

Ursachen mangelnder Anwuchserfolge bei der Aufforstung der Rieselfelder in Berlin- Buch

Bodenkundliche Aspekte

Lutz Schlenther, Bernd Marschner, Christian Hoffmann und Manfred Renger *

ZUSAMMENFASSUNG

Die Rieselfelder in Berlin Buch wurden 1985 stillgelegt, daraufhin wurden die knapp 1.400 ha mit schweren Maschinen eingeebnet und ohne Untersuchungen des Bodens begann man mit einer Aufforstung. Schon nach 4 Jahren zeigte sich, daß nur 40 % der Bäume angewachsen waren. Im Jahr 1992 durchgeführte Untersuchungen an 13 Bodenprofilen, Kartierungen sowie umfangreiche Schadstoffanalysen in unterschiedlichen Maßstabsbereichen sollten Aufschluß über die bodenbedingten Ursachen des Baumsterbens geben. Es wurden Schwermetallbelastungen und organischer Schadstoffe vor allem in den organischen Rückständen der Verrieselung gefunden die sich im YAh-Horizont, insbesondere an den ehemaligen Einlaßbereichen der Galerien, befinden. Für den flächenhaften Ausfall scheint der Wasserhaushalt eine entscheidende Rolle zu spielen, denn dieser wird durch die organische Substanz des YAh-Horizont deutlich verbessert. Untersuchungen zur Vitalität des Baumbestandes auf einer Intensiv-Untersuchungsfläche zeigen positive Korrelationen zur Mächtigkeit des YAh-Horizontes.

KEY WORDS

Rieselfelder, Schwermetalle, organische Schadstoffe, Wasserhaushalt, Aufforstung

Die Untersuchungen wurden im Auftrage des Landesforstamtes Berlin, im Rahmen des ökologischen Sofortprogrammes (ÖSP) des Berliner Senates und des Bundesministeriums für Umweltschutz & Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

1 PROBLEMSTELLUNG

Rund 1.370 ha ehemaliger Rieselfeldflächen im Besitz der Berliner Forsten befinden sich im Norden Berlins, auf dem südwestlichen Teil des Barnimplateaus, im Forstamtsbereich Buch (davon 770 ha im Land Berlin, 600 ha im Land Brandenburg, Kreis Bernau). Nach der endgültigen Aufgabe einer fast einhundert Jahre andauernden und gegen Ende intensiven Verrieselung von Abwässern aus Berlin (1984), sollte auf den auf diesen Flächen ein Erholungswald geschaffen werden. Die Forstwirtschaft begann 1985/86 - unter erheblichen Zeitdruck der 750-Jahrfeier Berlins - ohne ausreichende Voruntersuchungen und wissenschaftlich fundierte Konzepte mit einer flächendeckenden Aufforstung. Nach der Planierung des Geländes wurden überwiegend maschinell rund 50 Baum- und Straucharten gepflanzt. Bereits 1987 zeichnete sich ab, daß diese Maßnahme weitgehend mißglückte, da sich ledig-

* TU-Berlin, Fachbereich Umwelt und Gesellschaft, Institut für Ökologie, Fachgebiet Bodenkunde, Tel.: 030 314 73531

lich auf 40 % der Fläche ein mehr oder weniger vitaler Baumbestand etablierte. Die Ursache - Wirkungsbeziehungen hierfür sind vielschichtig; neben forstwirtschaftlichen Aspekten wie Qualität des Pflanzgutes und der Pflanzmaßnahmen an sich, wurde aus bodenkundlicher Sicht die besondere Standortproblematik, die durch schadstoffhaltige Klärschlammrückstände sowie gestörte Oberboden- und Grundwasserhaushaltsverhältnisse gekennzeichnet ist, untersucht. Ziel der Untersuchungen war es die wichtigsten Bodentypen im Untersuchungsgebiet bodenchemisch und -physikalisch zu analysieren, um so die Standortverhältnisse (Wasser-, Luft- und Nährstoffhaushalt) zu charakterisieren. Weiterhin sollten durch gezielte Belastungsanalysen die wichtigsten Schadstoffe und deren räumliche Verteilung ermittelt werden, da die ehemaligen Rieselgalerien planiert und eingeebnet wurden.

2 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND BEPROBUNGSSCHEMA

Die ehemaligen Rieselfelder Buch liegen auf der pleistozänen Hochfläche des sog. Westbarnims, einer aus Geschiebemergel aufgebauten Grundmoräne aus der Saaleeiszeit. Während der letzten Vereisung, der Weichseiszeit, wurden auf den Flächen glazifluviatile und fluviatile Sedimente abgelagert, die heute als sandig-kiesige Substrate von bis zu 10 m Mächtigkeit der Grundmoräne aufliegen. Nur im Forstrevier Blankenfelde und im äußersten Westen des Reviers Hobrechtsfelde steht der Geschiebemergel oberflächennah an.

Unter vergleichbaren natürlichen, ungestörten Bedingungen sind im Berliner Raum Bodentypen der Entwicklungsreihe Regosol - Braunerde - Rostbraunerde / Bänder-Parabraunerde - Podsol zu finden (Grenzius 1987). Dementsprechend finden sich im Bucher Forst, der nie als Rieselfeld genutzt wurde vornehmlich Rostbraunerden mit unterschiedlich stark ausgeprägtem Grundwassereinfluß (Schlenter et al. 1992). Durch die Umgestaltungen und den Rieselbetrieb wurden die Böden teilweise gekappt und / oder überprägt. An der Oberfläche lagerten sich organische Rückstände der Verrieselung ab und bildeten stark humose Schichten, die zum Teil durch die letzten Bodenbewegungen mit mineralischem Material des Unterbodens vermischt sind. Diese Auftragsschichten führten bei der Ansprache zur Klassifikation Auftragshorizont (Symbol Y). Die im Profilaufbau folgenden mineralischen Horizonte sind teilweise durch eine Verbraunung (Bildung feinverteilter Eisenoxide und Tonminerale - Bv-Horizonte) und / oder Anreicherung von Eisen- und Manganoxiden (Bsv-Horizonte) gekennzeichnet (Auftragsboden-Braunerden und Auftragsboden-Rostbraunerden). Häufig fehlen diese Horizonte jedoch, da sie im Zuge der Umgestaltungen abgetragen wurden, so daß das Ausgangsmaterial unmittelbar unter dem Auftragshorizont ansteht (Auftragsboden-Regosol). Als eine Ausnahme sind die Böden im Bereich des Forstrevieres Blankenfelde anzusprechen. Hier stehen die undurchlässigen Schichten des Geschiebelehms bzw. des Geschiebemergels bis zu 4 dm unter der Geländeoberfläche an. Unter der Auftragsbodenschicht sind zum Teil an Eisen und Feinmaterial verarmte Sandhorizonte zu finden, so daß hier von einer Verlagerung ausgegangen werden kann und damit der Bodentyp Auftragsboden-Parabraunerde ausgewiesen wurde. Grundwasserbeeinflusste Böden (Gleye) finden sich im Untersuchungsgebiet heute nur in Niederungen und Senken, wo das Grundwasser bis einen Meter unter Geländeoberfläche ansteht. Der Grundwasserspiegel ist nach Beendigung der Verrieselung um circa einen Meter gesunken, was anhand der reliktschen hydromorphen Merkmale in vielen Böden erkennbar ist.

Im Rahmen der Standortcharakterisierung und Belastungsanalyse (Schlenther et al. 1992) wurden 13 *Leitprofilstandorte* (P1 - P13) ausgewählt, die das Spektrum der vorkommenden Böden im Untersuchungsgebiet repräsentieren. An diesen Profilen erfolgte, bis in eine Tiefe von 2 Metern, eine horizontspezifisch umfassende bodenchemische und -physikalische Beschreibung, sowie eine Analyse von Schwermetallen, organischer und anderer Schadstoffe.

Zur Abschätzung der räumlichen Verteilung der Belastung im Gesamtuntersuchungsgebiet wurden 299 Punkte in insgesamt 44 *Galerien* an der Oberfläche (0 bis 10 cm) beprobt und hinsichtlich ausgewählter Schwermetallgehalte, Nährstoffe und einfacher bodenphysikalischer Parameter analysiert (Strohbach et al. 1992). An 48 dieser 299 Punkte wurden *Bodenprofile* bis 1 Meter Tiefe angesprochen um auch hier eine Tiefenfunktion zu erhalten.

Zur Ermittlung der kleinräumlichen Variabilität, insbesondere die der Schwermetallbelastung, wurde eine repräsentative umgestaltete Galerie (Abteilung 709 b1/b2 Forstrevier Schönerlinde) im *Raster- und Transektverfahren* beprobt (Schlenther et al. 1992).

3 SCHADSTOFFBELASTUNG UND NÄHRSTOFFSTATUS

Während der knapp 100-jährigen Nutzung der Flächen für die Abwasserentsorgung Berlins kam es zu einem kontinuierlichen Stoffeintrag, der nur zum Teil mit dem Sickerwasser oder dem Erntegut wieder abgeführt wurde. Da ein Großteil der Stoffe an Partikel und Schwebstoffe gebunden mit dem Abwasser zugeführt wurde, akkumulierten diese Stoffe mit den Sedimenten, also an der Bodenoberfläche. Durch regelmäßige Bodenbearbeitung bei der ackerbaulichen Nutzung kam es zu einer gleichmäßigen Einmischung in die obersten 20-30 cm. Durch die zunehmende Industrialisierung während der 20er und 30er Jahre und nach 1945 stieg auch die Schadstofffracht in den Abwässern. Ihren Höhepunkt dürfte diese Entwicklung in den 70er und frühen 80er Jahren erreicht haben, als die Rieselfelder im Dauerbetrieb mit Abwasser unbekannter Zusammensetzung überflutet wurden.

3.1 Schwermetalle

Auf den rund 1300 ha der ehemaligen Rieselfelder Buch wurden 334 Oberbodenproben (0-10 cm) auf die Schwermetalle Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Blei (Pb) und Zink (Zn) analysiert (Tab. 1). Es wird deutlich, daß die Schwermetallgehalte eine sehr große Spanne aufweisen. Die Minimalwerte liegen meist noch unter den Gehalten des nicht berieselten Vergleichsstandortes im Bucher Forst ("Wald"), während die Maximalwerte um das bis zu 1800-fache darüber liegen. Die Maximalwerte überschreiten alle die Richtwerte der Kategorie Ib der Berliner Liste (1991), die für sensible Nutzungen wie Gemüseanbau oder Kinderspielplätze gilt. Auch die Richtwerte der Kategorie III (Hochflächen, normale Nutzung) werden von den Schwermetallen Cd, Cr, Cu und Zn deutlich überschritten. Zur Beschreibung der durchschnittlichen Belastung eignet sich wegen der links-steilen Verteilung der Stichprobenwerte der geometrische Mittelwert besser als der arithmetische, da letzterer die hohen Extremwerte überbewertet. Als weitere Charakterisierung der Häufigkeitsverteilungen sind in der Tabelle 2 die 75 und 95 Perzentile aufgeführt.

Tab. 1: Minima, Maxima, geometrische Mittelwerte, 75- und 95-Perzentile der Schwermetallgehalte im Oberboden (0-10 cm) der Rieselfelder im Vergleich zu einem unbelasteten Waldstandort im Bucher Forst und zu den Richtwerten der Kategorien Ib und III der Berliner Liste [mg/kg].

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Minimum	0,1	1,1	3,4	0,9	6,4	12,7
Maximum	44,3	1850,0	876,0	285,3	452,2	3584,0
geom. MW	2,5	112,7	54,8	9,5	62,2	170,2
75%	6,4	255,6	91,9	15,4	106,6	279,8
95%	19,2	722,7	221,3	36,3	242,5	695,7
Wald	0,3	n.b.	3,0	n.b.	17,9	16,8
RW Ib	1,5	100	100	50	100	300,0
RW III	20,0	800	600	300	600	3000,0

Zwischen allen sechs Schwermetallen bestehen enge korrelative Zusammenhänge ($r = 0,7-0,9$), so daß die Maximalwerte auf bestimmten Standorten gemeinsam auftreten (Tab. 3). Bei allen fünf aufgeführten Schwermetallen ist ein deutlicher Konzentrationsgradient vom ehemaligen Einlaßbereich der Galerien hin zum Auslaß nachzuweisen, der sich auch statistisch absichern läßt.

Alle mittleren Schwermetallkonzentrationen im Bereich des Einlasses von Galerien liegen über dem Grenzwert der Berliner Liste für sensible Nutzung (vgl. Tab. 2). Ein Viertel oder 8 von 33 Galerien liegen im Einlaßbereich mit mehr als 20,7 mg Cadmium und 734,3 mg Chrom pro kg Boden sogar über dem Richtwert der Berliner Liste für Hochflächen. Jede zweite Galerie erreicht auch in der Mitte bei Cadmium (2,3 mg/kg) und Chrom (107,2 mg/kg) noch den Richtwert für sensible Nutzung. Dies trifft auch für den Auslaßbereich zu, wo allerdings die Maximalwerte deutlich unter denen der Galeriemitte liegen.

Damit wird deutlich, daß selbst nach dem teilweisen Abfahren von Schlammrückständen aus den ersten Becken zu Beginn der Aufforstung und selbst nach den umfangreichen Erdbewegungen während der Umgestaltung auch heute noch die durch den Rieselbetrieb bedingten Belastungsgradienten existieren. Die am höchsten belasteten Flächen lassen sich weitgehend auf die ehemaligen Einlaßbecken eingrenzen, was von großer praktischer Bedeutung für die weitere Bewirtschaftung der Flächen ist. Allerdings ist punktuell auch in den anderen Bereichen der Galerien mit sehr hohen Schwermetallkonzentrationen zu rechnen, so daß sensible Nutzungen (Landwirtschaft, Gartenbau, Spielplätze) nicht ohne detaillierte Voruntersuchungen angelegt werden dürfen. Da außerdem hochsignifikante Korrelationen zur organischen Bodensubstanz bestehen (Tab. 3), läßt sich aus dem Humusgehalt und dem Humusvorrat eines Standortes mit relativ hoher Sicherheit die Schwermetallbelastung ableiten. Dies ist für die Erkundung und Abgrenzung von stark belasteten Flächen von großer praktischer Bedeutung.

Tab. 2: Schwermetallgehalte (mg/kg) und Humusgehalte (%) im Oberboden der Rieselfelder in Abhängigkeit von der Lage innerhalb der Galerie.

	Cadmium			Zink			Kupfer		
	Einlaß*	Mitte*	Auslaß	Einlaß*	Mitte	Auslaß	Einlaß*	Mitte	Auslaß
Minimum	1,2	0,1	0,1	113,0	12,7	33,9	40,5	3,4	10,7
Maximum	43,4	16,6	9,5	3584,0	590,0	369,0	876,0	169,0	323,0
geom. MW	8,9	2,3	1,4	426,6	158,5	125,9	141,3	51,3	40,8
75%	20,7	5,1	3,1	663,5	266,0	166,4	205,3	90,7	65,8
95%	41,7	12,3	8,9	1887,2	405,3	360,0	710,8	143,1	132,1
	Blei			Chrom			Humus		
	Einlaß*	Mitte	Auslaß	Einlaß*	Mitte	Auslaß	Einlaß*	Mitte	Auslaß
Minimum	74,8	6,4	7,5	1,1	3,3	9,7	3,5	0,5	1,1
Maximum	335,9	184,2	133,5	1850,0	735,0	574,0	44,6	16,4	7,4
geom. MW	138,0	57,5	47,9	288,4	107,2	102,3	7,8	3,2	3,2
75%	179,8	92,1	66,6	734,3	256,2	172,3	11,4	4,6	4,6
95%	295,2	160,7	132,7	1329,5	549,2	463,3	28,8	8,0	6,0

n=163 (Einlaß=33, Mitte=89, Auslaß=41)

* = signifikant p=0,05

Tab.: 3: Korrelationskoeffizienten (*r*) für Humus- und Schwermetallkonzentrationen von 78 Transektproben in drei Tiefenstufen (bis 60 cm), (n=234)

	org. Sub.	Blei	Kupfer	Zink
Blei	0,91			
Kupfer	0,94	0,94		
Zink	0,88	0,88	0,92	
Cadmium	0,88	0,82	0,92	0,86

Wie eingangs erwähnt, waren die 1986 begonnenen Aufforstungen der Rieselfeldflächen nur zu einem Teil erfolgreich. Häufig sind im Untersuchungsgebiet kranke oder durch Kümmerwuchs gekennzeichnete Bäume zu finden. Dabei ist auffällig, daß dort wo ehemals Dämme zur Abgrenzung einzelner Becken der Galerien aufgeschüttet waren, augenscheinlich der Anwuchs der Bäume besser ausfällt. Besonders deutlich wird dies bei der Betrachtung von Luftbildern des Untersuchungsgebiets. Der Verlauf ehemaliger Dämme wird auf diesen Bildern durch dichtere, üppigere Vegetation wiedergegeben. Ein Ziel der Bodenuntersuchungen war, dieses Phänomen möglichst zu klären, wobei die Kern-

hypothese den besseren Anwuchs der Bäume auf den ehemaligen Dämmen auf eine geringere oder keine Belastung mit organischen und anorganischen Schadstoffen zurückführte.

Anhand einer Transektbeprobung mit 99 Probepunkten innerhalb einer umgestalteten und aufgeforsteten Galerie zeigte sich entgegen den Erwartungen, daß die Belastung mit *Cadmium*, *Kupfer*, *Zink* und *Blei* im Bereich ehemaliger Dämme am höchsten ist. Stellvertretend, da für alle Schwermetalle identisch, ist in Abbildung 1 die kleinräumliche Verteilung der Cadmiumkonzentrationen entlang eines Transektes dargestellt. Dieser Transekt war so angelegt, daß er über die Distanz von 140 Metern im Einlaßbereich (vom äußeren Rand des Becken 3 diagonal zum äußeren Rand des Beckens 2) verlief und bei 60 Metern ein Dammkreuz im Winkel von ca. 45 ° schnitt.

Aus der Abbildung 1 ist zu entnehmen, daß genau bei 60 Metern die Dammsohle erreicht wurde, d. h. der Punkt, der genau unterhalb der ehemaligen Dammkuppe liegt, zeigt in den Tiefen 0 bis 20 cm und 40 bis 60 cm geringste Gehalte bei allen untersuchten Schwermetallen. Jeweils links und rechts dieses Punktes sind innerhalb von 2,5 bis 10 Metern höchste Gehalte von z.B. 35 bis 45 mg Cadmium pro kg Boden zu finden. Ebenfalls nimmt in diesen Bereichen des Transektes die *Mächtigkeit des humosen Auftragshorizontes* auf mehr als 50 cm zu und der *Gehalt an organischer Substanz* steigt auf 10 bis 15 Gewichtsprozent (vgl. Abb. 2).

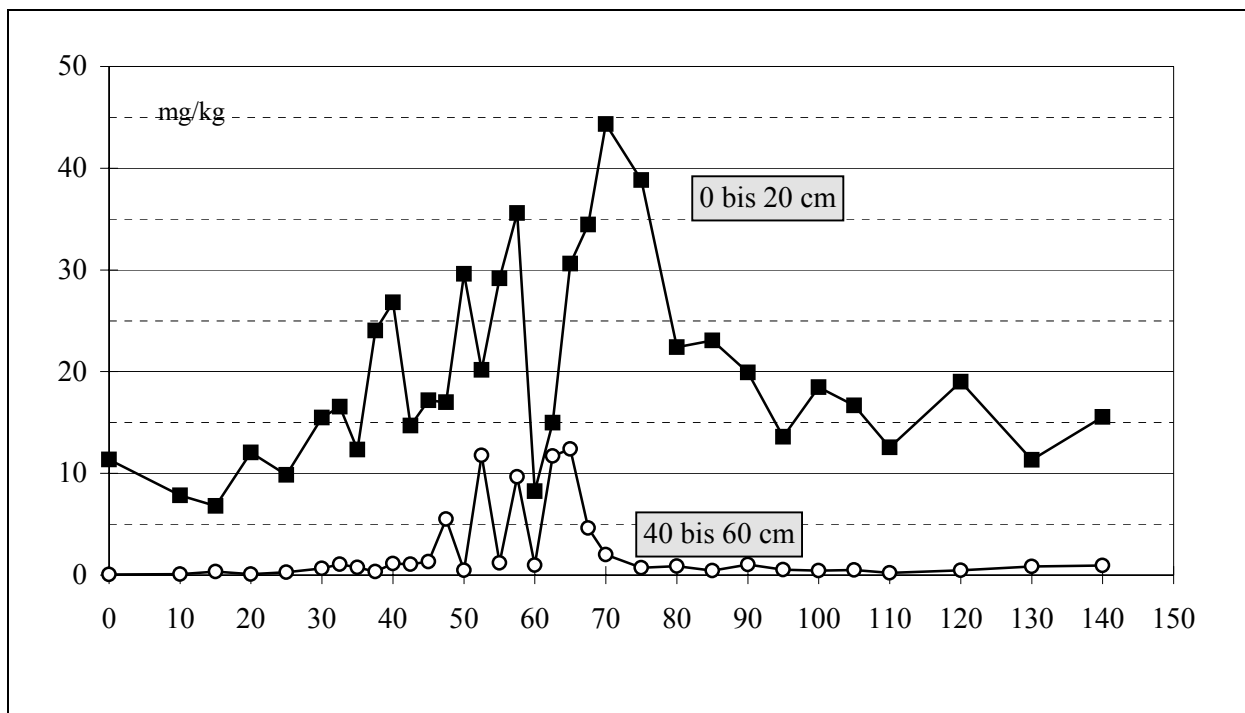


Abb. 1: Cadmiumkonzentrationen in zwei Tiefenstufen entlang eines Transektes.

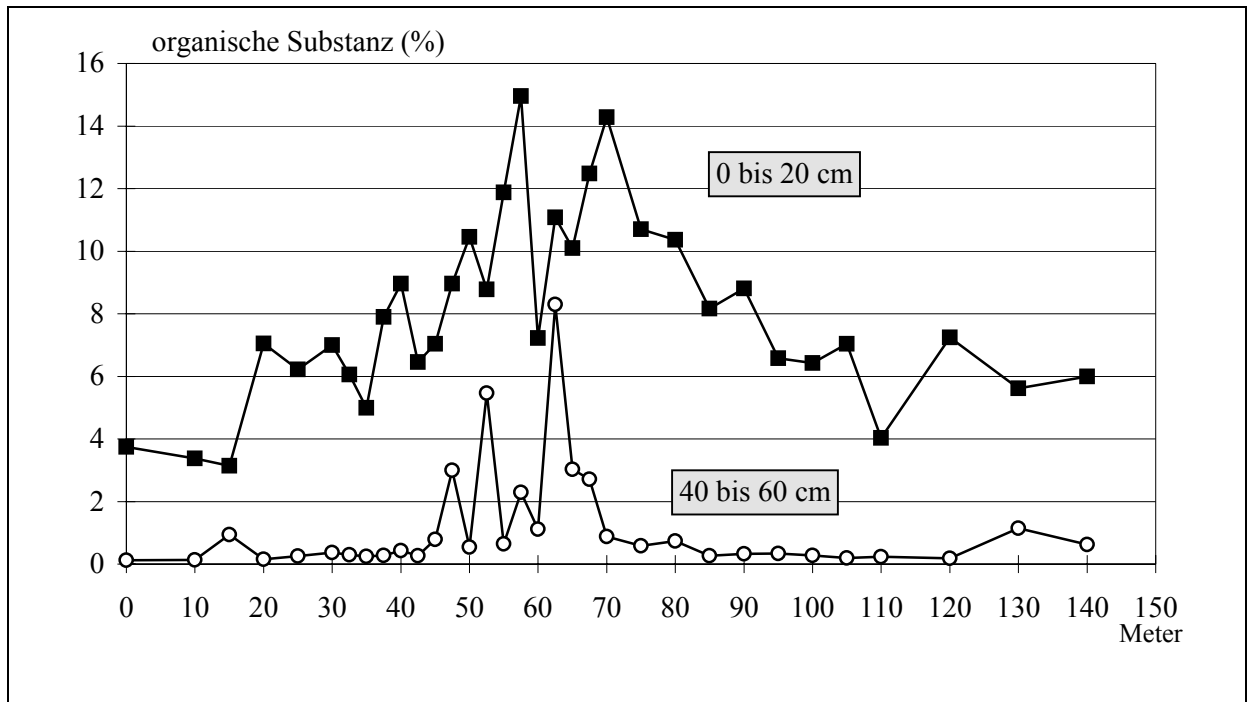


Abb. 2: Gehalte an organischer Substanz in zwei Tiefenstufen entlang eines Transektes.

3.2 Organische Schadstoffe

Organische Schadstoffe wurden an insgesamt 66 Standorten (Dioxine an 12) im Oberboden (0-20 cm) untersucht; darüberhinaus wurden an 27 ausgewählten Stellen auch Tiefenprofile analysiert. Von den in den Rieselfeldböden untersuchten organischen Schadstoffgruppen wiesen die Polyaromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), die Polychlorierten Biphenyle (PCB), die Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) und die Dioxine/Furane deutlich erhöhte Werte gegenüber nicht berieselten Flächen auf. Bei den ebenfalls untersuchten extrahierbaren organisch gebundenen Halogenen (EOX), den leicht flüchtigen Chlorkohlenwasserstoffe (LCKW), den aromatischen Kohlenwasserstoffen (AKW) und dem Phenolindex traten dagegen keine Auffälligkeiten gegenüber der Umgebung auf.

Wie aus Tab. 4 zu ersehen ist, weisen die organischen Schadstoffgehalte im Oberboden eine ähnlich weite Spanne auf wie die Schwermetalle. Die Maximalwerte liegen bis zu 2500-fach höher als die Minima, bzw. als die Werte des Kontrollbodens im Bucher Forst ("Wald"). Auch die organischen Schadstoffgehalte sind links schief verteilt, so daß die geometrischen Mittelwerte die durchschnittliche Belastung besser beschreiben. Wird die Berliner Liste für eine Einschätzung der Belastung zu Rate gezogen, so liegen die Maxima der PAK, PCB und MKW alle über dem Richtwert der Kategorie Ib, aber noch deutlich unter dem der Kategorie III. Dies gilt nicht nur für die Maximalwerte, sondern für rund 25% der untersuchten Bodenproben. Die Dioxinkonzentrationen erreichen diese Richtwerte nicht, aber der Großteil der Proben (67%) liegt deutlich oberhalb des z.Zt. diskutierten Richtwertes für landwirtschaftlich genutzte Böden von 5,0 ng TE/kg (Kratz, pers. Mitt.).

Tab. 4: Minima, Maxima, geometrische Mittelwerte, 75- und 95-Perzentile organischer Schadstoffgehalte im Oberboden (0-20 cm) der Rieselfelder im Vergleich zu einem unbelasteten Waldstandort im Bucher Forst und zu den Richtwerten der Kategorien Ib und III der Berliner Liste [mg/kg].

	PAK µg/kg	PCB µg/kg	MKW mg/kg	Dioxine ng TE/kg
Minimum	9	1	0	1,9
Maximum	7476	2559	1626	52,8
geom. MW	662	136	122	11,0
75%	1410	847	285	28,1
95%	4037	1578	867	52,8
Wald	9	0	36	n.b.
RW Ib	1000	1000	300	100
RW III	100.000	5000	5000	*

Wegen ihrer starken Sorption an die organische Bodensubstanz (Tab. 5) treten die höchsten organischen Schadstoffkonzentrationen im humosen Oberboden auf. Die Bioverfügbarkeit und Mobilität der organischen Schadstoffe wird nicht durch den pH des Bodens beeinflusst. Eine Abnahme der Humusvorräte würde die Sorptionsplätze vermindern, allerdings ist bei einem Humusabbau möglicherweise auch ein verstärkter Schadstoffabbau zu erwarten. Da hierüber aber keine Untersuchungen vorliegen, sollten auf den Flächen keine Maßnahmen erfolgen, die zu einer Reduzierung des wichtigsten Sorptionsträgers, der organischen Bodensubstanz in diesen Sandböden führen.

Tab. 5: Korrelationskoeffizienten (r) für Humusgehalte und organische Schadstoffe von ausgewählten Leitprofilstandorten (0 bis 90 cm Tiefe) und Transektproben (0 bis 60 cm), ($n=77$)

	org. Sub.	PAK	PCB
PAK	0,48		
PCB	0,76	0,71	
MKW	0,65	0,76	0,92

Entlang eines Transekts zeigen auch die *organischen Schadstoffe* ein ähnliches Verteilungsmuster wie die Schwermetalle. Dabei erreichen die Konzentrationen der Polyaromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) ebenfalls in den Bereichen der ehemaligen Dämme Maximalwerte bis zu 3200 mg pro kg Boden. Auch die Polychlorierten Biphenyle (PCB) mit 2500 µg und die Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) mit 1100 mg pro kg Boden erreichen bei einem identischen räumlichen Verlauf ihre Maximalwerte in den Dammbereichen.

3.3 Nährstoffe und pH-Werte

Nach der langen und intensiven Verrieselung von Siedlungs- und Industrieabwässern ist zu erwarten, daß ein hohes oder zumindest ausreichendes Angebot an Nährstoffen im Untersuchungsgebiet zu finden ist. Die organischen Substanz stellt dabei insbesondere für N und P einen sehr großen Nährstoffpool dar. Anhand von 60 Profilanalysen zeigen Schlenther et al. (1992) und Strohbach et al. (1992) weiterhin, daß das potentielle Nachlieferungsvermögen an Nährstoffen zu 85 bis 90 Prozent durch den Humusgehalt erklärt werden kann. Damit fällt der Mächtigkeit der Auftragshorizonte und deren Humusgehalt eine Schlüsselrolle für die Nährstoffversorgung am Standort zu.

3.3.1 Austauschbare Nährstoffkationen und Kationenaustauschkapazität

Leicht nachlieferbares *Calcium* kommt in den humosen Horizonten im Mittel mit 3,5 mval/100g Boden, Maximal zu 55 mval/100g vor (Strohbach et al. 1992). In den tieferen mineralischen Horizonten werden im Mittel nur noch 0,7 mval/100g erreicht, was nach Hüttl (1991) noch eine für das Baumwachstum ausreichende Menge darstellt.

Schlenther et al. (1992) und Strohbach et al (1992) weisen auf sehr geringe Gehalte an austauschbarem *Magnesium* und *Kalium* an allen untersuchten Standorten hin und halten einen Mangel an diesen Makronährstoffen für möglich, da die Werte in einem Bereich liegen, bei denen Hüttl (1991) bei Fichten deutliche Gelbspitzigkeit nachwies.

Im Mittel liegt die KAK in den humosen Auftragsschichten bei 10 mval/100g Boden und ist damit als gering bis sehr gering zu bezeichnen (Schlenther et al. 1992). Nur die Schlammschichten, mit bis zu 50 % Anteilen an organischer Substanz, erreichen Werte von fast 30 mval/100g Boden. Aufgrund der fortschreitenden Bodenversauerung liegt allerdings an nur 3 der 13 repräsentativen Profilen im Untersuchungsgebiet die Basensättigung über 50 Prozent, maximal bei 65 %.

3.3.2 pH-Werte

Der ehemalige Grundwassereinfluß kommt auch in den häufig festgestellten pH-Wert-Tiefenprofilen zum Ausdruck, bei denen die pH-Werte entgegen den natürlichen Verhältnissen mit der Tiefe nicht zu- sondern abnehmen. Dies ist eine Folge der Grundwasserabsenkung wodurch Schwefelverbindungen im Unterboden durch die Luftzufuhr zu Schwefelsäure oxidiert wurden. An einem Drittel der 61 untersuchten Profile wurden diese Verhältnisse innerhalb des ersten Meters festgestellt. Der überwiegende Teil aller Profile liegt im stark bis mittel saurem Bereich (pH 4,0 bis 6,0), Extreme sind Werte von 3,8 und 6,9. Ausnahmen bilden Profile mit kalkhaltigem Material (Mergel oder Wiesenkalk), wo Werte im alkalischen Bereich bis 8,0 auftreten. Am Referenzprofil im Bucher Forst wurden im Oberboden Werte von 3,3 gemessen.

3.4 Zusammenfassende Bewertung

Von den untersuchten Schwermetallen müssen unabhängig von den Richtwertüberschreitungen Cd, Cr und Zn am kritischsten bewertet werden. So können bereits bei 6-9 mg Cd/kg starke Aktivitätshemmungen bei Bodenmikroorganismen auftreten (Stadelmann et al. 1982). Für Cr wurden toxische

Wirkungen auf Mikroorganismen und Pflanzen ab 100 mg/kg nachgewiesen (Beck 1981; Mohr 1983). Zink kann in sauren Böden ($\text{pH} < 5-6$) ab 150 mg/kg Schäden an Pflanzen auslösen (Herms & Brümmer 1980).

Außerdem werden die Schwermetalle Cd, Ni und Zn bei einer fortschreitenden Bodenversauerung, wie sie auf den Flächen zu beobachten ist, zunehmend löslich und damit bioverfügbar bzw. potentiell grundwassergefährdend. Die Verfügbarkeit von Cu, und Pb ist durch deren Bindung an die reichlich vorhandene organische Bodensubstanz dagegen auch bei niedrigen pH-Werten deutlich geringer (Scheffer & Schachtschabel 1989).

Die Maximalwerte der PAK-Belastung in den Rieselfeldböden liegen in der gleichen Größenordnung wie am Fahrbahnrand von sehr stark befahrenen Straßen (Fleischmann & Wilke 1991). Nach Kratz (1992 a,b) sind sublethale toxische Wirkungen auf Mikroorganismen bei den gefundenen Konzentrationen wahrscheinlich. Die PCB-Gehalte sind deutlich gegenüber dem Kontrollboden erhöht (Tab. 4), liegen aber noch unter den Werten, die Gelbert et al. (1992) in klärschlammgedüngten Ackerböden fanden. Eine toxische Wirkung der PCB auf Bodenorganismen ist in dem gefundenen Konzentrationsbereich unwahrscheinlich, allerdings können einzelne Enzymsysteme bereits bei Gehalten unterhalb von 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ gestört werden (Tebaay et al. 1990). Eine Wirkung der PAK, PCB oder Dioxine/Furane auf Pflanzen ist dagegen nicht zu erwarten. Die MKW können dagegen bereits ab Konzentrationen von 1000 mg/kg das Pflanzenwachstum beeinträchtigen (Kratz 1992 a), während über ihre Wirkung auf Bodenorganismen wenig bekannt ist. Im Gegensatz zu den Schwermetallen können die organischen Schadstoffe mit unterschiedlichen Raten im Boden abgebaut werden, z.T. verflüchtigen sie sich auch aufgrund ihres geringen Dampfdruckes in die Atmosphäre. Es ist daher davon auszugehen, daß seit Einstellung des Rieselbetriebes bereits ein Rückgang bei den organischen Schadstoffkonzentrationen eingetreten ist. Einige Verbindungen wie die höher chlorierten PCB, die hocharomatischen PAK und die Dioxine/Furane sind allerdings sehr persistent und werden daher noch jahrzehntelang in den Böden verbleiben.

Die Makronährstoffe dürften in den humosen Horizonten in ausreichenden pflanzenverfügbaren Mengen vorliegen. Aufgrund ihrer meist geringen Humus- und Tongehalte und den relativ niedrigen pH-Werten besitzen die C-Horizonte (Ausnahme: Mergel in Blankenfelde) im Gegensatz zu den stark humosen Oberböden nur wenige Adsorptionsplätze, sie gelten damit als Nährstoffarm.

Zusammenfassend läßt sich aus diesen Ergebnissen zum einen feststellen, daß die Schadstoffgehalte im Boden auf kürzeste Entfernungen sehr stark variieren können, dabei aber bestimmten Mustern folgen. Die Maximalwerte liegen im Bereich der ehemaligen Dämme, was dadurch zu erklären ist, daß bei der früher regelmäßig durchgeführten Entschlammung die Rückstände oft auf den Dämmen verteilt wurden. Zum anderen ist eine Beeinträchtigung des Baumwachstums durch die Schadstoffe offensichtlich nicht, oder nur punktuell gegeben, sondern die Standorteigenschaften wirken sich eher positiv auf die Baumvitalität aus, da an den Stellen, an denen die Auftragsschichten mächtiger und humoser sind, die Nährstoffkonzentrationen höchste Werte erreichen. Die flächenmäßig bedeutendsten Ausfälle liegen in der Mitte der ehemaligen Galerien (Becken), hier treffen die Baumwurzeln nach wenigen Zentimetern humosen Oberbodens auf die Nährstoffarmen C-Horizonte. Eine mangelnde Nährstoffversorgung kommt hier für den flächenhaften Ausfall der Anpflanzung größere Bedeutung zu. Harter (1993) konnte auf Standorten mit Mangel an pflanzenverfügbarem Kalium beim Echenahorn eine verminderte Blattgrößenentwicklung und reduziertes Dickenwachstum beobachten.

Im Hinblick auf das pflanzenverfügbare Magnesium waren beim Eschenahorn und bei der Schwarzpappel das Höhen- und Dickenwachstum auf unterversorgten Standorten reduziert.

4 TEXTUR UND WASSERHAUSHALT

4.1 Der Unterschied zwischen den Substraten

Der Großteil der Böden weist zumindest in den Unterböden Sandanteile von 96 bis 99 % auf mit nur geringen Ton- und Schluffanteilen. In den Auftragshorizonten liegen die Ton- und Schluffgehalte oft höher (bis zu 12%), da diese Stoffe auch mit dem Abwasser auf die Flächen gelangten. Eine Ausnahme stellen die Geschiebelehme und -mergel der Blankenfelder Parabraunerden dar, in denen bei nur 55 - 60 % Sand ca. 25 % Schluff und 15 - 20 % Ton zu finden sind.

In erster Linie bewirken diese Korngrößenunterschiede deutlich andere Wasserleitfähigkeiten. So erreichen die lehmigen Horizonte im Mittel unter gesättigten Bedingungen nur 43 cm pro Tag, die sandigen Substrate dagegen 300 - 1000 cm pro Tag. Die geringere Durchlässigkeit des in Blankenfelde oberflächennah anstehenden Geschiebelehms führte während der Verrieselung zwangsläufig zu einer geringeren Beschickung mit Abwässern. Die extrem hohen Wasserleitfähigkeiten der Sande erhöht zum jetzigen Zeitpunkt das Verlagerungsrisiko von Nähr- und Schadstoffen.

Wesentlich wird durch die unterschiedliche Textur das Wasserspeichervermögen der Böden beeinflusst. Die potentiell pflanzenverfügbare Bodenwassermenge (nutzbare Feldkapazität) fällt in den undurchlässigeren Horizonten mit 11,5 Volumenprozent etwas höher gegenüber den 4,5 bis 8 Volumenprozent der Sande aus.

Den größten Einfluß auf die Wasserhaushaltseigenschaften der Böden hat die organische Substanz. Bei den relativ hohen Humusgehalten der Auftragshorizonte liegt aufgrund einer besseren Aggregation und der hohen spezifischen Wasserkapazität des Humus der Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser bei bis zu 20 Vol.%. Je mächtiger und humusreicher die Auftragshorizonte und je tiefer die C-Horizonte liegen, um so günstiger sind die Standorte hinsichtlich der absoluten pflanzenverfügbaren Wassermenge und des gesamten Wasserhaushaltes zu beurteilen. Dieser Sachverhalt wird durch die Abbildung 3 verdeutlicht: dort ist die nutzbare Feldkapazität für einen Meter Tiefe in Abhängigkeit der Mächtigkeit des YAh-Horizontes dargestellt. Die Daten wurden an einem Transekt (n=72) aufgenommen, die nFk aus der Bodenart, der Lagerungsdichte und dem Humusgehalt der Auflage berechnet. Bleibt der YAh-Horizont unter 30 cm Mächtigkeit, ist die nFk als gering einzustufen.

Die Menge pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Wurzelraum steht in enger Beziehung zur Vegetation am jeweiligen Standort (Schlentherr et al. 1992, Geldmacher 1993, vgl auch Abb. 4). An den grundwasserfernen Standorten mit nur geringmächtigen Auftragshorizonten fällt die Menge pflanzenverfügbaren Bodenwassers mit 79 oder 88 mm gering aus, dort hat sich lediglich eine Grasflur entwickelt. Dagegen finden sich mehr oder weniger geschlossenen Baumbestände (Vorwald 5-7m) auf Standorten mit deutlich größerem Angebot an pflanzenverfügbarem Bodenwasser, das meist durch kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser gespeist wird. Dies ist im Bucher Forst mit seinen tiefreichenden Wurzeln besonders stark ausgeprägt.

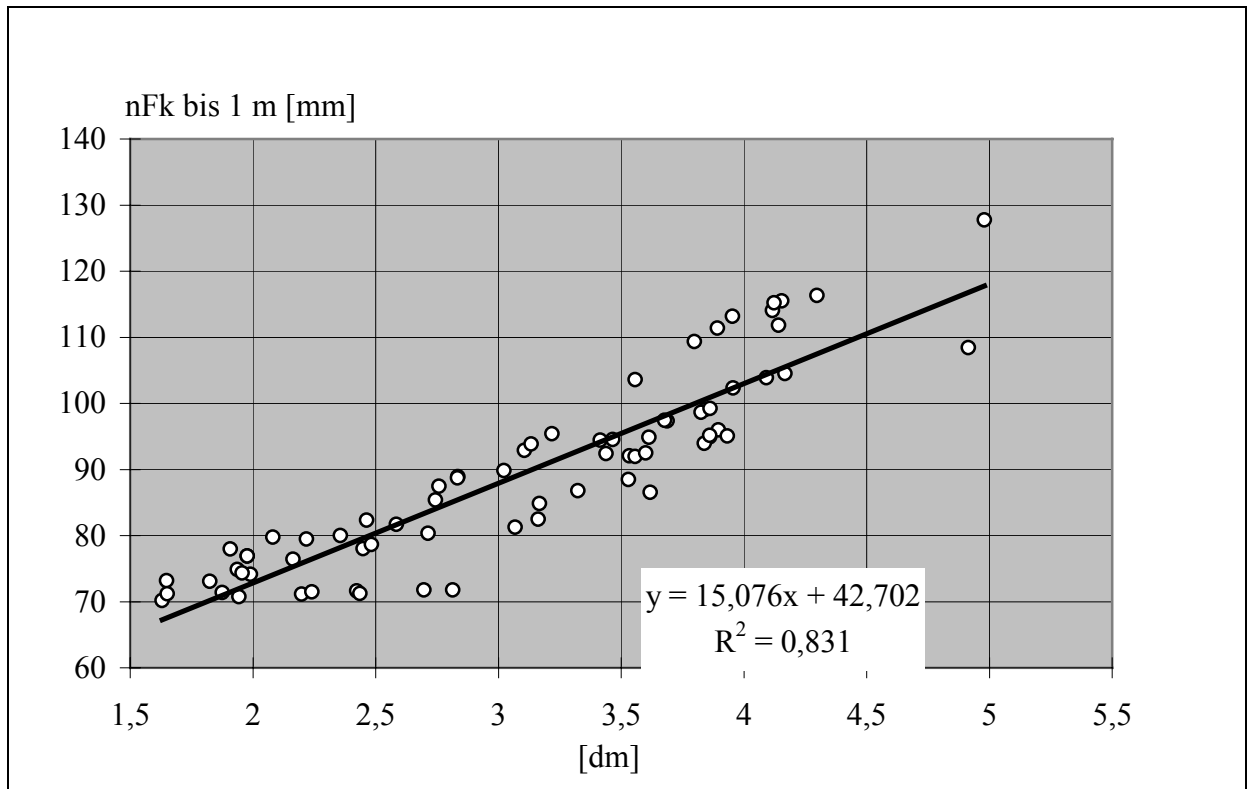


Abb. 3: Nutzbare Feldkapazität bis 1 Meter Tiefe in Abhängigkeit der Mächtigkeit des humosen Auftragsbodenhorizontes (YAh); $n = 72$.

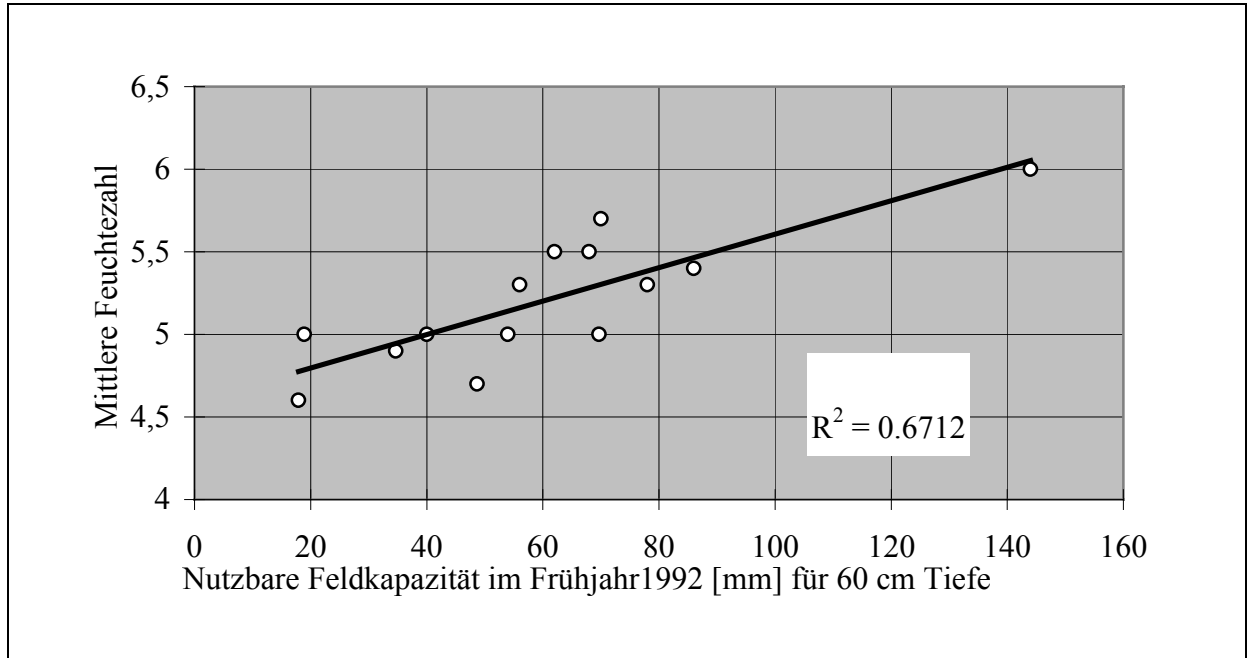


Abb. 4: Mittlere Feuchtezahl (Frühjahr 1992) in Abhängigkeit des pflanzenverfügbares Bodenwassers innerhalb 60 cm Tiefe an 14 Standorten (verändert nach Geldmacher 1993)

4.2 Beziehung zwischen Baum- und Bodenparametern

Harter (1993) hat innerhalb einer ehemaligen Rieselgalerie auf 19 Parzelle, jeweils 20 x 25 Meter, alle angewachsenen Bäume (n=379, 37 % Anwuchserfolg) forstwirtschaftlich kartiert. Dieser Baumbestand setzt sich zu 40 % aus Eschenahorn, 39 % Balsampappel und 21 % Schwarzpappel zusammen. Für jeden Baum wurde, anhand von drei Bodenkartierungspunkten pro Parzelle mittels geostatistischer Verfahren, die YAh-Mächtigkeit berechnet, und anschließend mittels einer Clusteranalyse in Gruppen zusammengefaßt.

Die mittleren Mächtigkeiten mit den statischen Parametern sind in Tabelle 6 zusammengefaßt. Es wird deutlich, daß die Wurzeln der in Bereiche mit geringer YAh-Mächtigkeit (Gruppe 3) gepflanzten Bäume, sich nur noch wenige cm oder gar nicht im humosen Oberboden befinden.

Tab. 6: Gruppen der YAh-Mächtigkeit für den untersuchten Baumbestand in einer ehemaligen Rieselgalerie und deren statistische Maßzahlen

Gruppe	Min. [cm]	Max. [cm]	Mittelw. [cm]	Std.abw. [cm]	n	Anteile [%]
1	50,0	77,1	55,6	5,5	89	24
2	36,2	49,9	42,3	4,0	176	46
3	15,8	36,1	28,9	4,9	114	30

Diesen Sachverhalt verdeutlicht die Korrelation zwischen Höhe und Umfang (in 30 cm Höhe) der untersuchten Bäume zur Mächtigkeit des YAh-Horizontes (Tab. 7): Insbesondere die Schwarzpappel reagiert auf zunehmende YAh-Mächtigkeit mit stärkerem Wachstum.

Tab. 7: Korrelationskoeffizienten der YAh-Mächtigkeit mit ausgesuchten Bestockungsparametern des untersuchten Baumbestandes

Baumart	Parameter	YAh-Mächtigkeit
Schwarzpappel	Höhe	0,81
Balsampappel	Höhe	0,57
Eschenahorn	Höhe	0,56
Schwarzpappel	Umfang 0,3	0,76
Balsampappel	Umfang 0,3	0,57
Eschenahorn	Umfang 0,3	0,47

Betrachtet man die Höhenentwicklung aller Bäume auf den untersuchten 19 Parzellen, so zeigen sich hinsichtlich der YAh-Mächtigkeit signifikant (Student-Newmann-Keuls-Test) unterschiedliche Mittelwerte (Tab. 8). Im Bereich des Einlasses der ehemaligen Galerie (157 Bäume) wird dies am deutlichsten.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß, ebenso wie bei der Belastung mit Schadstoffen, der Humusgehalt im obersten Auftragshorizont für den Wasserhaushalt am Standort von größter Bedeutung ist.

Je mehr organische Substanz und je mächtiger diese Schicht, um so besser ist die Versorgung der Bäume mit Wasser. Dies gilt insbesondere für junge, gerade anwachsende Bäume. Während trockener Perioden sind dann die Ausfallerscheinungen am größten, insbesondere dann, wenn die jungen Bäume in nur wenige cm mächtige Auflageschichten gepflanzt worden sind. Die ungünstigen

Wasserspeichereigenschaften der C-Horizonte und Konkurrenzvegetation (Gras- und Staudenflur am Pflanzloch) verringern dann das Wasserdargebot erheblich.

So zeigte der Vergleich zwischen dem Infrarotluftbild einer aufgeforsteten Rieselfeldgalerie und der für diese Fläche erstellten Bodenkarte eine sehr enge Beziehung zwischen Anwuchserfolg und Mächtigkeit des humosen Auftragshorizontes (Schlenther et al. 1992). In Bereichen, in denen die Mächtigkeit der Auftragshorizonte unter 30 cm liegt, sind keine Bäume und nur Gras- und Staudenvegetation zu erkennen. Dies wird vor allem mit dem höheren Vorrat an pflanzenverfügbarem Wasser, aber auch mit den höheren Nährstoffvorräten in Zusammenhang gebracht (Harter 1993).

Tab. 8: Höhe des untersuchten Baumbestandes und deren statistische Maßzahlen für den Bereich des Einlasses einer ehemaligen Rieselfeldgalerie (n=157) nach Gruppen der YAh-Mächtigkeit unterschieden.

Gruppe	Min. [dm]	Max. [dm]	Mittelw. [dm]	Std.abw. [dm]	n	Anteile [%]
1	12,0	53,0	34,3	11,5	35	23
2	8,0	45,0	23,7	8,0	55	35
3	4,0	42,0	19,0	9,0	67	42

5 SCHLUßFOLGERUNGEN

Die bisher vorliegenden Ergebnisse weisen darauf hin, daß die ursprünglich aufgestellten Hypothesen über einen Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastung und Aufforstungsmißerfolg relativiert werden müssen. Anscheinend wird die Vitalität der Bestände durch die zum Teil extrem hohen Schwermetallgehalte im Boden kaum beeinträchtigt. Auch die zum Teil geringen Kalium- und Magnesiumvorräte im Boden sind keine ausreichende Erklärung für die massiven Anwuchsausfälle. Die Wasser-
verfügbarkeit scheint eine wichtige Rolle für die Verteilung und Vitalität der Gehölze zu spielen.

Probleme bei der Standortcharakterisierung und Abschätzung von Gefährdungspotentialen bereitet die hohe räumliche Variabilität der Bodeneigenschaften und -belastung. Es lassen sich zwar Hochlastverdachtsflächen im Bereich der Einlaßbecken anhand der alten Rieselpläne identifizieren, die Datenbasis reicht aber bisher nicht aus, um die Ausdehnung dieser Flächen abzuschätzen und die Belastung ehemaliger Dämme um andere Becken auszuschließen.

Eine weitere Schwierigkeit für die ökologische Beurteilung der Standorte besteht darin, daß zur Zeit eine hohe Dynamik der Bodenprozesse stattfindet, die vor allem durch starke Mineralisationstätigkeit und Versauerung gekennzeichnet ist. Dies wird längerfristig die Standorteigenschaften nachhaltig verändern, hin zu Böden mit geringeren Humusvorräten und niedrigem pH, wie es an einzelnen Standorten schon zu beobachten ist. Eine dadurch ausgelöste Schwermetallmobilisierung könnte dann das Baumwachstum beeinträchtigen und zur Belastung des Grund- und Oberflächenwassers führen, was nicht mehr durch technische Mittel zu sanieren wäre. Über Zeitpunkt, Ausmaß und Dauer dieser Prozesse können noch keine gesicherten Aussagen gemacht werden, da weder Daten aus der Vergangenheit, noch Erfahrungen von vergleichbaren Standorten vorliegen.

6 LITERATUR

- Beck, T. (1981):** Untersuchungen über die toxische Wirkung der in Siedlungsabfällen häufigen Schwermetalle auf die Bodenmikroflora. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 144: 613-627.
- Fleischmann, S. & B.-M. Wilke, (1991):** PAK's in Straßenböden. *Mitt. Deutsch. Bodenkundl. Ges.* 63: 99-102
- Gelbert, G.; Hasselbach, G.; Georgii, S.; Brunn, H. (1992):** Chlorkohlenwasserstoffe (Dioxine und Furane, PCB, Pestizide) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in Acker- und Grünlandböden - Ergebnisse aus langjährigen Klärschlamm-Feldversuchen. *Agribiol. Res.* 45: 77-87
- Geldmacher, K. (1993):** Effektiver Wurzelraum und pflanzenverfügbares Bodenwasser charakteristischer Böden und Nutzungen in Berlin - Buch, Diplomarbeit am Fb 14 der TU-Berlin, Inst. f. Ökologie Fg. Bodenkunde, 102 S.
- Grenzius, R. (1987):** Die Böden Berlins (West), Klassifizierung, Vergesellschaftung, ökologische Eigenschaften, Dissertation am FB 14, TU-Berlin
- Harter, A. (1993):** Beziehung zwischen Baumbestockung und Bodenparametern einer aufgeforsteten Rieselfeldfläche im Forstamt Berlin - Buch, Diplomarbeit am Fb 14 der TU-Berlin, Inst. f. Ökologie Fg. Bodenkunde, , Dipl. am Fb 14 der TU-Berlin, Inst. f. Ökologie Fg. Bodenkunde, 118 S
- Hermes, U. & G. Brümmer, (1980):** Einfluß der Bodenreaktion auf Löslichkeit und tolerierbare Gesamtgehalte an Ni, Cu, Zn, Cd und Pb in Böden und kompostierten Siedlungsabfällen. *Landwirtsch. Forsch.* 33: 408-23
- Hüttl, R. F. (1991):** Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika, in: *Freibg. Bodenkdl. Abhandlungen*, Heft 28
- Kratz, W. (1992a):** Bestimmung von organischen Schadstoffen im Boden von den ehemaligen Rieselfeldern in Berlin Buch. Teil I. Abschlußbericht des ÖSP-Buch, im Auftrag der Berliner Forsten.
- Kratz, W. (1992b):** Bestimmung von organischen Schadstoffen im Boden von den ehemaligen Rieselfeldern in Berlin Buch, Teil II. Abschlußbericht des ÖSP-Buch, im Auftrag der Berliner Forsten.
- Mohr, H.D. (1983):** Toxizität von Cr(III) und Cr (IV) und ihre Aufnahme in die Rebe (*Vitis vinifera* L.) bei unterschiedlicher Bodenreaktion. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 146: 516-524
- Schlenther, L.; Eggert, T.; Hoffmann, C. & Renger, M. (1992):** Bodenökologische Untersuchungen auf den Rieselfeldflächen Buch. Gutachten im Auftrag der Berliner Forsten, 215 S.
- Scheffer & Schachtschabel (1989):** Lehrbuch der Bodenkunde. Enke Verl., Stuttgart
- Stadelmann, F.X.; Gupta, S.K.; Rudaz, A.; Stoekli-Walter, C. (1982):** Wechselbeziehungen zwischen Bodenmikroorganismen und Cd in Labor- und Gefäßversuchen. *Landwirt. Forsch.* 39: 149-156
- Strohbach, B., H.-H. Krauß, L. Bolduan, C. Banse & B. Heisterberg (1992):** Bericht über die Schwermetallbelastung und Nährstoffversorgung der Böden im Rahmen des ÖSP Rieselfelder Berlin Buch. Im Auftrag der Berliner Forsten. 35 S.
- Tebaay, R., G. Welp & G. Brümmer (1990):** Untersuchungen zur mikrobiellen Toxizität sowie zur Adsorption und Löslichkeit von PAK und PCB. Vortragskurzfassung zum Kolloquium "Schadstoffe im System Boden/Pflanze", Recklinghausen März 1990.