

Das Wurzelraumverfahren

Eine kostengünstige Alternative zur technischen Abwasserbehandlung

von Dr.-Ing. Norbert Könemann

1. Einleitung

Der Schutz unseres Lebensraums für heute und die zukünftigen Generationen erfordert u.a. die Reinhaltung der Gewässer. Dies bedeutet, daß alles anfallende Abwasser aus Haushalten, Gewerbe- und Industriebetrieben sowie diffusen Quellen (z. B. Hausmüll- und Industrieabfalldeponien) gereinigt werden muß, bevor es in den natürlichen Wasserkreislauf zurückgegeben wird. Zielsetzung der Abwasserbehandlung ist dabei, alle umweltrelevanten Schadstoffe aus dem Abwasser zu entfernen und schadlos zu verwerten oder zu beseitigen. Dabei müssen neben den biologisch leicht abbaubaren Stoffen auch Stickstoff- und Phosphorverbindungen sowie schwer abbaubare und toxische Stoffe aus dem Abwasser entfernt werden.

Mit hohem technischen Aufwand kann diese Zielvorgabe erreicht werden. Dies ist jedoch mit einem erheblichen finanziellem Aufwand verbunden. Neben hohen Investitionskosten schlagen insbesondere die Betriebskosten zu Buche.

Als Alternative zu den technischen Anlagen bietet sich das Wurzelraumverfahren an, mit dem die Ziele des Gewässerschutzes effektiv und kostengünstig erreicht werden können.

2. Das Wurzelraumverfahren

2.1 Allgemeines

Das Wurzelraumverfahren ist eine Methode, die sich auf dem Zusammenwirken von Boden und Pflanze begründet. In den 60er Jahren wurden von Frau Dr. Käthe SEIDEL Pflanzenkläranlagen untersucht, in denen der Abbau organischer Inhaltsstoffe durch Pflanzen erfolgen sollte. Die Pflanzen sind jedoch nicht in der Lage, die gewünschte Reinigungsleistung zu erbringen.

Erst Prof. Dr. Reinhold KICKUTH erkannte das Zusammenwirken zwischen den Wurzeln, den Pflanzen und den dort angesiedelten Mikroorganismen des Bodens. Dabei zeigte sich, daß in dem Ökosystem des bepflanzt und überfluteten Bodenkörpers Mik-

roorganismen die biologisch abbaubaren Abwasserinhaltsstoffe entfernen und sich die Schwermetalle im Boden und teilweise in den Wurzeln der Pflanzen ablagern.

Die beanspruchte Fläche ist eine Funktion der hydraulischen Belastung und der gewünschten Reinigungsleistung; sie kann entsprechend berechnet werden. Der Boden muß bestimmte Kriterien erfüllen, damit eine langfristige Durchlässigkeit gewährleistet bleibt, die ausgewählten Pflanzen wachsen können und Schwermetalle abgelagert werden.

Die Laufzeit von Wurzelraumanlagen beträgt zwischen 30 bis 50 Jahren.

In der folgenden Abbildung ist das Prinzip der Wurzelraumanlage dargestellt:

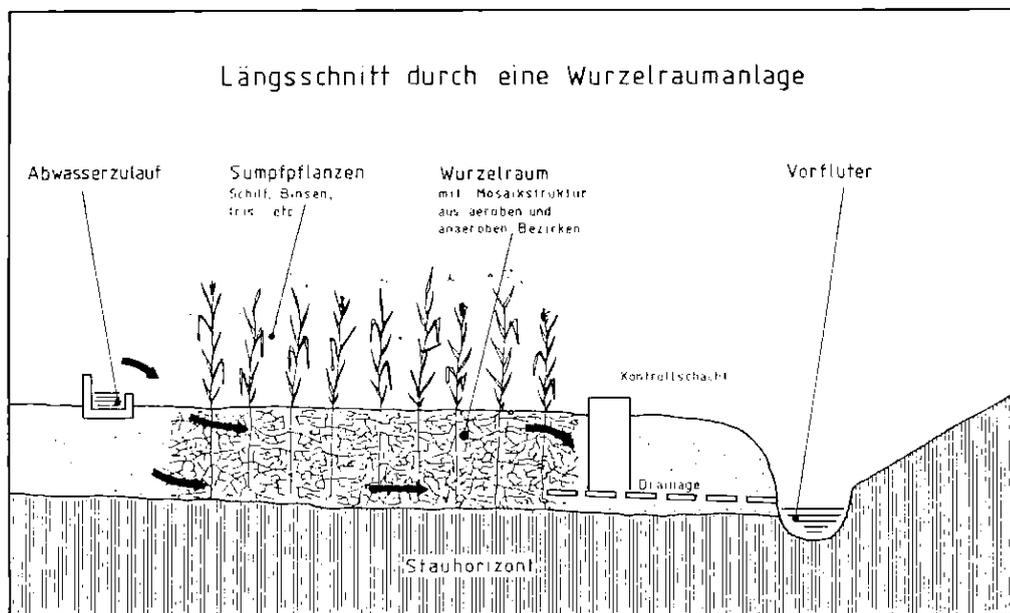


Abbildung 1 : Funktionsschema einer Wurzelraumanlage

2.2 Pflanzen und Boden

Für die Abwasserreinigung ist das Zusammenspiel zwischen Pflanzen, Boden und Mikroorganismen maßgebend. Es handelt sich um ein vielschichtig miteinander verbundenes Ökosystem.

Röhrichtpflanzen können in einem wassergesättigten Boden leben. Sie nehmen den Luftsauerstoff nicht wie terrestrische Pflanzen über Bodenkapillaren in die Wurzeln auf,

sondern sie verfügen über ein luftführendes Gewebe (Aerenchym), das den Luftsauerstoff im Innern der Pflanze bis zu den Wurzeln transportiert. Dieser Vorgang funktioniert auch während der Vegetationsruhephase. So bleiben die Wurzeln und damit der gesamte Röhrichtbestand auch im Winter erhalten. Der Sauerstoff wird über die Wurzeln in die unmittelbare Umgebung abgegeben und steht hier den Mikroorganismen für chemische Abbauprozesse zur Verfügung.

In der folgenden Abbildung sind verschiedene Röhrichtpflanzen abgebildet:

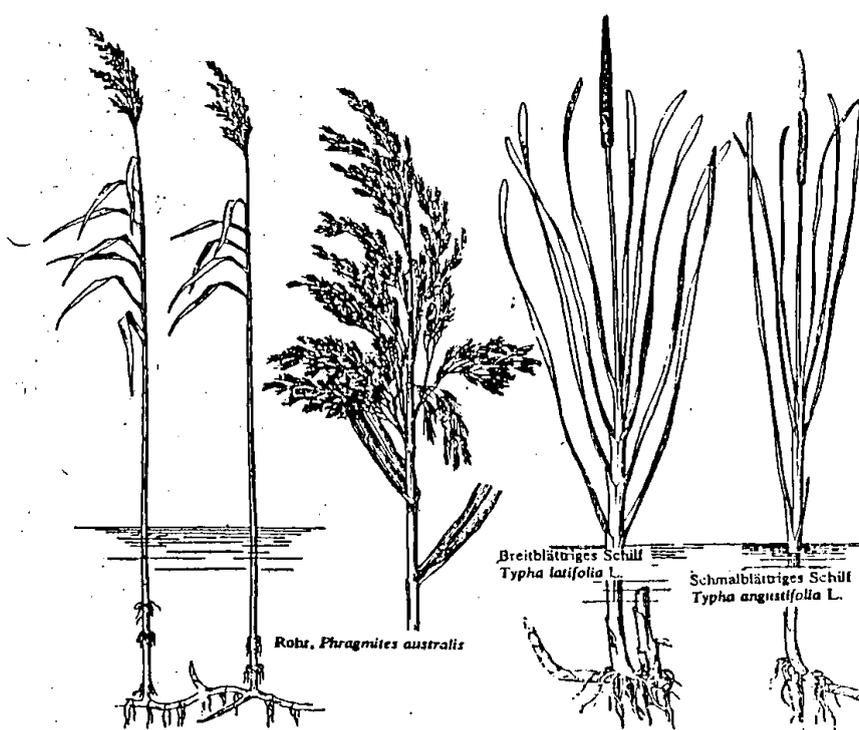


Abbildung 2 : Röhrichtpflanzen

In dem überwiegend anaeroben Bodenkörper ergeben sich durch Sauerstoffanreicherung in unmittelbarer Nachbarschaft der Wurzeln aerobe Bereiche. Es entsteht eine Struktur von anaeroben und aeroben Bezirken, in denen der Abbau der Abwasserinhaltsstoffe durch die Mikroorganismen des Bodens erfolgt. Die Anzahl der Bodenbakterien ist vergleichbar mit denen von technischen Belebungsanlagen. Sie beträgt ca. 10 bis 100 Millionen pro Gramm Boden. Allerdings ist die Artenvielfalt um den Faktor 10 bis 100 größer als bei technischen Anlagen.

Neben der Sauerstoffversorgung kommt der Röhrichtpflanze noch eine andere Aufgabe zu. Durch das intensive Wachstum der Wurzeln - sie ist ca. 3 mal größer als der oberirdische Pflanzenwuchs - wird die Durchlässigkeit des Bodens erhöht und auf Dauer gewährleistet. Dadurch kann das Abwasser den Boden passieren und wird dabei gereinigt.

Selbst in der kalten Jahreszeit bleibt dieser Reinigungsprozeß aufrechterhalten. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine ausreichende Nährstoffversorgung der Bodenbakterien, damit die Prozeßwärme das Zufrieren des Bodenkörpers verhindert. Darüber hinaus bildet die abgestorbene Blattmasse im Lauf der Zeit eine „Isolierschicht“, die den durchströmten Boden gegen Kälte schützt.

3. Auslegung der Wurzelraumanlage

Die Größe einer Wurzelraumanlage wird durch die hydraulische Belastung und das gewünschte Reinigungsziel bestimmt.

3.1 Hydraulik von Wurzelraumanlagen

Das Strömungsverhalten in dem Bodenkörper der Anlage wird näherungsweise durch das Filtergesetz nach DARCY beschrieben. Danach ist bei einer laminaren Strömung die Fließgeschwindigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens und dem vorhandenen Druckgefälle wie folgt abhängig:

$$v_f = k_f \cdot j \text{ (m/s)}$$

In dieser Gleichung bedeuten :

$$\begin{aligned} v_f &= \text{mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)} \\ k_f &= \text{horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)} \\ j &= \text{Druckliniengefälle} \end{aligned}$$

Bezogen auf den durchströmten Querschnitt, ergibt sich für die transportierte Wassermenge folgende Beziehung :

$$Q = A \cdot v_f = h \cdot b \cdot k_f \cdot j \text{ (cbm/s)}$$

In dieser Gleichung bedeuten :

$$Q = \text{Durchfluß (cbm/s)}$$

- A = durchströmter Querschnitt (qm)
- h = Fließtiefe (m)
- b = Breite der Anlage (m)

Die Fließtiefe und somit die Wirtiefe der Pflanzen liegt zwischen 0,5 m und 1,0 m.

Das Druckgefälle ergibt sich aus dem Sohlgefälle der Anlage sowie der Wasserspiegeldifferenz zwischen Einlauf und Auslauf.

Die Durchlässigkeit des Bodens wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert k_f (m/s) gekennzeichnet. Bei einem mit Röhrichtpflanzen besetzten Bodenkörper kommt es zu einer Anisotropie der Durchlässigkeit. Maßgebend ist hier der horizontale Wert, da Wurzelraumkläranlagen in der Regel horizontal durchströmt werden.

In Sonderfällen muß eine vertikale Durchströmung gewählt werden, wobei auch eine alternierende Beschickung angewendet werden kann. Die Mächtigkeit des durchströmten Substrats kann dann bis 1,5 m betragen.

Die Besonderheit des Wurzelraumverfahrens liegt darin, daß ein Bodensubstrat gewählt werden muß, das bindige Anteile enthält und trotzdem langfristig die notwendige Durchlässigkeit gewährleistet. Die Wurzeln der Röhrichtpflanzen entwickeln sich vom Wurzelsproß horizontal aus und dringen in den anstehend Boden ein. Hierdurch wird das Bodengefüge aufgelockert. Da die Wurzeln innen hohl sind, entstehen nach ihrem Absterben kleine Kanäle, die für den Wassertransport zur Verfügung stehen. Durch die überwiegend horizontal verlaufenden Wurzeln bildet sich eine Anisotropie der Durchlässigkeit aus.

In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung der Durchlässigkeit in bepflanzten hydromorphen Böden dargestellt, die von KICKUTH untersucht wurde :

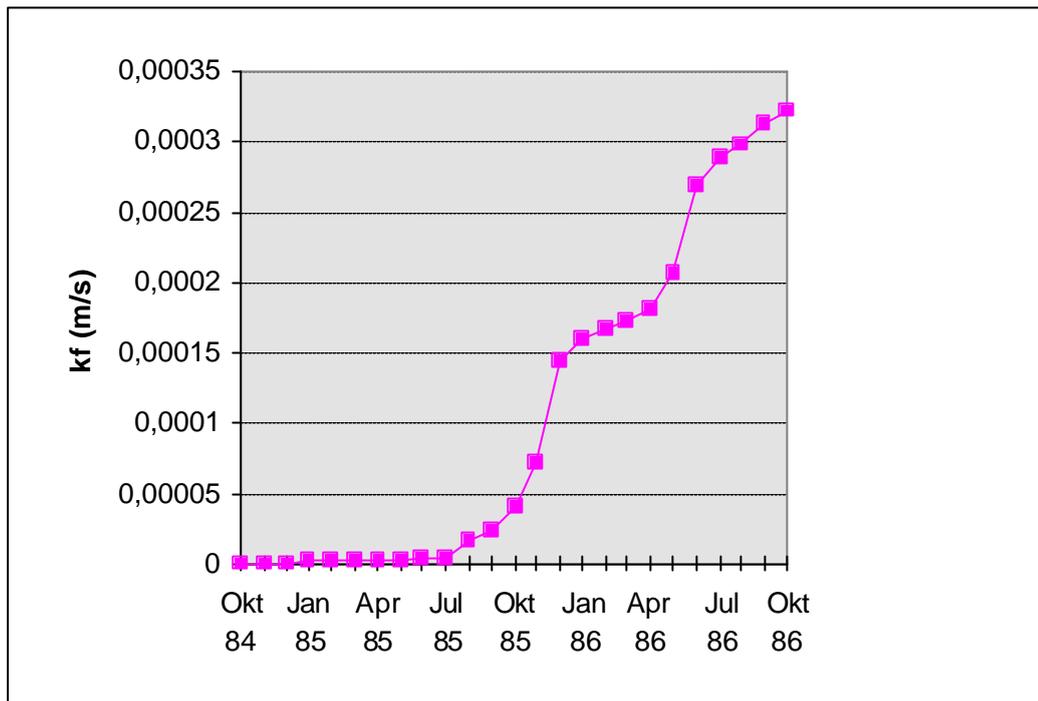


Abbildung 3 : Entwicklung der Durchlässigkeit in hydromorphen Böden

Der Ausgangsboden hatte eine Durchlässigkeit von $k_f = 5,1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Bereits nach 10 Monaten war die Durchlässigkeit um eine Zehnerpotenz gestiegen. Nach drei weiteren Monaten war sie nochmals um eine Zehnerpotenz erhöht. Am Ende des Versuchs betrug die Durchlässigkeit $k_f = 3 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Dieses Phänomen erinnert an die rohrlose Drainage (Maulwurfdrainage), bei der ein konischer Körper in einer Tiefe von ca. 60 cm durch den bindigen Boden gezogen wird. Dieses Verfahren wird mit Erfolg im landwirtschaftlichen Wasserbau für die Entwässerung von bindigen Böden eingesetzt. Umfangreiche Erfahrungen hat man hiermit u.a. im Flußgebiet der Donau gewonnen.

3.2 Reinigungsleistung von Wurzelraumkläranlagen

Die Breite der Wurzelraumanlage ist abhängig von der hydraulischen Belastung. Die Länge der Anlage und damit die Fläche wird von der notwendigen Reinigungsleistung bestimmt.

Die biochemischen Reaktionen im Bodenkörper lassen sich durch eine Funktion 1. Ordnung wie folgt beschreiben :

$$c_t = c_o \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (\text{mg/l})$$

In dieser Gleichung bedeuten :

c_t	=	Schmutzfrachtkonzentration im Auslauf (mg/l)
c_o	=	Schmutzfrachtkonzentration im Einlauf (mg/l)
\exp	=	Exponentialfunktion
k	=	Reaktionskonstante (1/h)
t	=	Aufenthaltszeit (h)

Die Schmutzfrachtkonzentration im Zulauf ist von den örtlichen Gegebenheiten abhängig, dies sind im wesentlichen die Abwasserart und -zusammensetzung.

Die Schmutzfrachtkonzentration im Ablauf der Anlage wird durch die Anforderungen an den Gewässerschutz bestimmt.

In der folgenden Tabelle sind die Mindestanforderungen für die Ablaufkonzentrationen aus kommunalen Kläranlagen in der Europäischen Gemeinschaft EU angegeben. Dabei wird für empfindliche Gebiete ein höherer Standard gefordert.

Parameter	Normalstandard	Höchststandard
BSB5	25 mg/l	25 mg/l
CSB	125 mg/l	125 mg/l
Nges	keine	15 mg/l ab 10.000 bis 100.000 EW
		10 mg/l ab 100.000 EW
Pges	keine	2 mg/l ab 10.000 bis 100.000 EW
		1 mg/l ab 100.000 EW

Die Reaktionskonstante ist abhängig von der Temperatur und von den jeweiligen Inhaltsstoffen des Abwassers, die abgebaut werden müssen. Aufgrund von langjährigen Erfahrungen sind die Konstanten für viele Abwasserarten bekannt. Für problematische Abwässer der Industrie oder für Deponiesickerwässer sind sie durch Versuchsanlagen festzustellen.

Die Aufenthaltszeit ist eine Funktion der Wassermenge und des modularen Volumens der gesamten Wurzelraumanlage. Das modulare Volumen ist wiederum der Teil des Gesamtvolumens, der für den Wassertransport zur Verfügung steht, er liegt in einer Größenordnung von ca. 25 % bis 30 %.

4. Beispiele von Wurzelraumkläranlagen

Für die Behandlung von häuslichem Abwasser sowie von hochbelastetem Abwasser (Industrie, Deponiesickerwasser, Landwirtschaft) wurde eine Vielzahl von Wurzelraumanlagen errichtet. Die dabei gewonnenen Erfahrungen erlauben heute ihren gezielten Einsatz für spezielle Aufgabenstellungen. Damit ist es möglich, mit geringen Investitions- und Betriebskosten den Zielen des Umweltschutzes gerecht zu werden.

4.1 Häusliches Abwasser

Abwasser aus Haushalten wird in einer Vielzahl von Wurzelraumanlagen behandelt. Der spezifische Flächenbedarf liegt je nach dem Abwasseranfall und dem erforderlichen Reinigungsziel zwischen 2 und 5 qm pro Einwohner. So kann z. B. auf der Fläche eines Fußballplatzes (7500 qm) das Abwasser von ca. 1000 bis 4000 angeschlossenen Einwohnern behandelt werden. Wurzelraumanlagen werden für Einzelhäuser mit 4 Personen aber auch für Gemeinden und Städte mit bis zu 20.000 Einwohnern gebaut.

In den folgenden 3 Tabellen sind die Leistungsdaten verschiedener Anlagen zusammengestellt.

Standort:	Hungary		
Baujahr :	1995		
Meßdaten :	1996		
	Einlauf	Auslauf	Abbaurrate %
Ammoniumstickstoff (mg/l)	147,00	7,85	94,66
Nitrat (mg/l)	226,40	16,40	92,76
Phosphat (mg/l)	1,08	0,04	96,30

Tabelle 1 : Wurzelraumanlage für häusliches Abwasser mit Zusatz von Schweinegülle

Standort:	Canada		
Baujahr :	1996		
Meßdaten :	1996		
	Einlauf	Auslauf	Abbaurrate %
BSB5 (mg/l) Win- ter	104,55	36,00	65,57
BSB5 (mg/l) Win- ter	114,29	43,00	62,38
BSB5 (mg/l) Win- ter	119,23	63,00	47,16
BSB5 (mg/l) Win- ter	115,15	28,00	75,68
BSB5 (mg/l) Win- ter	113,64	58,00	48,96
BSB5 (mg/l) Win- ter	103,85	43,00	58,59
BSB5 (mg/l) Sommer	263,89	29,00	89,01
BSB5 (mg/l) Sommer	150,00	21,00	86,00
BSB5 (mg/l) Sommer	146,67	10,00	93,18
BSB5 (mg/l) Sommer	144,44	10,00	93,08
BSB5 (mg/l) Sommer	190,91	9,00	95,29
BSB5 (mg/l) Sommer	152,63	10,00	93,45

Tabelle 2 : Wurzelraumanlage für häusliches Abwasser

Man erkennt, daß die Anlage bereits im Winter nach der Herstellung eine beachtliche Abbauleistung zeigt. Im Sommer liegt die BSB-Elimination bei über 90 %.

Standort:	Swisse		
Baujahr :	1989		
Meßdaten :	1992		
	Einlauf	Auslauf	Abbaurrate %
BSB5 (mg/l)	306,60	6,89	97,75
BSB5 (mg/l)	287,40	8,10	97,18
BSB5 (mg/l)	311,00	9,00	97,11
CSB (mg/l)	411,00	42,70	89,61
CSB (mg/l)	396,70	48,00	87,90
CSB (mg/l)	607,00	46,10	92,41
NH4-N (mg/l)	61,10	10,10	83,47
NH4-N (mg/l)	60,00	19,50	67,50
NH4-N (mg/l)	64,00	16,05	74,92
Pges (mg/l)	11,90	1,10	90,76
Pges (mg/l)	13,80	0,85	93,84
Pges (mg/l)	18,80	1,12	94,04

Tabelle 3 : Wurzelraumanlage für häusliches Abwasser

4.2 Industrielles Abwasser

Industrielles Abwasser läßt sich aufgrund der Vielfalt an Bodenorganismen in Wurzelraumanlagen behandeln. Selbst problematische Abwässer, die z.B. Schwefel oder Arsen enthalten, werden gereinigt.

In der folgenden Abbildung sind die Leistungsdaten einer ca. 18 ha (180.000 qm) großen Wurzelraumanlage zusammengestellt, mit der industrielles Abwasser eines Stahlwerkes in England behandelt wird :

Abbildung 4 : Wurzelraumkläranlage für NH₄-N-befruchtetes Abwasser eines Stahlwerkes.

In der folgenden Abbildung sind die Leistungsdaten einer Wurzelraumanlage zusammengestellt, mit der industrielles Abwasser eines Textilveredelbetriebes behandelt wird :

Abbildung 5 : Wurzelraumkläranlage für schwefelhaltiges Abwasser eines Textilveredelbetriebes

In der folgenden Tabelle sind die Verhältnisse in einer Wurzelraumanlage dargestellt, mit der metallbefrachtete Abwässer gereingt werden :

Standort:	France		
Baujahr :	Aug 91		
Meßdaten :	Dez 91		
	Einlauf	Auslauf	Abbaurrate %
CSB (mg/l)	2560	265	89,65
BSB5 (mg/l)	525	35	93,33
Crom Cr (mg/l)	4,43	0	100,00
Kupfer Cu (mg/l)	0,13	0	100,00
Aluminium Al (mg/l)	4,81	0	100,00
Eisen Fe (mg/l)	37,02	2,72	92,65
Blei Pb (mg/l)	0,48	0	100,00
Zink Zn (mg/l)	2,88	0	100,00

Tabelle 4 : Wurzelraumanlage für metallhaltige Abwässer

4.3 Deponiesickerwasser

Besonders problematisch sind Sickerwässer aus Deponien, in denen neben häuslichem Abfall auch gefährliche Stoffe der Industrie abgelagert wurden. Als Beispiel sei eine ca. 2500 qm große Wurzelraumanlage genannt, die seit 1984 in Betrieb ist und in der hochtoxisches Sickerwasser aus einer stillgelegten Deponie gereinigt wird. Als Hauptproblemstoffe wurden verschiedenste Chlorkohlenwasserstoffe (lineare und aromatische halogenierte Kohlenwasserstoffe, u. a. PCP, PCB, Dioxine) sowie bestimmte aromatische Kohlenwasserstoffe (Benzol, Ethylbenzol, Naphthalin) im Sickerwasser gemessen. Darüber hinaus wurden hohe Arsenkonzentrationen festgestellt. Die Analyse des Ablaufs aus der Wurzelraumanlage zeigt, daß sämtliche Problemstoffe abgebaut werden. In der folgenden Tabelle sind die entsprechenden Stoffe aufgelistet :

Standort :	Germany			
Baujahr :	1984			
Deponiesickerwasser 2500 qm				
		Zulauf	Ablauf	Abbaurrate %
Summe Chlorphenole (PPB)	1986	15,20	0,50	96,71
	1989	24,23	1,40	94,21
Naphtalin (PPB)	1986	42,60	0,26	99,39
HCH Summe (PPB)	1990	6,61	0,93	85,87
Lindan (PPB)	1990	0,063	0,010	84,13
Summe Chlorbenzene (PPB)	1989	98,78	0,00	100,00
Summe Chlorbenzole (PPB)	1990	142,00	0,05	99,97
Chlorbenzol (PPB)	1990	130,00	0,00	100,00
Summe Dichlorbenzole (PPB)	1990	13,50	0,05	99,67
Summe Tetrachlorbenzole (PPB)	1990	0,031	0,00	100,00

Tabelle 5 : Wurzelraumanlage zur Reinigung von Deponiesickerwässer

4.4 Landwirtschaftliches Abwasser

In der intensiven Viehwirtschaft fallen tierische Exkremete an, die wegen ihrer großen Stickstoff- und Phosphorfrachten nicht mehr landwirtschaftlich verwertet werden können. Hier bietet sich die Vorbehandlung in einer Wurzelraumkläranlage an. In

den folgenden Darstellungen sind die Abbauleistung in einer entsprechenden Anlage in Fließrichtung dargestellt.

Abbildung 6 : Abbau von Gesamt-Phosphat in Fließrichtung in einer Wurzelraumanlage

Abbildung 7 : Abbau von Gesamt-Stickstoff in Fließrichtung in einer Wurzelraumanlage

Abbildung 8 : Abbau von CSB in Fließrichtung in einer Wurzelraumanlage

4.5 Sonderabwässer

Sonderabwässer entstehen z. B. bei der Enteisung von Flugzeugen. Dabei werden die Flächen der Flugzeuge mit Glykol besprüht. Die ablaufenden Wässer werden gesammelt und müssen gereinigt werden. Auf den internationalen Flughäfen Kloten in Zürich (Schweiz) und Schönefeld bei Berlin (Deutschland) werden Wurzelraumkläranlagen zur Behandlung dieser problematischen Abwässer eingesetzt.

5. Zusammenfassung

Aufgrund der langjährigen Grundlagenforschung und dem praktischen Betrieb von Wurzelraumanlagen steht inzwischen ein kostengünstiges Verfahren für die Behandlung von häuslichen, gewerblichen und auch problematischen Abwässern zur Verfügung.

Bei diesem Verfahren nach KICKUTH wird das Zusammenwirken von Pflanzen, Boden sowie den darin lebenden Mikroorganismen genutzt, um Abwasserinhaltsstoffe biologisch abzubauen bzw. im Bodenkörper oder in den Wurzeln der Teichpflanzen anzulagern.

Die Breite der Anlage wird über die hydraulische Belastung bestimmt. Die Fließlänge ergibt sich aus der Schadstoffbelastung im Zusammenhang mit dem gewünschten Reinigungsziel.

Ho Chi Minh City, im April 1998

Dr.-Ing. Norbert Könemann