

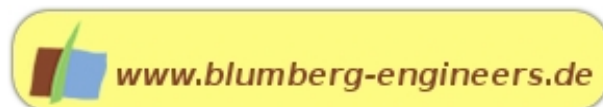
**Untersuchungsergebnisse zur
Substratdurchwurzelung
von
Phragmites communis (syn. *australis*)
in Schilfkläranlagen**

**und daraus ableitbare abwasserhydraulische
Konsequenzen**

**Vortrag zum International Workshop
Röhricht - Bedeutung einer Pflanzengesellschaft in Ökologie und Technologie
Limnologische Station Iffeldorf der TU München
05. - 09. September 1995**

Neu-Eichenberg, im Juni 1995

von Michael Blumberg



Untersuchungsergebnisse zur Substratdurchwurzelung von *Phragmites communis* in Schilfkläranlagen und daraus ableitbare abwasserhydraulische Konsequenzen

Michael Blumberg

Zusammenfassung

Schilfkläranlagen werden als eine naturnahe Variante moderner Abwasserreinigungsverfahren definiert. Diese Verfahren beanspruchen das Prädikat Ökotechnik bzw. "ecological engineering" im engeren Sinne zu Recht. Die vorgestellten Forschungsergebnisse erlauben die Feststellung, daß sich mehr als 95 % der unterirdischen Biomasse von *Phragmites communis* in Schilfkläranlagen auf den Bodenprofilausschnitt von 0 (= Geländeoberkante) bis - 40 cm Bodentiefe beschränkt und daß die Durchwurzelungsintensität mit der Wurzelraumtiefe steil absinkt. Die ermittelte unterirdische Biomasse schwankt standortabhängig zwischen ca. 1 bis 5 kg TS pro m². Anhand von bodenhydraulischen Sachverhalten wird dargelegt, daß das vorgefundene Durchwurzelungsprofil ein überwiegend oberflächennahes Abwassertransportgeschehen impliziert. Schilfkläranlagen können demzufolge um etwa ein Drittel "flacher" ausgelegt werden (40 cm) als bisher allgemein gefordert (60 cm), ohne daß wesentliche Leistungseinbußen zu befürchten sind. In der Praxis der Kläranlagenplanung an grundwassernahen Standorten erweist sich die geringe erforderliche Bautiefe von Schilfkläranlagen als deutlicher, zusätzlicher Systemvorteil gegenüber konventionell - technischen Verfahren (Tropfkörper-, Belebungsanlagen).

key words: Reed bed treatment systems, underground biomass distribution of *Phragmites communis*, hydraulics of constructed wetlands, stratification of roots and rhizomes of *Phragmites communis* in soil profiles, ecological engineering

INVESTIGATIONS INTO THE ROOT DISTRIBUTION PATTERNS OF *PHRAGMITES COMMUNIS* IN HORIZONTAL FLOW REED BED TREATMENT SYSTEMS AND THE CONSEQUENT DESIGN IMPLICATIONS OF WASTE WATER HYDRAULICS.

Michael Blumberg

SUMMARY

Reed bed treatment systems are a nature-near, modern alternative to conventional waste water treatment systems.

These systems can justifiably claim the attributes of eco-technology or ecological engineering.

The presented research results confirm that more than 95 % of the below ground biomass of *Phragmites Communis* in reed bed treatment systems is concentrated in the top 40 cm of the root zone depth and that the root/rhizome density decreases steeply with increasing depth.

The below ground biomass was measured on a number of sites and found to vary according to the specific site conditions of the soil, but in all cases was between one and five kg of dry matter per square metre.

In line with well known facts in Soil Physics and Hydraulics, this investigation into root distribution patterns confirms that water movement in horizontal flow reed bed treatment systems which use fine textured substrates, occurs primarily in the top layer of the root zone.

In consequence, such reed bed treatment systems can therefore be designed to operate successfully without significant performance efficiency reductions in one third less thickness of soil/substrate than has up to now generally been considered essential for optimum performance.

The relative lower construction depth of such reed bed treatment systems is a further advantage over conventional treatment systems (i.e. trickling filter and activated sludge systems) in relation to sewage treatment for sites with high ground water levels.

1 "Schilfkläranlagen",

- es gibt eine Fülle weiterer Bezeichnungen die verdeutlichen, daß es ebensoviele Varianten gibt -, sind erst seit etwa zwei Jahrzehnten vorzugsweise im ländlichen Raum im Einsatz und wurden seitdem ständig weiterentwickelt.

Es handelt sich um Landbehandlungsverfahren (also nicht um mehr oder weniger stark bepflanzte Teiche), bei denen Abwasser ein mit Sumpfpflanzen bestandenes Substrat (Mutterboden, Kies, Sand oder Mischformen) horizontal oder vertikal durchsickert. Der Reinigungsprozess findet in künstlich abgedichteten (Folie oder Betonit) Erdbecken statt.

Durch substratgebundene und abwasserbürtige Mikroorganismen, vor allem Bakterien, werden organische Schmutzstoffe unterschiedlichster Art zu Kohlendioxid und Wasser abgebaut.

Das ganz überwiegend eingesetzte Rohrschilf (*Phragmites communis*, synonym *australis*) erhält mit seinem Wurzel- und Rhizomsystem die Wasserdurchlässigkeit des Substrates und führt über pflanzenspezifische Luftleitgewebe Sauerstoff in den wassergesättigten Untergrund.

2 Ökotechnik

Schilfkläranlagen sind geradezu ein Musterbeispiel für Verfahren, die mit den Begriffen "Ökotechnik" und "ecological engineering" assoziiert werden. Der Autor definiert "Ökotechnik als den

planmäßigen Aufbau und Einsatz von natürlich vorkommenden Ökosystemen zu dauerhaften Produktions- und/oder Entsorgungszwecken.

In der Ökotechnik werden Ökosysteme als Ganzes - und nicht wie in der Biotechnologie in kleinsten Ausschnitten - nutzenstiftend eingesetzt, um Bedürfnisse der menschlichen Zivilisation zu erfüllen. Das Ökosystem "Schilfröhricht", eine weitverbreitete kosmopolitisch anzutreffende Pflanzengesellschaft am Ufersaum von Seen, Teichen und Fließgewässern, besteht aus den Pflanzen, dem Boden mit seinen Mikroorganismen, dem Wasser und aus unzähligen Insektenarten, die wiederum eine Nahrungsgrundlage für eine verschwenderische Fülle von Vogelspezies bilden.

Die Vorzüge solcher Ökotechniken betreffen vor allem Aspekte des Energieverbrauchs, der Lebensdauer, der Wartungserforderlichkeit und der Landschaftsästhetik bei vergleichbaren oder sogar besseren Wirkungsgraden hinsichtlich des Primärzweckes "Ver- oder Entsorgung" z.B. von Siedlungsabwässern oder -abfällen gegenüber technisch - konventionellen Verfahren.

3 Durchwurzelungs- und Fließbereiche von Schilfkläranlagen

Die intendierten pflanzlichen Einflüsse auf die Bodenstruktur (Aufrechterhaltung der Wasserwegigkeit) können nur zur Wirkung kommen, wenn eine Etablierung der vorgesehenen Vegetationsformen überhaupt gelingt.

In vielen Pflanzenkläranlagen bereitete es in der Vergangenheit jedoch zum Teil erhebliche Schwierigkeiten einen geschlossenen Bestand von *Phragmites communis* in relativ kurzer Zeit zu etablieren, das soll heißen innerhalb von drei Jahren (KRETZSCHMAR 1988, LOLL 1990).

Bepflanzungsprobleme sind für die Art *Phragmites communis* als gelöst oder vermeidbar anzusehen. Erfolge oder Mißerfolge sind ausschließlich eine Funktion des Pflanzmaterials und des spezifischen Know-hows des mit der Arbeit Beauftragten.

Die mittlerweile zahlreichen Befundungen eines überwiegend oberflächennahen Abflußgeschehens im Bereich des Mineralbodens (UNIVERSITÄT WIEN et al. 1988, BÖRNERT et al. 1990, Dänische UMWELTBEBÖRDE MILJÖSTYRELSEN 1990) decken sich mit den vielfältigen Praxiserfahrungen des Autors.

Aus diesem Grund wurden nachfolgende Untersuchungen zur Durchwurzelungsintensität ausgeführt, der Komponente also, die theoretisch den entscheidenden struktur- und damit abflußwirksamen Beitrag liefern soll (KICKUTH 1983, KICKUTH u. GROMMELT 1983).

4 Material und Methode zur Bestimmung der unterirdischen Biomasse in Schilfkläranlagen, die mindestens drei Vegetationsperioden im Betrieb sind:

Die Probenahmen erfolgten mittels eines an den langen Seiten offenen Quaders, der durch ein 2,5 mm starkes zusammengeschweißtes Stahlblech gebildet wurde, mit den Abmessungen 1 m lang; 0,5 m breit und 0,5 m hoch. Auf einer der langen Seiten befanden sich 2 mm große Schlitze, jeweils in 10 cm Abstand, in die ein Stahlblech als Fach für die horizontale Bodenentnahme eingeführt werden konnte. Auf den Schmalseiten waren zu diesem Zweck punktuell Winkeleisen angeschweißt, die als Führung dienten.

Die Seite des Stahlquaders, die auf den Boden gesetzt wurde, war angeschärft, ebenso das Stahlfach, das jeweils in die vier horizontalen Schlitze eingeführt wurde, um die Bodenschichten abzuschneiden.

Für die Beprobung wurde so vorgegangen, daß zunächst die Probefläche abgesteckt, das oberirdische Schilf abgesenkt und das oberflächlich aufliegende organische Detritusmaterial beseitigt wurde. Der Entnahmequader wurde sodann auf die abgesteckte Probefläche gestellt und mittels eines Vorschlaghammers (Unterlage Kanthölzer) bis ganz in die Erde getrieben (50 cm tief).

An einer Langseite des eingeschlagenen Stahlrahmens wurde eine Grube ausgeschachtet mit etwa folgenden Abmessungen: 1,20 m lang; 0,80 m breit und 0,60 m tief. Von dieser Grube aus wurde das Stahlblech horizontal in das erste Fach mittels Hammer und mit Hilfe von Kant-hölzern, die als Hebel dienten, eingetrieben. Anschließend wurde der erste Horizont (Rhizom-Wurzel-Erdgemisch; 0-10 cm) mittels einer Kelle entnommen. Für die folgenden drei Horizonte wurde gleichermaßen verfahren.

Um die zu transportierende Bodenmenge zu reduzieren, wurde das entnommene durchwurzelte Erdmaterial in einer Spülwanne aufgeschlämmt und über einem 4 mm Sieb ausgewaschen. In einem zu vernachlässigenden Rahmen gingen dabei feinere Wurzeln verloren. Das Erd-Wurzel-Rhizom-Gemisch wurde verpackt, ins Labor transportiert und dort mit einer Handdusche über einem 2 mm Sieb erneut ausgewaschen. Auch hierbei mußte ein geringer Feinwurzelverlust in Kauf genommen werden. Die ausgesiebte unterirdische Biomasse wurde schließlich im Trockenschrank drei Tage bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und danach gewogen.

Die gewählte Methode ist aus Praktikabilitätsgründen auf Standorte mit Zufahrtsmöglichkeiten und Wasserverfügbarkeit beschränkt. Die erforderliche Arbeitszeit im Feld beträgt etwa 14 Stunden für 2-3 Personen, bezogen auf das gewählte Probevolumen von 0,25 m³.

Sowohl bei der Vorwäsche am Standort (4 mm Sieb) als auch bei der Siebung im Labor (2 mm Sieb) gehen unvermeidbar Feinwurzeln verloren. Die absoluten Biomassen (g TS/m²) sind also tendenziell zu klein angegeben. Der Fehler dürfte pro 0,5 m² Probefläche jedoch nicht mehr als 100 g TS betragen. Für die hier betrachtete Fragestellung ist er



Abbildung 1: Stahlquader nach Eintrieb in den Boden
(Foto: M. Blumberg)



Abbildung 2: Stahlquader mit abgeräumtem obersten Horizont (0-10 cm). Das trennende Stahlfach ist bereits wieder herausgezogen. (Foto: M. Blumberg)

vernachlässigbar klein. Sicherlich fehlerbehaftet ist auch das Abräumen des organischen Materials auf der Bodenoberfläche. Besonders bei älteren Anlagen ist der Mineralboden nicht mehr als scharfe Grenze zum organischen Auflagehorizont auszumachen. Es sind dann Horizontgliederungen zu finden, die sich dem typischen Bild eines Feucht-Rohhumus je nach dem Grad der oberflächlichen Hydromorphie nähern.

Die Probenahmetiefe wurde auf 50 cm beschränkt, um nicht beim Eintreiben des Stahlquaders oder des KG-Rohres die Folienabdichtung zu gefährden. Der unterste Horizont 50-60 cm fehlt also. Dieser Fehler ist schwer zu quantifizieren, dürfte jedoch ebenfalls aufgrund der mit der Wurzelraumtiefe stark sinkenden Biomasse gering sein.

Bei den horizontweisen Ausschlämmungen zeigte sich ein jeweils typisches Verteilungsmuster der unterirdischen Biomasse in der Form, daß sich Fein- und Grobwurzeln, Rhizomsprosse und horizontale Rhizome als inniges Geflecht vor allem in den oberen 30 cm des Profils befinden. In den folgenden Schichten sind kaum noch Feinwurzeln zu finden und es dominieren Horizontalrhizome und Grobwurzeln, deren Häufigkeit mit der Tiefe abnimmt, wie andererseits ihr ellipsenförmiger Querschnitt zunimmt.

Im Bereich 50-60 cm kommen nur noch sehr vereinzelt Rhizome vor. Auch wenn diese miterfaßt würden, ergäbe sich damit nicht zwangsläufig ein repräsentativeres Bild, da aufgrund ihrer zufälligen Verteilung das beprobte Volumen zu klein erscheint. Dieser Fehler ließe sich nur über ein größeres Ausgrabungsvolumen oder eine höhere Probenahmedichte beseitigen.

Tabelle 1: **Meßergebnisse** zur Beprobung der unterirdischen Biomasse durch Stahlquader

Schilfkläranlage	Beprobte Fläche [m ²]	Bodentiefe [cm]	g TS	g TS bezogen auf 1 m ²
Melchiorsgrund	1 x 0,5	10	641	1282
		20	404	808
		30	182	365
		40	92	184
		50	7	14
		0-50	1326	2653
Bünde	1 x 0,5	10	190	380
		20	161	322
		30	62	124
		40	26	51
		50	22	43
		0-50	461	922
Grünstadt	1 x 0,5	10	173	346
		20	153	306
		30	193	385
		40	219	437
		50	99	198
		0-50	837	1672
Hamburg	1 x 0,5	10	479	958
		20	718	1436
		30	626	1252
		40	552	1104
		50	202	404
		0-50	2577	5154
Hofgeismar	1 x 0,5	10	308	615
		20	259	517
		30	180	360
		40	44	88
		50	9	18
		0-50	800	1598

Ergänzend dazu seien nachfolgend einige Beprobungsergebnisse mitgeteilt (BLUMBERG et al. 1991), die mittels eines senkrecht in den Boden getriebenen 100 mm KG-Rohres gewonnen wurden. Die Probenbehandlung im Labor erfolgte analog zur beschriebenen Vorgehensweise.

Tabelle 2: Meßergebnisse zur Beprobung der unterirdischen Biomasse durch KG-Rohr

Schilfkläranlage	Beprobte Fläche [m ²]	Bodentiefe [cm]	g TS	g TS bezogen auf 1 m ²
Am Sande	4 x 0,011	10	19,65	1914
		20	12,31	1088
		30	3,85	340
		40	3,59	317
		50	1,06	94
		0-50	40,46	3753
Ittlingen	16 x 0,011	10	12,33	1090
		20	7,90	699
		30	5,42	479
		40	3,79	335
		50	1,60	141
		0-50	31,04	2744
Bünde	2 x 0,011	10	3,71	328
		20	3,79	335
		30	0,96	85
		40	0,93	82
		0-50	9,39	830

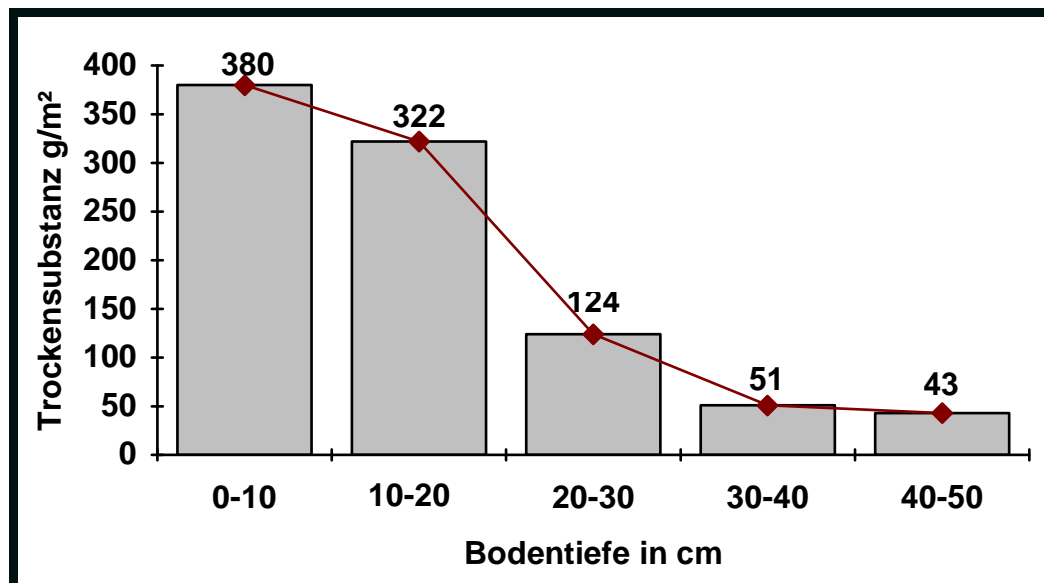


Abbildung 3: Verteilung der unterirdischen Schilfbiomasse in der Schilfkläranlage Bünde (Stahlquadermethode)

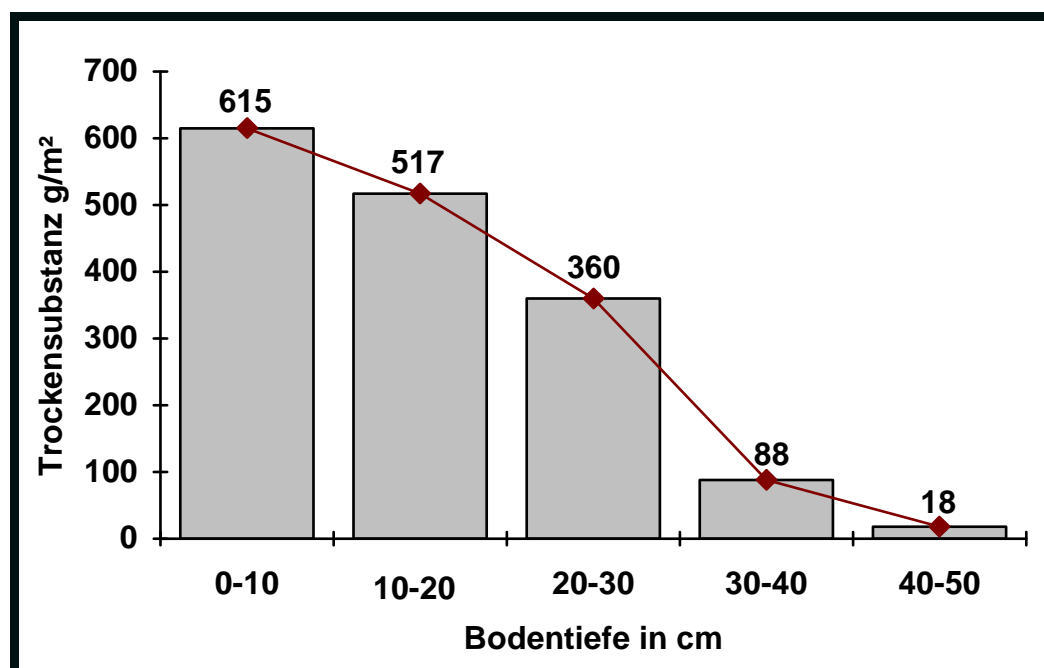


Abbildung 4: Verteilung der unterirdischen Schilfbiomasse in der Schilfkläranlage Hofgeismar (Stahlquadermethode)

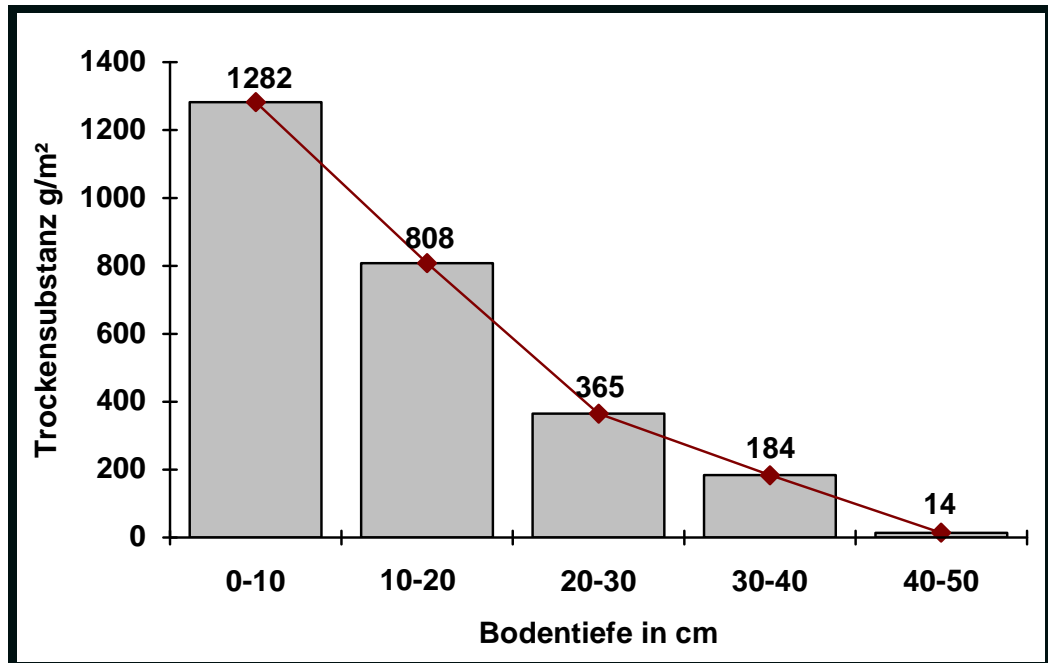


Abbildung 5: Verteilung der unterirdischen Schilfbiomasse in der Schilfkläranlage Melchiorgrund (Stahlquadermethode)

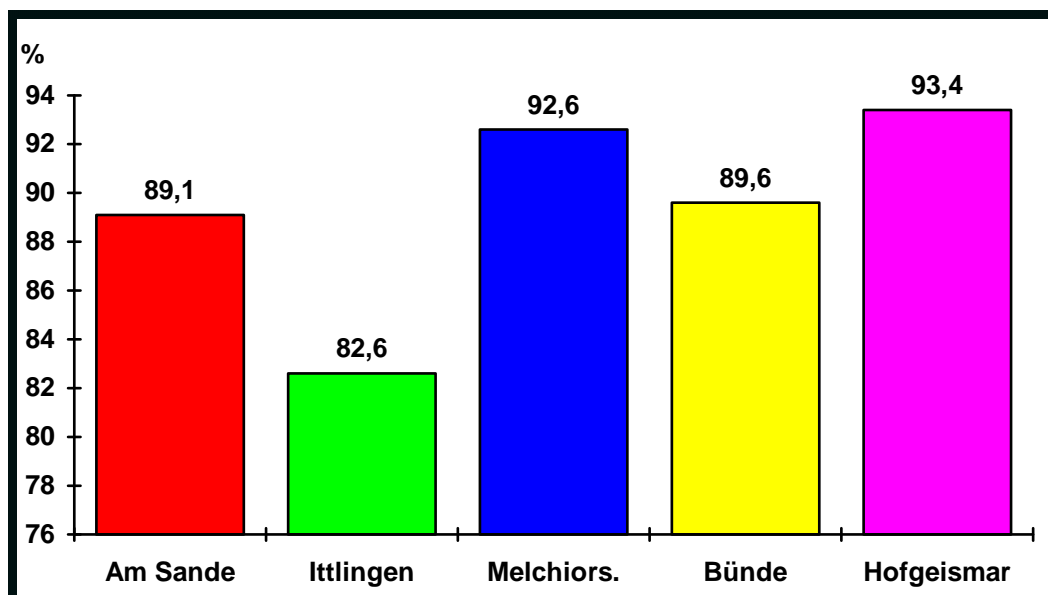


Abbildung 6: Prozentualer Anteil der Schilfbiomasse in der Bodenschicht 0 - 30 cm an der gesamten unterirdischen Schilfbiomasse bei verschiedenen Schilfkläranlagen

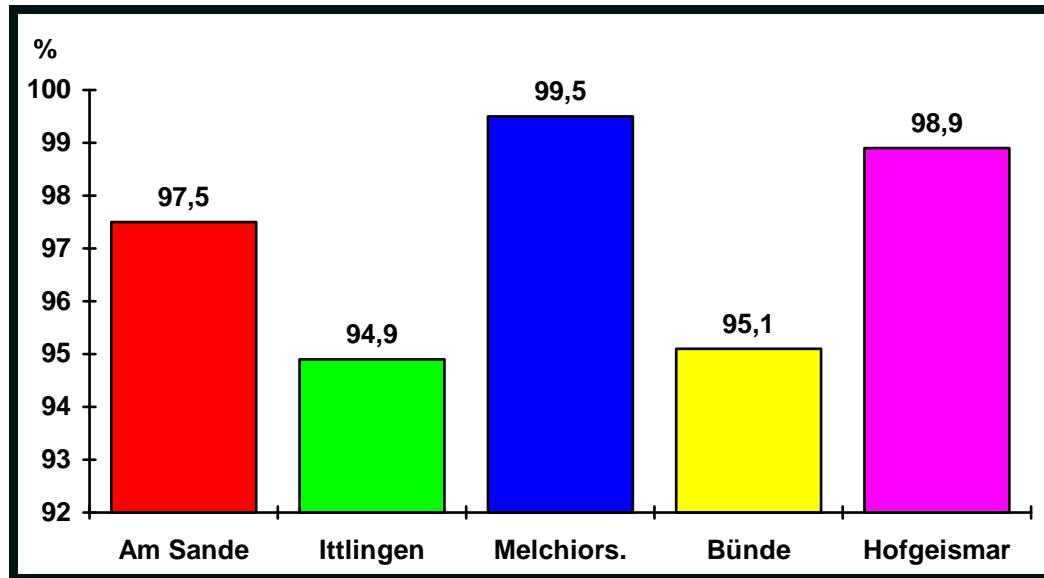


Abbildung 7: Prozentualer Anteil der Schilfbiomasse in der Bodenschicht 0 - 40 cm an der gesamten unterirdischen Schilfbiomasse bei verschiedenen Schilfkläranlagen

Die Probenahmen- und Analysenergebnisse für die Schilfkläranlagen Grünstadt und Hamburg müssen als nicht repräsentativ gewertet werden.

Beim eingefüllten Boden im Hamburg handelt es sich um ein Ton-Torf-Gemisch. Tatsächlich wurden in nahezu allen beprobten Schichten größere Mengen an Wurzelfilzen gefunden, die jedoch nicht torfig beschaffen waren, sondern nahezu völlig unzersetzt. Sie ließen sich nicht in Fraktionen trennen, die dem stehenden Schilfbestand oder früherer Vegetation zuzurechnen wären. Insofern ist aus diesen Ergebnissen für die hier betrachtete Frage kein Nutzen zu ziehen.

Die Anlage in Grünstadt unterscheidet sich sehr wesentlich vom Bautypus der übrigen Schilfkläranlagen, da sie mit einem sogenannten Unterflurschotterkörper ausgestattet ist. Die ausgeglichene Verteilung der Biomasse über das Profil bestätigt in der Tendenz die Vorstellung, daß eine homogenere Durchwurzelung durch periodische Nichtbeschickung der Anlage mit Abwasser erreichbar ist (Trockenphasen), wenn auch gleichzeitig konstruktiv sichergestellt wird, daß die Entwässerung des Bodens stattfindet (dränbar eingerichteter Unterflurschotterkörper), was unter Praxisbedingungen meist jedoch nicht realisierbar ist.

Nur am Rande sei erwähnt, daß die hier vorgestellten Ergebnisse auch einen deutlichen Bezug zur O₂-Abgabe in den Wurzelraum haben (und damit zum Beispiel auch auf das Nitrifikationspotential), die laut Untersuchungen der UNIVERSITÄT WIEN et al. (1988) nicht an der Rhizomoberfläche selbst, sondern an Wurzeln, Hüllblättern, Knospen und Verletzungen stattfindet, folglich nur in den oberen durchwurzelten Horizonten bedeutsam ist.



Abbildung 3: Freigespülter Wurzelraum am Ablauf des Klärteiches Ida (Othfresen) (0-40 cm) (Foto: M. Blumberg)

5 Biomassenuntersuchungen anderer Autoren

GRIES (1988) untersuchte die Schilfkläranlage Zarpen und weist auf die starke Streuung der unterirdischen Trockenmassen hin. Sie ermittelt durch Stechzylinder ($d = 30 \text{ cm}$, $h = 40 \text{ cm}$, Fläche = $0,07 \text{ m}^2$) bei monatlichen Probenahmen 1986 und 1987 während der Vegetationsperiode folgende Trockenmassen:

Rhizome:	509 +/- 240	(g/m ²)
Wurzeln:	65 +/- 28	(g/m ²)
Gesamt	574	(g/m ²)

BÖRNERT et al. (1990) dokumentierten die Entwicklung der Biomassen in der Schilfkläranlage Hofgeismar, die 1985 in Betrieb genommen wurde, für die vier folgenden Jahre.

Tabelle 3: Entwicklung des Schilfbestandes in der Wurzelraum-Modellkläranlage Hofgeismar - Beberbeck 1986 bis 1989 (verkürzt aus BÖRNERT et al. 1990)

Jahr	1986 n=4	1987 n=7	1988 n=10	1989 n=12
Oberirdische Biomasse [g/m ²]	1403 +/- 1046	2577 +/- 861 n=5	2044 +/- 651 n=8	2080 +/- 233 n=11
Unterirdische Biomasse [g/m ²]	481 +/- 346	882 +/- 285	1241 +/- 481	1520 +/- 405
Probenahme­fläche 25 cm x 25 cm				

UNIVERSITÄT WIEN et al. (1988) konstatieren, "daß die Rhizome nur im Zulaufbereich von Beet 1 bis in eine Tiefe von 45 cm wachsen, dagegen im Ablaufbereich von Feld 3 nur bis in 15 cm Tiefe."

Die nachfolgend dokumentierten Biomasse-Beprobungen an der Pflanzenkläranlage Mannersdorf (Probenahme­fläche jeweils 30 cm x 30 cm) wurden daher im Zu- und Ablaufbereich der drei Felder in die Tiefenbereiche 0-15 cm und 15-30 cm eingeteilt.

Tabelle 4: Unterirdische Biomasse in 0-30 cm Tiefe (Mittelwerte) der Pflanzenkläranlage Mannersdorf (zusammengestellt aus UNIVERSITÄT WIEN et al. 1988)

Horizont [cm]	Trockengewicht [g/m ²]	Probenanzahl [n]
0 - 15	1148	18
15 - 30	722	15

REED und BRAUN (1992) weisen darauf hin, daß die Durchwurzelung laut EPA-Studien auf etwa 30 cm beschränkt ist, unabhängig von der eingesetzten Pflanzenart in den USA-Anlagen.

Die besten Nitrifikationsergebnisse wurden in flachen Anlagen erzielt, in denen das Abwasser den durch die Helophyten importierten Sauerstoff aufnehmen konnte bei, gleichzeitig ausreichender Aufenthaltszeit.

6 Diskussion und Schlußfolgerungen zu den Untersuchungen der unterirdischen Biomasse an verschiedenen Schilfkläranlagen

Es bleibt teilweise unklar, welche Ursachen letztlich zu der hohen Streuung der gemessenen Werte führen.

Eindeutig übt die Abwasserlastsituation z.B. (hohe Unterschiede im Zu- und Ablaufbereich an der Pflanzenkläranlage Mannersdorf) einen wesentlichen Einfluß aus.

Das relative Alter eines Phragmites-Bestandes, von der Pflanzung her gesehen, ist eine weitere sichere Variationsursache, die jedoch schwer zu quantifizieren ist, da keine verlässlichen Angaben über den Zeitraum bis zum Erreichen eines "steady-state" oder Klimax-Zustandes vorliegen. Auch die aus der allgemeinen Ökologie entnommene Annahme eines solchen vergleichsweise konstanten Gleichgewichts zwischen Aufbau- und Abbauprozessen ist eine Modellvorstellung, die mit der Realität nicht übereinstimmen muß.

Für die hier vorgestellte Stahlquadermethode (Probenahmenvolumen 0,25 m³) bleibt offen, ob die Probenahmeorte repräsentativ für den Gesamtstandort sind. Zwischen den Werten von BÖRNERT et al. (1990) und der eigenen Beprobung an der Schilfkläranlage Hofgeismar bestehen praktisch keine Unterschiede. Da aus arbeitstechnischen Gründen keine oder nur wenige Wiederholungen vorgenommen wurden, sind Signifikanzuntersuchungen nicht durchführbar.

Einflüsse des standortspezifischen Bodensubstrats und Klimas, der methodisch unterschiedlichen Probenahme und Analyse des Rhizom-Wurzel-Erdgemischs und der variierenden Ökotypen der Pflanzenart *Phragmites* können ebenfalls nicht weiter differenziert werden.

Auch die Art der Pflanzmethode und der Beikrautunterdrückung in den ersten Betriebsjahren übt einen entscheidenden Einfluß auf die Schnelligkeit der Besiedlung eines neuen Areals durch Schilfpflanzen aus.

Nach den gängigen Vorstellungen erreicht die Trockenmasse eines Phragmitetums im Juli, August einen Höchstwert (UNIVERSITÄT WIEN et al. 1988). Variationsursachen, die sich aus dem Zeitpunkt der Probenahme ergeben, müssen daher ebenfalls als beträchtliche "Störgröße" angesehen werden. Die vorliegenden unterirdischen Biomassedaten sind daher insgesamt nur beschränkt aussagefähig, liefern jedoch deutliche Indizien zur Abschätzung der Durchwurzelungsintensität eines sich entwickelnden künstlichen Schilfbestandes unter Abwasserbelastung bzw. unter Bedingungen des Nährstoffluxuskonsums.

Aus den dargestellten Versuchsergebnissen lassen sich in Übereinstimmung mit vergleichbaren Forschungsergebnissen anderer Autoren folgende Schlüsse ziehen:

1. Mindestens 95% der unterirdischen Biomasse befindet sich im Bodenprofilabschnitt 0-40 cm. Die unterirdische Schilfbiomasse sinkt mit zunehmender Wurzelraumtiefe steil ab.
2. Ob der aus Labor- und kleintechnischen Versuchen hergeleitete Effekt der phytogenen Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit (KICKUTH 1984) auch in größere Tiefen (z.B. 60 cm) einer Schilfkläranlage unter Praxisbedingungen hinabreicht, ist bis heute nicht belegt und muß aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit als sehr unwahrscheinlich klassifiziert werden. Auch makroskopische Beobachtungen bei den vorgenommenen Aufgrabungen hinterlassen für die unteren Bodenhorizonte (30-60 cm) den Eindruck fast völliger Wasserundurchlässigkeit.
3. Auch im Klimax-Zustand des artifiziiell eingerichteten Phragmitetums ist eine starke vertikale Stratifizierung des Leitfähigkeitsprofils, hervorgerufen durch phytogene Einflüsse, zu unterstellen. Dieses Muster wird gleichsinnig durch die mit der Bodentiefe steigende Lagerungsdichte noch verstärkt.

Eine mittlere horizontale Leitfähigkeit k_h wird jedoch durch die Schicht mit der größten Durchlässigkeit bestimmt (LANGGUTH u. VOIGT 1980):

$$k_h = \frac{k_1 \times m_1 + k_2 \times m_2 + \dots + k_n \times m_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}$$

$$k_h = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n k_i m_i$$

wobei m_i = Mächtigkeit der i-ten Einzelschichten,
 $m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n$ ist.

Die Annahme einer eindimensionalen horizontalen Strömung (vereinfacht) ist deshalb so oft berechtigt wie HARTGE (1978) in Bezug auf den Schichtenaufbau von Böden schreibt, da bereits "eine Veränderung der Leitfähigkeit um das 10-20fache praktisch einer Nichtbeteiligung der weniger durchlässigen Schicht am Wassertransport gleichkommt."

Die Strömungslinien müssen dann so abbiegen, daß ein größerer Fließquerschnitt entsteht.

Wie gezeigt konzentriert sich die durch Wurzel- und Rhizombahnen induzierte Sekundärporung auf die Horizontschicht 0-30 cm bzw. 0-40 cm. In tieferen Schichten kommen nur noch wenige große Rhizome und vertikal streichende Grobwurzeln vor.

Obwohl mit steigendem Querschnitt die Abflußleistung in der 4ten Potenz zunimmt ($q = d^4$), fehlt diesen vereinzelt liegenden wasserwegigen Rhizom- und Wurzelröhren der Anschluß an andere Grobporen oder anders ausgedrückt: Die für ein "leistungsfähiges" Abflußgeschehen im dreidimensionalen Porengeflecht notwendige Vernetzung oder Kontinuität der Poren nimmt mit der Bodentiefe drastisch ab, ebenso wie andererseits die Lagerungsdichte zunimmt.

Für den Tiefenbereich 30-60 cm (oder zumindest 40-60 cm) einer Schilfkläranlage ist daher entsprechend den oben zitierten Literaturangaben für gesättigte Wasserleitfähigkeiten, bei den üblicherweise eingebauten Bodenarten Schluff und Lehm, mit weitestgehend nur körnungsbedingten kf-Werten in den Größenordnungen 10^{-6} bis 10^{-8} m/s zu rechnen.

Da aber andererseits bei mehrjährig schilfdurchwurzelten Anlagen mittlere kf-Werte zwischen 2×10^{-5} und 5×10^{-4} m/s über den gesamten Fließquerschnitt (Breite x 0,6 m Tiefe) ermittelt wurden, müssen die oberen Horizonte (0-10 cm und 10-20 cm vor allem) deutlich durchlässiger sein gegenüber den gemessenen mittleren Leitfähigkeiten über das gesamte Profil, wie auch KREUTZMANN et al. (1991) gefunden haben.

4. Mit abnehmendem kf-Wert steigt der erforderliche Transportquerschnitt als Schilfbeetbreite (bei konstanter Schilfkläranlagentiefe) so stark an, daß die Abwasser-Querverteilungsprobleme immer unbeherrschbarer werden und ferner die Gefahr hydraulischer Kurzschlüsse steil zunimmt, da die Lauflänge entsprechend kürzer wird (bei konstantem Verweilvolumen), worauf auch WATSON u. HOBSON (1989) hinweisen.

Der Vorteil, daß breite kurze Anlagen besser über die Ablaufsteuerung mittels des höhenvariablen Ablaufrohres einstellbar sind, muß in Anbetracht des tatsächlich vorgefundenen Verständnisses bei Klärwerkspersonal und Betreibern als praktisch nicht realisierbar vernachlässigt werden.

Literaturverzeichnis:

BLUMBERG, M., H. KÜPPERS und G. HÜBNER, 1991: Biometrische und bodenphysikalische Untersuchungen an Wurzelraumkläranlagen. - Witzenhausen, unveröffentlicht.

BÖRNERT, W., U. HAGENDORF u. A. MORELL, 1990: Wissenschaftliche Begleituntersuchungen an der Pflanzenkläranlage Hofgeismar-Beberbeck. - Schriftenreihe WAR (Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung), 48, TH Darmstadt, S. 69-89.

GRIES, C., 1988: Wachstum, Stoffaufnahme und Sauerstoffeintrag in die Rhizosphäre von *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel in einer biologischen Kläranlage. - Dissertation, Universität Kiel.

HARTGE, K.H.: 1978: Einführung in die Bodenphysik. - 1. Aufl. Enke Verlag, Stuttgart.

KICKUTH, R., 1983: Einige Dimensionierungsgrundsätze für das Wurzelraumverfahren. - In: SEKOULOV, I. u. P. WILDERER (Hrsg.): Abwasserreinigung mit Hilfe von Wasserpflanzen. - Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, 1. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium, Ratzeburg 25.05.1982, Eigenverlag, Hamburg, S. 29-38.

KICKUTH, R., 1984: Das Wurzelraumverfahren in der Praxis. - Landschaft + Stadt, 16, H.3, S. 145-153.

KICKUTH, R. u. H.-J. GROMMELT, 1983: Wurzelnahe Reaktionszonen in hydromorphen Böden. - In: Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung. - Int. Symp. Österr. Bundesanstalt, Gumpenstein, S. 681-688.

KRETZSCHMAR, R., 1988: Abschlußbericht zur Wurzelraum-Entsorgungsanlage Zarpen. - Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie der Universität Kiel.

KREUTZMANN, A., G. AXT u. R. KICKUTH, 1991: Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilung in der hydromorphen, horizontal mit Abwasser durchströmten Bodenmatrix. - DFG - Abschlußbericht Ax 6/1, Berlin und Witzenhausen; unveröffentlicht.

LANGGUTH, H.-R. u. R. VOIGT, 1980: Hydrogeologische Methoden. - Springer Verlag, Berlin u.a.

LOLL, U., 1990: Leistungsvergleich zwischen Teich- und Wurzelraumentorgungsanlagen am Beispiel der Pilotanlage Modautal-Brandau. - Schriftenreihe WAR, 48, Institut für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung, TH Darmstadt, S. 91-102.

REED, S.C. u. D.S. BROWN, 1992: Performance of Gravel Bed Wetlands in the United States, in: Wetland Systems in Water Pollution Control, Proceedings of the International Specialist Conference, University of New South Wales, Sydney, Australia.

UMWELTBEHÖRDE MILJÖSTYRELSEN UND BOTANISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT AARHUS, 1990: Spildevandsrensning i rodzoneanlæg (Schmutzwasserreinigung in Wurzelraumanlagen). - Miljöprojekt nr. XX 1990 (Umweltprojekt Nr. XX 1990), aus dem Dänischen von G. RUDLOFF übersetzte Zusammenfassung, Interessengemeinschaft Umweltschutz für Schleswig und Umgebung; unveröffentlicht.

UNIVERSITÄT WIEN u. AMT DER NÖ LANDESREGIERUNG, 1988: Pflanzenkläranlage Mannersdorf/L. - Jahresbericht 1987. - Sept. 1988, Wien.

WATSON, J.T. u. J.A. Hobson, 1989: Hydraulic Design Considerations and Control Structures for Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. - In: HAMMER, D.A. (Hrsg.): Constructed Wetlands for Wastewater Treatment - Municipal, Industrial and Agricultural. - Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan, S. 379-392.

Michael Blumberg
Ingenieurbüro Blumberg
Gänsemarkt 10
37120 Bovenden, Germany

