker besiedelt als das Material der Versuchsfläche (Kontrolle mit Testgefäß).

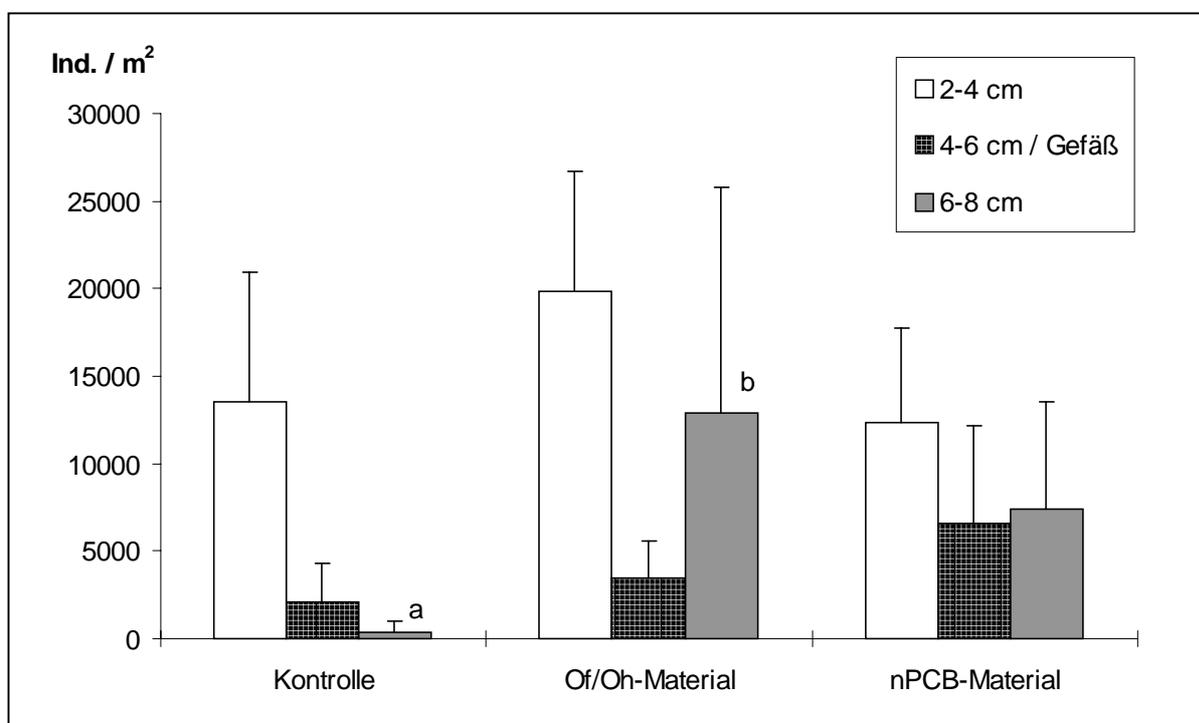


Abb. 28: Abundanzen der Enchytraeiden in den verschiedenen Tiefenstufen bzw. in den Testgefäßen (Mittelwerte) auf der Forstversuchsfläche zu Versuchsende. Kontrolle: ohne Testgefäß, Of/Oh-Material: Kontrolle mit Forstboden im Testgefäß, nPCB-Material: nPCB-Material im Testgefäß. a signifikant verschieden von b (Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse, Dunn's Test).

In der Vertikalverteilung der Arten zeigten sich Unterschiede zwischen der Kontrolle und den beiden Varianten mit Testgefäß. Im ungestörten Boden kam die Art *Cognettia sphagnetorum* unterhalb von 4 cm nur noch in geringen Dichten vor (Abb. 29). In den Varianten mit Testgefäß war diese Art dagegen im Gefäß und im Boden darunter eine der dominierenden bzw. die dominierende Art (Abb. 30-31). In der nPCB-Variante dominierte *C. sphagnetorum* mit 89,8 % der gefundenen Individuen insgesamt sehr stark.

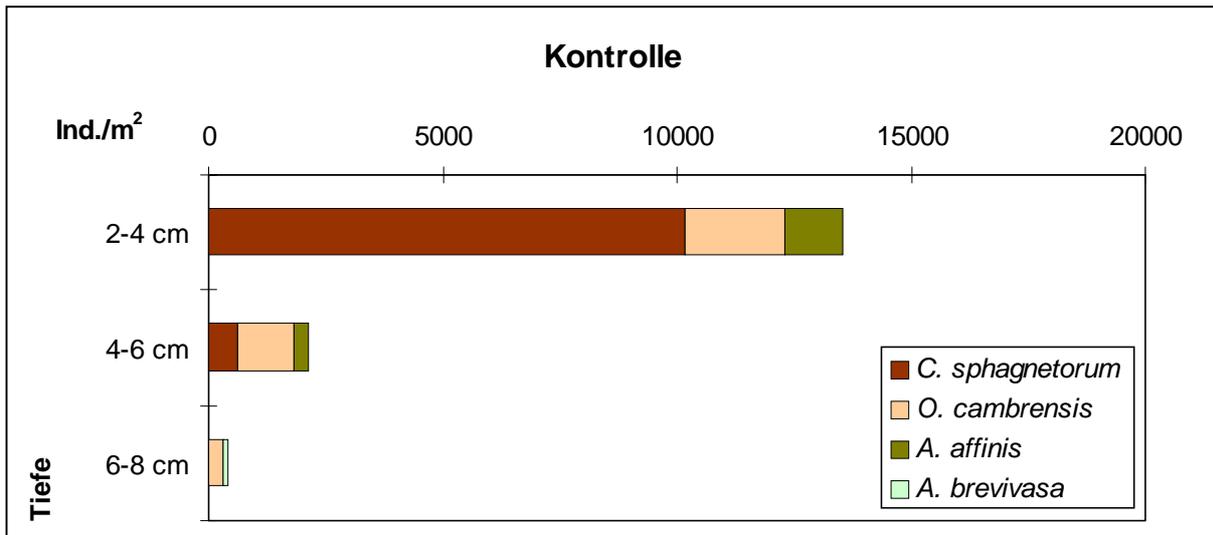


Abb. 29: Vertikalverteilung der Arten im ungestörten Boden zu Versuchsende

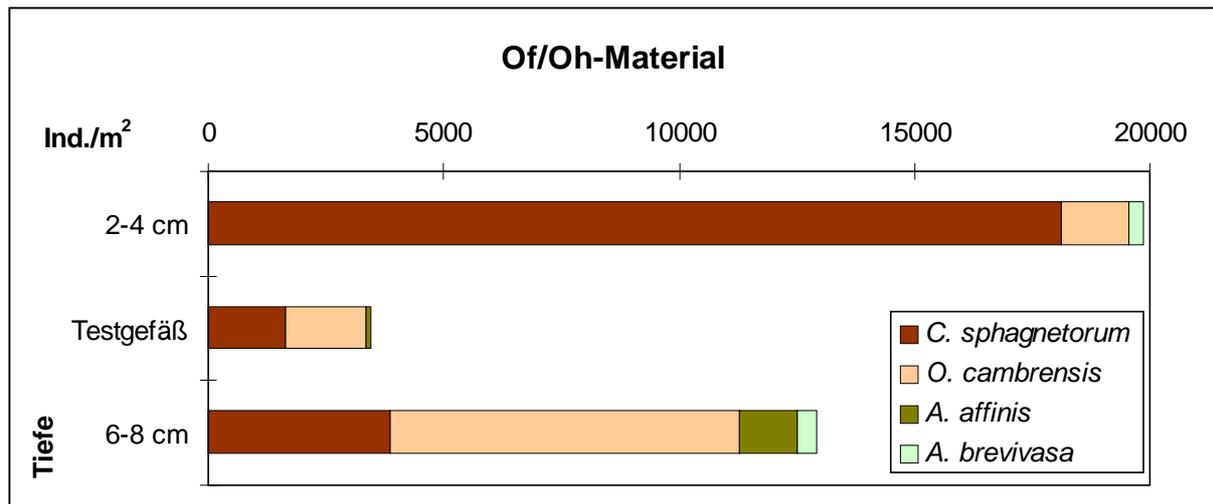


Abb. 30: Vertikalverteilung der Arten in der Of/Oh-Material-Variante

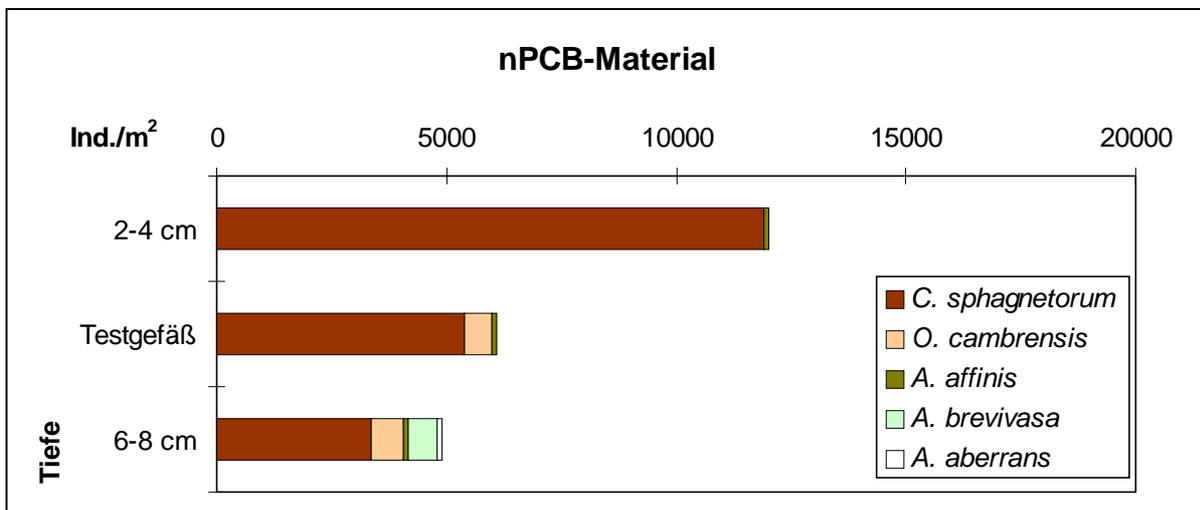


Abb. 31: Vertikalverteilung der Arten in der nPCB-Material-Variante