

IHH TB40

LÖSUNGSANSÄTZE ZU AKTUELLEN PROBLEMEN IM WASSERBAU
DARMSTÄDTER WASSERBAULICHES KOLLOQUIUM 1987

TECHNISCHE BERICHTE

ÜBER INGENIEURHYDROLOGIE UND HYDRAULIK

INSTITUT FÜR WASSERBAU TECHNISCHE HOCHSCHULE DARMSTADT
HERAUSGEGEBEN VON PROF. DR.-ING. RALPH C.M. SCHRÖDER

NR. 40

1988

Hydraulische Probleme von Wurzelraumanlagen zur Abwasserreinigung

von

N. Könemann*

* Dr.-Ing. Norbert Könemann
Mitinhaber des Ingenieurbüros Müller-Könemann
Holunderweg 4, 3524 Immenhausen

Inhalt

	Seite
1.	Einleitung 4
2.	Das Wurzelraumverfahren 5
2.1	Allgemeines 5
2.2	Pflanzen und Boden 5
3.	Hydraulik der Wurzelraumanlage..... 7
3.1	Grundlagen 7
3.1.1	Druckgefälle..... 8
3.1.2	Durchlässigkeit 8
3.2	Einlauf- und Auslaufkulissee..... 13
3.2.1	Einlaufkulissee..... 13
3.2.2	Auslaufkulissee..... 14
3.3	Länge der Wurzelraumanlage..... 15
4.	Zusammenfassung 16
5.	Literaturverzeichnis..... 17

1. Einleitung

Im Hinblick auf den Schutz unseres Lebensraumes hat insbesondere die Reinhaltung der Gewässer höchste Priorität. Dies bedeutet, daß das gesamte anfallende Abwasser aus den Haushalten, den Gewerbebetrieben und den großen Industriebetrieben einer Behandlung unterzogen werden muß, damit es ohne Schaden für den Gewässerhaushalt in den nächst gelegenen Bach geleitet werden darf. Die Zielsetzung der Abwasserbehandlung muß dabei so ausgerichtet sein, daß möglichst alle umweltrelevanten Schadstoffe dem Abwasser entzogen werden.

Mit dieser Forderung sind nunmehr zwei Aufgabenstellungen verknüpft, die von den Wasserwirtschaftlern zu bewältigen sind.

1. Die Abwasserbehandlung darf sich nicht nur auf die leicht biologisch abbaubaren Fäkalstoffe beschränken. Es ist vielmehr eine weitergehende Abwasserreinigung dringend geboten, bei der insbesondere der Stickstoff, die Phosphate, die Schwermetalle und andere schwerabbaubare und toxische Verbindungen (CKW's) aus dem Abwasser entfernt werden.
2. Die Forderung, daß alle anfallenden Schmutzwässer einer biologischen Abwasserbehandlung unterzogen werden müssen, führt bei konsequenter Anwendung dazu, daß auch im ländlichen Bereich die Einwohner von Einzelanwesen und Streusiedlungen an das öffentliche Kanalisationsnetz angeschlossen werden. Durch diese Zielsetzung entstehen immense Kosten für die Zuleitungen und eventuelle Pumpstationen. Die Zumutbarkeit des Anschlusses an das öffentliche Kanalnetz wird zwar regional unterschiedlich gehandhabt, es werden jedoch allgemein Kosten von 20.000 DM bis 30.000 DM für den Anschluß eines Einzelgehöftes für wirtschaftlich vertretbar gehalten.

Die Lösung der genannten Aufgabenstellung sollte die Wasserwirtschaftler nicht dazu verführen, auch außerhalb von Ballungsgebieten ein Zentralklärwerk zu bauen und dann das anfallende Abwasser durch lange Kanalstrecken heranzuführen. Hier sollten vielmehr dezentrale Lösungen angestrebt werden, wobei selbst Einzelgehöfte durch eine eigene biologische Kläranlage entsorgt werden können.

Neben einer Vielzahl von technischen Klärkonzepten bieten sich aus ökologischen und ökonomischen Gründen naturnahe Klärverfahren zur Abwasserreinigung an. Dabei werden neben den natürlich belüfteten Teichen auch Pflanzenkläranlagen eingesetzt.

Von den verschiedenen Ausführungsarten der Pflanzenkläranlagen hat sich das Wurzelraumverfahren nach Kickuth /6/ als besonders geeignet erwiesen. Dieses Verfahren basiert auf einer Grundlagenforschung, mit der vor mehr als 30 Jahren begonnen wurde. Mittlerweile werden ca. 40 Anlagen in der Bundesrepublik und ca. 20 Anlagen im Ausland betrieben. Dabei erstreckt sich die Größe der Anlagen von 4 bis 20000 Einwohnergleichwerten. Gereinigt wird nicht nur häusliches Abwasser, sondern auch industrielles Abwasser und Deponiesickerwasser mit zum Teil schwerabbaubaren Verbindungen.

2. Das Wurzelraumverfahren

2.1 Allgemeines

Das Wurzelraumverfahren ist ein Landbehandlungsverfahren, wobei die erforderliche Fläche zur Abwasserreinigung komprimiert wurde. Das Abwasser wird horizontal durch einen Bodenkörper transportiert. Der Boden wird mit bestimmten Sumpfpflanzen besetzt. Die beanspruchte Fläche ist eine Funktion der hydraulischen Belastung und der erforderlichen Reinigungsleistung und kann exakt berechnet werden. Eventuelle Standortbeeinträchtigungen sowie eine Bodenverbesserung oder ein Bodenaustausch oder eine Untergrundabdichtung sind von den jeweiligen örtlichen Randbedingungen abhängig.

Das Phosphataufnahmevermögen des Bodens begrenzt die Lebensdauer einer Wurzelraumanlage. Sie liegt erfahrungsgemäß bei ca. 100 Jahren und kann nach entsprechenden Bodenanalysen berechnet werden.

In der folgenden Abbildung ist das Prinzip der Wurzelraumanlage dargestellt.

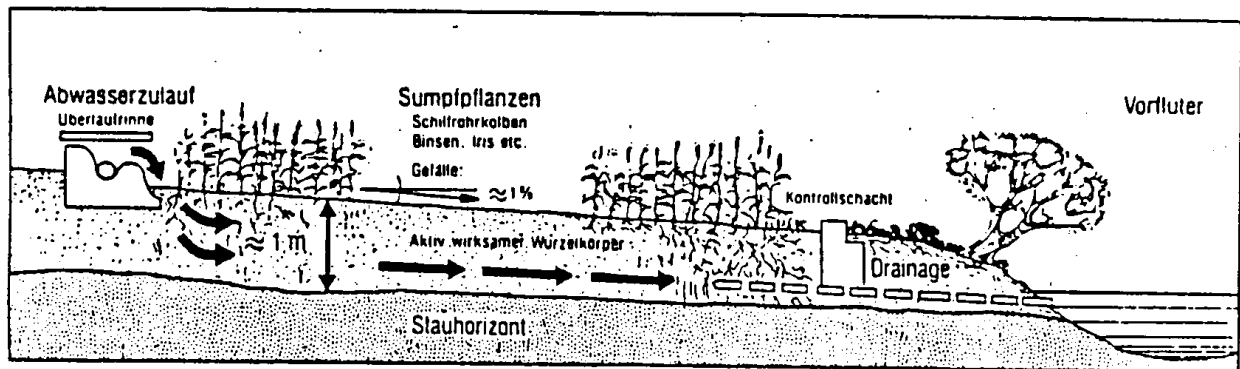


Abbildung 1: Funktionsschema einer Wurzelraumanlage

2.2 Pflanzen und Boden

Für die Abwasserreinigung maßgebend ist das Zusammenspiel von Pflanzen, Boden und Mikroorganismen, die ein vielschichtig miteinander vernetztes System darstellen.

Röhrichtpflanzen können in einem wassergesättigten Boden leben. Sie nehmen den Luft-sauerstoff nicht wie terrestrische Pflanzen über Bodenkapillaren in die Wurzeln auf, sondern sie besitzen ein luftführendes Gewebe (Aerenchym), das den Luft-sauerstoff im Innern der Pflanzen bis zu den Wurzeln transportiert. Dieser Vorgang funktioniert auch während der Vegetationspause. So bleiben die Wurzeln und damit der Röhrichtbestand auch im Winter erhalten. Der Sauerstoff wird über die Wurzeln in die unmittelbare Umgebung abgegeben und stellt hier den Mikroorganismen zur Verfügung.

In der folgenden Abbildung sind verschiedene Röhrichtpflanzen abgebildet :

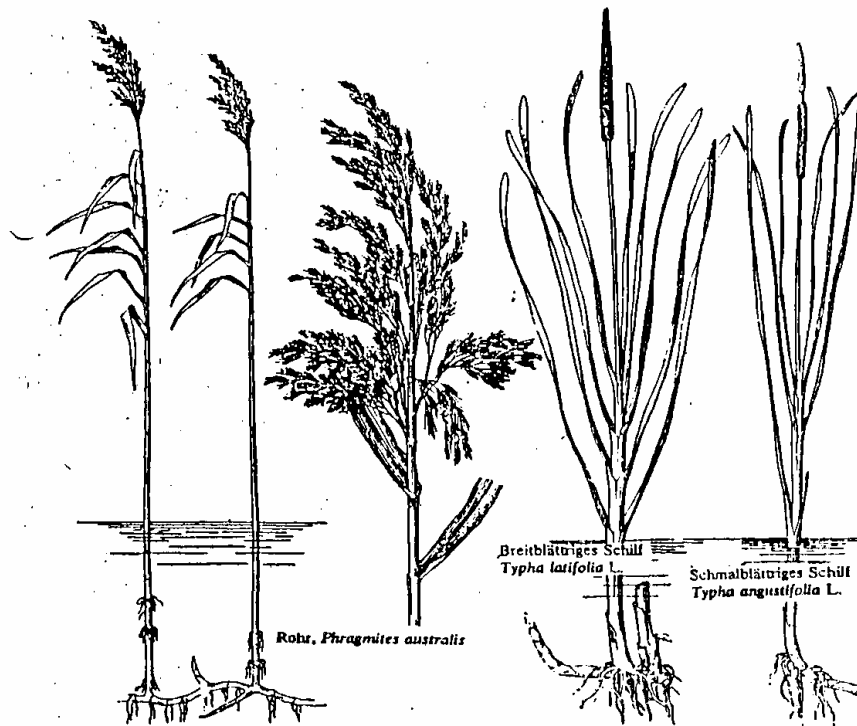


Abbildung 2: Röhrichtpflanzen

In dem überwiegend anaeroben Bodenkörper ergeben sich somit durch die 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 der Bakterien um ein bis zwei Zehnerpotenzen höher als bei technischen Anlagen.

Neben der Sauerstoffversorgung kommt der Röhrichtpflanze noch eine andere Aufgabe zu. Durch das intensive Wachstum der Wurzeln - diese sind 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 kann dieser Reinigungsprozess aufrecht erhalten werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine ausreichende Nährstoffversorgung der Bodenbakterien, damit die auftretende Prozeßwärme das Zufrieren des Bodenkörpers verhindert. Darüberhinaus bildet die abgestorbene Blattmasse im Laufe der Zeit eine Isolierschicht, die den durchströmten Boden gegen Kälte schützt und bei einer hydraulischen Überlastung der Anlage eine zusätzliche Reinigungsleistung bewirkt.

3. Hydraulik der Wurzelraumanlage

3.1 Grundlagen

Das Strömungsverhalten in dem Bodenkörper einer Wurzelraumanlage wird näherungsweise durch das Filtergesetz nach DARCY /10/ beschrieben. Danach ist bei einer laminaren Strömung die Fließgeschwindigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens und dem vorhandenen Druckgefälle wie folgt abhängig:

$$v_f = k_f \cdot j \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

In dieser Gleichung bedeuten:

- v_f = mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)
- k_f = horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
- j = Druckliniengefälle (-)

In der folgenden Abbildung ist ein Bodenkörper mit den entsprechenden Randbedingungen für die Durchströmung dargestellt:

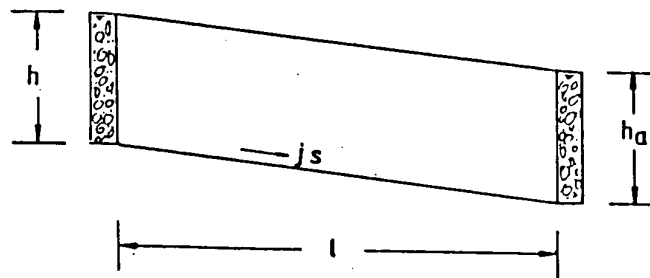


Abbildung 3: durchströmter Bodenkörper

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

$$Q = A \cdot v_f = h \cdot b \cdot k_f \cdot j \quad (\text{cbm/s}) \quad (2)$$

In dieser Gleichung bedeuten :

- v_f = mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)
- k_f = horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
- j = Druckliniengefälle (-)
- A = durchströmter Querschnitt (qm)
- h = Fließtiefe (m)
- b = Einlauflänge (m)

3.1.1 Druckgefälle

Das Druckgefälle wird durch die Wasserspiegellage zwischen dem Einlauf und dem Auslauf der Wurzelraumanlage bestimmt. Die Wasserspiegellage ist wiederum anhängig von dem Reliefgefälle und der Länge der Anlage sowie der Wirtiefe der Pflanzen.

Das Reliefgefälle wird durch die hydraulische Belastung und den Pflanzenwuchs begrenzt. Bei hydraulischer Überlastung des Bodenkörpers wird ein Teil des Wassers oberflächlich abfließen. Bei entsprechend steilem Gefälle kann es dann zur Ausbildung von Erosionsrinnen kommen. Die Pflanzen können sich auf einem geneigten Relief des Untergrundes nur bis zu einem gewissen Grenzgefälle entwickeln. Dieses darf auf keinen Fall überschritten werden.

Die Wirtiefe der Pflanzen liegt in der Regel zwischen 0.5 m und 0.6 m.

Die Länge l der Wurzelraumanlage wird durch die erforderliche Reinigungsleistung bestimmt (siehe Abschnitt 3.3).

Der Druckgradient läßt sich in Abhängigkeit von den genannten Parametern entsprechend der Abbildung 3 wie folgt berechnen:

$$J = j_s + (h - h_a)/l \quad (-) \quad (3)$$

In dieser Gleichung bedeuten :

- j = Druckliniengefälle (-)
- j_s = Reliefgefälle (-)
- h = Fließtiefe im Einlauf (m)
(entspricht der Wirtiefe der Wurzeln)
- h_a = Fließtiefe im Auslauf (m)
- l = Länge der Wurzelraumanlage (m)

Die Fließtiefe im Auslauf kann durch entsprechende Regelorgane gesteuert werden. Bei maximaler Absenkung des Wasserspiegels im Auslauf ($h_a = 0$) ergibt sich der größte Druckgradient.

3.1.2 Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit eines Bodens wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert k_f (m/s) gekennzeichnet. Bei mit Röhrichpflanzen besetzten Bodenkörpern kommt es zu einer Anisotropie der Durchlässigkeit. Da für den Wassertransport in der Regel der horizontale Durchlässigkeitsbeiwert maßgebend ist, werden sich die weiteren Ausführungen immer auf diesen Wert beziehen.

Die Besonderheit des Wurzelraumverfahrens liegt darin, daß für das Ausgangssubstrat ausschließlich bindiger Boden verwendet wird. Bei bindigen Böden weiß man aus der Bodenmechanik, daß relativ kleine Durchlässigkeitsbeiwerte vorliegen und dieses Material deshalb hervorragend für Abdichtungsarbeiten geeignet ist. KEZDI /4/ gibt als größten Wert eine Durchlässigkeit von ca. 10^{-8} m/s für bindigen Boden an.

Für den Einsatz des Wurzelraumverfahrens muß der Bodenkörper aber eine wesentlich größere Durchlässigkeit aufweisen, damit das Wasser durch den Boden hindurch transportiert werden kann. Es stellt sich daher die Frage, ob eine Pflanze in der Lage ist, die Durchlässigkeit des bindigen Bodens um einige Zehnerpotenzen so zu erhöhen, daß die Durchlässigkeit der von Kiesen entspricht.

Die Wurzeln der Röhrichtpflanzen bilden sich von dem jeweiligen Wurzelsproß horizontal aus und dringen in den anstehenden Boden. Hierdurch wird zunächst das Bodengefüge aufgelockert. Da die Wurzeln innen hohl sind, entstehen nach dem Absterben der Wurzeln kleine Kanäle, die für den Wassertransport zur Verfügung stehen. Durch die überwiegend horizontal verlaufenden Wurzeln bildet sich eine Anisotropie der Durchlässigkeit aus.

Dieses Phänomen erinnert an die rohrlose Drainung (Maulwurfdrainung), 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. Hier hat man unter Beachtung bestimmter Randbedingungen beachtliche Erfolge erzielt, wobei die Drainung über einen Zeitraum von ca. 8 Jahren einwandfrei funktioniert hat. EHWALD /3/ berichtet über Fälle, „wo nach üblichen kf-Messungen als weitgehend undurchlässig beurteilte Böden auf Drainung befriedigend ansprachen“.

In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung der Durchlässigkeit in bepflanzt hydro-morphen Böden dargestellt, die von KICKUTH /7/ durchgeführt wurden:

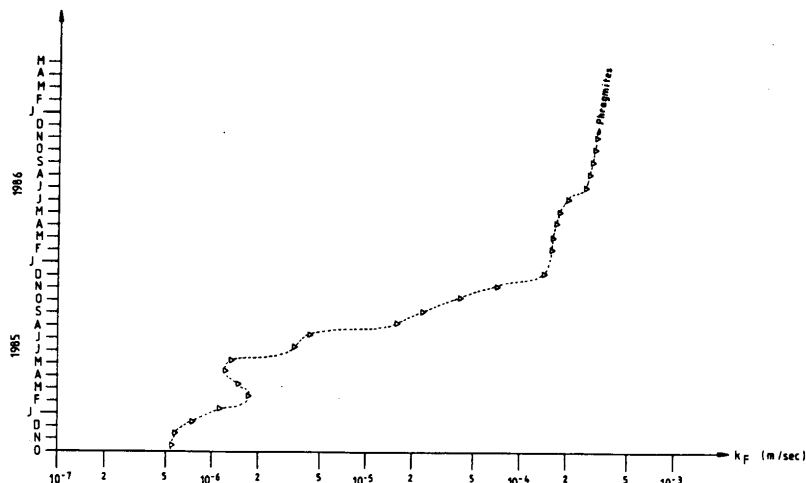


Abbildung 4: Entwicklung von Durchlässigkeiten

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 wurde die Durchlässigkeit nochmals um eine Zehnerpotenz erhöht. Am Ende des Versuches betrug die Durchlässigkeit $k_f = 3 \cdot 10^{-4}$ m/s. Nach einer Aufwuchsphase von ca. 2 Jahren hatte sich die Durchlässigkeit des Bodens um nahezu drei Zehnerpotenzen vergrößert.

Aufgrund von umfangreichen Messungen wird deshalb von KICKUTH /5/6/8/9/ als Endwert eine Durchlässigkeit $k_f = 10^{-3}$ m/s für hydromorphe bindige Böden, die mit Röhrichtpflanzen besetzt sind, angegeben.

In der folgenden Abbildung ist der Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Wirtiefe der Wurzeln dargestellt. Danach erhöht sich die ursprüngliche Durchlässigkeit $k_f = 3.2 \cdot 10^{-7}$ m/s ab einer Tiefe von ca. 0.70 m bis auf $k_f = 8.5 \cdot 10^{-3}$ m/s in einer Tiefe von ca. 0.30 m. Im oberen Bodenbereich nimmt der k_f -Wert zunächst wieder ab und beträgt in einer Tiefe von ca. 0.10 $k_f = 1.9 \cdot 10^{-6}$ m/s. In der obersten Bodenzone nimmt die Durchlässigkeit wieder zu und erreicht einen Wert von $k_f = 10^{-1}$ m/s.

Der Mittelwert der Durchlässigkeit liegt bei $k_f = 10^{-3}$ m/s.

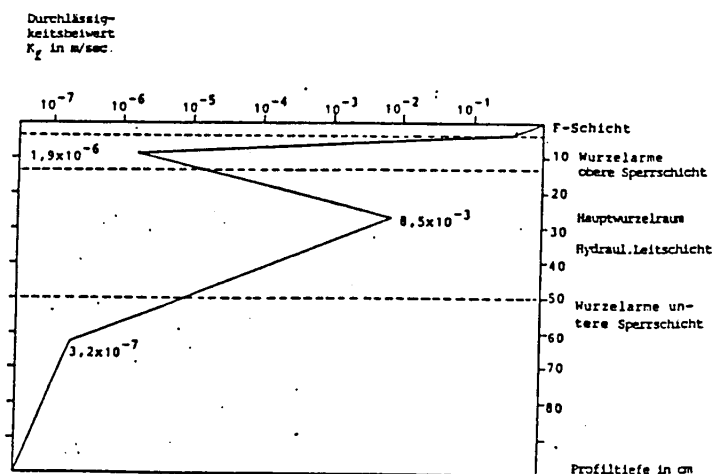


Abbildung 5: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Wirtiefe der Pflanzen

UHDEN /12/ gibt für bindige Böden ebenfalls eine große Spanne des Durchlässigkeitsbeiwertes an. Danach liegt der k_f -Wert zwischen $2.3 \cdot 10^{-7}$ m/s und $3.1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL /8/ bestätigen ebenfalls die Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes von der Wirtiefe der Wurzeln. In der folgenden Abbildung wird die hohe Durchlässigkeit ($k_f = 10^{-2}$ m/s bis 10^{-3} m/s) in der oberen Bodenzone (0.05 m bis 0.10 m) und eine geringere Durchlässigkeit ($k_f = 10^{-4}$ m/s bis 10^{-5} m/s) in der unteren Bodenzone (0.40 m bis 0.50 m) bestätigt.

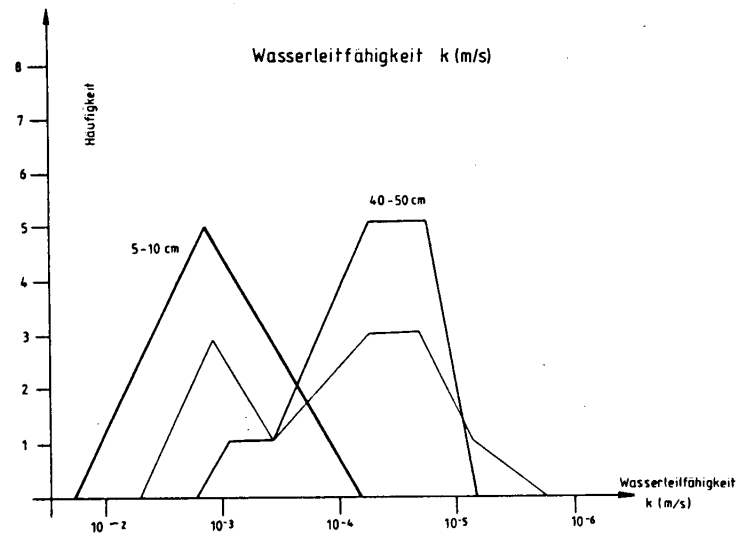


Abbildung 6: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Wirtiefe der Pflanzen

Bei umfangreichen Untersuchungen an dem Phragmetetum "Windelsbleiche" hat WINTER /13/ einen mittleren Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 5.7 \cdot 10^{-3}$ bis $1.8 \cdot 10^{-2}$ beobachtet. Auch hier wurde eine Abhängigkeit von der Wirtiefe der Pflanzen festgestellt.

EGGELSMANN /2/ gibt für Mineralböden (Lehm und Ton) je nach Struktur einen Bereich für den Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 2.3 \cdot 10^{-9}$ m/s bis $3.3 \cdot 10^{-3}$ m/s an. Für Schilftorfe wird ein Bereich zwischen $k_f = 1.2 \cdot 10^{-7}$ m/s bis $1.4 \cdot 10^{-3}$ m/s genannt. Dieser Bereich wird nochmals nach dem jeweiligen Zustand der Pflanzen und des Torfes unterteilt. Bei einer deutlichen Pflanzenstruktur im Torf wird als Bereich $k_f = 4.6 \cdot 10^{-5}$ bis $1.4 \cdot 10^{-3}$ m/s angegeben. Bei Bruchtorfen kann dieser Bereich mit $k_f = 3.3 \cdot 10^{-3}$ m/s noch überschritten werden.

In der folgenden Abbildung sind die Durchlässigkeitsbeiwerte für bindige Böden nach Angaben der verschiedenen Autoren zusammengestellt.

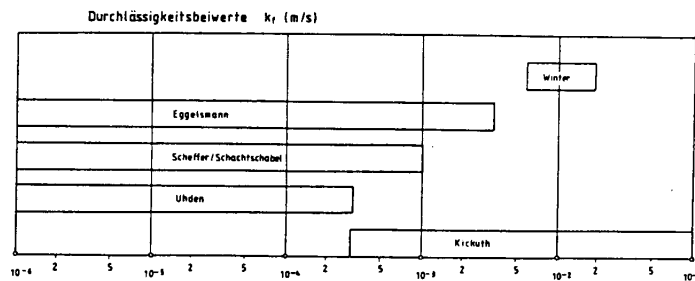


Abbildung 7: Durchlässigkeitsbeiwert für bindige Böden

Die aufgezeigten Untersuchungen verschiedener Autoren zeigen, daß durch den Bewuchs mit Röhrichtpflanzen mineralische Böden eine sehr hohe Durchlässigkeit erreichen können, die durchaus denen von Grobkiesen entspricht. Dies wird im übrigen durch eine Vielzahl von realisierten Wurzelraumanlagen bestätigt.

Es stellt sich nunmehr die Frage, bei welchen Bodenarten diese hohe Durchlässigkeit erzielt und dann langfristig erhalten werden kann.

Die Aktivitäten der Pflanzen im Bodenbereich bewirken ein Aufreißen des dichten Bodengefüges. Darüberhinaus bildet sich nach dem Absterben der Wurzeln ein vielfältiges Geflecht aus Kanälen mit unterschiedlichen Durchmessern aus. Hierdurch wird im Boden eine Sekundärstruktur geschaffen, die aus Schollen, Klüften und Röhren besteht und die auch langfristig einen Wassertransport durch den Bodenkörper hindurch gewährleistet. Die Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß der Boden so beschaffen sein muß, daß die Sekundärstruktur auch unter hydromorphen Bedingungen erhalten bleibt und nicht zerstört wird.

Ein reiner Schluffboden wird bei Wassersättigung "fließen" und die Sekundärstruktur zerstören. Eine dauerhafte Durchlässigkeit ist damit nicht gewährleistet. Ein Boden, der sich theoretisch aus einzelnen Tonkugeln zusammensetzt, wird auch bei Wassersättigung die Sekundärstruktur und damit die Durchlässigkeit beibehalten.

Da sich ein Mineralboden im wesentlichen aus Schluff und Ton zusammensetzt, muß bei bestimmten Mischungsverhältnissen eine stabile Sekundärstruktur zu erwarten sein. Die Struktur wird allerdings auch von anderen Bodenkennwerten positiv oder negativ beeinflusst. So ist insbesondere das Bodengefüge sowie der Anteil von Calcium und Aluminium wichtig für eine positive Ausbildung der Sekundärstruktur. Natrium wirkt sich in der Regel negativ aus.

Durch dieses Zusammenwirken des Ton-Schluff-Verhältnisses sowie der anderen Bodenkennwerte läßt sich der relativ weite Bereich für die Durchlässigkeitsbeiwerte von bindigen Böden erklären.

Zur Beurteilung eines Bodens für den Einsatz in einer Wurzelraumanlage soll auf die Erfahrungen mit der rohrlosen Drainung zurückgegriffen werden. Mit diesem Verfahren wurden in den vergangenen 20 Jahren umfangreiche Erfahrungen gewonnen. So wurden z.B. in Ungarn seit 1965 ca. 20000 ha Haftnässeböden melioriert /2/.

3.2 Einlauf- und Auslaufkulisse

Die Länge der Einlauf- und Auslaufkulisse wird durch die hydraulische Belastung bestimmt. Sie ist so auszulegen, daß der gesamte Bemessungszufluß aufgenommen werden kann.

Nach Abschnitt 3.1 beträgt die Zulaufmenge :

$$Q = A * v_f \text{ (cbm/s)} \quad (2)$$

Die Eintrittsfläche ergibt sich aus dem Produkt der Wirtiefe h der Pflanzenwurzeln und der Breite der Einlaufkulisse b . Stellt man nun die Gleichung 2 entsprechend um, dann ergibt sich für die Länge der Einlauf- und Auslaufkulisse:

$$b = Q / (v_f * h) \text{ (m)} \quad (4)$$

Die Breite einer Wurzelraumanlage wird somit im wesentlichen durch den jeweiligen Bemessungszufluß geprägt. Verteilt man z. B. den Abwasserzufluß rechnerisch über 8 Stunden, dann ergibt sich eine dreifach breitere Einlauflänge, als bei einer Verteilung über 24 Stunden.

3.2.1 Einlaufkulisse

Die konstruktive Gestaltung der Einlaufkulisse muß eine gleichmäßige Verteilung des Wassers auf der gesamten Länge gewährleisten. Dabei muß insbesondere die Ausbildung von Erosionsrinnen vermieden werden.

In der folgenden Abbildung ist der Zufluß und die Verteilung des Wassers in einem geschlossenen System dargestellt:

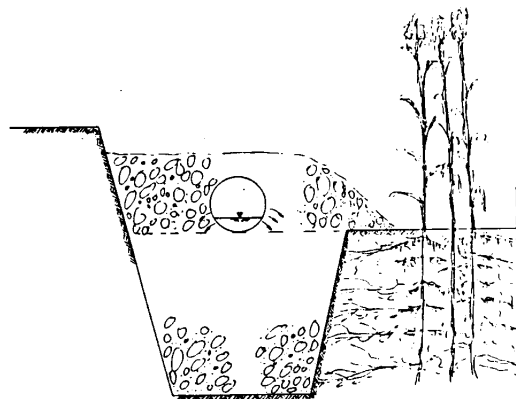


Abbildung 9: Einlaufkulisse mit geschlossener Wasserzuführung

Der Einlaufbereich erhält eine ca. 0.50 m bis 1.0 m breite Schüttung aus gebrochenem Gestein, die bis zur Wirktiefe der Anlage reicht. Auf dem Niveau der Oberfläche der Wurzelraumlage wird ein geschlitztes Drainagerohr angeordnet, das ebenfalls mit einer ca. 10 cm starken Schüttung umgeben wird. Zwischen dem Rohr und dem bepflanzten Bodenkörper sollte die Schüttung ca. 0.50 m breit sein. Bei einer hydraulischen Überlastung des Bodenkörpers kann das Wasser dann gleichmäßig durch den Schotterdamm sickern und luftseitig austreten.

Die Breite derartiger Rigolen sollte pro Beet eine Länge von 50 m nicht überschreiten. Zu Wartungszwecken sind entsprechende Kontrollschächte anzuordnen.

In der nächsten Abbildung ist eine offene Wasserzuführung und Verteilung dargestellt.

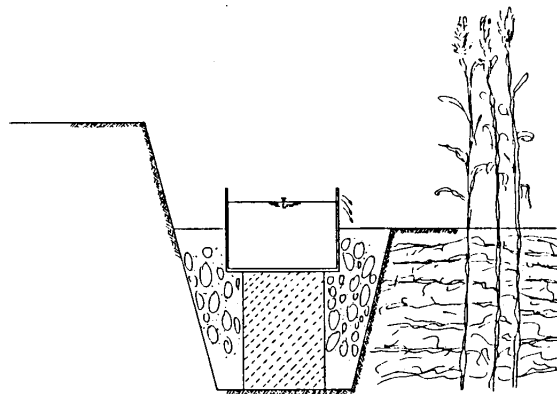


Abbildung 10: Einlaufkulisse mit offener Wasserzuführung

Hier wird ebenfalls eine Rigole aus gebrochenein Gestein geschüttet. Auf der Rigole wird dann eine offene Rinne auf Stützfundamenten horizontal verlegt, die seitlich Dreiecksöffnungen aufweist und damit eine gleichmäßige Verteilung des Wassers ermöglicht. Die Rinne wird aus Polyesterbeton gefertigt. Auch hier sollte die Länge der Rinne pro Beet 50 m nicht überschreiten.

3.2.2 Auslaufkulisse

Die Auslaufkulisse erhält ebenfalls eine Rigole entsprechend dem Zulauf. Auf der Sohle wird ein Entwässerungsdrain angeordnet, das in einem Kontrollschacht endet. Das Längsgefälle des Drains sollte mindestens 0.5 % betragen. Der Durchmesser richtet sich nach der hydraulischen Belastung. Er sollte 150 mm nicht unterschreiten.

3.3 Länge der Wurzelraumanlage

Die Länge des durchflossenen Bodenkörpers einer Wurzelraumanlage richtet sich nach der gewünschten Reinigungsleistung. Die biochemischen Reaktionen im Bodenkörper lassen sich durch eine Funktion 1. Ordnung wie folgt beschreiben :

$$c_t = c_o * \exp(-k*t) \text{ (mg/l)} \quad (5)$$

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 Randbedingungen abhängig. Dies sind im wesentlichen die Abwasserart und -zusammensetzung, der Abwasseranfall, der Fremdwasseranfall und eine eventuelle Vorbehandlung des Abwassers. Die Schmutzfrachtkonzentration im Ablauf wird durch den jeweiligen Vorfluter und den vorhandenen Niedrigwasserabfluß bestimmt.

Die Reaktionskonstante k ist abhängig von der Temperatur und der jeweiligen Zusammensetzung des Abwassers. Sie muß insbesondere bei industriellem Abwasser oder Deponiesickerwasser für den jeweilig maßgebenden Schmutzfrachtparameter experimentell bestimmt werden.

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 und liegt in der Größenordnung von ca. 25 %. Damit ergibt sich für die Aufenthaltszeit t folgende Beziehung:

$$t = V_g * 0.25/Q = h * b * l * 0.25/Q \text{ (s)} \quad (6)$$

In dieser Gleichung bedeuten

t	=	Aufenthaltszeit (s)
V_g	=	Gesamtvolumen (cbm)
Q	=	Wassermenge (cbm/s)
h	=	Wirktiefe der Anlage (m)
b	=	Breite der Anlage (Einlauflänge) (m)
l	=	Länge der Anlage (m)

Die Verknüpfung der Gleichungen (5) und (6) ergibt das gesuchte Volumen:

$$V_g = Q * (\ln c_o - \ln c_t) / (0.25 * k * t) \quad (7)$$

Mit der bekannten Einlauflänge und der Wirtiefe der Pflanzenwurzeln läßt sich aus dieser Gleichung die Länge der Wurzelraumanlage bestimmen:

$$l = Q * (\ln c_o - \ln c_t) / (0.25 * k * t * b * h) \quad (8)$$

Es empfiehlt sich, zu der rechnerischen Länge der Anlage noch einen Zuschlag von ca. 20 % aber mindestens 5 m zu geben.

4. Zusammenfassung

Aus der Vielzahl von Pflanzenkläranlagen liefert das Wurzelraumverfahren nach KICKUTH die besseren Reinigungsergebnisse. Dies ist auf eine langjährige Grundlagenforschung sowie den praktischen Betrieb von derartigen Anlagen zurückzuführen. Neben häuslichem Abwasser können in dieser Anlage auch problematische Abwässer aus Industriebetrieben sowie Deponiesickerwasser gereinigt werden.

Nach einer Beschreibung der Grundlagen des Verfahrens wird die hydraulische Problematik eingehend erläutert. Dabei wird insbesondere die Frage nach der Durchlässigkeit der Anlage behandelt. Die Eigenart des Verfahrens liegt darin, daß ein bindiger Boden mittels Pflanzen so gestaltet wird, daß er auch im hydromorphen Zustand wasserdurchlässig bleibt. Es zeigt sich aufgrund von Erfahrungen einer Vielzahl von Autoren, daß mit Röhricht bewachsene bindige Böden Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = 10^{-3}$ m/s bis 10^{-2} m/s aufweisen. Diese hohen Durchlässigkeiten werden offensichtlich durch eine stabile Sekundärstruktur bedingt, wobei Risse, Klüfte und Wurzelkanäle den Wassertransport ermöglichen.

Dieses Phänomen ist vergleichbar mit den Erfahrungen der rohrlosen Drainung. Hier zeigen langjährige Beobachtungen, daß bei einem bestimmten Ton-Schluff-Verhältnis auch Haftenäseböden entwässert werden können, obwohl der Boden einen völlig undurchlässigen Eindruck hinterläßt.

Mit dem Durchlässigkeitsbeiwert läßt sich das hydraulische Verhalten des durchströmten Bodenkörpers nach DARCY beschreiben. Die horizontale Fließtiefe im Boden, die Wirtiefe der Pflanzenwurzeln und die anfallende Wassermenge bestimmen die Breite der Wurzelraumanlage (Einlauf- und Auslaufänge). Die Länge der Anlage wird durch die Schmutzfrachtkonzentration im Zulauf und Ablauf sowie der Temperatur und der Art des Abwassers bestimmt. Die Bemessungsgleichungen für eine Wurzelraumanlage werden im einzelnen hergeleitet.

Die vorgestellten Bemessungsgrundlagen erlauben einen ersten Schritt für den Bau einer Wurzelraumanlage. Man kann mit ihnen die äußeren Abmessungen der Anlage dimensionieren. Erst die weitere Zusammenarbeit mit erfahrenen Boden- und Pflanzenkundlern wird zum vollen Gelingen einer Wurzelraumanlage beitragen.

Immenhausen, im November 1987
Dr.-Ing. Norbert Könemann

5. Literaturverzeichnis

- /1/ -- Merkblatt zur kombinierten Drainung
Bayrische Landesanstalt für Boden, Kultur und Pflanzenbau /
Bayrische Landesanstalt für Wasserwirtschaft, München, 1976
- /2/ Eggelsmann Drainanleitung für Landbau, Ingenieurbau und Landschaftsbau
Verlag Paul Parey, Hamburg / Berlin, 1981
- /3/ Ehwald Zur Bedeutung und Problematik der Leitfähigkeit des Bodens
für Wasser
Vortrag anlässlich der 8. wissenschaftlichen Tagung der Boden-
kundlichen Gesellschaft der DDR in Magdeburg, Februar, 1976
- /4/ Kzdi Handbuch der Bodenmechanik
Band I, Bodenphysik
VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1969
- /5/ Kickuth Abwasserreinigung in Mosaikmatritzen aus aeroben und
anaeroben Teilbezirken
österreichische Arbeitsgruppe
Chemisches Apperatewesen, Graz, 1980
- /6/ Kickuth Das Wurzelraumverfahren in der Praxis
Landschaft und Stadt 1984
- /7/ Kickuth Messung von Durchlässigkeitswerten an befrachteten
Bodenkörpern, 1985 - 1986, unveröffentlicht
- /8/ Kickuth Verfahrensanpassung und Dimensionierung für eine
Wurzelraumanlage in Hofgeismar-Beberbeck,
1983, unveröffentlicht
- /9/ Kickuth Das Wurzelraumverfahren in der Praxis
Landschaft und Stadt 1984
- /10/ Schröder, R. Hydraulik im Wasserbau
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn
Berlin * München * Düsseldorf 1972
- /11/ Schröder, W. Landwirtschaftlicher Wasserbau
Pflanzen- und Bodenkunde, Entwässerung, Bewässerung
Fachgebiet Konstruktiver Wasserbau und Wasserwirtschaft,
TH Darmstadt
- /12/ Uhdn Taschenbuch landwirtschaftlicher Wasserbau
Frank'sche Verlagshandlung Stuttgart 1964
- /13/ Winter Entfernung und Umsetzung von Schwefelverbindungen aus
Abwasser in Wurzelraumanlagen
Dissertation des Fachbereichs Landwirtschaft
der GH Kassel, 1985