

Siedlungswasserwirtschaft

**Bodenfilter
zur Regenwasserbehandlung
im Misch- und Trennsystem**



Bodenfilter zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
2. überarbeitete Auflage

Karlsruhe 2002

Herausgeber	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 76157 Karlsruhe • Postfach 21 07 52, http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de
Bearbeitung	Prof. P. G. Brunner Hochschule für Technik Karlsruhe Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft Regierungspräsidium Karlsruhe Referat 53 Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Abteilung 4 - Wasser und Altlasten
Umschlaglayout	Stephan May • Grafik-Design, 76227 Karlsruhe
Titelbild	Jutta Ruloff • Diplom-Designerin, 76275 Ettlingen

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhaltsverzeichnis:

Zusammenfassung	5
1 Bodenfilter im Mischsystem	7
1.1 Derzeitige Technik der Mischwasserbehandlung	7
1.2 Historische Entwicklung der Filtration durch Bodensubstrate	7
1.3 Definitionen	8
1.4 Eigenschaften des Mischwasserabflusses	9
1.5 Vorgänge im Boden bei der Mischwasserfiltration	11
1.5.1 Filtration	11
1.5.2 Biochemische Prozesse	11
1.5.3 Adsorption	13
1.6 Bodensubstrate bei der Mischwasserfiltration	15
1.6.1 Lehmboden	15
1.6.2 Sandboden	18
1.6.3 Kies	20
1.7 Pflanzen bei der Mischwasserfiltration	21
1.8 Anordnung von Bodenfilteranlagen im Mischsystem	23
1.9 Weitergehende Mischwasserbehandlung	34
1.9.1 Herkömmliche Methode der weitergehenden Mischwasserbehandlung	34
1.9.2 Bodenfilter für die weitergehende Mischwasserbehandlung	36
1.10 Dimensionierung eines Bodenfilters	38
1.11 Ergänzung von unterdimensionierten Regenüberlaufbecken durch Bodenfilter	41
1.12 Konstruktive Gestaltung von Retentionsbodenfilteranlagen	42
1.13 Hinweise zur Bauausführung	57
1.14 Hinweise zum Betrieb	58
1.15 Kosten	58
1.15.1 Kosten von Regenüberlaufbecken in Betonbauweise	58
1.15.2 Kosten von Filterbecken in Erdbauweise	60
1.15.3 Kosten der Gesamtanlage	61
1.16 Zusammenfassende Bewertung	62
2 Bodenfilter im Trennsystem	65
2.1 Eigenschaften des Regenwasserabflusses beim Trennverfahren	65
2.2 Konventionelle Regenwasserbehandlung beim Trennsystem	66

2.3	Weitergehende Regenwasserbehandlung beim Trennsystem.....	73
2.3.1	Herkömmliche Methode der weitergehenden Regenwasserbehandlung	74
2.3.2	Weitergehende Regenwasserbehandlung durch Filteranlagen.....	75
2.4	Anordnung von Bodenfiltern für die Regenwasserbehandlung	76
2.5	Bemessung von Bodenfiltern beim Trennsystem	82
2.5.1	Bemessung der Absetzanlage	82
2.5.2	Bemessung des Bodenfilters	83
2.6	Konstruktive Gestaltung von Retentionsbodenfiltern des Trennsystems	87
2.7	Hinweise zum Betrieb	94
2.8	Kosten von Retentionsbodenfiltern des Trennsystems	94
2.9	Zusammenfassende Bewertung.....	94
3	Abbildungen ausgeführter Filteranlagen.....	97
	Verzeichnisse	109
	Abkürzungen	109
	Zeichen und Fachausdrücke	110
	Literatur.....	112
	Veröffentlichungen der Reihe Handbuch Wasser 4	115

Zusammenfassung

Filterbecken werden seit mehr als 10 Jahren für die Regenwasserbehandlung in Misch- und Trennsystemen eingesetzt. Es handelt sich dabei um Multifunktionsbauwerke, die verschmutzte Regen- bzw. Mischwasserabflüsse reinigen.

Die Retentionseigenschaft macht es möglich, durch Zwischenspeicherung ein größeres Abflussvolumen der Behandlung zugänglich zu machen. Die Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Baden-Württemberg ist bestrebt, das Verfahren weiterzuentwickeln, zu verbessern und einer breiten Anwendung zuzuführen. Zu diesem Zweck begleitet eine Gruppe von Fachleuten, Arbeitsgruppe Bodenfilter (AGB), die vom Land Baden-Württemberg geförderten Pilotanlagen.

Der 1998 veröffentlichte und mittlerweile vergriffenen Band 10 der Reihe Handbuch Wasser 4 fasst den bisherigen, gesicherten Kenntnisstand über die Filtration von Misch- und Regenwasser in den Bereichen Konzeption und Bemessung, Bau, Betrieb und Kosten der Anlagen umfassend zusammen. Die verschiedenen Möglichkeiten der Anordnung der Vorbehandlungsstufe, des Filterbeckens und des Retentionsraumes werden aufgezeigt und bewertet. Die Auswahl des Filtermaterials, der Aufbau des Filters, die Filterstärke und der Betrieb der Anlagen richtet sich nach den qualitativen Zielen, die an das gereinigte Abwasser gestellt werden. Eine Bewertung und Einordnung der Bodenfilter in das Instrumentarium der Anlagen zur Regenwasserbehandlung wird vorgenommen. Mit dieser Fülle an Information liefert das vorliegende Handbuch Anlagenbetreibern, Planern und Genehmigungsbehörden wertvolle und neue Informationen zu dem sehr aktuellen Thema der Bodenfiltration.

In der hier vorliegenden Fassung, mit der das Handbuch Interessierten über das Internet verfügbar gemacht wird, wurden die Kapitel zur Bemessung von Bodenfiltern (Kap. 1.10 und 2.5.2) den neuesten Erfahrungen angepasst.

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Forschung und Entwicklung im Bereich der Filterbecken noch im vollen Gange ist. Sobald neue gesicherte Erkenntnisse vorliegen, werden diese durch die Landesanstalt für Umweltschutz wieder veröffentlicht.

1 Bodenfilter im Mischsystem

1.1 Derzeitige Technik der Mischwasserbehandlung

Deutschland wird zu 70 % im Mischsystem entwässert. Als Instrument der Mischwasserbehandlung werden hauptsächlich Regenüberlaufbecken (RÜB) eingesetzt, da sich damit im Vergleich zu Regenüberläufen erhebliche Kosteneinsparungen ergeben. Bei RÜB handelt es sich um Retentionsräume mit Entlastungsmöglichkeit, die bei Regenwetter Mischwasser vorübergehend speichern und gedrosselt zum Klärwerk weiterleiten. Bei Anwendung von Normalanforderungen werden beim Einsatz von Regenüberlaufbecken 50 % bis 60 % des jährlichen Regenwasserabflusses im Klärwerk biologisch behandelt. Der restliche Regenwasserabfluß wird als Mischwasser unmittelbar ins Gewässer entlastet [6]. Bei dieser Vorgehensweise wird in der Regel die Verschlammung eines Gewässers verhindert und die durch eine Mischwassereinleitung ausgelöste Sauerstoffdepression auf ein für aquatisches Leben verträgliches Maß begrenzt.

Der Schutz der Gewässer läßt sich steigern, wenn es für das Mischwasser aufnehmende Gewässer notwendig ist. Ein typisches Instrument dafür besteht in der Vergrößerung der Regenüberlaufbecken. Dieser Vorgehensweise hat die Folge, daß dann circa 75 Prozent des jährlichen Regenwasserabflusses im Klärwerk behandelt werden.

Die in der vorliegenden Ausarbeitung vorgestellten Filteranlagen haben demgegenüber das Ziel, die Gewässerbelastung infolge Mischwassereinleitung zu senken ohne dabei das Klärwerk zusätzlich zu belasten. Gleichzeitig wird damit der ins Gewässer eingeleitete Volumenstrom gedämpft. Im Vergleich zu Regenüberlaufbecken ist mit Bodenfilteranlagen eine über die Sedimentation hinausgehende Behandlung möglich.

1.2 Historische Entwicklung der Filtration durch Bodensubstrate

Die Anwendung der Filtration durch Bodensubstrate für die Reinigung häuslicher und gewerblicher Abwässer, ohne Einsatz von Nutzpflanzen, geht nach Darlegungen von Dunbar auf Versuche zurück, die der Brite Sir Edward Frankland 1868 in England mit Lehm-, Sand- und Kiesböden durchgeführt hat [18]. Frankland arbeitete mit vertikaler Filtration und intermittierender Beschickung. Er fand, daß das aus den Bodensäulen abfließende Wasser klar, farblos, geruchlos und nitrathaltig war sowie daß man bei einer Filterbelastung von $18 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ Abwasser dauerhaft gründlich reinigen kann.

Diese experimentellen Feststellungen wurden ab 1886 in den USA in Laurence/Massachusetts wieder aufgegriffen. Die Erkenntnisse Sir Frankland's wurden bestätigt. Bereits 1891 erschienen Regeln für Bodenkennwerte, Filterbelastung und die Konstruktion von Filteranlagen. 1895 wandte die Stadt Waldkirch in Baden das Verfahren erstmals in Deutschland mit einer jährlichen Stapelhöhe von $18 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ für die Reinigung von Abwasser an.

Dunbar hatte den englischen Begriff „soil filter“ als „Bodenfilter“ in Deutschland eingeführt, der seither für die mechanisch-biologische Reinigung verschmutzten Wassers in intermittierend vertikal beschickten Bodensubstraten erhalten blieb [18].

Die Bemessungsempfehlungen des Massachusetts State Board of Health für die biologische Reinigung von Abwasser waren so brauchbar, daß sie später ins Taschenbuch von Imhoff übernommen wurden [21]. Noch 1998 erschien sie nahezu unverändert im

Arbeitsblatt ATV-A 262 für die Bemessung von Pflanzenbeeten für kommunales Abwasser [7].

Der Einsatz von Filtern für die Mischwasserreinigung hat sich in Deutschland lange Zeit nicht durchgesetzt. Erst vor circa zwanzig Jahren begann man in Baden-Württemberg, mechanische Filter für die Mischwasserreinigung anzuwenden. 1988 wurde der Bodenfilter in Baden-Württemberg erstmals zur mechanisch-biologischen Mischwasserbehandlung eingesetzt [13] [29]. 1998 wurden Filter als Anlagen der zentralen Niederschlagswasserbehandlung ins Arbeitsblatt ATV-A 166 aufgenommen [1].

1.3 Definitionen

Infolge einer fehlenden offiziellen Terminologie tauchen in der Praxis die unterschiedlichsten Begriffe für Filteranlagen auf: Sickerbecken, Versickerungsbecken, Regenrückhaltebecken oder Pflanzenkläranlage sind regional unterschiedlich angewandte Begriffe, die aus anderen Feldern der Entwässerungstechnik entlehnt wurden, um damit Filteranlagen zu umschreiben. Gemeinsames Merkmal aller Filteranlagen ist die Perkolation des Wassers durch ein Bodensubstrat. Aus dem Erfordernis einer einheitlichen Terminologie heraus werden nachfolgend die wichtigsten Begriffe zur Charakterisierung von Filteranlagen definiert.

Es werden folgende Filterarten unterschieden:

a) Nach dem Reinigungsziel:

- Mechanische Filter (MF) zur Abtrennung partikulärer Feststoffe.
- Bodenfilter (BF) zur Abtrennung partikulärer Feststoffe und zum Abbau gelöster Stoffe.

b) Nach der Richtung der Filtration:

- Vertikale Filtration.
- Horizontale Filtration.

Mechanische Filter arbeiten mit vertikaler oder horizontaler Filtration. Bodenfilter arbeiten vorwiegend mit vertikaler Filtration.

c) Nach der Kornzusammensetzung des Substrates:

- Mechanische Filter mit Kiessand oder Kies.
- Bodenfilter mit Lehmboden oder Sand.

d) Nach der Lage des Retentionsraumes:

- Filter mit integriertem Speicherraum. Retention und Filterung erfolgt in einem Bauwerk.
- Filter mit vorgeschaltetem Speicherraum. Retention und Filterung erfolgen in getrennten Bauwerken.

Daraus ergeben sich die wichtigsten in der Praxis angewendeten Begriffe:

Bodenfilter (BF):	Filteranlage zur mechanisch-biologischen Mischwasserreinigung durch Abtrennung partikulärer und biologischen Abbau gelöster Stoffe
Retentionsbodenfilter (RBF):	Filter zur mechanisch-biologischen Mischwasserreinigung mit integriertem Speicher
Bodenfilter mit vorgeschalteter Retention (BFvR):	Filter zur mechanisch-biologischen Mischwasserreinigung mit vorgeschaltetem Speicher
Mechanischer Filter (MF):	Filteranlage zur mechanischen Mischwasserreinigung durch Abtrennung partikulärer Stoffe
Mechanischer Retentionsfilter (MRF):	Filter zur mechanischen Mischwasserreinigung mit integriertem Speicher
Mechanischer Filter mit vorgeschalteter Retention (MFvR):	Filter zur mechanischen Mischwasserreinigung mit vorgeschaltetem Speicher

Bodenfilter besitzen gegenüber mechanischen Filtern eine ausgeprägte biologische Reinigungskomponente bezüglich der gelösten Stoffe im Niederschlagsabfluß. Die Abgrenzung der Bodenfilter von den mechanischen Filtern ist in der Praxis nicht immer eindeutig vorzunehmen. Es gibt Übergangsformen, z.B. mechanische Filter mit geringem biologischem Abbau gelöster Stoffe. Erschwerend kommt hinzu, daß mechanische Filter unkorrekter Weise oft als Bodenfilter bezeichnet werden.

Nachfolgend wird auf mechanische Filter nicht weiter eingegangen. Gegenstand der anschließenden Ausführungen sind die mechanisch-biologisch wirkenden Bodenfilter.

1.4 Eigenschaften des Mischwasserabflusses

Es besteht bereits eine hundertjährige Erfahrung mit der Bodenfiltration. Allerdings bezieht sich dieses Wissen auf die Reinigung von häuslichem Abwasser. Zur Zeit läßt sich beobachten, daß insbesondere diese Erfahrungen mit Pflanzenbeeten unkritisch auf die Reinigung von Mischwasserabflüssen übertragen werden. Es ist notwendig, sich der grundlegenden Unterschiede zwischen häuslichem Abwasser und Mischwasser bewußt zu machen.

Häusliches Abwasser fällt quasi kontinuierlich an. Eine Mischwasserbeschickung unterliegt anderen Gesetzmäßigkeiten. Niederschläge sind zufällige Ereignisse. Die zeitliche Verteilung ihres Auftretens und die Dauer der Mischwasserbeschickung sind unregelmäßig. Bei Schlechtwetterperioden muß mit einer permanenten Beschickung von bis zu mehreren Tagen Dauer gerechnet werden. Das andere Extrem sind Trockenperioden von mehreren Wochen Dauer.

Für die Reinigung von häuslichem Abwasser werden vertikal durchströmte Bodenfilter seit Sir Frankland's Untersuchungen mit einer täglichen Stapelhöhe von 60 mm/d beschickt. Bei Niederschlägen hingegen unterliegt die Niederschlagshöhe je Ereignis extremen Schwankungen. Ein Quadratmeter Filterfläche wird je Beschickungsereignis mit wenigen Millimetern bis zu weit über 1000 mm Mischwasser belastet. Beispielsweise stieg bei der Pilotanlage Angelbachtal die Filterbelastung bei extremen Ereignissen trotz starker Abflußdrosselung auf 4000 mm an [15]. Die Häufigkeit der Filterbeschickung ist hingegen beim Mischwasserfilter

ungleich niedriger als beim Abwasserfilter (z.B. Pflanzenbeet). Je nach Beschickungsart wird ein Abwasserfilter mehrere hundertmal im Jahr beschickt. Bei einem Mischwasserfilter hängt die Häufigkeit der Beschickung vom regionalen Klima und von der Ausbildung der vorgeschalteten Behandlungsstufe ab. Sie liegt bei einem auf Normalanforderungen ausgelegten vorgeschalteten Regenüberlaufbecken bei ca. 30 - 60 Beschickungen pro Jahr, bei einem vorgeschalteten Regenüberlauf sogar nur bei ca. 10 - 15 Ereignissen pro Jahr.

Aus diesen Ausführungen geht hervor, daß die Art der hydraulischen Belastung beim Mischwasserfilter erheblich von der eines Abwasserfilters abweicht. Ein Abwasserfilter erhält seine Wasserlast gleichmäßig in wohlproportionierten Dosen, ein Mischwasserfilter hingegen bei wenigen Ereignissen in großer Menge. Die hydraulischen Rahmenbedingungen bei der Mischwasserfiltration sind deutlich ungünstiger als bei den Abwasserfiltern.

Daneben bestehen auch qualitative Unterschiede zwischen der Belastung eines Mischwasserfilters und eines Abwasserfilters. Grundsätzlich ist zu sagen, daß Mischwasser einen hohen Gehalt an organischen Zehrstoffen (BSB, CSB), Ammonium, Phosphat und Keimen aufweist. Die Konzentrationen werden stark von der Einwohnerdichte, gewerblichen Abwässern und von Kanalablagerungen bestimmt. In der Regel liegen die Konzentrationen im Mischwasser als Mischung von Abwasser und Regenwasser niedriger als im Trockenwetterabfluß. Vorsicht ist aber bei den partikulären Feststoffen geboten. Beispielsweise wurde im Mischwasser von Bad-Mergentheim ein Gehalt von 425 mg/l gegenüber 106 mg/l im Trockenabfluß [12] festgestellt. Wenngleich das nur in einem stark ablagerungsbehafteten Netz möglich ist, so zeigt dieses Beispiel wie stark der Mischwasserabfluß im Einzelfall von Kanalsedimenten geprägt sein kann. Würden diese auf eine Filteranlage gelangen, dann wäre das eine Katastrophe, die zum Filterversagen durch Kolmation führen würde. Um das zu vermeiden, muß einer Filteranlage für Mischwasser eine Entschlammungsanlage in Form eines Regenüberlaufbeckens vorgeschaltet werden.

Der nicht absetzbare Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen im Mischwasser beträgt circa 50 mg/l. Da kein Regenüberlaufbecken vollständig entschlammt, liegt der Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen im entlasteten Mischwasser über diesem Wert. Beim auf Normalanforderungen ausgelegten Durchlaufbecken kann von einem Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen im Überlaufwasser eines Klärüberlaufs von ca. 100 mg/l ausgegangen werden. Bei Fangbecken liegt er am Beckenüberlauf erfahrungsgemäß deutlich höher.

Die Abläufe von nach dem Arbeitsblatt ATV-A 131 ausgelegten Klärwerken enthalten hingegen Konzentrationen an abfiltrierbaren Stoffen, die im Mittel lediglich 10 mg/l betragen. Deshalb kommt der Filtration von Mischwasser im Hinblick auf die Gewässergüte ein hoher Stellenwert zu [8]. Die ATV-Arbeitsgruppe „Bedeutung der Abwasserfiltration aus der Sicht der Gewässer“ kommt zu folgendem Schluß; *„Grundsätzlich kann festgestellt werden, daß vielfach bei abwassertechnischer Sanierung der Einleitungen aus Kläranlagen eine Gewässerbelastung durch Feststoffe aus Mischwasserentlastungen wesentlich kritischer für die Gewässerbiozönose beurteilt werden muß als Feststoffausträge aus Kläranlagen mit funktionierender Nachklärung“* [8].

Vorsicht ist bei modifizierten Entwässerungssystemen geboten. Diese sind gekennzeichnet durch das Bemühen, gering verschmutztes Regenwasser abzutrennen. Dadurch wird die an Mischwasserentlastungsstellen ausgetragene Fracht reduziert, andererseits steigt die Konzentration des Entlastungswassers an. Bei der Planung und Auslegung von Filteranlagen muß dieser Effekt berücksichtigt werden.

1.5 Vorgänge im Boden bei der Mischwasserfiltration

Für den Entwurf von Filteranlagen zur Reinigung von Mischwasser sind bodenkundliche Kenntnisse erforderlich. Um den Einstieg in dieses Wissensgebiet zu erleichtern, werden die wichtigsten Vorgänge im Boden kurz beschrieben.

Stoffe werden im gesättigten und ungesättigten Boden in gelöster und partikulärer Form transportiert. Sie unterliegen dabei physikalischen, biologischen und geochemischen Einflußfaktoren. Dabei treten die ablaufenden Mechanismen als Prozeßkombinationen mit komplexen Verflechtungen auf.

1.5.1 Filtration

Mischwasser besteht aus partikulären und gelösten Stoffen. Der partikuläre Anteil des Mischwassers beim CSB, Pges und den Metallen ist groß und macht häufig über 50 % der Gesamtkonzentrationen aus. Der mechanische Filtervorgang zur Abtrennung des partikulären Anteils ist deshalb als wichtiger Teilprozeß anzusehen.

Bei der Filtration werden suspendierte Teilchen, welche die Porenkanäle nicht passieren können, am Weitertransport gehindert. Besteht das Filtermaterial aus Lehmboden oder Sand, spielt sich dieser Prozeß vorwiegend an der Filteroberfläche oder in den obersten fünf Zentimetern der Filterschicht ab. Man spricht dann von Flächenfiltration. Bei einem Filtermaterial aus Kies, dringen hingegen die suspendierten Partikel tief in den Filter ein und sind noch in fünfzig Zentimeter Tiefe zu finden. Der Filterkörper wirkt als Schlamm-speicher. Man spricht dann von Raumfiltration.

Eine durch fortschreitende Verengung der Poren verursachte Selbstdichtung wird als Kolmation bezeichnet. Verstopfungen an der Filteroberfläche nennt man äußere Kolmation. Werden organische und anorganische Partikel bei der Raumfiltration in das Innere des Korngerüsts transportiert und der Porenraum stark verengt, kann das zu innerer Kolmation führen. Beim Mischwasser werden Selbstdichtungsvorgänge durch ein anaerobes Milieu mit eingeschränktem Gasaustausch stark gefördert, weil dann der Abbau organischen partikulären Materials behindert ist. Bei der Mischwasserfiltration kommt deshalb ein Dauerstau über der Filtersohle oder ein permanent volleingestautes Filtermaterial nicht in Frage.

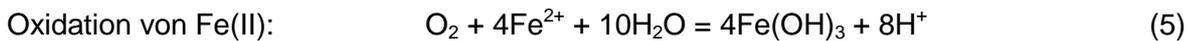
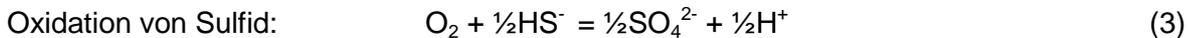
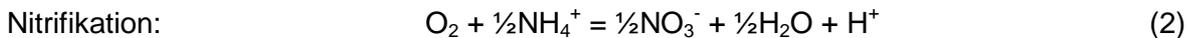
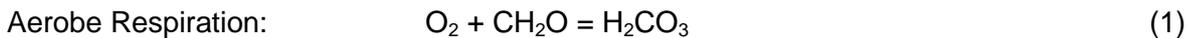
Die Abtrennung der absetzbaren Mischwasserinhaltsstoffe vor der Filtration ist unabdingbar für die Langlebigkeit einer nicht rückspülbaren Filteranlage.

1.5.2 Biochemische Prozesse

Grundvoraussetzung für eine mikrobielle Metabolisierung von Mischwasserinhaltsstoffen in einem Bodenfilter ist der offene Gasaustausch über die Filteroberfläche und ein Drainagesystem. Hierbei kann Sauerstoff in das System eintreten und Gase, insbesondere Kohlensäure, aus dem System entweichen.

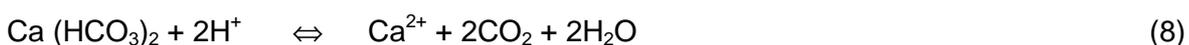
Mikrobielle Umsetzungen liefern beim Abbau organischer Substanzen Spaltprodukte, die teilweise zum Aufbau von Biomasse verwendet werden.

Biologische Reaktionen mit Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel im Boden sind Redoxreaktionen. Sauerstoff ist der wichtigste Elektronenakzeptor. Ist Sauerstoff im Überschuß vorhanden, können unter dem Einfluß mikrobieller Katalyse Elektronendonatoren wie z.B. organische Substanz (CSB), Ammonium, Sulfide, Pyrit, Fe(II)-Verbindungen oxidiert werden [26]:



Die wichtigsten dieser Prozesse sind die aerobe Respiration und die Nitrifikation. Jedoch spielen auch andere Oxidationsvorgänge bei der Mischwasserfiltration eine Rolle. Die Oxidation reduzierter Verbindungen ist, solange der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre gewährleistet wird, nicht limitiert.

Von Bedeutung ist, daß bei zahlreichen dieser Prozesse Protonen H^+ freigesetzt werden, welche die chemischen Eliminationsvorgänge beeinflussen. Entstehen Protonen, dann muß das Puffersystem des Bodens die entstehende Säure abfangen, wenn der pH-Wert nicht abfallen soll. Letzteres muß aber unbedingt vermieden werden, da dies zur Mobilisierung bereits festgelegter Schwermetalle führen und den weiteren Ablauf der mikrobiellen Umsetzungen hemmen würde. Im ungepufferten System wird die Nitrifikation behindert. Die Nitrifikation von Mischwasser ist aus limnologischer Sicht eine der wichtigsten Anforderungen an die Mischwasserbehandlung. Dabei hat die Umsetzung des Kations Ammonium zum Anion Nitrat entscheidenden Einfluß auf das Gleichgewicht der wässrigen Lösung. Aus dem Kation NH_4^+ entsteht eine äquivalente Menge NO_3^- . Zur Wahrung der Elektronenneutralität müssen der Lösung Anionen entzogen werden (z.B. HCO_3^-) bzw. Kationen zugeführt werden (z.B. Ca^{2+}). Das setzt einen ausreichenden Gehalt an Karbonat im Boden voraus (Calcit CaCO_3 oder Magnesit MgCO_3):



Das Absinken des pH-Wertes durch Protonen wird durch die pH-Anhebung beim Auflösen von Karbonaten kompensiert. Der für die Mischwasserfiltration eingesetzte Boden muß daher zur Sicherstellung der Nitrifikation und zur Pufferung weiterer, infolge Redoxvorgängen freigesetzter Protonen, karbonathaltig sein. Karbonate erhöhen ferner die Strukturstabilität bei bindigen Böden.

In der Praxis des Filterbaus läßt sich die Tendenz beobachten, Filteranlagen permanent einzustauen. Dabei lassen sich drei Fälle unterscheiden:

- ein permanenter Dauerstau, bei dem der Wasserspiegel über der Filteroberfläche liegt,
- ein permanenter Volleinstau, bei dem der Wasserspiegel in Höhe der Filteroberkante liegt,
- ein permanenter Teileinstau, bei dem der untere Teil des Filtermaterials eingestaut wird und der biologisch hochaktive obere Teil frei bleibt.

Jeder Einstau stellt eine Belüftungsbarriere dar. Damit wird der Zutritt von Sauerstoff erheblich erschwert und beschnitten. Die Folge ist eine Prozeßumkehr der mikrobiell katalysierten

Redoxreaktionen. Dann können je nach Umfang des Einstaus und dem Ausmaß der Mischwasserbelastung folgende Reaktionen ablaufen [26]:

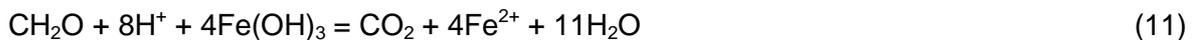
Denitrifikation:



Reduktion von vierwertigem Mangan



Reduktion von dreiwertigem Eisen



Reduktion von Sulfat



Methanfermentation



N₂-Fixierung



Außerdem kann es zu einer Mobilisierung von Metallen kommen, da die Reduktion zu zweiwertigen Metallen die Löslichkeit stark fördert.

Erwünscht ist von diesen Reaktionen lediglich die Denitrifikation des Nitrats. Dabei ist aber zwangsläufig, infolge Sauerstoffmangel, der Kohlenstoffabbau gering (CSB-Anstieg). Im Extremfall des permanenten Dauerstaus werden sowohl der Kohlenstoffabbau als auch die Nitrifikation gehemmt. Dann kann auch keine Denitrifikation stattfinden. Geruchsprobleme kommen bei Mischwasser zusätzlich hinzu. Ein Dauerstau oder permanenter Volleinstau, kommen bei Mischwasserfiltern nicht in Frage. Selbst ein permanenter Teileinstau ist nur bei schwacher Filterbelastung akzeptabel.

1.5.3 Adsorption

Eine Mischwasserbeschickung bringt innerhalb kurzer Zeit große Schmutzfrachten. Die Aufenthaltszeit des Wassers im Boden bei der Durchsickerung, ist vergleichsweise kurz. Innerhalb von wenigen Minuten soll der Boden neben der Filtration Kohlenstoffverbindungen abbauen, Ammonium nitrifizieren sowie nach Möglichkeit gelöste Phosphate und Metalle festhalten. Die Entfernung großer Mengen gelöster Stoffe innerhalb kurzer Zeit ist nur denkbar, wenn das Bodensubstrat über eine hohe Sorptionskapazität verfügt. Bei Sorptionsreaktionen werden gasförmige oder gelöste Stoffe dem Wasser durch Anlagerung an die feste Bodenmatrix entzogen. Vereinfacht ausgedrückt versteht man unter Adsorption die Fähigkeit des Bodens, gelöste Stoffe wie CSB, NH₄⁺, PO₄³⁻, Me⁺ festzuhalten und vorübergehend schnell zu binden. Anschließend werden diese Stoffe in weiteren Prozessen mikrobiell abgebaut, nitrifiziert und fixiert. Diese Reinigungsarbeit muß nicht innerhalb kurzer Zeit während der Mischwasserbeschickung geleistet werden, sondern kann auch bei Trockenwetter aus dem durch Sorption angelegten Vorrat erfolgen.

CSB-Abbau und Nitrifikation sind nur bei ausreichender Sauerstoffzufuhr möglich. Der Sauerstoffgehalt des Mischwassers ist gering. Der Sauerstoffeintrag über Diffusion im Wasser ist minimal, da Sauerstoff im Wasser zehntausendmal langsamer diffundiert als in Luft. Der Sauerstoffeintrag aus der Luft kann während der Mischwasserbeschickung infolge Einstau tagelang unterbunden sein. Ohne Sorption würde der aerobe mikrobielle Kohlenstoffabbau und die Nitrifikation bei längerer Mischwasserbeschickung, zum Erliegen kommen. Bei einem Boden mit geringer Sorptionskapazität, beispielsweise Kies, ist das der Fall. Für die Mischwasserbehandlung geeignete Böden wie Sande und Lehmböden, speichern dagegen durch Sorption die organischen Verbindungen und Ammonium, um sie nach Sauerstoffzufuhr und Wiederbelüftung abzubauen oder umzuwandeln.

Es gibt zwei Arten der Sorption:

Die biotische Sorption bildet sich erst im Boden durch mikrobielle Tätigkeit. In der belebten Bodenzone führt die Zufuhr organischen Materials zu einer Vermehrung der Bodenorganismen. Die Zone mit der höchsten biologischen Aktivität liegt im der Atmosphäre zugewandten Bereich des Filters, wo die Sauerstoffversorgung und der Gasaustausch am intensivsten sind. In der mikrobiellen Hauptzone bilden sich die stärksten Sorptionskräfte aus. Das Maß dieser biogenen Sorption ist bei Sanden so groß, daß bei nicht zu niedriger Temperatur und nicht zu großer hydraulischer Belastung CSB und Ammonium ausreichend gespeichert werden können.

Die abiotische Sorptionskapazität beruht auf dem Chemismus eines Bodens (Eisen-, Aluminium-, Kalkgehalt) und seiner Struktur (Tonmineralien). Böden die -zusätzlich zur mikrobiellen biotischen Sorptionskapazität- über eine hohe abiotische Sorptionsfähigkeit verfügen, gelten als besonders sorptionsstark. Typische Vertreter dafür sind Lehmböden. Ein bekanntes Maß für die abiotische Sorption ist die Kationenaustauschkapazität KAK. Diese beruht auf einem Ionenaustausch von Kationen (z.B. NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Me^+), wobei die Adsorption von Kationen mit der Desorption einer äquivalenten Menge anderer Kationen verbunden ist. Von besonderer Bedeutung ist der Kationenaustausch für das Kation Ammonium. Dieses wird an den Sorptionsplätzen angelagert, wobei z.B. Natrium verdrängt wird. Anschließend wird es mikrobiell zum Anion Nitrat oxidiert. Dabei wird Platz geschaffen für nachrückende Ammoniumionen. Aus diesem an den Austauschplätzen angelegten Vorrat kann ständig, auch bei Trockenwetter nitrifiziert werden.

Ein weiterer Sorptionsvorgang, der bei der Mischwasserfiltration interessiert, ist die Sorption des Anions Phosphat PO_4^{3-} . Phosphor kann im Boden nicht mikrobiell abgebaut werden, sondern lediglich an die Bodenmatrix durch Anionenaustausch angelagert werden, um dann eventuell in stabilere Bindungsformen wie z.B. FePO_4 , AlPO_4 oder $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ übergeführt zu werden. Die spezifische Anionensorption beruht auf der starken Affinität von Phosphat zu in der Oberfläche von Oxiden, Hydroxiden und Tonmineralien lokalisierten Eisen- und Aluminiumatomen. Ein eisenreicher Boden bringt die besten Voraussetzungen mit um Phosphat zu fixieren. Allerdings bestimmen noch eine Reihe weiterer Faktoren das Maß der Phosphatsorption. Je niedrigerer das Verhältnis von pflanzenverfügbarem Phosphat zum Gesamtphosphat ist, umso besser ist die Phosphatsorption. Karbonatfreie Böden mit niedrigem pH-Wert zeigen eine deutlich höhere Phosphatsorption als karbonathaltige Böden mit hohem pH-Wert. Was für die Nitrifikation günstig ist, schadet der Phosphatsorption. Hohe NH_4^+ Sorption und hohe Phosphatsorption stehen deshalb bezüglich des Boden pH-Wertes im Widerspruch. Die elektrostatische Sorption von Phosphat bindet dieses aber nicht auf Dauer. Eine langjährige Bindung setzt eine Fixierung durch Calcium oder Eisen voraus.

1.6 Bodensubstrate bei der Mischwasserfiltration

Für die Mischwasserreinigung kommen drei grundsätzlich verschiedene Bodenarten in Frage

- Lehm Boden T + U + S
- Sand S
- Kies G

Diese Begriffe werden keineswegs immer korrekt den einschlägigen Normen entsprechend angewendet. So kommt es vor, daß beispielsweise ein Kompost als mineralischer Mutterboden oder ein Kies als Sand bezeichnet wird. Auch mit dem Begriff Boden wird recht locker umgegangen und beispielsweise eine Auflage von Rindenmulch als Oberboden bezeichnet. In Tabelle 1 werden die korrekten Begriffe nach DIN 4022 „Benennen und Beschreiben von Boden und Fels“ angeführt.

Art	Korngröße mm
Kies G	2 – 63
Grobkies gG	20 - 63
Mittelkies mG	6,3 – 20
Feinkies fG	2 - 6,3
Sand S	0,06 – 2
Grobsand gS	0,6 – 2
Mittelsand mS	0,2 - 0,6
Feinsand fG	0,06 - 0,2
Schluff U	0,002 - 0,06
Grobschluff gU	0,02 - 0,06
Mittelschluff mU	0,006 - 0,02
Feinschluff fU	0,002 – 0,006
Ton	Unter 0,002

Tabelle 1: Korngrößenbereiche nach DIN 4022, Teil 1

1.6.1 Lehm Boden

Ein Lehm Boden mit krümeliger Struktur ist ein mineralischer Boden, dessen Korngrößen den Bereich Ton/Schluff/Sand (T + U + S) umfassen und der ein Mindestmaß an Humus enthält. Tabelle 2 enthält beispielhaft die Kornzusammensetzung und den Chemismus einiger Lehm Böden, die erfolgreich bei der Mischwasserfiltration eingesetzt wurden.

	T %	U %	S %	Fe %	CaCO ₃ %	pH -	Humus %	C/N -	KAK meq/100g
Boden 1	21,9	11,3	13,3	1,26	2,7	7,1	4,4	10,2	21,8
Boden 2	48,1	36,4	15,5	2,92	2,3	7,2	4,9	10,2	32
Boden 3	37,2	37,5	25,3	1,82	3,9	7,2	2,9	10,7	24,6

Tabelle 2: Kornverteilung und Chemismus von Lehmböden bei der Mischwasserfiltration.

- Die Kationenaustauschkapazität KAK beschreibt das abiotische Sorptionsvermögen eines Bodens. Ein Boden mit einem KAK-Wert von unter 5 meq/100g wird als sorptionschwach angesehen. Ein KAK-Wert von 30 meq/100g steht für einen extrem sorptionsstarken Boden. Angegeben ist der Wert der sogenannten potentiellen KAK, das ist ein Maximalwert. Die tatsächlich vorhandene KAK ist vom pH-Wert des Bodens abhängig und ist bei saueren Böden deutlich geringer als die potentielle KAK.
- pH-Werte von unter 6, wie sie beispielsweise für Waldböden typisch sind, müssen vermieden werden. Ein saurer pH-Wert ist zwar für die Phosphor-Sorption günstig, wirkt sich aber negativ auf die Nitrifikation und den Rückhalt gelöster Metalle aus.
- Der Gehalt des Bodens an Calcit dient zur Pufferung der bei den Redoxreaktionen frei werdenden Protonen. Ein hoher Calcit-Gehalt wirkt sich wie ein hoher KAK-Wert positiv auf die Nitrifikation aus.
- Ein hoher Eisengehalt dient der Sorption von Phosphat.
- Der Tongehalt T verleiht einem Boden Sorptionskraft. Er soll mindestens 10 % betragen. Optimal sind 15 % - 20 %. Bei Tongehalten über 25 % steigt das Risiko einer Verdichtung beim Einbau stark an. Böden mit hohen Tongehalten sollen nur von erfahrenen Bodenkundlern eingesetzt werden. Im Sinne der Bodenmechanik sind Böden mit hohem Tongehalt nicht ausreichend durchlässig. Erst die biologische Aktivität in Verbindung mit einer krümeligen Struktur und lockerer Lagerungsdichte erzeugt die erforderliche hydraulische Durchlässigkeit.
- Humus im Sinne der Bodenkunde ist hochmolekulare organische Substanz, die bei der Mischwasserfiltration nur wenige Massenprozent betragen darf. Humus verleiht einem Lehmboden eine lockere Struktur und Strukturstabilität. Ein strukturarmer Boden wäre für die Mischwasserfiltration ungeeignet. Eine krümelige Struktur erhöht hingegen die Wasserdurchlässigkeit und das Sorptionsvermögen für gelöste Metalle. Der Humusgehalt soll mindestens 2 % betragen, aber den Wert von 10 % nicht überschreiten. Optimal sind Werte von 3 % - 5 %.
- Das C/N-Verhältnis ist ein Maß für die Stabilität der organischen Substanz. Ein enges Kohlenstoff-Stickstoffverhältnis von 10 stellt sicher, daß es nicht durch Humusabbau zu einer unerwünschten CSB-Freisetzung aus dem Boden kommt.
- Kompost und Rindenmulch sind als Ersatz für einen Lehmboden völlig ungeeignet.
- Vom krümeligen Lehmböden sind schluffiger Sand und künstliche Mischungen aus Sand und Oberboden zu unterscheiden. Mischungen aus Sand und Oberboden verhalten sich anders als Lehmböden.

Lehmböden haben eine Reihe vorteilhafter Eigenschaften, welche Sande und Kies nicht besitzen.

- Zu nennen ist zunächst das hohe Wasserspeichervermögen, das sich bei einer Bepflanzung mit Schilf bei langen Trockenperioden positiv auswirkt.
- Ein weiterer Vorteil der Lehmböden ist die Unempfindlichkeit der Reinigungsleistung gegenüber niedrigen Temperaturen. In der Literatur wird von Sandböden übereinstimmend berichtet, daß mit sinkenden Temperaturen die CSB- und Ammonium-Konzentrationen im Ablauf von Filtern ansteigen, da die mikrobielle Tätigkeit zurückgeht. Das konnte bei mit Mischwasser belasteten Lehmböden nicht beobachtet werden. Der Grund dafür liegt in der, im Vergleich zu Sandfiltern, ungleich höheren Sorptionskapazität der Lehmböden. Diese ermöglicht extreme Streßsituationen auch in Fällen zu meistern, in denen ein Sandboden infolge erschöpfter Sorption und erlahmter mikrobieller Tätigkeit längst CSB und Ammonium ausspuckt. Lehmböden vermögen hingegen eine ganzjährige Nitrifikation zu gewährleisten.
- Lehmböden besitzen im Vergleich zu Sand ein wesentlich stärkeres Sorptionsvermögen gegenüber Phosphor. Zwischen der Nitrifikation und der Phosphatfixierung in Filteranlagen besteht ein grundlegender Unterschied. Zwar beruhen beide auf der Sorptionsfähigkeit der Bodensubstrate. Der Ammoniumabbau ist ein regenerativer Vorgang, der sich zeitlich nicht erschöpft. Der Kationenspeicher wird immer wieder von neuem mit Ammonium aufgefüllt und nach der Bildung von Nitrat entleert. Die Phosphatsorption infolge Anionenaustausch ist hingegen ein endlicher Vorgang, der endet, wenn alle Sorptionsplätze für Phosphor belegt sind. Das ist bei mit Mischwasser beschickten, eisenarmen Sandfiltern bereits nach wenigen Jahren der Fall, sofern nicht spezielle Meliorationsmaßnahmen mit Eisen oder Aluminium ergriffen wurden. Ein Lehmboden mit seiner hohen Sorptionskapazität und seinem vergleichsweise hohen Eisengehalt vermag hingegen ungleich länger Phosphor zu sorbieren.

Diesen Stärken der Lehmböden steht aber hinsichtlich der hydraulischen Leitfähigkeit eine Schwachstelle gegenüber. Bei der Mischwasserfiltration ist eine hydraulische Leitfähigkeit in der ungesättigten Bodenzone von mindestens 10^{-5} m/s erforderlich. Um das zu erreichen, benötigt ein Lehmboden eine Krümelstruktur mit einer Lagerungsdichte von möglichst 1,1 kg/l. Dazu bedarf es eines äußerst sorgfältigen Einbaus. Darüber hinaus wird die dauerhafte Durchlässigkeit eines Lehmbodens von Makroporen bestimmt. Das sind Grobporen, die präferentielle Fließbahnen des Wassers im Boden darstellen. Sie entstehen u.a. durch die Tätigkeit der Bodenfauna, durch Pflanzenwurzeln, durch Trockenriße und durch Bodenfrost. Biologisch aktive Böden können bis zu 100 Kanäle je m^2 enthalten. Makroporenfluß entsteht, wenn die Poren kontinuierlich durch den Bodenkörper laufen. Ohne Makroporenfluß haben Lehmböden mit den in Tabelle 2 angegebenen Tongehalten nicht die erforderliche hydraulische Leitfähigkeit.

Für den Planer einer Filteranlage mit Lehmboden ergibt sich das Problem der korrekten Prognostizierung der sich einstellenden hydraulischen Leitfähigkeit. Ein Lehmboden kann im bodenmechanischen Labor auf seinen k_f -Wert im wassergesättigten Zustand untersucht werden. Dieser Wert weicht jedoch von der sich unter der Wirkung des Makroporenflusses einstellenden Sickerleistung ab. Die korrekte Prognose erfordert große Erfahrung, die keineswegs überall vorhanden ist.

Um Kurzschlüsse über Makroporenfluß zu vermeiden erfordern reine Lehmböden eine Schichtstärke von 0,75 m. Die Lehmschicht kann nicht direkt auf dem Drainagekies aufgebracht werden. Die Filterregeln erfordern die Zwischenschaltung einer 0,2 m starken Schicht Sand 0/2. Lehmbodenfilter weisen die Schichtenfolge Lehm-Sand-Drainagekies auf.

Dafür ist eine Dicke von $0,75 + 0,2 + 0,25 = 1,2$ m erforderlich. Die Auswahl eines Lehmbodens wird vom planenden Ingenieurbüro vor der Ausschreibung der Baumaßnahme, unter Einschaltung eines Bodenkundlers, anhand der beschriebenen Kenngrößen getroffen. Dabei ist darauf zu achten, daß Lehmboden erfahrungsgemäß nur in begrenzter Menge in homogener Qualität verfügbar ist. Unzulässig ist es, lediglich den Einbau von „Mutterboden“ oder „Oberboden“ auszuschreiben und die Auswahl dem Gutdünken der Baufirma zu überlassen. Darüber hinaus muß das planende Büro der Baufirma klare Vorgaben zum Einbau des Lehmbodens machen, um die maximal zulässige Lagerungsdichte des Bodens zu unterschreiten.

1.6.2 Sandboden

Sand ist in der Regel in einem Sand-/Kieswerk ungleich leichter zu beschaffen, als ein Lehmboden auf einer Bodenbörse. Auf dem Gebiet der Reinigung von Abwasser durch Filtration wird Sand seit über hundert Jahren angewendet. Die ATV hat im Entwurf für das Arbeitsblatt ATV-A 262 die Empfehlungen des Massachusetts State Board of Health übernommen und für Pflanzenbeete ein Mittelsand/Grobsand/Feinkies-Gemisch empfohlen [7]. Es wäre naheliegend, diese Regeln auch bei der Filtration von Mischwasser anzuwenden.

Nach den Erkenntnissen der Gruppe AGB kann damit aber keine optimale Reinigung von Mischwasser erreicht werden. Kies erzielt keine nennenswerte Reinigung. Auch Grobsand reinigt Mischwasser nur in unbefriedigendem Umfang, ist aber für die hydraulische Leitfähigkeit erforderlich. Die Gruppe AGB empfiehlt den Einsatz von gewaschenem Bodenfiltersand 0/2 (kein gebrochenes Material), entsprechend der im Bild 1 enthaltenen Sieblinie. Moderne Werke sind in der Lage Sande zu liefern, die dieser Sieblinie entsprechen. Sand mit einem gegenüber Bild 1 zu hohem Grobsandanteil soll vermieden werden, weil sich dann der biologische Abbau und die Nitrifikation verschlechtern. Außerdem sinkt die Feldkapazität. Ein zu hoher Feinsandanteil wirkt sich, ebenso wie die Verwendung von gebrochenem scharfkantigen Sand, negativ auf die hydraulische Durchlässigkeit aus. Die dargestellte Sieblinie stellt dabei einen anzustrebenden Idealzustand dar. Abweichungen davon sind, ohne Abstriche bei der Reinigungsleistung zu machen, nur in engen Grenzen tolerierbar. So muß der Anteil der Ton- und Schlufffraktion unter 5 % liegen. Der Anteil der Feinkiesfraktion 2 – 4 mm darf maximal 5 % betragen.

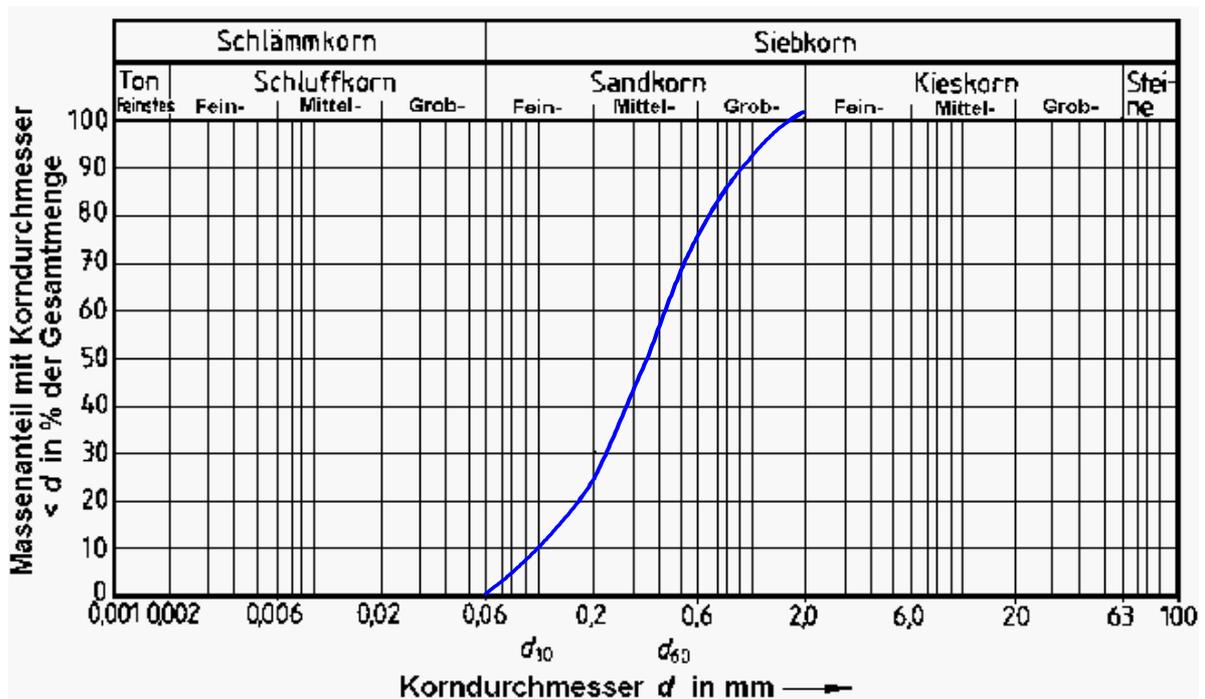


Bild 1: Empfohlene Kornverteilungskurve von Sand für die Mischwasserreinigung

Bodenfiltersand 0/2 zeigt in einigen Punkten ein anderes Verhalten als Lehmboden bei der Filtration von Mischwasser:

- Im Gegensatz zu den Lehmböden, die rasch biologisch wirksam sind, benötigt ein Sandfilter eine längere Einarbeitungszeit. Diese kann über ein halbes Jahr betragen. Erst dann kann ein gesicherter CSB-Abbau mit Nitrifikation erwartet werden. Aus diesem Grund sind Untersuchungen über die Ablaufbeschaffenheit kurz nach der Inbetriebnahme nicht repräsentativ.
- Beim Sandboden muß bei fallenden Temperaturen mit einem Rückgang des CSB-Abbaus und der Nitrifikation gerechnet werden. Eine ganzjährige Nitrifikation wie bei den Lehmböden ist nicht gesichert.
- Der Eisengehalt von Bodenfiltersand 0/2 ist in der Regel gering und liegt unter 0,5 %. Eine nachhaltige langfristige Fixierung von gelösten Phosphor kann von eisenarmen Sanden nicht erwartet werden. Sie nimmt mit zunehmender Betriebsdauer laufend ab und wird nach einigen Jahren bedeutungslos.
- Stark eisenhaltige Sande lassen eine bessere Entfernung von gelösten Phosphor erwarten.
- Im Gegensatz zu Lehmböden können Sande melioriert werden um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. In erster Linie kommt die Zugabe von Fällmitteln in Frage. Für eine nachhaltige Fixierung von gelöstem Phosphor ist bei eisenarmen Sanden eine Meliorisation mit Eisen oder Aluminium erforderlich.
- Sande besitzen keinen ausgeprägten Makroporenfluß. Das wirkt sich positiv bei der Entfernung von Keimen und Bakterien aus.

- Die Feldkapazität von Sand ist im Vergleich von Lehmböden gering.
- Der Humusgehalt von Bodenfiltersand 0/2 ist gering. Entsprechend eng ist das Kohlenstoff-Stickstoffverhältnis.
- Die Kationenaustauschkapazität von Sanden ist im Vergleich zu Lehmböden gering und liegt unter 5 meq/100g. Sandböden verfügen im wesentlichen nur über die biotische Sorptionskapazität, die durch mikrobielle Tätigkeit aufgebaut wird.
- Die Denitrifikationsleistung ist bei den Sandböden wie bei den Lehmböden gering.

Hinsichtlich ihres Chemismus müssen Sande unterschieden werden in karbonatfreie Quarzsande und karbonathaltige Flußsande (z.B. Rheinsand).

- Karbonatfreie Quarzsande besitzen einen leicht sauren Charakter. Langfristig ist nur eine bescheidene Nitrifikation des Ammoniums zu erreichen. Allerdings ist nicht in allen Gewässern Ammonium eine kritische Größe. Saure Sande mit pH-Werten unter 6 sind in jedem Fall zu meiden, da mit dem Absinken des pH-Wertes das Risiko einer Metallmobilisierung anwächst.
- Karbonathaltige Sande mit pH-Werten über 7 erzielen neben dem CSB-Abbau auch eine gute Nitrifikation.

Sandfilter können einfacher aufgebaut werden als Lehmbodenfilter, da nur die Schichtenfolge Sand-Drainagekies erforderlich ist. Für einen Bodenfilter ist eine Schichtdicke von $0,75 + 0,25 = 1,0$ m im Endzustand nach Abschluß der Setzung erforderlich. Die Setzung bei Sand liegt bei ca. 15 % und ist bei Festlegung der Schütthöhen zu berücksichtigen.

Die Baukosten von Sandfilter sind günstiger als die von Lehmbodenfilter. Außerdem sind die Anforderungen an den Planer und die Baufirma beim Sandfilter deutlich geringer.

1.6.3 Kies

Kies und Kiessand werden als Filtermaterial für mechanische Filter eingesetzt. Die Entfernung gelöster Stoffe wird dabei nicht angestrebt. Ziel ist die Abtrennung der partikulären Fraktion.

In Baden-Württemberg wurden auch an mit Mischwasser beschickten Kiesfiltern Untersuchungen zum Reinigungsverhalten durchgeführt. Die Filter waren mit dem Ziel der Feststoffabtrennung gebaut worden, um nachgeschaltete Versickerungsanlagen vor Kolmation zu bewahren. Gefiltert wurde über Mittelkies und Grobkies. Das Ergebnis der Untersuchungen lautete: *Über die Abtrennung von Feststoffen hinaus erfolgt kein nennenswerter biologischer Abbau gelöster Stoffe.*

Kiesfilter arbeiten im Gegensatz zu Sandfiltern und Lehmbodenfiltern mit Raumfiltration. Die abgetrennten Feststoffe dringen tief in den Filterkörper ein. Die Invasionstiefe nimmt mit wachsender Betriebsdauer zu. Das Filtersubstrat wirkt als Schlamm-speicher. Nachdem die Invasion etwa einen halben Meter vorgedrungen ist, muß der Filter außer Betrieb genommen werden, um den Austrag der gespeicherten Stoffe über die Drainage zu verhindern. Die anschließende Erneuerung des Filtermaterials ist kostenintensiv. Dies muß bei den Kostenbetrachtungen berücksichtigt werden, zumal die Planer von Kies- und Kiessandfiltern eigentlich eine Kosteneinsparung gegenüber den Sand- und Lehmbodenfiltern anstreben.

Kiese und Kiessande haben eine hohe Durchlässigkeit. Die Vorstellung beruht auf der folgenden in der Bodenmechanik weit verbreiteten Hazen-Beziehung:

$$k_f = 0,0116 d_{10}^2 \text{ m/s} \quad (15)$$

$$k_f \approx \frac{d_{10}^2}{100} \text{ m/s} \quad (16)$$

mit d_{10} in mm.

Die Hazen-Formel wurde aus Mittelsanden hergeleitet und gilt für den wassergesättigten Boden. Die Hazen-Formel ergibt hohe Durchlässigkeitsbeiwerte und einen hohen Filterdurchfluß. Je größer der Filterdurchsatz angesetzt wird, um so kleiner werden der Platzbedarf, das Retentionsvolumen und die Kosten. Dabei wird übersehen, daß ein Kiesfilter nur in der Anfangszeit eine hohe Durchlässigkeit besitzt. Durch den Filtrationsvorgang verwandelt sich der Kies rasch in ein Kies-Schluff-Gemisch. Der Vorgang der allmählichen Verschleiffung ist zwangsläufig mit einem starken Rückgang der spezifischen Sickerleistung verbunden, der Hazen-Wert wird zur Makulatur.

Infiltrationsmessungen an jahrelang mit Mischwasser beschickten Kiesfiltern bestätigten, daß die hydraulische Durchlässigkeit nicht von dem Kornaufbau des Kiesmaterials, sondern durch die Sediment- und Invasionschicht bestimmt wird. Die Durchlässigkeit geht unabhängig vom Ausgangszustand auf Werte von gut strukturierten Lehmböden zurück. Sie kann um Zehnerpotenzen unterhalb des theoretischen Hazen-Wertes liegen. Der Vorgang einer allmählichen Bodenbildung in Kiesfiltern hat auch eine positive Seite. Aus dem anfänglich rein mechanischen Filter mit hoher Durchlässigkeit, wird allmählich ein biologisch wirkender Bodenfilter mit geringerer Durchlässigkeit. Dieser positive Aspekt erfolgt allerdings nicht gleichmäßig über die Filteroberfläche. Er ist im Zulaufbereich aufgrund der höheren Beschickung besonders stark ausgeprägt. Die durch Invasion allmählich entstehende Umwandlung vom mechanischen Filter zum biologisch arbeitenden Bodenfilter ist deshalb inhomogen und ungleichmäßig. Suboptimaler Kornaufbau, wie er für Kies typisch ist, eignet sich nicht für die Fälle, in denen ein guter biologischer Abbau gelöster Stoffe angestrebt wird.

Kiessande haben sich bei der Filtration von stetig anfallenden Abwasser gut bewährt [21]. Auch Kiese können quasi kontinuierlich anfallendes Abwasser ausreichend reinigen [26]. Bei der Filtration von diskontinuierlich anfallendem Mischwasser stellen sie jedoch nicht das wassergütewirtschaftliche Optimum dar. Sie sollen nur eingesetzt werden, wenn die biologische Wirkung von nachgeordneter Bedeutung ist.

1.7 Pflanzen bei der Mischwasserfiltration

Pflanzen sollen in erster Linie den Filter vor Kolmation schützen. Das zur Zeit verfügbare Grundlagenwissen reicht nicht aus, um sicher vorherzusagen, wann ein Filter kolmatiert. Nach Beobachtung der Gruppe AGB genügt auf einem unbepflanzten Filter bereits eine fünf Millimeter starke Sedimentschicht, um die Infiltrationsleistung extrem abzumindern. Das Risiko einer Kolmation ist bei unbepflanzten Filtern wesentlich größer als bei bepflanzten Filtern. Daneben werden den Pflanzen eine Vielzahl weiterer positiver Eigenschaften zugeschrieben: Eintrag von Sauerstoff, Entzug von Stickstoff, Phosphor und Metallen sowie eine hohe Verdunstungsrate. Diese Wirkungen sind jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Es gibt Vorschläge für die unterschiedlichsten Pflanzen:

- Rollrasen
- Gras

- Schwertlilien
- Rohrkolben
- Wasserschwaden
- Binsen
- Schilf.

Erfolgt keine Bepflanzung so kommt es entweder zur Kolmation oder es siedeln sich im Laufe der natürliche Sukzession Unkräuter, Brennesseln und Gräser an.

Für die unterschiedlichen Pflanzen können folgende Hinweise gegeben werden:

- Gras verträgt infolge Sauerstoffmangel und Behinderung der Photosynthese nur kurze Einstaudauern (maximal drei Tage). Wird der Filter regelmäßig längere Zeit eingestaut, dann kann sich Gras nicht auf Dauer behaupten. Ebenso ist Gras empfindlich gegenüber größeren Überlagerungen durch Sedimente und damit wird der Filter anfällig gegen Kolmation.
- Mit Schwertlilien, Rohrkolben, Wasserschwaden und Binsen wurden wiederholt Versuche an Pflanzenbeeten durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß sie der Konkurrenz von Schilf nicht standhalten. Außerdem sind diese Pflanzen aufgrund ihres starken Biomassenzuwachses und der damit verbundenen zusätzlichen Filterbelastung ungeeignet.
- Schilf ist unempfindlich gegen Überdüngung. Die für den Sproßtrieb von Schilf erforderliche Temperatur liegt über 6°C. Schilf beginnt daher erst Anfang Mai oberirdisch auszutreiben und stirbt im Oktober ab. Setzlinge werden von Dielen aus gepflanzt. Möglich sind auch Rhizompflanzungen, das Ausbringen von Schilfbällen und von Schilfmatten. Setzlinge entwickeln erst im dritten Jahr einen flächendeckenden Bewuchs. Die Filterfläche ist daher in den ersten Jahren besonders durch Verschlammung und Invasion gefährdet. Schilfmatten erzielen demgegenüber in deutlich kürzerer Zeit einen dichten Bewuchs. Die Filteranlage kann früher in Betrieb genommen werden als bei Einsatz von Setzlingen. Allerdings können bezüglich Halmdichte, -länge und -alter große Unterschiede bestehen. Eine Qualitätsbeschreibung im Rahmen der Ausschreibung und eine Qualitätsprüfung durch die Bauleitung vor der Verlegung ist erforderlich.

Im ersten Jahr der Pflanzung benötigt Schilf als Starthilfe reichlich Wasser und Nährstoffe. Durch einen zeitweiligen Überstau wird das Unkraut unterdrückt. Geerntet wird das Schilf nicht. Durch das Absterben der oberirdischen Schilfteile im Herbst, bildet sich auf der Filteroberfläche eine Streuschicht. Diese ist biologisch aktiv, wirkt als Wärmedämmung und stellt organische Sorptionsflächen bereit. Sie verhindert die Bildung einer geschlossenen Schlammschicht. Wird das Mischwasser in der ersten Stufe ausreichend von absetzbaren Stoffen befreit und ist der Filter entsprechend bemessen, so kann bei einer Schilfbepflanzung die Ausbildung einer Kolmationsschicht ausgeschlossen werden.

Schilf stellt bei der Eingriffs-Ausgleichsregelung nach § 8a Bundesnaturschutzgesetz ein Positiv-Potential dar und erfreut sich deshalb bei Naturschutzstellen einer hohen Wertschätzung.

Als Beispiel sei die im Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Hessen veröffentlichte Ausgleichsabgabenverordnung vom 09.02.1995 angeführt. Dort werden in einer Werteliste folgende Wertepunkte vergeben:

Art der Fläche	Punkte/m ²
Rasenpflaster	7
Grünanlagen	14
Extensiv begrünte Dächer	19
Schilf	53

Ein Quadratmeter mit Schilf bepflanzte Filterfläche wird fast dreimal so hoch bewertet wie ein Quadratmeter Gründach und fast viermal so hoch bewertet wie ein Quadratmeter Grünfläche. Es hat sich auch gezeigt, daß schilfbepflanzte Filter, im Gegensatz zu konventionelle Lösungen, selbst in Natur- und Landschaftsschutzgebieten zugelassen wurden.

Aus einer Schilfbepflanzung entwickelt sich keine Monokultur. Das entstehende Artengemisch richtet sich nach der Boden- und Mischwasserbeschaffenheit. Beteiligt sind Brennesseln und die Zaunwinde, die als Schmetterlingsnahrung eine Rolle spielen.

Es gibt Beispiele, wo durch den Einsatz eines mit Schilf bepflanzten Bodenfilters, in Kombination mit Grünflächen und Grünpflastern, zusätzliche Ausgleichsmaßnahmen für ein ganzes Neubaugebiet vermieden werden konnten. Dieser Aspekt spielt bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen eine wichtige Rolle.

Unter den Ingenieuren ist die Zahl der Gegner eines Schilfbewuchses groß. Sie propagieren in der Regel den unbepflanzten Filter mit natürlicher Sukzession. Dabei sind die Kosten einer Schilfbepflanzung relativ gering. In Anbetracht der Umstände, daß Schilf ein sicheres Mittel gegen Kolmation darstellt, die Durchlässigkeit des Systems trotz Sedimentauflage erhöht und im Rahmen der Eingriffs- Ausgleichsregelung erhebliche Kostenvorteile bringen, kann ist die ablehnende Haltung der Schilfgegner aus Sicht der AGB nicht gerechtfertigt.

1.8 Anordnung von Bodenfilteranlagen im Mischsystem

Eine Retentionsbodenfilteranlage ist immer eine zweistufige Anlage. Die erste Stufe besteht aus einem Regenüberlaufbecken (DB, FB, SKO, SKU) oder einem Regenüberlauf (RÜ). Die zweite Stufe bildet der eigentliche Bodenfilter mit folgenden möglichen Elementen:

- Filterfläche (Lehmboden, Sandboden, Kombination Lehmboden/Sandboden) mit Drainage, Abdichtung und Bepflanzung
- Retentionsraum entweder über dem Filter angeordnet (RBF) oder dem Filter vorgeschaltet (BFvR)
- Überlauf des Retentionsraumes
- Drosselorgan für den Drainageabfluß aus dem Filter.

Das vorgeschaltete Regenüberlaufbecken sorgt für eine intermittierende Beschickung und hält absetzbare Stoffe weitgehend vom Filter fern.

Im Filter erfolgt die mechanisch-biologische Reinigung des aus dem Regenüberlaufbecken (RÜB) entlasteten Mischwassers. Das Filtermaterial und die Filterschichtstärke richten sich nach den Reinigungszielen. Der Retentionsraum sorgt für die Zwischenspeicherung des zu filternden Mischwassers. Beim Retentionsbodenfilter (RBF) ist der Speicherraum über der Filterfläche angeordnet. Beim Bodenfilter mit vorgeschalteter Retention (BFvR) ist der Speicherraum zwischen dem Regenüberlaufbecken und der Filterfläche angeordnet.

Das nicht zu filternde Mischwasser wird durch einen Überlauf aus dem Retentionsraum direkt ins Gewässer geleitet.

Ein Drosselorgan begrenzt den Filterdurchsatz und damit die Filtergeschwindigkeit. Damit wird die Aufenthaltszeit des Mischwassers im Filtersubstrat eingestellt und die jährliche Filterbelastung auf das zulässige Maß begrenzt. Die nachfolgenden Bilder 2, 3, 4 und 5 zeigen im Lageplan verschiedene Ausführungsvarianten von Retentionsbodenfiltern.

Die Abtrennung von absetzbaren Stoffen vor der Filterung erfolgt besonders effizient mit Durchlaufbecken (DB). Bild 2 stellt einen Retentionsbodenfilter (RBF) mit vorgeschaltetem Durchlaufbecken dar. Sowohl der Klärüberlauf (KÜ) als auch der Beckenüberlauf (BÜ) werden dem Retentionsraum zugeleitet. Damit wird im Hinblick auf hydrobiologischen Streß und Erosion im Gewässer eine maximale Dämpfung des Entlastungsabflusses erreicht. Die hohen Zuflußspitzen erfordern eine sorgfältige Umwandlung der Zulaufenergie um im Einlaufbereich des Filters Erosion mit Kolkbildung und ein Umlegen von Pflanzenbewuchs zu vermeiden.

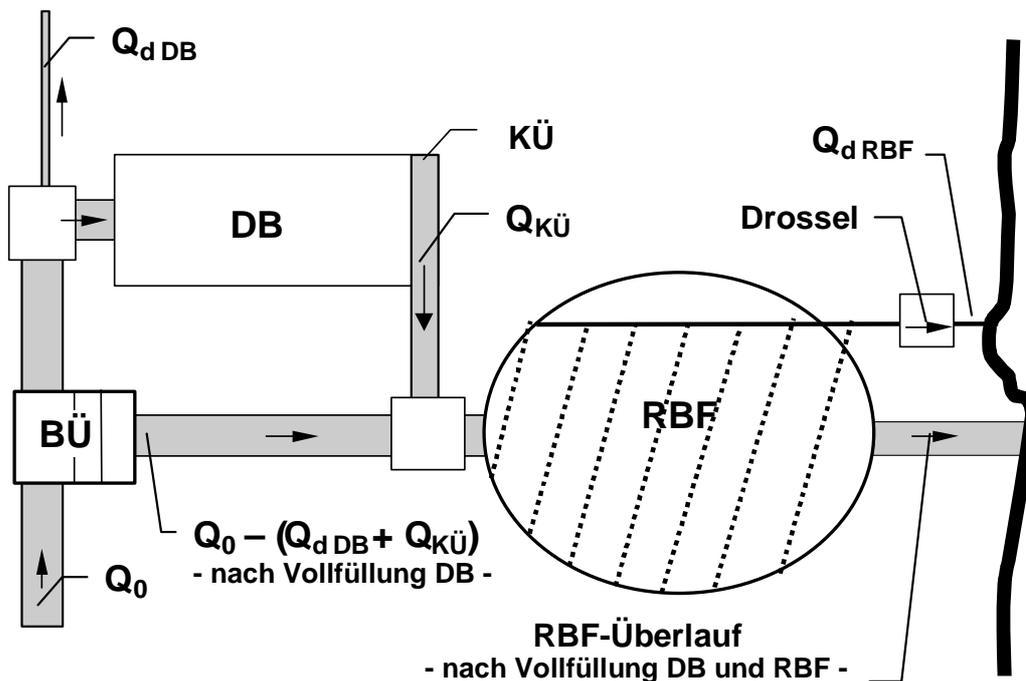


Bild 2: Durchlaufbecken mit nachgeschaltetem Retentionsbodenfilter. Klärüberlauf und Beckenüberlauf werden in den RBF geleitet.

Bild 3 stellt ebenfalls einen Retentionsbodenfilter (RBF) mit vorgeschaltetem Durchlaufbecken (DB) dar. In die Filteranlage wird lediglich der Klärüberlauf (KÜ) geleitet. Das vereinfacht die Einlaufgestaltung in die Filteranlage. Allerdings wird keine maximale Dämpfung des ins Gewässer eingeleiteten Volumenstroms erreicht. Die Anordnung kommt z.B. zur Anwendung, wenn vor dem Durchlaufbecken ein Pumpwerk angeordnet werden muß.

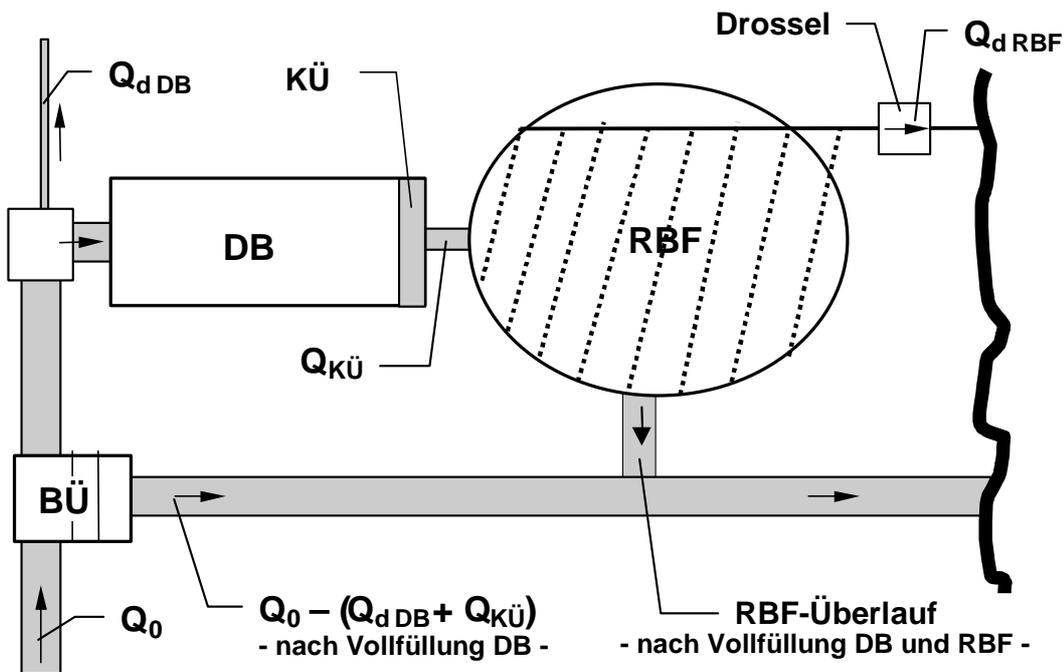


Bild 3: Durchlaufbecken mit nachgeschaltetem Retentionsbodenfilter. Nur der Klärüberlauf wird in den RBF geleitet.

In Bild 4 ist ein Retentionsbodenfilter (RBF) mit vorgeschaltetem Fangbecken (FB) dargestellt. Der Feststoffaustrag, insbesondere der Grobstoffaustrag, ist bei Fangbecken erfahrungsgemäß größer als bei Durchlaufbecken. Das führt zu erhöhter Sedimentbildung im Einlaufbereich der Filteranlage.

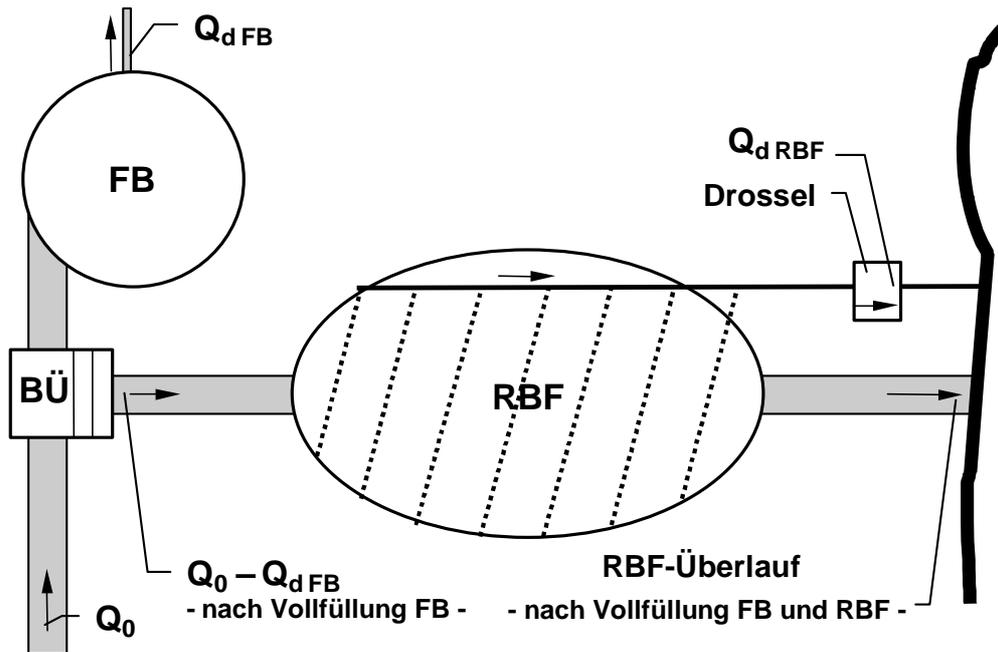


Bild 4: Fangbecken mit nachgeschaltetem Retentionsbodenfilter.

Bild 5 zeigt einen Retentionsbodenfilter (RBF) mit vorgeschaltetem Stauraumkanal mit unten liegender Entlastung (SKU). Im Vergleich zum Durchlaufbecken und auch zum Fangbecken muß auch hier mit einem erhöhten Feststoff- und Grobstoffeintrag in die Filteranlage gerechnet werden.

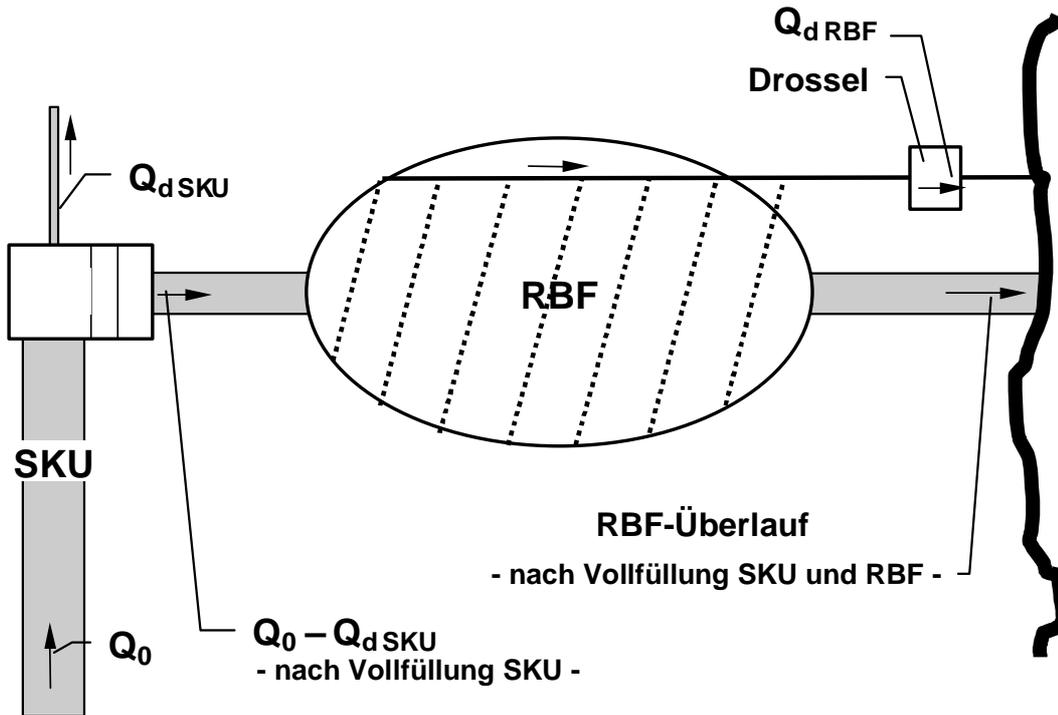


Bild 5: Stauraumkanal mit unten liegender Entlastung mit nachgeschaltetem Retentionsbodenfilter.

In Bild 6 ist einem Retentionsbodenfilter anstelle eines Regenüberlaufbeckens (RÜB) ein Regenüberlauf (RÜ) vorgeschaltet (ausgelegt auf $r_{\text{krit}} \geq 15 \text{ l/s}\cdot\text{ha}$). Menge und Häufigkeit der Filterbeschickung sind dann bei gleichem Einzugsgebiet wesentlich geringer als bei einem vorgeschalteten Regenüberlaufbecken, da mit dem kritischen Abfluß Q_{krit} bereits über 80 % des Mischwasserabflusses am Filter vorbei geleitet werden. Diese Anordnung ist nur bei sehr hohen Anforderungen an die Gewässergüte erforderlich.

Die seltene Beschickung muß hinsichtlich der Wasserversorgung einer Bepflanzung bedacht werden.

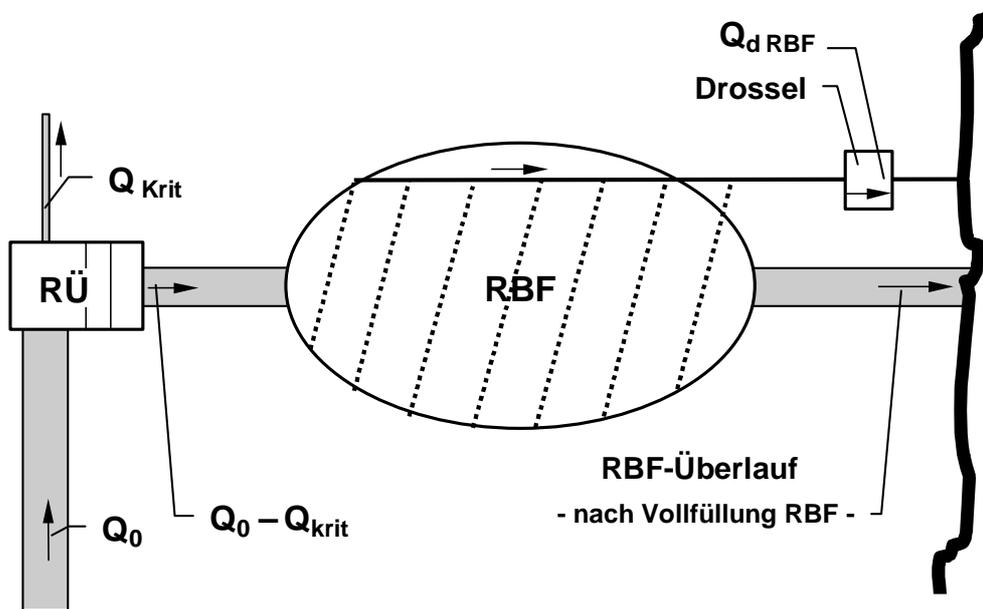


Bild 6: Regenüberlauf mit nachgeschaltetem Retentionsbodenfilter.

Es gibt Fälle, bei denen zur hydraulischen Entlastung der Vorflut große Regenrückhaltevolumina erforderlich werden, die nur sehr selten überlaufen. In solchen Fällen kann es aus Kostengründen zweckmäßig sein, den qualitativen Gewässerschutz vom quantitativen Gewässerschutz zu entkoppeln und einem Retentionsbodenfilter (RBF) zur zusätzlichen Dämpfung der Abflüsse ins Gewässer einen Regenrückhalteraum nachzuschalten. Der Regenrückhalteraum läuft dabei seltener über als der Retentionsbodenfilter. Bild 7 zeigt als Beispiel die Kombination Fangbecken-Retentionsbodenfilter-Regenrückhalteraum. Der Rückhalteraum ist in allen nachfolgenden Skizzen, bis auf Bild 9, als Regenrückhaltebecken (RRB) dargestellt. Andere Formen wie Regenrückhaltegräben oder Regenrückhaltekanäle sind je nach den örtlichen Verhältnissen ebenfalls möglich.

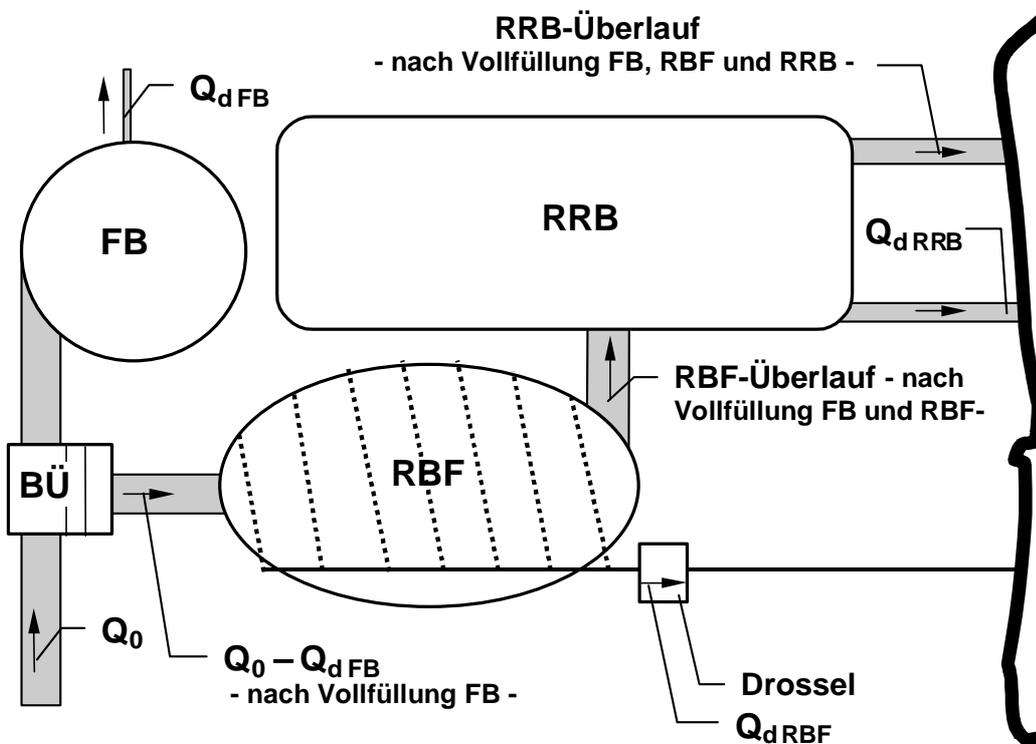


Bild 7: Kombination Fangbecken-Retentionsbodenfilter-Regenrückhaltebecken

Bild 8 zeigt ein Beispiel für die Kombination Durchlaufbecken-Retentionsbodenfilter-Regenrückhaltebecken. Auf die Anordnung eines zusätzlichen Beckenüberlaufs am DB wurde verzichtet.

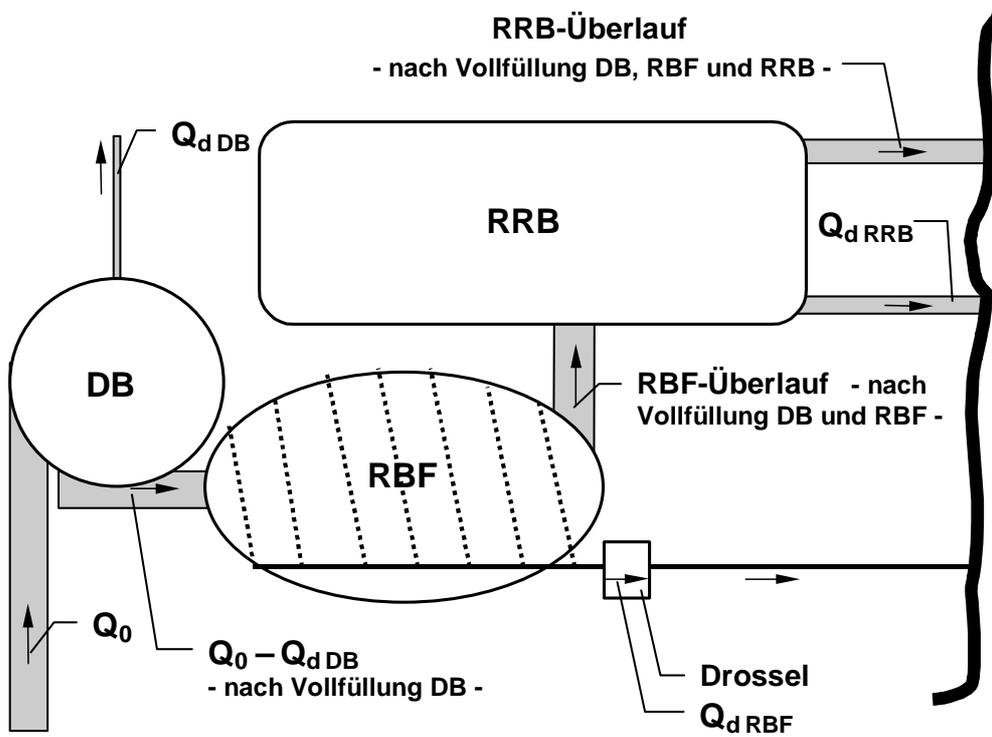


Bild 8: Kombination Durchlaufbecken-Retentionsbodenfilter-Regenrückhaltebecken

Alternativ kann es zweckmäßig sein, das Regenrückhaltebecken über dem Retentionsraum des Filterbeckens anzuordnen. Dadurch können je nach den örtlichen Verhältnissen eventuell Flächen und Kosten eingespart werden.

In anderen Fällen ist es sinnvoll, daß eine Bodenfilteranlage einem Retentionsraum (RR) nachgeschaltet wird. Die Funktionen Retention und Bodenfiltration werden dabei räumlich getrennt. Man spricht dann vom Bodenfilter mit vorgeschalteter Retention (BFvR). Bild 9 zeigt als Beispiel die Kombination Fangbecken-Retentionsraum-Bodenfilter.

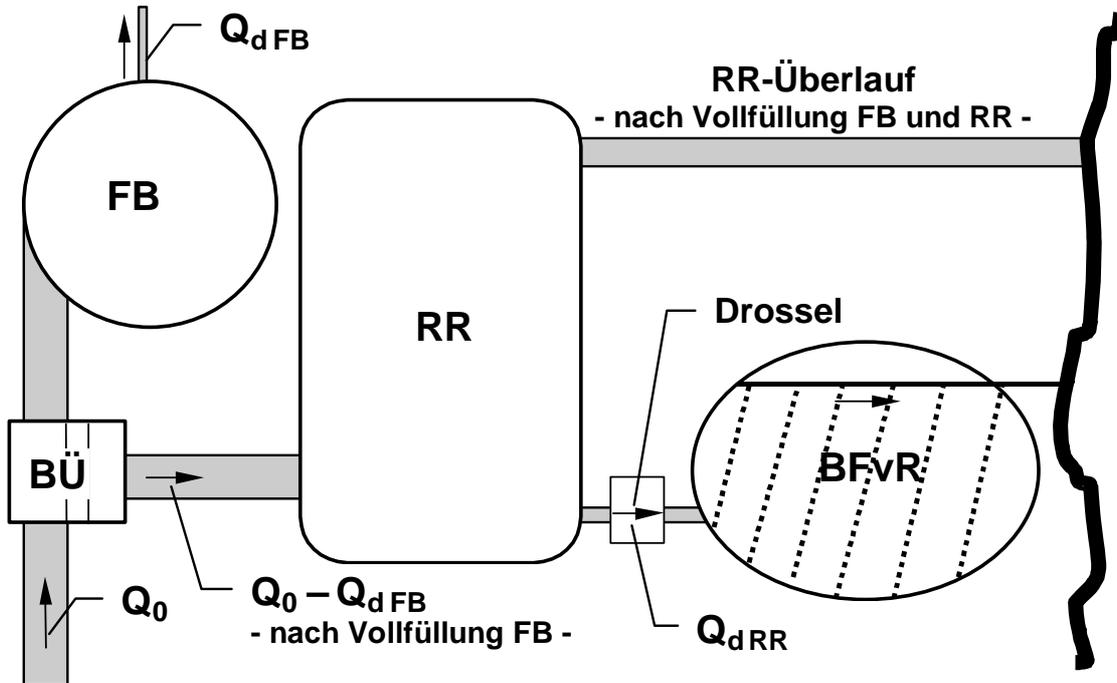


Bild 9: Kombination Fangbecken-Retentionsraum-Bodenfilter

Eine derartige Kombination kann beispielsweise in Frage kommen, wenn der Retentionsraum bereits vorhanden ist und es darum geht, die Qualität des Ablaufs ins Gewässer zu verbessern.

Die räumliche Trennung von Rückhalteraum und Bodenfilter entsprechend Bild 9 erlaubt es, durch Regelung des Ablaufs des Retentionsraumes, den Effekt der intermittierenden Bodenfilterbeschickung zu verstärken. Sind die Sorptionskräfte des Filters erschöpft, kann die Filterbeschickung unterbrochen werden. Der Filter erhält eine Atempause zur Wiederbelüftung und kann anschließend um so besser reinigen. Diese Betriebsweise erfordert jedoch eine Vergrößerung des Rückhaltevolumens und erhöht die Baukosten der Anlage. Beim Lehm-bodenfilter und beim Sandfilter mit Lehm-bodenauflage ist diese Betriebsweise nicht notwendig, da ausreichende abiotische Reserven für die Sorption zur Verfügung stehen. Auch reine Sandfilter der Körnung 0/2 mm (Bild 1) sind auf diese Betriebsweise nicht angewiesen.

In der Praxis wird versucht, aus Kostengründen das Volumen der herkömmlichen Regenüberlaufbecken zu reduzieren. So gibt es Bestrebungen, ein einem unterdimensionierten Regenüberlaufbecken nachgeschaltetes Regenrückhaltebecken als Absetz- und Entschlammungsanlage zu betreiben. Vorgeschlagen werden trockene, offene Regenrückhaltebecken, in denen der Mischwasserschlamm gezielt sedimentieren und aerob mineralisieren soll. Andere Versuche sehen eine Wasserzone im Regenrückhaltebecken vor, wobei die Mischwassersedimente anaerob gehalten werden. Mit der Verlagerung der Schlammabscheidung vom Regenüberlaufbecken in ein Regenrückhaltebecken entstehen

zwangsläufige Probleme und Kosten. Auftretende Gerüche sowie die erhöhten Betriebskosten im Regenrückhaltebecken infolge Schlammräumung, Abtransport und Entsorgung müssen vorweg bedacht werden und stellen die Akzeptanz der Anordnung in Frage.

Weitere Vorschläge, die eine Kombination von Schlammteich, Regenrückhaltebecken und Bodenfilter entsprechend Bild 10 vorsehen, verschärfen die zuvor genannten Probleme. Ein im Regenrückhaltebecken integrierter Abwasserteich soll dabei als teilbiologische Teichklär-anlage wirken, der ein Filter als gedrosselt beschickte, zusätzliche biologische Stufe nachgeschaltet ist. Abgesehen von den mit diesen Vorschlägen verbundenen Gerüchen und erhöhten Kosten für die Schlammräumung müssen sich derartige Anlagen in der Praxis erst noch bewähren.

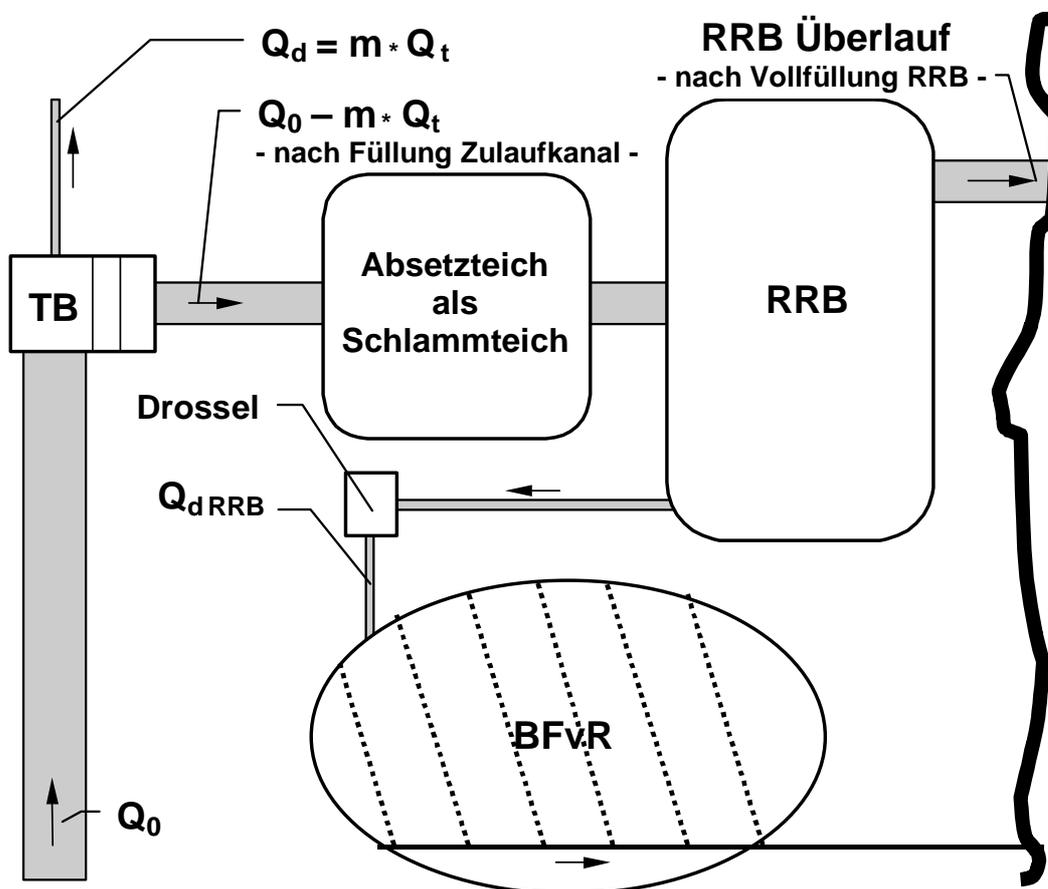


Bild 10: Kombination Schlammteich-Regenrückhaltebecken-Bodenfilter mit vorge-schalteter Retention

1.9 Weitergehende Mischwasserbehandlung

Weitergehende Anforderungen an eine Mischwassereinleitung ergeben sich aus der Schutzwürdigkeit oder den Nutzungen des Gewässers. Empfindliche und schutzwürdige Gewässer wie

- Grundwasser,
- Gewässer, die Trinkwasserschutzgebiete durchfließen,
- Badegewässer,
- Fischgewässer und Gewässer mit Fischzuchtanlagen,
- Gewässer der Güteklasse I und I-II,
- Gewässer, die noch nicht durch Kläranlagen vorbelastet sind,
- Gewässer mit geringer Fließgeschwindigkeit und stehende Gewässer,
- Gewässer mit geringer Niedrigwasserführung,
- Gewässer mit Erosionsproblemen.

erfordern besondere Schutzmaßnahmen [9].

Dabei werden folgende Reinigungsziele angestrebt:

Beim Grundwasser, in Trinkwasserschutzgebieten und bei Badegewässern steht die Keimelimination im Vordergrund.

Bei Fließgewässern wird die Nitrifikation des Ammoniums und der weitergehende Abbau des CSB angestrebt, um die verbreitete Artenarmut zu beheben.

Bei stehenden und sehr langsam fließenden Gewässern kann die Phosphorelimination das Ziel darstellen.

In Einzelfällen kann die Entfernung von Kohlenwasserstoffen angezeigt sein.

Bei leistungsschwachen und erosionempfindlichen Gewässern bildet die Abflußdämpfung ein wichtiges Element der Behandlung.

1.9.1 Herkömmliche Methode der weitergehenden Mischwasserbehandlung

Die traditionelle Maßnahme zum Schutz empfindlicher Gewässer bei Mischwassereinleitungen besteht in der Vergrößerung der Regenüberlaufbecken. Die Größe eines Regenüberlaufbeckens ist entsprechend dem Arbeitsblatt ATV-A 128 unter anderem von folgenden Faktoren abhängig:

- Regenabflußspende q_r [$l/s \text{ ha}^x$]
- spezifisches Speichervolumen V_s [m^3/ha^x]
- Jahresentlastungsrate e [%]

Der Zusammenhang zwischen den Größen q_r , V_s , e ist in Bild 11 dargestellt [6].

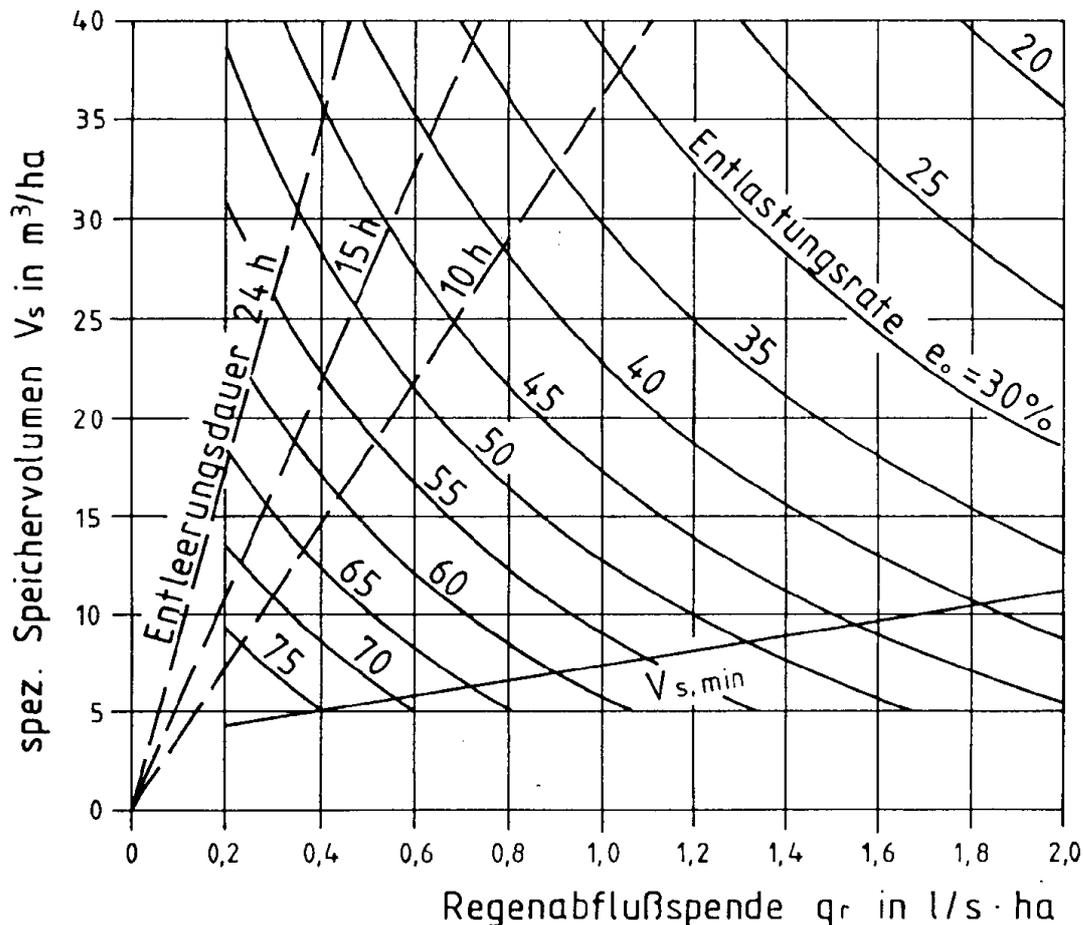


Bild 11: Spezifisches Speichervolumen in Abhängigkeit von der Regenabflußspende und der zulässigen Entlastungsrate nach ATV-A 128

Die Entlastungsrate e ist definiert als Quotient zwischen der im Jahresmittel entlastenden Mischwassermenge VQ_e [m^3/a] und der Regenabflußsumme VQ_r [m^3/a]

$$e = \frac{VQ_e}{VQ_r} \quad (17)$$

$$VQ_e = e \times VQ_r \quad (18)$$

Zahlenbeispiel:

Ein für Normalanforderungen bemessenes Regenüberlaufbecken hat eine Regenabflußspende $q_r = 0,8 \text{ l/s} \cdot \text{ha}^x$ und ein spezifisches Gesamtspeichervolumen (Becken und Kanalnetz) von $V_s = 22 \text{ m}^3/\text{ha}^x$. Entsprechend Bild 11 beträgt die Entlastungsrate $e_0 = 45 \%$. Das bedeutet, daß 55 % der jährlichen Regenabflußsumme dem Klärwerk zur biologischen Reinigung zugeführt und 45 % direkt ins Gewässer entlastet werden.

Im Falle einer weitergehenden Mischwasserbehandlung wird die Entlastungsrate e_0 auf die Entlastungsrate e abgemindert.

$$e \leq 0,85 \times e_0 \quad (19)$$

Das entspricht der in Baden-Württemberg in der Regel vorgenommenen Erhöhung der kritischen Regenspende von $r_{\text{krit}} = 15$ auf $r_{\text{krit}} = 30 \text{ l/s} \cdot \text{ha}^x$

Zahlenbeispiel:

Ein für Normalanforderungen bemessenes Regenüberlaufbecken hat eine Regenabflußspende von $q_r = 0,8 \text{ l/s} \cdot \text{ha}^x$, ein spezifisches Speichervolumen von $22 \text{ m}^3/\text{ha}^x$ und eine Entlastungsrate von $e_0 = 45 \%$. Im Falle einer weitergehenden Mischwasserbehandlung beträgt die zulässige Entlastungsrate e

$$e \leq 0,85 \times e_0 = 0,85 \times 45\% = 38\%$$

Dem biologischen Klärwerk müssen jetzt mindestens 62 % der jährlichen Regenabflußsumme zugeleitet werden. Gegenüber den Normalanforderungen ist das eine Steigerung um 13 %. Entsprechend Bild 11 vergrößert sich das spezifische Speichervolumen V_s von $22 \text{ m}^3/\text{ha}^x$ auf $30 \text{ m}^3/\text{ha}^x$. Beim traditionellen Lösungsansatz beruht ein verbesserter Gewässerschutz auf einer zusätzlichen Belastung des Klärwerks. Trotzdem ist der traditionelle Lösungsansatz bei Planern und Genehmigungsstellen populär, da er beiden die Formulierung einer individuellen Zielvorstellung erspart.

1.9.2 Bodenfilter für die weitergehende Mischwasserbehandlung

Eine Diskussion der durch Filtration beeinflussbaren Parameter und der gewässergütewirtschaftlichen Bedeutung der Filtration enthält der ATV Arbeitsbericht „Bedeutung der Abwasserfiltration aus der Sicht der Gewässer“ [8].

Bodenfilter stellen dezentral angeordnete Kläranlagen für Niederschlagswasser dar. Sie verringern die Gewässerbelastung, ohne dem Klärwerk zusätzlich Mischwasser zuzuleiten. Eine mehrstufige Bauweise aus vorgeschaltetem Regenüberlaufbecken und nachgeschalteter Filteranlage mit Retentionsraum gemäß den Bildern 2 bis 9 ist zwingend erforderlich.

Im Rahmen einer Filterplanung ist zunächst das angestrebte Reinigungsziel festzulegen. Nach diesem Ziel richtet sich die Auswahl des Filtermaterials:

- Kiessande und Kies entfernen partikuläre Stoffe.
- Karbonathaltige Sande entfernen partikuläre Feststoffe, Keime, gelösten CSB und Ammonium.
- Meliorierte Sande können partikuläre Feststoffe, Keime, gelösten CSB, Ammonium und gelösten Phosphor entfernen.
- Lehmböden entfernen partikuläre Feststoffe, gelösten CSB, Ammonium und reduzieren gelösten Phosphor sowie gelöste Metalle.

Bei den partikuläre Stoffen sind der CSB, Phosphor, Metalle, Mineralölkohlenwasserstoffe und die PAK von besonderer Bedeutung.

Auf die Konkurrenz zwischen der Nitrifikation und der Eliminierung von gelöstem P wurde bereits in Kapitel 1.3.3 hingewiesen. Ein hoher pH-Wert im Boden wirkt sich positiv auf die Nitrifikation, aber nicht optimal auf die PO_4 -Bindung aus. Ein niedriger pH-Wert im Boden

fördert die PO_4 -Sorption, schadet aber der Nitrifikation und kann zur Freisetzung von Metallen führen. Der optimale biologische Abbau im Bodenfilter hat in der Regel Vorrang. Dort, wo es auf eine gezielte nachhaltige Elimination von gelöstem PO_4 ankommt, sind fallbezogene experimentelle Untersuchungen über die zu treffende Bodenauswahl und der Meliorisation unverzichtbar.

Die Ablaufkonzentrationen einer Filteranlage werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst:

- Struktur, Kornverteilung, Chemismus des Filtermaterials,
- Schichtstärke des Filtermaterials,
- Filtergeschwindigkeit ,
- Aufenthaltszeit des Mischwassers im Filterkörper,
- Gelöster Anteil der Mischwasserkonzentration,
- Belüftung des Filtermaterials,
- Häufigkeit der Filterbeschickung,
- Dauer der vorausgehenden Trockenperiode,
- Stapelhöhe des Ereignisses,
- Temperatur,
- Chemismus und Struktur von abfiltrierten Sedimenten,
- Homogenität oder Inhomogenität der Filteranlage,
- Betriebsalter der Anlage.

Die Variabilität dieser Faktoren wirkt sich auf die einzelnen Stoffe unterschiedlich aus. Mit dem heutigen Kenntnisstand ist eine sichere Vorhersage der erzielbaren Ablaufkonzentrationen nicht möglich. Die zur Zeit verfügbaren Untersuchungsergebnisse aus Fulda [11] und Angelbachtal [15] stammen von schwach belasteten Lehm Bodenfiltern. Deren Ablaufkonzentrationen können nicht unkritisch auf die hochbelasteten Filter übertragen werden, die entsprechend Kapitel 1.8 heute eingesetzt werden. Zuverlässige Prognosen erfordern die vorherige Untersuchung der für die Filterung örtlich verfügbaren Böden und des anfallenden Mischwassers.

Noch schwieriger ist es, einen Wirkungsgrad sicher zu prognostizieren, da dieser auch von den Zulaufkonzentrationen und deren Variabilität abhängt. Die Zahl der verfügbaren langjährigen Untersuchungsergebnisse ist viel zu gering, um angesichts der Vielfalt der eingesetzten Filtermaterialien und der in Kapitel 1.6 beschriebenen unterschiedlichen Filterkonzepte gesicherte Wirkungsgrade angeben zu können. Unzulässig ist es, an Lehm Bodenfiltern gewonnene Wirkungsgrade unreflektiert auf beliebige grobkörnige Filtermaterialien bis hin zum Kiesfilter zu übertragen. Ebenso ist es unzulässig, an Pflanzenbeeten für Abwasser gewonnene Erkenntnisse unkritisch auf die speziellen Verhältnisse der Mischwasserfiltration anzuwenden.

Die in der Praxis erkennbare Tendenz, aus Schmutzfrachten des Filterzulaufs mit Hilfe eines fiktiven Wirkungsgrads die Gewässerbelastung der Filteranlage zu berechnen, enthält deshalb eine starke spekulative Komponente. Die vorliegende Ausarbeitung verzichtet bewusst darauf, sich an den gegenwärtigen Spekulationen zu beteiligen und beschränkt sich auf gesicherte generelle Aussagen.

1.10 Dimensionierung eines Bodenfilters

Retentionsbodenfilter im Mischsystem haben die wasserwirtschaftliche Aufgabe, die Entlastungsrate, also den Anteil ungereinigt entlasteten Mischwassers zu verringern. Eine Entlastungsrate von "Null" ist nicht mit vertretbarem Aufwand möglich.

Die Verringerung der Entlastungsrate kann aus folgenden Gründen erforderlich sein:

1. Zur Einhaltung der Anforderungen nach dem Arbeitsblatt ATV-A 128 in Verbindung mit den "ArbMat 3/99"¹ (auch "weitergehende Anforderungen") an ein Entwässerungssystem.
2. Zur Einhaltung sonstiger auf bestimmte Stoffe bezogenen Anforderungen an einer bestimmten Einleitungsstelle. In diesem Falle kommt es neben der Entlastungsrate auch auf einen den speziellen Anforderungen angepassten Filteraufbau an.

Der in diesem Kapitel vorgestellte Bemessungsansatz bezieht sich auf den zweiten Fall.

Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand muss bei der Dimensionierung einer Filteranlage der Gesichtspunkt des Filterversagens im Vordergrund der Überlegungen stehen. Zu kleine erste Stufen oder zu kleine Filterflächen erhöhen das Kolmationsrisiko erheblich. Die Frage der zulässigen hydraulischen und stofflichen Filterbelastung ist eng mit dem Versagensrisiko verknüpft. Bei der Planung einer Filteranlage müssen die Konsequenzen eines Filterversagens vorweg geklärt werden. Das Filterversagen infolge Kolmation führt zu Anlagen reduzierter Durchlässigkeit und somit zum zeitweiligen ungewollten Einstau und im Extremfall zu einem Mischwasserteich. Diese entsprechen nicht den Zielvorstellungen einer Filteranlage. Wird ein durch Kolmation entstandener Abwasserteich vom Auftraggeber nicht akzeptiert, kann auch der Planer zur Verantwortung gezogen werden.

Unter den Gesichtspunkten der Kosten und Wirtschaftlichkeit wäre ein möglichst großer hydraulischer Filterdurchsatz wünschenswert. Andererseits wird die Ablaufbeschaffenheit in hohem Maße von der Filtergeschwindigkeit bestimmt. Von den Langsamfiltern der Trinkwasserversorgung ist bekannt, dass sie unter 0,1 m/h liegen muss. Zur Begrenzung der Filtergeschwindigkeit ist deshalb eine weitgehende Drosselung erforderlich. Hier unterscheiden sich Bodenfilter von ungedrosselten Tropfkörperfiltern, welche den Durchfluss der inhomogenen Durchlässigkeit des Filtermaterials überlassen [19].

Die Auslegung eines Filters allein mit Hilfe des Darcy Gesetzes bietet keine ausreichende Sicherheit gegen Kolmation. Die Begrenzung der jährlichen Flächenbelastung stellt ein unverzichtbares zusätzliches Kriterium dar. Bei dem hohen Ungenauigkeitsgrad der mit üblichen Modellen berechneten stofflichen Parameter bietet zur Zeit der Rückgriff auf die hydraulische Flächenbelastung die größte Sicherheit.

¹ „Arbeitsmaterialien zur fortschrittlichen Regenwasserbehandlung in Baden-Württemberg“, eingeführt durch das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg mit Erlass vom 11.03.1999

Der nachfolgende Bemessungsansatz der Gruppe AGB Baden-Württemberg legt die hydraulische Flächenbelastung als Bemessungskriterium zugrunde [17]. Das setzt den Einsatz eines Niederschlags-Abfluss-Modells mit Speicherelementen voraus. Dazu kann z. B. der Niederschlags-Abfluss-Teil üblicher Schmutzfrachtmodelle verwendet werden. Als Datengrundlage sind langjährige (ca. 30 Jahre) und lückenlose Niederschlagsreihen für das betreffende Gebiet erforderlich. Da solche Messreihen i.d.R. nicht vorliegen, bietet sich die Verwendung von synthetischen Niederschlagsreihen an. Diese können kurzfristig bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg bezogen werden.

Folgende Bemessungsschritte sind durchzuführen:

1. Filterfläche A_F [m²] wählen.

2. Drosselabfluß Q_{dRBF} [l/s] aus dem Filter festlegen:

Vereinfacht kann über den gesamten Füllungs- und Entleerungsvorgang von einem mittleren spezifischen Drosselabfluss von 0,01 l/s•m² ausgegangen werden.

$$Q_{dRBF} \leq 0,01 \times A_F \text{ [l/s]} \quad (20)$$

3. Einstautiefe h und Böschungsneigungen wählen:

$$\text{Im Regelfall gilt: } 0,50 \leq h \leq 1,00 \text{ [m]} \quad (21)$$

4. Den nach 1. bis 3. definierten Retentionsbodenfilter und die vorgeschaltete erste Stufe als Speicherelemente (z.B. Rückhaltebecken) in das Entwässerungssystem einfügen, Langzeitsimulation für das gesamte Entwässerungssystem durchführen.

5. Aus den Ergebnissen der Niederschlag-Abfluss-Simulation lassen sich folgende Kenngrößen entnehmen:

VQ_E [m³/a] mittlerer jährlicher Entlastungsabfluss aus erster und zweiter Stufe,

VQ_F [m³/a] mittlerer jährlicher hydraulischer Filterdurchsatz,

VQ_r [m³/a] mittlere jährliche Regenabflusssumme, die der ersten Stufe zufließt.

6. Ermittlung der Entlastungsrate $e = \frac{VQ_E}{VQ_r} \times 100$ [%]. (22)

7. Nachweis der zulässigen Entlastungsrate e_{zul} :

$$\text{Es muss gelten: } e < e_{zul}. \quad (23)$$

e_{zul} ist entsprechend den Randbedingungen des Einzelfalls in Abstimmung mit der zuständigen Genehmigungsbehörde festzulegen.

8. Berechnung der hydraulischen Filterbelastung (Stapelhöhe) h_s [m/a]:

$$h_s = \frac{VQ_F}{A_F} \text{ [m}^3\text{/m}^2\text{•a} = \text{m/a]} \quad (24)$$

Die zulässige Stapelhöhe h_s darf im langjährigen Mittel einen Wert von 30 m/a nicht überschreiten. In einzelnen besonders nassen Jahren wird die jährliche hydraulische Filterbelastung bis auf 50 m/a ansteigen, ohne dass es dabei zum Filterversagen kommen darf. Durch die Einhaltung dieser Bemessungswerte wird die auf die Filterfläche jährlich aufgebrachte Feststofffracht begrenzt. Da in der Regel die aufgebrachte Feststofffracht nicht genau vorherbestimmt werden kann, wird hilfsweise die hydraulische Stapelhöhe h_s verwendet.

Für eine ausgewählte Anlage sind in den Bildern 12 und 13 beispielhaft die Ergebnisse der beschriebenen Rechenschritte dargestellt.

In diesem Beispiel weist das vorgeschaltete Regenüberlaufbecken eine Entlastungsrate e von 30 % auf. Es wird also 70 % des jährlichen Regenwasserabflusses zur Kläranlage weitergeleitet und dort biologisch gereinigt. Im Rahmen einer weitergehenden Mischwasserbehandlung soll die biologisch zu reinigende Rate von 70 % auf 80 % erhöht werden, ohne das Klärwerk zusätzlich zu belasten. Die zulässige Entlastungsrate der Retentionsbodenfilteranlage (vorgeschaltetes Regenüberlaufbecken und Retentionsbodenfilter) beträgt dann 20 %. Um das erforderliche Volumen des Retentionsbodenfilters zu bestimmen, wurden zunächst Modellrechnungen für die ausgewählten Volumina 0, 180, 220, 320, 420, 520 und 620 m³ durchgeführt. Die Punkte in den Diagrammen der Bilder 12 und 13 sind die Ergebnisse der Simulationsrechnung. Aus Bild 12 ergibt sich, dass zur Einhaltung der vorgesehenen Entlastungsrate von 20 % ein Volumen von 275 m³ erforderlich wird. Die zulässige Stapelhöhe von 30 m/a ist dann gerade noch eingehalten (Bild 13). Kleinere Becken als 275 m³ sind im vorliegenden Beispiel aufgrund dieses Kriteriums nicht zulässig.

Würde wegen der besonderen Schutzwürdigkeit des Vorfluters die biologische Reinigung von 90 % des jährlichen Regenwasserabflusses verlangt (Entlastungsrate: 10 %), wäre dafür ein Bodenfilter mit über 600 m³ Retentionsvolumen erforderlich. Die jährliche Stapelhöhe würde dann nur noch 20 m/a betragen.

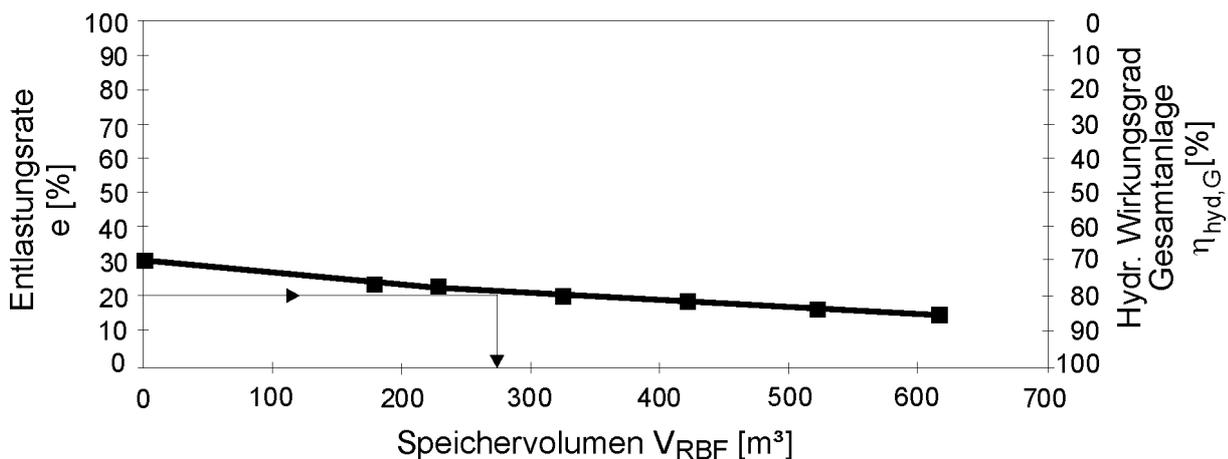


Bild 12: Beispiel für eine ausgewählte Anlage (nicht übertragbar): Zusammenhang zwischen der Entlastungsrate bzw. dem hydraulischen Wirkungsgrad² der ersten und zweiten Stufe und dem Speichervolumen V_{RBF} eines Retentionsbodenfilters

² Die Entlastungsrate e ist ein Maß für den Anteil des ungereinigt entlasteten Mischwassers, der hydraulische Wirkungsgrad $\eta_{hyd,G}$ gibt dagegen den Anteil der behandelten Wassermenge wieder. Es gilt: $\eta_{hyd,G} = 100\% - e$

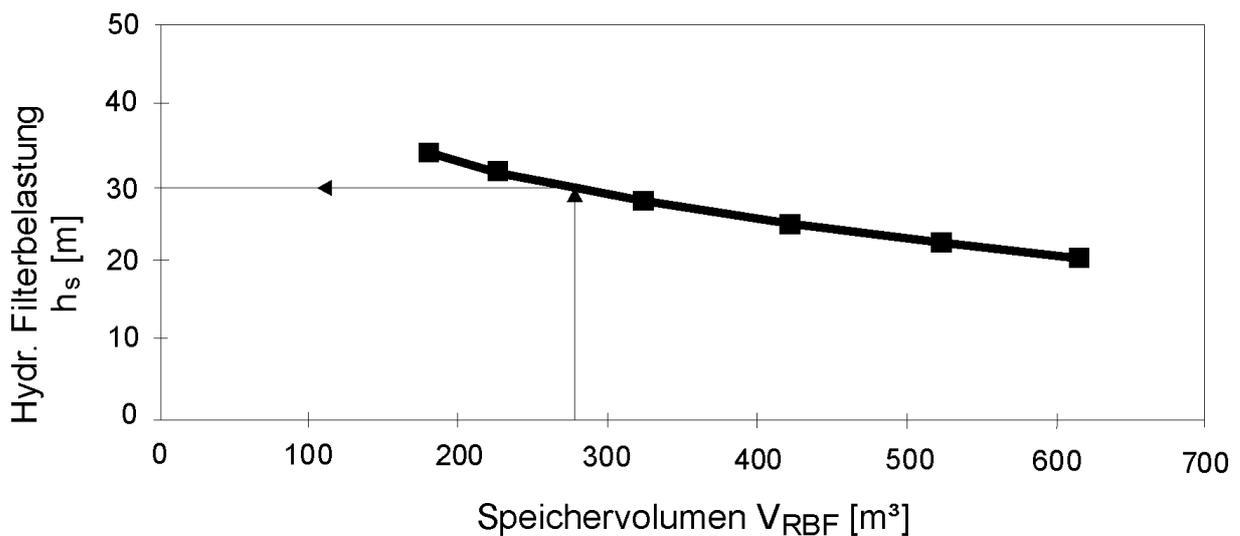


Bild 13: Beispiel für eine ausgewählte Anlage (nicht übertragbar): Zusammenhang zwischen der hydraulischen Filterbelastung h_s (Stapelhöhe) und dem Speichervolumen V_{RBF} eines Retentionsbodenfilters

Die erforderliche spezifische Filterfläche m^2/ha^x oder das erforderliche spezifische Retentionsvolumen m^3/ha^x werden vom vorgeschalteten Entwässerungsnetz, der vorgeschalteten ersten Stufe und vom örtlichen Niederschlagsgeschehen beeinflusst. Mit steigender langjähriger örtlicher Niederschlagshöhe nehmen die erforderliche Filterfläche und das Retentionsvolumen stark zu. Hier gelten andere Gesetzmäßigkeiten als bei der Auslegung von Regenüberlaufbecken nach dem Arbeitsblatt ATV-A 128. Weitere entscheidende Einflussgrößen sind die statistischen Eigenschaften der Niederschläge am jeweiligen Standort, das Volumen und der Drosselabfluss der vorgeschalteten ersten Stufe, sonstige vorhandene Vorentlastungsanlagen und die zulässige Entlastungsrate. Es ist deshalb nicht möglich, Bodenfilteranlagen mit empirischen Faustgrößen, beispielsweise $80 m^3/ha^x$, sinnvoll auszulegen, wie das in der Praxis in unreflektierter Anlehnung an die Pilotanlage Angelbachtal manchmal geschieht.

1.11 Ergänzung von unterdimensionierten Regenüberlaufbecken durch Bodenfilter

Die weitergehende Mischwasserbehandlung spielt in Deutschland nur eine untergeordnete Rolle. Reges Interesse besteht hingegen am Einsatz von Bodenfiltern zur Ergänzung überlasteter oder unterdimensionierter Regenüberlaufbecken bis hin zu deren vollständigen Substitution. Auf diesem Gebiet gibt es eine Fülle von Vorschlägen. Substitutionsfilter sollen als dezentrale Schlammvererdungsanlagen anstelle von Regenüberlaufbecken gebaut werden und gleichzeitig als Preisbrecher und Sparmodell dienen. Erfolgreiche Pilotprojekte auf diesem Gebiet sind zur Zeit nicht bekannt. Mit der Steigerung der auf einem Filter aufgetragenen Feststofffracht steigt das Risiko eines Filterversagens durch Kolmation stark an. Deshalb erfordert eine weitgehende Verkleinerung der ersten Stufe Kompensationsmaßnahmen zum Abtrennen der partikulären Feststoffe vor der Filtration.

Als Kompensationsmaßnahmen kommen in Frage:

- Anordnung einer räumbaren Absetzzone, zum Abtrennen der absetzbaren Stoffe vor der Filtration. Die in Kapitel 1.6 angedeuteten Probleme sind zu beachten.
- Reduzierung der zulässigen jährlichen Stapelhöhe auf unter 30 m/a. Dabei steigen der Flächenbedarf und Kosten des Filters.

Verbindliche Regel über die im Einzelfall zu treffenden Maßnahmen können zur Zeit noch nicht angegeben werden. Bei bestehenden Fangbecken kann beispielsweise zur Verbesserung der Entschlammungswirkung der Umbau zum Durchlaufbecken untersucht werden.

In beschränktem Umfang ist eine Reduzierung der ersten Stufe ohne Kompensationsmaßnahmen möglich. Die erforderliche Entschlammungswirkung der ersten Stufe ist nach bisherigen Erfahrungen sichergestellt, wenn die Entlastungsrate e des vorgeschalteten Regenüberlaufbeckens nicht mehr als 50 % beträgt.

Zahlenbeispiel:

Ein für Normalanforderungen bemessenes Regenüberlaufbecken hat eine Regenabflußspende von $0,8 \text{ l/s} \cdot \text{ha}^x$ und ein spezifisches Speichervolumen von $22 \text{ m}^3/\text{ha}^x$. Die Entlastungsrate e_0 nach ATV-A 128 beträgt entsprechend Bild 11 45 %. Die Entlastungsrate e der Vorstufe einer nachgeschalteten Bodenfilteranlage darf jedoch 50 % betragen. Entsprechend Bild 11 genügt bei dieser Regenabflußspende ein spezifisches Speichervolumen von $17 \text{ m}^3/\text{ha}^x$. Das entspricht einer Volumenreduzierung um ca. ein Viertel. Gleichzeitig wird das Klärwerk mit weniger Mischwasser belastet. Im nachfolgenden Retentionsbodenfilter darf die Stapelhöhe von 30 m/a nicht überschritten werden.

1.12 Konstruktive Gestaltung von Retentionsbodenfilteranlagen

In diesem Kapitel werden konstruktive Hinweise zu einer Retentionsbodenfilteranlage für die Mischwasserbehandlung gegeben. Im Einzelnen werden folgende wesentliche Komponenten behandelt:

- Erste Stufe (RÜB/SK/RÜ)
- Zulaufbauwerk
- Retentionsraum
- Bepflanzung
- Filterkörper
- Drainagesystem
- Abdichtung
- Ablaufbauwerk
- Entlastungsbauwerk
- Umzäunung

Erste Stufe:

Die Vorbehandlungsstufe hat die Aufgabe, absetzbare Stoffe und Grobstoffe vom Filter fernzuhalten. Diese Aufgabe erfüllen am effizientesten Durchlaufbecken. Erfolgt die Abtrennung der absetzbaren Stoffe nur ungenügend, dann ist zwischen der Vorbehandlungsstufe und dem Filter die Anordnung einer Absetzzone erforderlich. Die Mineralisation des Schlammes und die Schlammräumung muß sichergestellt sein.

Zulaufbauwerk:

Das Zulaufbauwerk hat die Aufgabe, das Mischwasser möglichst gleichmäßig über die Filterbreite zu verteilen und die Zulaufenergie in eine für die Filteroberfläche und den Bewuchs unschädliche Form umzuwandeln. Punktförmige Zuleitungen mit hohen Fließgeschwindigkeiten und Schleppspannungen verursachen eine unerwünschte Erosion der Filteroberfläche und führen zum ebenfalls unerwünschten Niederlegen des Bewuchses. Dem letzten Gesichtspunkt ist besonders bei schilfbepflanzten Filtern Rechnung zu tragen.

Im Zusammenhang mit dem Zulaufbauwerk soll geprüft werden, ob eine kostengünstige Umgehung der Filteranlage geschaffen werden kann. Es ist nicht auszuschließen, daß eine vorübergehende Außerbetriebnahme der Filteranlage erforderlich wird. Zumindest muß durchdacht werden, wie ein solcher Fall realisiert werden kann.

Eine punktförmige Zuleitung in den Retentionsraum entsprechend Bild 14 kommt nur bei kleinen Filterflächen in Frage. Die Energieumwandlung erfolgt durch Gabionen (mit Bruchsteinen gefüllte Draht-Schotter-Körbe von 0,5 m x 0,5 m). Diese Bauweise ermöglicht eine optisch bessere Einbindung in die Landschaft als eine Betonkonstruktion.

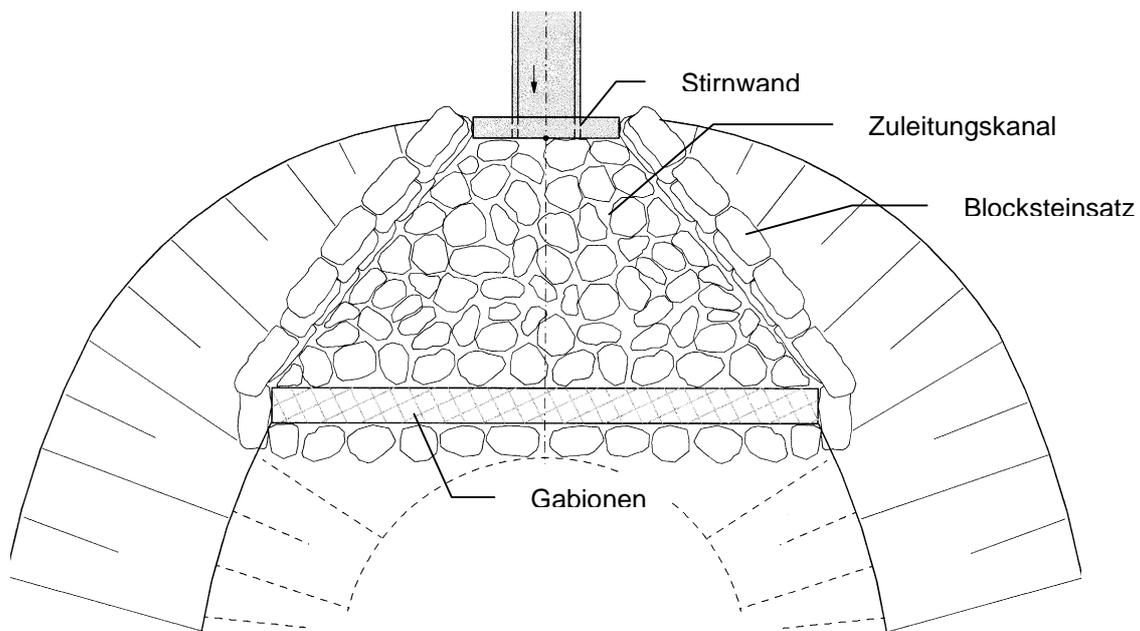


Bild 14: Punktförmiges Zulaufbauwerk mit Tosbecken

Im Regelfall ist eine breitflächige Zuleitung zum Retentionsraum anzustreben. Bei Durchlaufbecken sollte, entsprechend Bild 15, die Klärüberlaufschwelle im vierten Quadranten des Beckens gleichzeitig als Zulaufbauwerk des Filters dienen. Die Filteroberfläche ist auf der Ablaufseite der Schwelle gegen Erosion zu schützen.

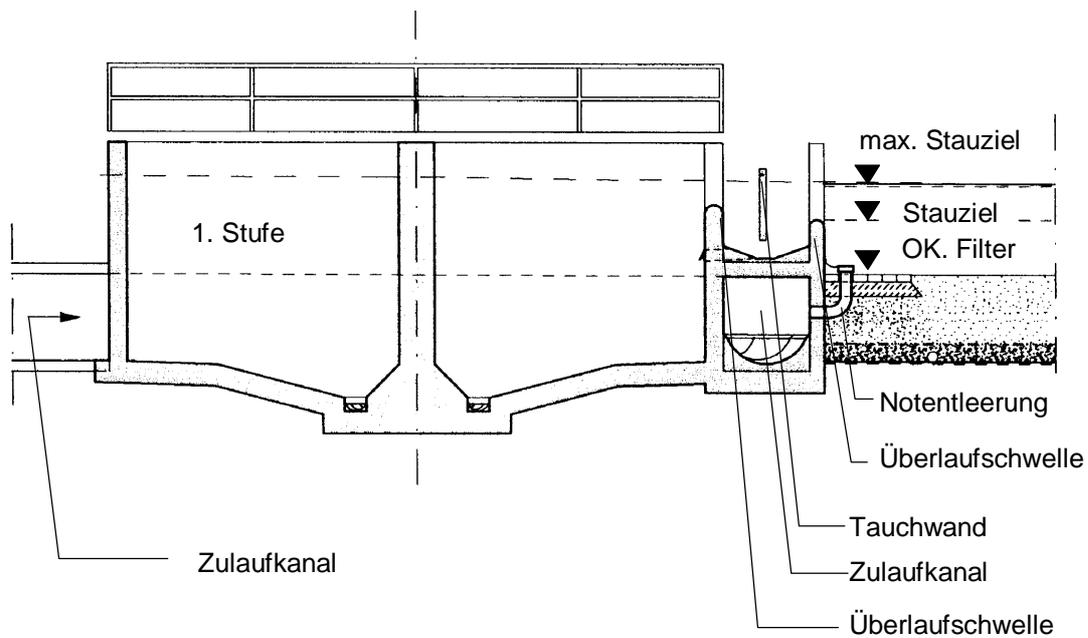
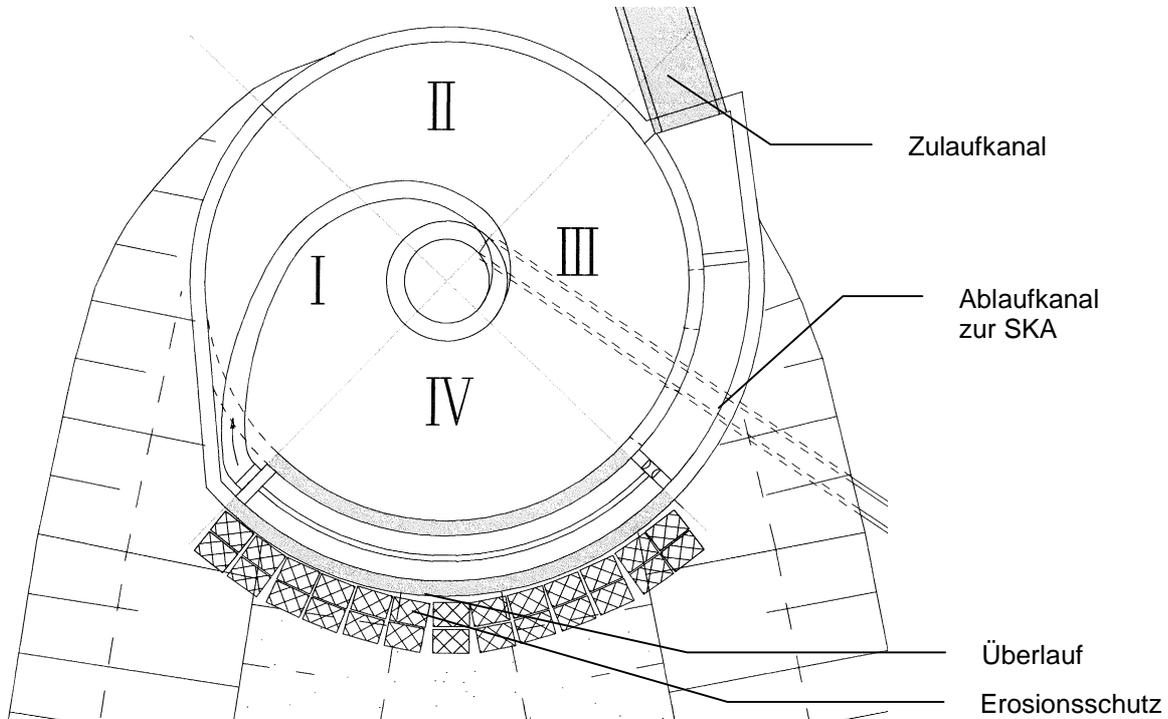


Bild 15: Breitflächiges Zulaufbauwerk aus der Vorstufe zum Retentionsbodenfilter

Retentionsraum:

Aus Kostengründen sollte der Retentionsraum grundsätzlich in Erdbauweise ausgeführt werden. Die Formgebung des Retentionsraumes erlaubt eine Fülle von Varianten. Den Bedürfnissen der Landschaftspflege werden strenge geometrische Grundrißformen allerdings nicht gerecht. Ähnliche Gesichtspunkte gelten bezüglich der Böschungen. Senkrechte massive Wände bilden die platzsparendste Lösung. Fläche mit Rohrglanzgras bepflanzte Böschungen erfordern mehr Platz, ermöglichen aber eine den Erfordernissen der Landschaftspflege angepaßte Einbindung des Bauwerks in die Umgebung. Daraus resultiert eine besondere Akzeptanz bei der Bevölkerung und den Behörden. Diese Akzeptanz kann soweit gehen, daß auch im Landschaftsschutzgebiet, ja sogar im Naturschutzgebiet Retentionsbodenfilteranlagen genehmigt werden können, wie bereits ausgeführte Beispiele beweisen.

Wie beim Regenüberlaufbecken ist auch für den Retentionsraum eine Notentleerung erforderlich.

Das Retentionsvolumen einer Filteranlage wird durch die maximale hydraulische und stoffliche Filterbelastung bestimmt. Mit zunehmender Filterfläche und Retentionsvolumen nimmt auch die ungleichmäßige stoffliche und hydraulische Belastung des Filters zu. Bei Speichervolumina mit einer Grundfläche von circa 2.000 m² ist die Aufteilung auf zwei oder mehrere Filtereinheiten anzustreben.

Bepflanzung:

Für die Bepflanzung des Filters mit Schilf werden Setzlinge aus Samen in Gewächshäusern herangezogen und bevorzugt in der Zeit Mai bis Juni mit einer Dichte von mindestens 4 Stück/m² gepflanzt. Pflanzungen sind bis in den Herbst hinein möglich.

Anstelle von Setzlingen ist auch das Ausbringen von Rhizomstücken möglich. Fünf Rhizome/m² reichen aus.

Vegetationsmatten ermöglichen einen raschen Anwuchs von dichtem Schilf. Sie sind teuer in der Anschaffung, benötigen aber einen geringeren Betreuungsaufwand beim Anwachsen. Außerdem entfällt das Aufbringen einer Mulchschicht.

Ein kräftiges Schilfwachstum stellt sich im ersten Betriebsjahr nur ein, wenn reichlich Wasser zur Verfügung steht. Ein zeitlich begrenzter Einstau des Filters ist die beste Starthilfe für ein üppiges Schilfwachstum. Ein temporärer Überstau sichert nach der Bepflanzung die Dominanz von Schilf gegenüber Konkurrenzpflanzen.

Für die Sicherung der Böschungen, die dem Wasserwechsel ausgesetzt sind, hat sich eine Aussaatmenge von 20 g/m² Rohrglanzgras bewährt.

Filter:

Die Eigenschaften unterschiedlicher Filtermaterialien wurden in Kapitel 1.4 beschrieben. Bei den von der Gruppe AGB betreuten Bodenfiltern wurden folgende Filtermaterialien eingesetzt:

- Lehm Boden zum Entfernen partikulärer Stoffe, gelöstem CSB, Ammonium, gelöstem Phosphor
- Sand 0/2 entsprechend Bild 1 zum Entfernen partikulärer Stoffe, gelöstem CSB, Ammonium, Keimen
- Kombinationen von Lehm Boden und darunter liegender Sandschicht

Die Reinigungsleistung nimmt mit wachsender Filterdicke zu. Die Stärke der Filterschicht soll im Hinblick auf die Reinigungsleistung auch bei Sand 0,75 m im konsolidierten Zustand nicht unterschreiten. Die Stärke der Drainageschicht von 0,25 m darf nicht angerechnet werden.

Die Oberfläche eines Filters muß horizontal sein. Ein Gefälle verursacht Erosionsrinnen. Der in der Anfangszeit erforderliche temporäre Beetüberstau zur Unterdrückung von Fremdvegetation erfordert ebenfalls eine horizontale Filteroberfläche.

In einen Mehrschichtenfilter findet in horizontalen Lagen ein Wechsel der Kornzusammensetzung statt, beispielsweise beim Übergang Lehm Boden - Sand oder beim Übergang Sand - Drainagekies. In diesen Bereichen muß Filterstabilität gewährleistet sein. Das kann erreicht werden durch

- Einlage eines Geovlies als Trennlage
- Kornaufbau entsprechend den Filtergesetzen der Bodenmechanik

Beim nährstoffreichen Mischwasser besteht das Risiko, daß der auf dem Vlies gebildete biologische Bewuchs die Durchlässigkeit beeinflusst. Bei einem den Filtergesetzen entsprechendem Kornaufbau erübrigt sich der Einbau von Geovliesen. Ein Filter muß sowohl mechanisch filterstabil als auch hydraulisch wirksam aufgebaut sein. In Deutschland wird dies in der Regel nach den Kriterien von Terzaghi, entsprechend DIN 4095 „Dränung zum Schutz baulicher Anlagen“, nachgewiesen. In einer Schweizer Norm wurden diese Regeln noch weiter differenziert.

So gelten entsprechend der Schweizer Norm SN 670125a „Filtermaterialien“ folgende Grenzwerte:

$$\frac{d_{15} \text{ Filtermaterial}}{d_{15} \text{ feinkörniges Material}} > 5 \quad (30)$$

$$\frac{d_{15} \text{ Filtermaterial}}{d_{85} \text{ feinkörniges Material}} \leq 5 \quad (31)$$

$$\frac{d_{50} \text{ Filtermaterial}}{d_{50} \text{ feinkörniges Material}} \leq 25 \quad (32)$$

Gleichung 30 und 32 sichern die hydraulische Funktion, Gleichung 31 die mechanische Funktion.

Beim Übergang Lehm Boden gegen Sand gilt:

$$\frac{d_{15} \text{ Sand}}{d_{15} \text{ Lehm Boden}} > 5 \quad (33)$$

$$\frac{d_{15} \text{ Sand}}{d_{85} \text{ Lehm Boden}} \leq 5 \quad (34)$$

$$\frac{d_{50} \text{ Sand}}{d_{50} \text{ Lehm Boden}} \leq 25 \quad (35)$$

Beim Übergang Sand gegen Kies gilt:

$$\frac{d_{15} \text{ Kies}}{d_{15} \text{ Sand}} > 5 \quad (36)$$

$$\frac{d_{15} \text{ Kies}}{d_{85} \text{ Sand}} \leq 5 \quad (37)$$

$$\frac{d_{50} \text{ Kies}}{d_{50} \text{ Sand}} \leq 25 \quad (38)$$

Neben den Regeln der SN 670125a werden in Deutschland auch die Kriterien von Terzaghi.

Drainagesystem:

Das Drainagesystem besteht aus in der Regel horizontal verlegten Dränsträngen, die an eine Sammelleitung angeschlossen sind. Bewährt haben sich PE-HD-Rohre nach DIN 4262, Teil 1, mit einer Mindestnennweite DN 150, die eine optische Inspektion und eine Spülung erlauben. Zu diesem Zweck müssen die Dränleitungen mit Vollrohren über Gelände hochgezogen werden, und über einen befahrbaren Weg zugänglich sein. Schlitzweiten von 1,2 mm sollen nicht unterschritten werden.

Die Gruppe AGB empfiehlt für den Aufbau eines Drainagesystems, bis maximal 2.000 m², folgende Anhaltswerte:

Abstand der Dränrohre	≤ 5 m
Länge der Dränrohre	≤ 20 m
Zahl der am Sammler angeschlossenen Dräne	≤ 10

Größere Filterflächen sollen auf mehrere Einheiten aufgeteilt werden.

Je größer die Filterfläche wird, um so ungleichmäßiger entwickelt sich ihre stoffliche und hydraulische Belastung. Durch symmetrische Anordnung der Dräne ist auf eine gleichmäßige hydraulische Belastung hinzuwirken.

Bei entleertem Filter übernimmt die Drainage die Funktion eines Belüftungssystems. Bei hoher organischer Filterbelastung ist es für die biologische Wirkung eines Bodenfilters wichtig, daß die Sauerstoffzufuhr über das Drainagesystem nicht durch einen permanenten Einstau ausgeschaltet wird.

Abdichtung:

Eine Abdichtung hat beim Retentionsbodenfilter den Zweck, ein geschlossenes System zu erreichen, das den Eintritt von Grundwasser und den Austritt von Filtrat ins Grundwasser verhindert. Ein Eintritt von Grundwasser ist entsprechend den Ausführungen in Kapitel 1.3 unerwünscht. Ein Austritt von Filtrat ins Grundwasser steht dem Bestreben entgegen, entsprechend Kapitel 1.8, die Stapelhöhe zu begrenzen und durch Drosselung eine Mindestaufenthaltszeit sicherzustellen.

Bei mit Schilf bepflanzten Filtern ist eine Dichtung außerdem notwendig, um einen temporären Einstau oder Überstau des Filterkörpers durchführen zu können.

Auf eine Abdichtung kann verzichtet werden, wenn der Untergrund einen Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-9} m/s aufweist. Künstliche mineralische Dichtungen werden in zwei Lagen von je 0,3 m Schichthöhe eingebaut.

PE-HD Dichtungsbahnen von mindestens 2 mm Stärke gewährleisten eine hohe Sicherheit, da die Prüfung der Dichtheit vor dem Filtereinbau erfolgt. Sie sind aber vergleichsweise teuer.

Bentonitmatten stellen eine kostengünstige Lösung einer künstlichen Dichtung dar. Die von den Herstellern vorgeschriebenen Qualitätssicherungsmaßnahmen müssen beachtet werden um Dichtheit zu erreichen. Die Überprüfung erfolgt erst bei der Inbetriebnahme.

Bild 16 zeigt einen Schnitt durch einen Retentionsbodenfilter mit den beschriebenen Elementen, Retentionsraum, Böschungen, Filtermaterial, Drainage und Dichtung.

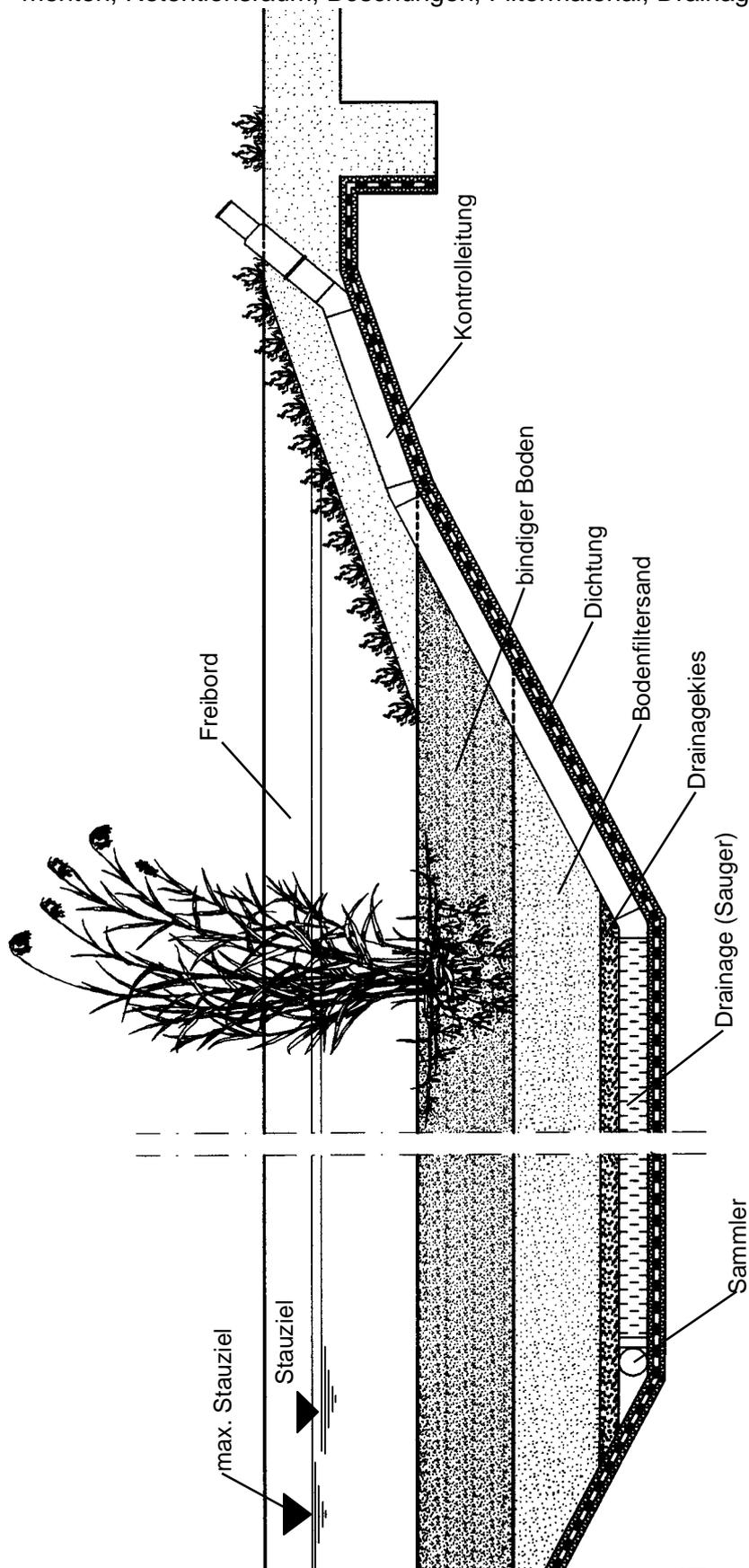


Bild 16: Schnitt durch einen Retentionsbodenfilter im Mischsystem

Ablaufbauwerk:

Beim Ablaufbauwerk handelt es sich um einen Schacht, in dem die Dränsammelleitung endet. Darin sind ein Absperrschieber, ein Drosselorgan und eine Einstauvorrichtung angeordnet. Das Ablaufbauwerk hat folgende Funktionen zu ermöglichen:

- Kontrolle des Filterablaufs
- Temporärer Einstau des Filters
- Begrenzung der Filtergeschwindigkeit oder des Filterdurchsatzes
- Vermeidung von anhaltendem Rückstau aus dem Vorfluter

Der mögliche Filterdurchsatz Q_F wird durch die Filterfläche A_F und den Durchlässigkeitsbeiwert des Filtermaterials bestimmt. Das Drosselorgan im Ablaufbauwerk drosselt den Filterdurchsatz, entsprechend Kapitel 1.8, auf einen Wert Q_{dRBF} oder Q_{dBF} , der kleiner als Q_F ist. Dadurch wird die Aufenthaltszeit im Filter erhöht.

Im Regelfall enthält der Filterablauf nur einen geringen Anteil an partikulären Feststoffen. Deshalb können zur Drosselung auch kostengünstige Steuerungsvorrichtungen eingesetzt werden. Im einfachsten Fall kann der ohnehin benötigte Absperrschieber die Aufgabe der Drosselung mit übernehmen.

Wird ein Bodenfilter regelmäßig durch Rückstau aus dem Vorfluter eingestaut, muß die Filteranlage durch eine Pumpe entleert werden. In diesem Fall übernimmt das Ablaufbauwerk die Funktion eines Pumpwerkes und die Pumpe die Drosselung.

Der Filterablauf kann so ausgebildet werden, daß der Porenraum des Filterkörpers rasch gefüllt und die Filteroberfläche rasch überstaut wird. Entsprechende Vorrichtungen können die Filterbelastung vergleichmäßigen und das Entstehen von inhomogenen Zonen verringern. Dadurch wird die Ablaufqualität verbessert.

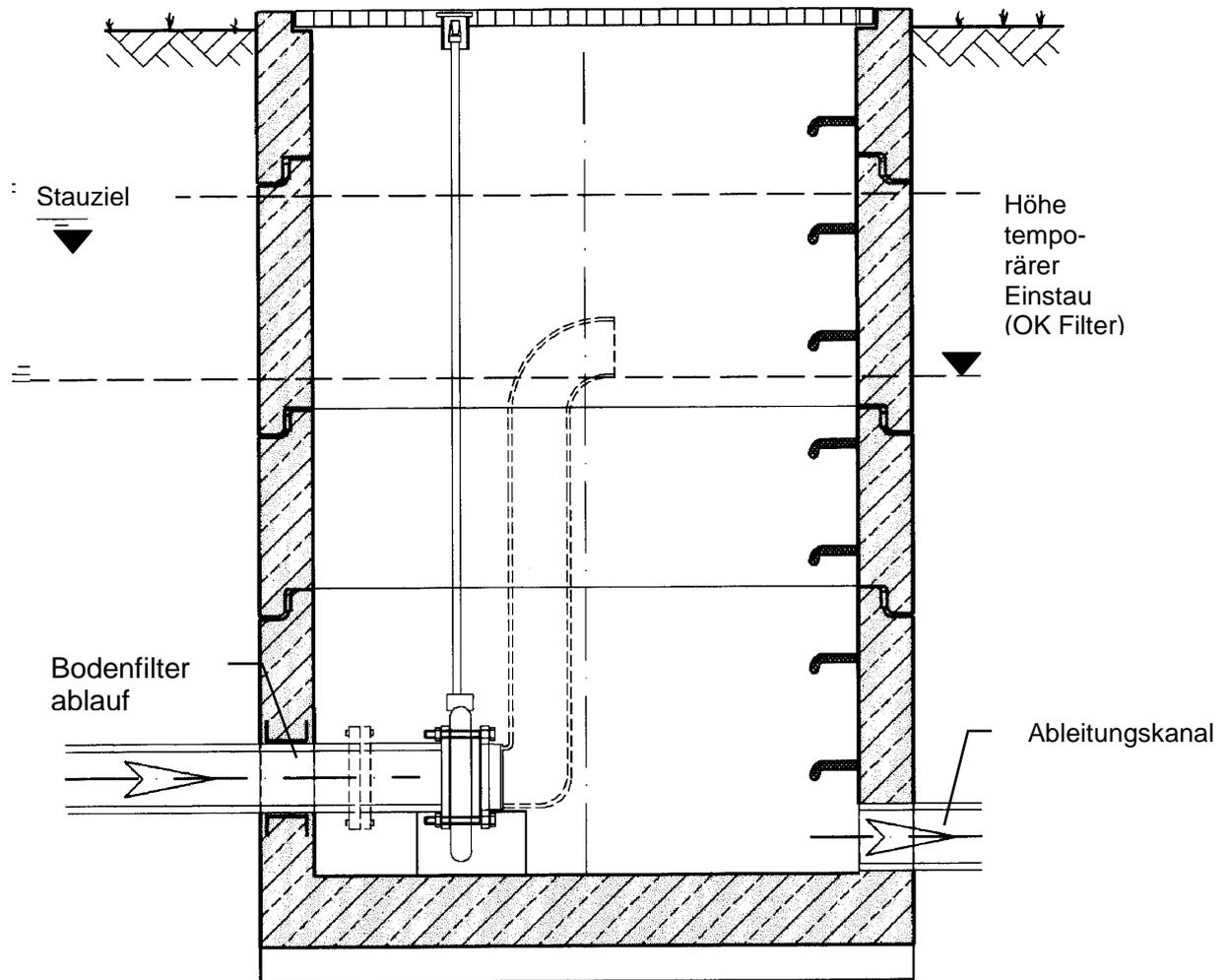


Bild 17: Schnitt durch das Ablaufbauwerk einer Filteranlage mit einer Vorrichtung zum temporären Einstau

Entlastungsbauwerk:

Das Speichervolumen eines Retentionsbodenfilters ist entsprechend den Bemessungsregeln des Kapitel 1.8 in der Regel kleiner als das Speichervolumen eines nach ATV-A 117 bemessenen Regenrückhaltebeckens. Deshalb benötigt ein Retentionsbodenfilter ein Entlastungsbauwerk.

Dafür kommen mehrere Standorte in Frage

- im Zulauf zum Filterbecken, analog zum BÜ eines Fangbeckens
- im Ablaufbereich des Filterbeckens, analog zum KÜ eines Durchlaufbeckens
- im Zulauf und Ablaufbereich des Filterbeckens, analog zum KÜ und BÜ eines Durchlaufbeckens mit zwei Überläufen

Über den zweckmäßigsten Standort des Entlastungsbauwerks muß anhand der örtlichen Verhältnisse des Einzelfalls entschieden werden.

Ein Entlastungsbauwerk im Zulauf zum Filterbecken hat den Vorteil, daß der Filter bei Bedarf vorübergehend umgangen werden kann. Es hat den Nachteil, daß das Entlastungswasser keine weitere Sedimentation erfährt.

Ein gegenüber dem Zulaufbereich angeordnetes Entlastungsbauwerk besitzt die Wirkung eines Klärüberlaufs (Bild 20). Das Entlastungswasser ist dann frei von sedimentierbaren Stoffen. Die mit der großen Oberfläche des gefüllten Retentionsraums verbundene See- retention wirkt sich dämpfend auf die Flutwelle aus.

Traditionell werden Entlastungsbauwerke als gepflasterte Dammscharten oder als Überfallwehre ausgebildet. Bild 18 zeigt ein Beispiel im Grundriß.

Für eine optimale Sedimentation sind lange Wehrkronen erforderlich. Die dadurch bedingten geringen Überfallhöhen erfordern eine exakte, setzungsfreie Herstellung, eine Befestigung des Zu- und Abstrombereichs und eine sorgfältige Unterhaltung.

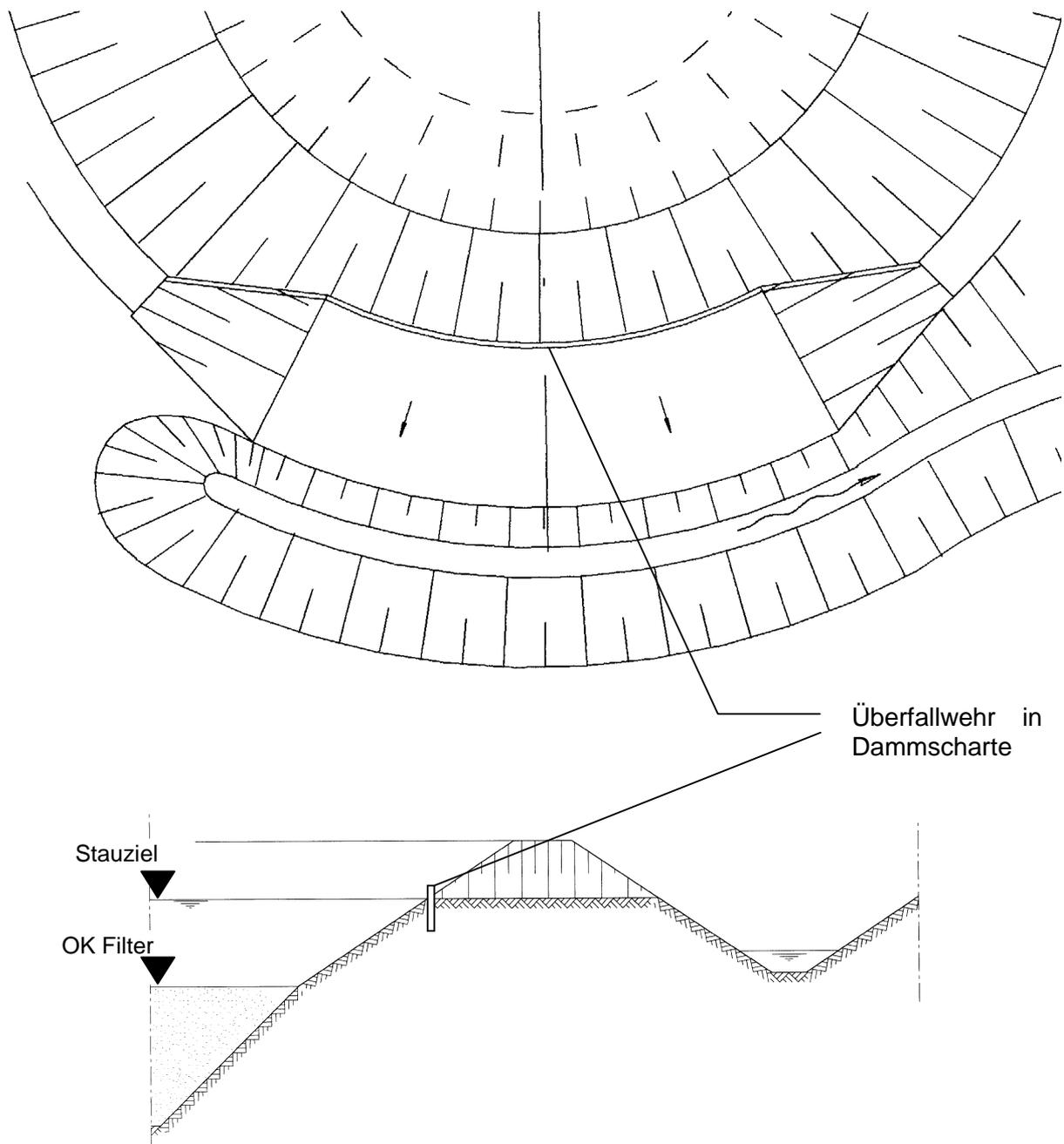


Bild 18: Beispiel für ein Entlastungsbauwerk, ausgebildet als Überfallwehr

Eine optisch ansprechende, den Ansprüchen der Landschaftspflege gerecht werdende und dennoch kostengünstige Bauweise stellen die verdeckten Entlastungen der Gruppe AGB dar.

Bild 19 zeigt als Beispiel die Ausbildung des Entlastungsbauwerks mit verdeckten Rohren. Werkseitig vorgefertigte Rohre lassen sich leicht und genau verlegen und auf exakter Höhe abtrennen.

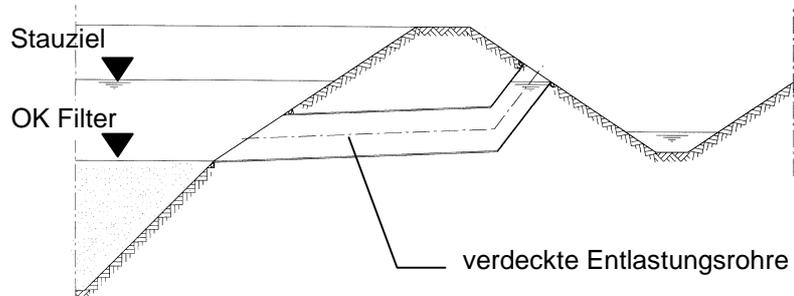
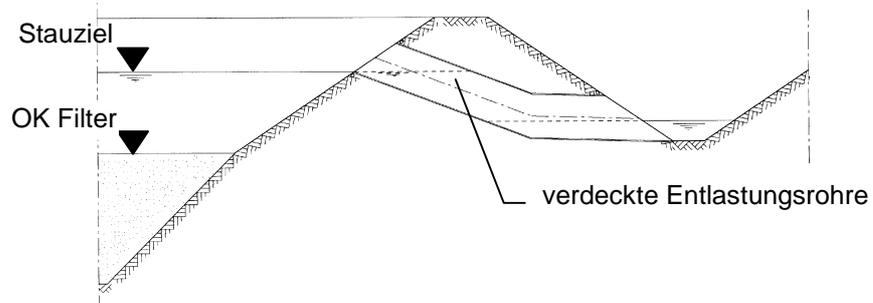
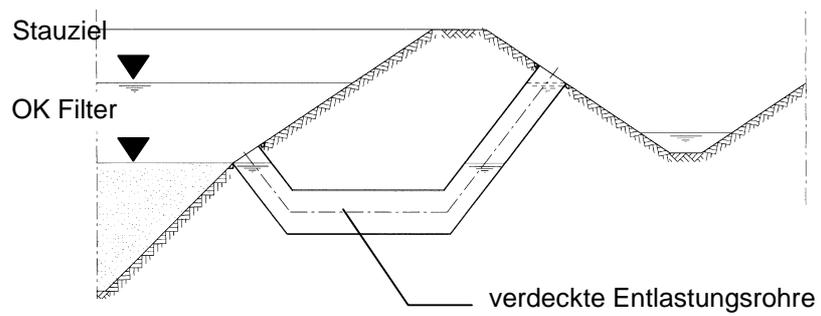
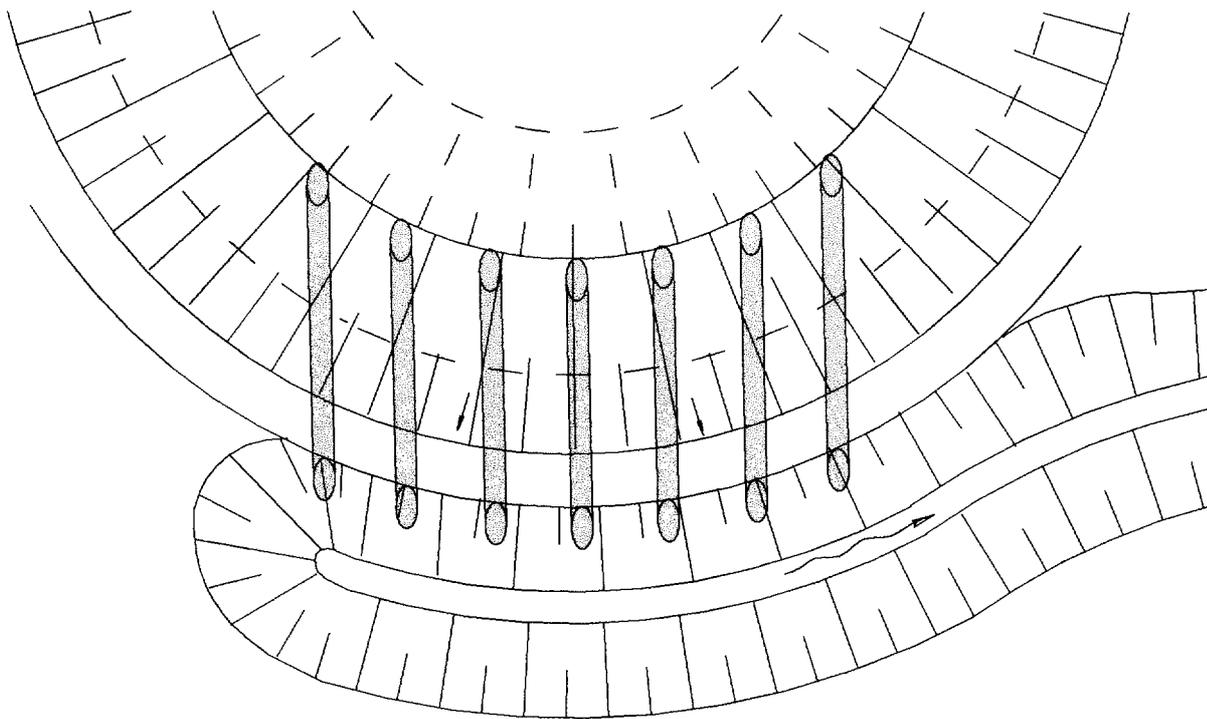


Bild 19: Verdecktes Entlastungsbauwerk nach Gruppe AGB

Umzäunung:

Bodenfilteranlagen müssen im Regelfall eingezäunt werden. Dies soll in erster Linie eine Zerstörung des Filters und des Filterbewuchs durch Betreten und Befahren verhindern. Jeder Vertritt des Bewuchs und jede Verdichtung durch Betreten, Befahren oder Beweiden muß unterbunden werden.

Gesamtbauwerk:

Bei der Zusammenstellung der vorstehend beschriebenen Elemente zur Gesamtanlage besitzt der Planer zahlreiche Möglichkeiten.

Die für den Planer einfachste Form ist eine rechteckige Anlage. Eine Alternative dazu ist die Ringform. Ein zentrisch angeordnetes rundes Durchlaufbecken bildet den mittigen Kern, um den sich der Filterkörper und Retentionsraum -radial beschickt und gedränt- ringförmig herumlegt.

In Bild 20 ist die Ellipsen- oder Tropfenform der Gruppe AGB dargestellt, die landschaftsgestalterischen Ansprüchen gerecht wird. Ein rundes Durchlaufbecken als erste Stufe bildet als Beschickungselement einen Pol der Anlage. Dem steht als Gegenpol das Entlastungsbauwerk mit verdeckten Rohren gegenüber.

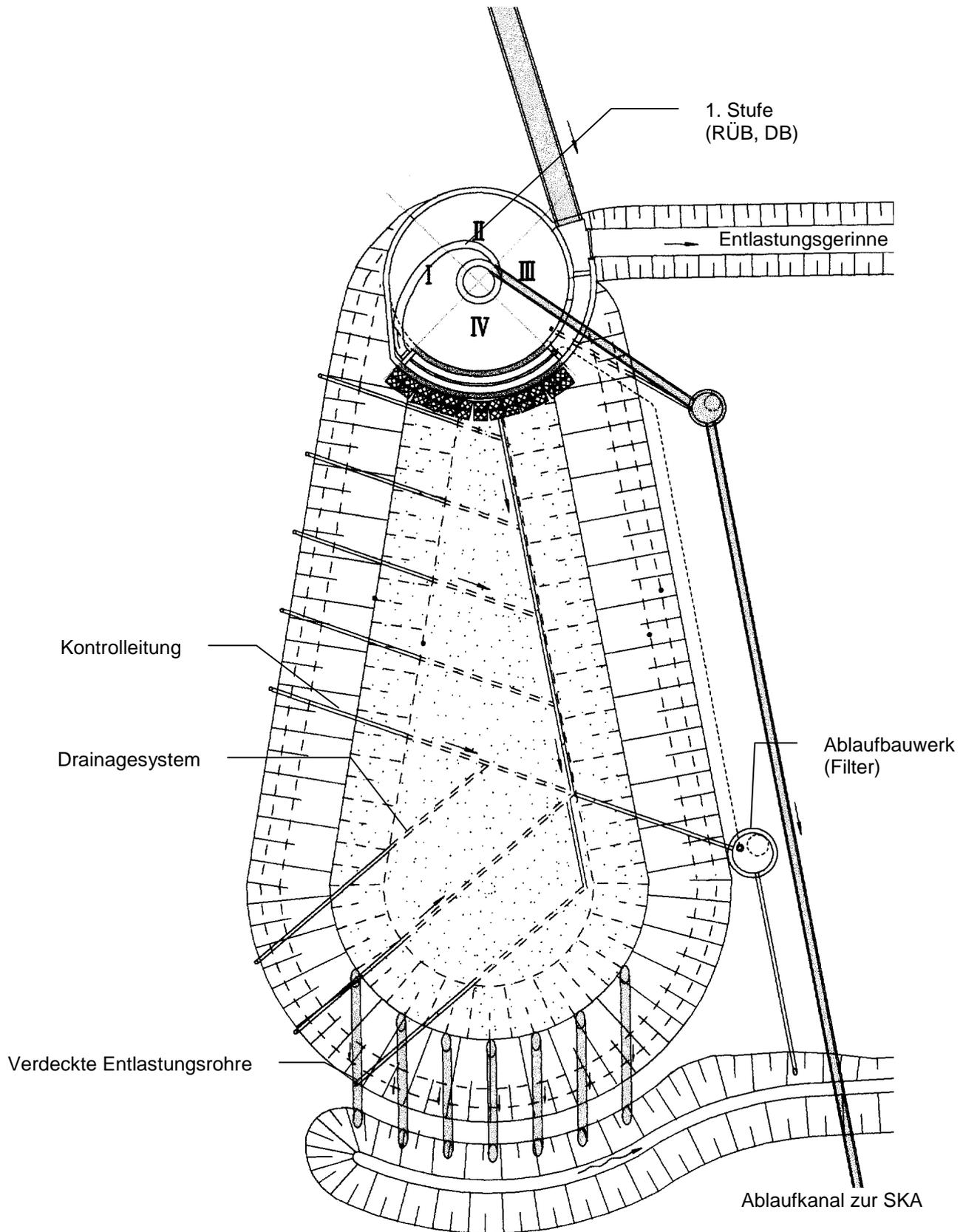


Bild 20: Retentionsbodenfilteranlage des Mischsystems in Tropfenform nach der Gruppe AGB

1.13 Hinweise zur Bauausführung

Kritische Phasen beim Bau einer Retentionsbodenfilteranlage sind:

- Herstellung der Dichtung
- Verlegung des Drainagesystems
- Einbau des Filtermaterials
- Bepflanzung

Bei diesen Gewerken ist eine überdurchschnittlich intensive Bauüberwachung erforderlich.

Dichtungen müssen dicht sein. Die Praxis zeigt, daß diese triviale Aussage keine Selbstverständlichkeit ist. Die für die Qualitätssicherung der verschiedenen Materialien vorgeschriebenen Maßnahmen sind strikt zu beachten. Die Dichtheit der Filteranlage ist in zwei Schritten zu überprüfen. Eine erste Abnahme erfolgt bei Einstau der Anlage zur Bewässerung des Schilfs, die zweite nach Stabilisierung der Böschungen.

Das angrenzende Gelände ist so zu gestalten, daß dem Retentionsraum kein Oberflächenwasser zufließen kann.

Bei der Abnahme des Drainagesystems ist zu überprüfen, ob Vollrohre und Sickerrohre plangemäß verlegt wurden, ob das vorgeschriebene Gefälle eingehalten wurden und ob Rohre mit richtigem Durchmesser und Schlitzweite eingebaut wurden. Der gelieferte Drainagekies ist auf Übereinstimmung mit der Ausschreibung zu überprüfen. Die Mindestüberdeckung der Sickerrohre von 10 cm muß eingehalten sein.

Die Kornzusammensetzung, die erforderliche Durchlässigkeit und der Chemismus von Filtersand sind auf Übereinstimmung mit der Ausschreibung zu überprüfen. Es ist keine Selbstverständlichkeit, daß Bodenfiltersand entsprechend der Zusammensetzung nach Bild 1 geliefert wird. Das gilt auch, wenn in den Ausschreibungsunterlagen eine entsprechende Sieblinie vorgegeben wird. Es hat sich als notwendig erwiesen, von der Bauleitung die Kornzusammensetzung vor der Anlieferung überprüfen zu lassen. Eine entsprechende Position ist im Leistungsverzeichnis vorzusehen.

Beim Einbau sind Teleskopbagger, Seilbagger und ähnliche Geräte einzusetzen. Jede Verdichtung der Filterschicht durch Befahren ist zu vermeiden. Die eingebaute Schichtstärke ist unter Berücksichtigung der künftigen Setzung zu überprüfen.

Lehmboden erfordert einen besonders sorgfältigen Einbau. Die Übereinstimmung des gelieferten Materials mit dem vorweg ausgesuchten Material muß überprüft werden. Die Entnahme von Rückstellproben ist erforderlich. Die Witterungsbedingungen beim Einbau spielen eine entscheidende Rolle. Trockenes Wetter ist eine Grundvoraussetzung für eine lockere Lagerungsdichte. Der Wassergehalt eines Lehmbodens muß beim Einbau unter 20 Massenprozent betragen. Jede Art von Verdichtung ist zu vermeiden.

Pflanzungen von Setzlingen müssen von Dielenbrettern aus erfolgen. Die Verschlammung der zunächst ungeschützten Filteroberfläche ist durch Aufbringen einer 0,1 m starken Mulchschicht zu verhindern. Bei einer Schilfpflanzung kommt für die Mulchung Schilfhäcksel, ersatzweise Weizenstrohäcksel in Frage. Mulch ist gegen Aufschwimmen zu sichern. Vegetationsmatten erfordern keine Abdeckung mit Mulch. Die Qualität der gelieferten Vegetationsmatten ist vor der Verlegung durch die Bauleitung zu überprüfen.

1.14 Hinweise zum Betrieb

Das Datum von Fertigstellung und Inbetriebnahme der Anlage ist nicht identisch. Im Hinblick auf die Abrechnung drängt der Bauunternehmer auf eine frühzeitige Inbetriebnahme der Anlage. Voraussetzung für die Inbetriebnahme ist die Begrünung der Böschungen und die flächendeckende Etablierung des Filterbewuchs, um ein Ausspülen der Bepflanzung, ein Rutschen der Böschungen und ein Verschlämmen der Filteroberfläche zu vermeiden. Deshalb muß der Zeitpunkt der Inbetriebnahmen schon in der Ausschreibung festgelegt werden.

Schilfpflanzungen benötigen in den ersten beiden Jahren nach der Fertigstellung eine Starthilfe durch regelmäßige Bewässerung und temporären Überstau zur Unterdrückung von Fremdvegetation. Es muß vorab geklärt werden, wer diese Pflegeleistungen erbringt. Ist das Schilf etabliert, erfolgt keine Ernte und keine Mahd. Der Entzug von Stoffen durch die Ernte ist gering, der Schaden durch Vertritt und Verdichtung bei der Ernte wäre dagegen hoch. Schilfmatten erreichen im Vergleich zu Setzlingen in kürzerer Zeit einen bodendeckenden Zustand. Die Filteranlage kann dadurch früher in Betrieb genommen werden.

Vor der Inbetriebnahme ist das Drainagesystem vollständig durchzuspülen. Hohe Spüldrücke sind zu vermeiden, da sich diese über die Schlitze in das Filtermaterial ausbreiten. Die Folge wäre eine Störung des Filteraufbaus.

Der Aufwuchs von Bäumen und Sträuchern auf der Filterfläche und im Böschungsbereich ist zu unterbinden. Deren Entfernung auf dem Filter soll im Winter bei Frost erfolgen.

Bodenfilter benötigen für den Aufbau von Biofilmen eine Einarbeitungszeit, die bei Sand ein halbes Jahr betragen kann. Auch nach der Einarbeitung finden Vorgänge statt, die nur für die Anfangsjahre typisch sind. Ein zu früher Start der Überprüfung der Reinigungsleistung ist unzweckmäßig. Bezüglich der Nährstoffelimination dürfen aus den ersten Betriebsjahren keine zu positiven Schlüsse gezogen werden. Durch den Einbau von Nährstoffen in Biomasse und die Sorption von Phosphor an zunächst reichlich vorhandene Bindungsplätze treten positive Anfangseffekte auf, die nach längere Betriebszeit nicht mehr vorhanden sind. Der reife Filter verhält sich daher anders als der junge Filter.

1.15 Kosten

Retentionsbodenfilteranlagen bestehen in der Regel aus einer Kombination von Regenüberlaufbecken und Filterbecken. Im Rahmen der weitergehenden Mischwasserbehandlung entstehen durch ein zusätzliches Filterbecken zwangsläufig zusätzliche Kosten. Andererseits besteht die Erwartung, durch Substitution von Regenüberlaufbecken erhebliche Kostenreduzierungen erreichen zu können. Um eine realistische Beurteilung zu ermöglichen, werden die Kosten der ersten und der zweiten Stufe einer Retentionsbodenfilteranlage getrennt dargelegt.

1.15.1 Kosten von Regenüberlaufbecken in Betonbauweise

Bild 21 enthält in Abhängigkeit von der Bauform die spezifischen Gesamtkosten DM/m³ (Bau und Ausrüstung) von geschlossenen Regenüberlaufbecken in Abhängigkeit vom Nutzvolumen. Es beruht auf einer am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Fachhochschule Karlsruhe in Zusammenarbeit mit dem Regierungspräsidium Karlsruhe durchgeführten Auswertung von in den Jahren 1987 bis 1993 gebauten Becken. Die Grundstückskosten und die Ingenieurgebühren sind darin nicht enthalten.

Bild 21 ermöglicht folgende Aussagen:

- Es besteht bei allen Beckenformen eine starke Abhängigkeit der spezifischen Kosten vom Nutzvolumen. Wird beispielsweise ein Rechteckbecken von 400 m³ um ein Viertel auf 300 m³ verkleinert, dann sinken die Kosten nicht um 25 %, sondern lediglich um 17 %. Ursache dafür ist der starke Einfluß der peripheren Anlagen, wie beispielsweise Drossel- und Spüleinrichtungen sowie Entlastungsanlagen auf die Gesamtkosten.
- Rundbecken sind preiswerter als Rechteckbecken und Kanalstauräume. Trotzdem spielen Rundbecken in der Praxis keine dominierende Rolle. Am häufigsten werden Rechteckbecken gebaut. In der Form der Regenüberlaufbecken steckt ein beachtliches Sparpotential. Bei Regenüberlaufbecken unter 2.000 m³ soll häufiger als bisher auf die kostengünstigen Rundbecken zurückgegriffen werden.
- Unter Kostengesichtspunkten sollen Bodenfilteranlagen entsprechend Bild 21 bevorzugt in der preisgünstigen Kombination Rundbecken, Filterbecken erstellt werden.

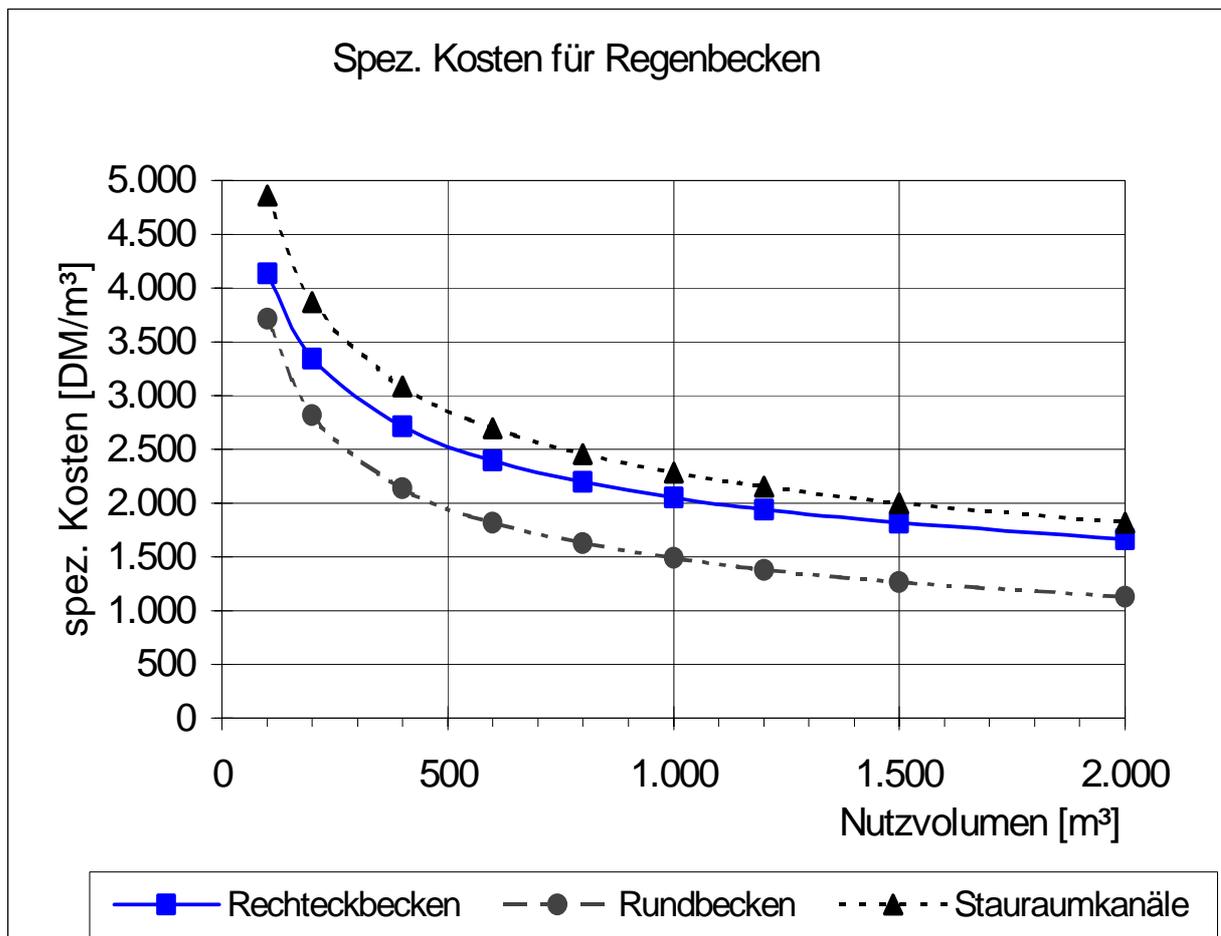


Bild 21: Spezifische Gesamtkosten (Bau und Ausrüstung) von Stauraumkanälen, Rechteck- und Rundbecken in Abhängigkeit vom Nutzvolumen (Bezugsjahr 1994)

1.15.2 Kosten von Filterbecken in Erdbauweise

Die Kosten von Filteranlagen unterliegen einer Reihe von Einflüssen. Zunächst sind örtliche Faktoren zu nennen. Grundwasserstände, natürliche Dichtheit oder Durchlässigkeit des Baugrunds, örtliche Ansprüche an die Bepflanzung von Außenanlagen können erheblichen Einfluß auf die Gesamtkosten nehmen. Eine weitere Kostengruppe stellen Sicherheitsmaßnahmen wie der Anschluß an eine Fernüberwachung und der Aufwand für einen Umlauf zur Außerbetriebnahme der Anlage dar. Um die Kosten von an unterschiedlichen Standorten gebauten Anlagen vergleichen zu können, ist eine Bereinigung der örtlichen Verhältnisse erforderlich.

In Bild 22 sind in Abhängigkeit vom Retentionsvolumen die spezifischen Kosten DM/m³ von Retentionsbodenfiltern in Erdbauweise (Misch- und Trennsystem) bezogen auf den Kostenindex 1995 dargestellt. Sie beruhen auf einer Auswertung von in den Jahren 1993 bis 1996 im Regierungsbezirk Karlsruhe geplanten offenen Retentionsbodenfilterbecken (Gesamtstärke von Filter- und Drainageschicht 1,2 m). In diesen Kosten sind nachfolgende Positionen nicht enthalten, da sie örtlich zu verschieden sein können:

- Wasserhaltung
- Aufwendungen für eine Dichtung
- Umgehungsleitung für eine Außerbetriebnahme
- Steuer- und Fernwirktechnik zu einer Zentrale
- Ingenieurgebühren
- Grundstückskosten.

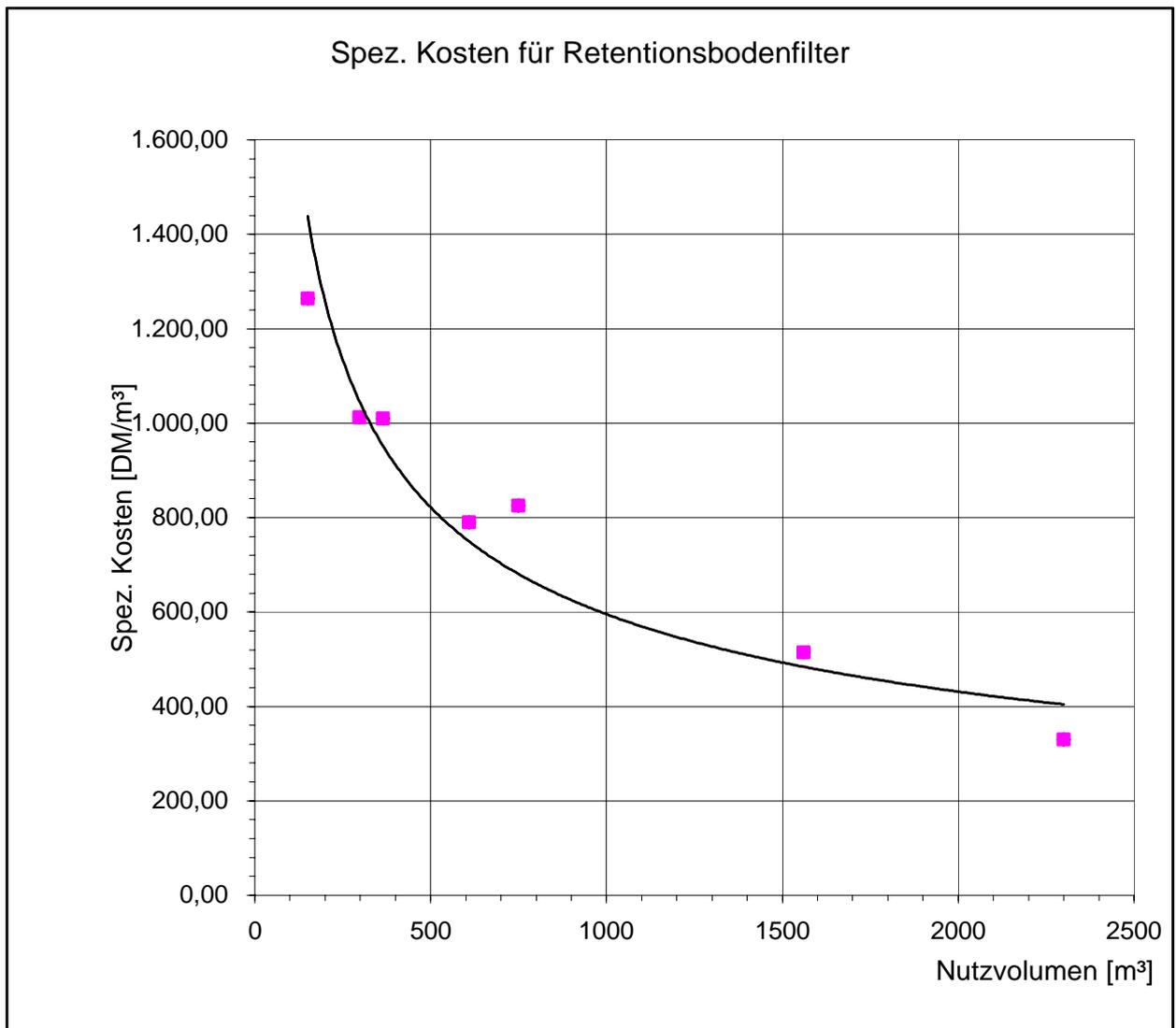


Bild 22: Spezifische Kosten von Retentionsbodenfiltern in Abhängigkeit vom Retentionsvolumen (Bezugsjahr 1995)

Bild 22 ermöglicht folgende Aussagen:

- Auch bei den Retentionsbodenfiltern besteht eine starke Abhängigkeit der spezifischen Kosten vom Retentionsvolumen
- 1 m³ Retentionsvolumen eines offenen Filterbeckens lässt sich preiswerter herstellen als 1 m³ Nutzvolumen eines geschlossenen Regenüberlaufbeckens. 1 m³ Nutzvolumen der preisgünstigen Rundbecken kostet so viel wie ca. 3 m³ Retentionsraum eines Filterbeckens.

1.15.3 Kosten der Gesamtanlage

Das derzeitige große Interesse an Retentionsbodenfilteranlagen beruht oftmals auf der Erwartung, daß mit diesem Verfahren eine kostensparende Variante zu den herkömmlichen Regenüberlaufbecken gefunden wurde. Optimisten erwarten gegenüber einem Regenüberlaufbecken sogar geringere Baukosten verbunden mit einem deutlich verbesserten Gewässerschutz.

Diese Erwartungen treffen in der Regel nicht zu. Die Kosten der Gesamtanlage aus erster und zweiter Stufe sind höher als die Kosten eines Regenüberlaufbeckens mit Standardbemessung. Davon sind die Einsparungen infolge der Wirkung als Ausgleichsmaßnahme abzusetzen. Es ist falsch, im Retentionsbodenfilter ein billiges Ersatz-RÜB zu sehen. Bodenfilter sind keine Preisbrecher bezüglich Regenüberlaufbecken, sondern sehr preisgünstige Anlagen der weitergehenden Mischwasserbehandlung. Zusätzlich zur Reduzierung der Schmutzfrachten tragen Bodenfilter zu hydraulischen Entlastung von Gewässer und Kläranlage bei und können als Ausgleichsmaßnahme dienen. Sie sind in diesem Zusammenhang eine kostengünstige Alternative zur modifizierten Entwässerung.

Vergleiche müssen auf der Basis von Vergleichbarem erfolgen. Vergleichbar mit dem Retentionsbodenfilter sind Anlagen mit Retention/ Fällung/technischer Filtration oder Anlagen mit Fällung/Flotation. Unter realen Betriebsbedingungen arbeitende technische Full Scale Filtrationsanlagen für Mischwasser gibt es noch nicht. Fest steht aber, daß die Kosten für Bau, Unterhaltung, Wartung und Betrieb erheblich sind und ein Vielfaches der Aufwendungen für eine Bodenfiltration betragen. Retentionsraum benötigen diese Verfahren ebenso wie ein Bodenfilter. Hinzu kommt aber ein laufender Personalbedarf, Reparaturbedarf, Chemikalienverbrauch, Energieeinsatz, zusätzlichen Schlammfall und Abwasseranfall durch Rückspülwasser sowie laufende Entsorgungskosten. Demgegenüber sind die Betriebskosten eines Retentionsbodenfilters minimal.

1.16 Zusammenfassende Bewertung

- Bodenfilter sind mechanisch-biologische Mischwasserkläranlagen mit Rückhaltefunktion. Sie sind keineswegs nur für den ländlichen Raum geeignet, sondern kommen für alle Arten von Erschließungsmaßnahmen, auch in städtischen Gebieten, in Frage. Allerdings ist der erforderliche Flächenbedarf höher als bei anderen Behandlungsverfahren vergleichbarer Qualität.
- Bezüglich ihrer Reinigungsleistung stellen Anlagen mit Fällung/Filtration oder Fällung/Flotation den Vergleichsmaßstab dar. Bodenfilter sind diesen Anlagen bezüglich Kosten, Energieeinsatz, Unterhaltung und Wartung überlegen.
- Mechanisch wirkende Anlagen wie Kombinationen von Hydrozyklonen und Durchlaufbecken sowie Hochleistungsabscheider kommen bezüglich ihrer Reinigungsleistung bestenfalls in die Nähe von mechanischen Filtern. Mit Bodenfiltern können sie nicht konkurrieren.
- Retentionsbodenfilter sind Multifunktionsbauwerke mit der Wirkung Abflußdämpfung, Driftverhinderung, Erosionsbekämpfung und Verbesserung der Gewässergüte.
- Retentionsbodenfilter verbessern in vielfältiger Weise die Ablaufqualität von Regenüberlaufbecken. Sie verhindern den Ausstoß von Grobstoffen, Schlamm und Trübung. Sie wirken gegen Sauerstoffdepressionen im Gewässer. Sie sind hochwirksam bei der Beseitigung von Ammonium, eine der häufigsten Ursachen von Artenarmut in Gewässern.
- Müssen zum Schutz eines Gewässers vor Erosion und hydrobiologischer Überlastung abflußdämpfende Maßnahmen ergriffen werden, bildet ein Retentionsbodenfilter die ideale Verknüpfung von kostengünstiger Mischwasserbehandlung und Abflußdämpfung.
- Mit Schilf bepflanzte Filterbecken haben Bedeutung als Ausgleichsmaßnahme.

- Retentionsbodenfilter lassen sich gut in die Landschaft einbinden und stellen bei entsprechender Ausführung ein landschaftsgestaltendes Element dar.

Unter diesen Gesichtspunkten sind Retentionsbodenfilter zwar kein preisbrechendes aber ein sehr preisgünstiges Element einer ökologischen Mischwasserbehandlung, das mit jeder anderen Form der Regenwasserbewirtschaftung wetteifern kann.

2 Bodenfilter im Trennsystem

2.1 Eigenschaften des Regenwasserabflusses beim Trennverfahren

Die nachfolgenden Ausführungen befassen sich mit dem Niederschlagswasser der Siedlungsgebiete. Dort wird der Abfluß von Dächern, Hofflächen, Gehwegen, Plätzen und Straßen gemischt. Die Mischung wird als Regenwasserabfluß bezeichnet. Das echte Trennsystem ist dadurch gekennzeichnet, daß das Regenwasser keine Einleitungen von häuslichem oder gewerblichem Abwasser aufweist. Im Vergleich zum Mischwasser enthält Regenwasser wenig Stickstoff, Ammonium, Phosphor, Keime und einen geringen Biochemischen Sauerstoffbedarf. Sofern diese Stoffe enthalten sind, sind sie überwiegend natürlichen Ursprungs von Bäumen, Grünanlagen, Gärten [20]. Die Untersuchungen der letzten zehn Jahre haben sich deshalb wenig mit diesen Stoffen befaßt. Im Mittelpunkt des Interesses standen die Metalle. Entsprechend wird das Maß der Verschmutzung von Abflüssen des echten Trennsystems schwerpunktmäßig aus der Luftverschmutzung, aus Dachmaterialien und aus der Struktur von Verkehrsflächen hergeleitet [4]. Beim echten Trennsystem wird eine technische Regenwasserbehandlung in der Regel als nicht erforderlich angesehen.

Das echte Trennsystem kann allerdings nicht als selbstverständlicher Regelfall angesehen werden. Zwei Ursachen verwandeln es häufig in ein verdecktes Mischsystem:

- Einschüttungen von Öl, Farben, Chemikalien und Fäkalien über Gullys.
- Einleitungen von häuslichem und gewerblichem Abwasser über Fehlan schlüsse.

Die Bekämpfung derartiger Mißstände erfordert von den Gemeinden energisches Einschreiten und hohen Personaleinsatz. Dies ist keineswegs überall zu finden.

Beim verdeckten Mischsystem prägen neben den Metallen und dem CSB auch Nährstoffe, Ammonium und Keime die Verschmutzung des Regenwassers. Die Notwendigkeit einer Behandlung wird in diesen Fällen offensichtlich.

Die Spanne der Verschmutzung von Abflüssen aus Trennsystemen ist außerordentlich groß. Die Bewertung reicht von „gering verschmutzt“ bis zu „dünn es Mischwasser“. In der Praxis ist es für einen Planer außerordentlich schwierig zu prognostizieren, in welcher Größenordnung sich die Regenwasserverschmutzung später einstellen wird. Eine Bewertung nach der baulichen Struktur, Luftverschmutzung, Nutzung und Verkehr entsprechend [4] ist zwar ein nützliches, aber unvollkommenes Instrument einer Verschmutzungsprognose beim Trennsystem.

In den zurückliegenden Jahren wurde eine Fülle von Untersuchungen über die Belastung von Regenwasserabflüssen in Deutschland durchgeführt. Das Einzugsgebiet bestand meist aus einzelnen Dächern, Plätzen oder Straßen. Entsprechend den örtlichen Verhältnissen streuen die Ergebnisse gewaltig. Die wenigen Untersuchungen, die ein größeres Einzugsgebiet umfassen und damit zufällige lokale Einflüsse mildern, sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Jedes dieser Einzugsgebiete wird als „sauber“, ohne Fehlan schlüsse und ohne hohe Verkehrsbelastung beschrieben [20], [24], [25]. Der relative Vergleich offenbart, daß diese subjektive Einschätzung keine Übertragbarkeit gewährleistet. Die Werte der Tabelle 3 zeigen, daß das Gebiet Bremen Panrepel extrem gering verschmutzt ist und die gemessenen Konzentrationen eine Größenordnung aufweisen wie sie sehr gering belasteten Flächen zugeordnet wird. Das Gebiet Reinickendorf ist im Vergleich dazu ungleich höher belastet und liegt in einem Bereich der von Mischsystemen bekannt ist.

Ort Jahr Nutzung	Bremen Panrepel 1993 / 95 Gewerbe [24]	Karlsruhe Grünwinkel 1993 Wohnen/Gewerbe [25]	Berlin Reinickendorf 1989 Wohnen/Gewerbe [20]
AFS	32	52,1	83
CSB	45	55,3	179
Pb	0,023	0,051	0,161
Zn	0,375	1,030	1,890
Cu	0,044	0,053	0,049

Tabelle 3: Mittlere Konzentrationen (mg/l) von Regenwasserabflüssen nicht modifizierter Trennsysteme

Zu beachten ist der gegenwärtige Trend zu modifizierten Systemen. Durch die getrennte Ableitung und Versickerung der Abflüsse von gering belasteten Flächen sind Regenwasserabflüsse beim modifizierten Rumpfsystem wesentlich konzentrierter als sich aus den Werten der Tabelle 1 ergibt. Bei einer Reihe von Güteproblemen spielt der Gradient der Belastung eine Rolle und der wird durch Konzentrationen maßgeblich beeinflusst. Modifizierte Entwässerungssysteme bringen die Notwendigkeit einer Regenwasserbehandlung deutlicher zum Ausdruck als nicht modifizierte Systeme.

2.2 Konventionelle Regenwasserbehandlung beim Trennsystem

In der Praxis wird überwiegend keine technische Regenwasserbehandlung vorgenommen. Die getrennte Ableitung von Schmutz- und Regenwasser, also der Bau eines Trennsystems, wird als die eigentliche technische Regenwasserbehandlungsmaßnahme angesehen. Ausgenommen von dieser Regel sind in Baden-Württemberg Gewerbegebiete, Trinkwasserschutzgebiete und stehende Gewässer. In diesen Fällen wird der Bau von Regenklärbecken (RKB) gefordert. Ein Regenklärbecken ist ein Absetzbecken für leicht sedimentierbare Stoffe mit integriertem Leichtstoffabscheider. Es dient dem Katastrophenschutz bei Unfällen mit flüssigem Gefahrgut, als Rückhalteanlage bei unerlaubten Einschüttungen von Ölen, Farben, Chemikalien, als Entschlammungsanlage und als Vorrichtung zum Aufdecken von Fehlan schlüssen.

Regenklärbecken werden nach ihrer Bauart unterschieden [2]:

- Regenklärbecken ohne Dauerstau (RKB oD)
- Regenklärbecken mit Dauerstau (RKB mD).

Regenklärbecken ohne Dauerstau sind nicht ständig gefüllt. Es handelt sich dabei um nach den Grundsätzen von Regenüberlaufbecken konstruierte Betonbecken mit maschinellen Einrichtungen zur Beckenreinigung und zur Beckenentleerung. Die dafür erforderliche Verbindung zu einem Schmutzwasserkanal ist nur vorübergehend während der Reinigung und Entleerung hergestellt. Da die dabei entstehende Belastung für den Schmutzwasserkanal und das Klärwerk bei einem eingestauten Regenwassernetz erheblich sein kann, sollten die oberen zwei Drittel der Wassertiefe im Becken nach der Sedimentation ohne die Schwimmstoffe ins Gewässer entleert werden. Nur das unterste konzentrierte Drittel der Beckenfüllung

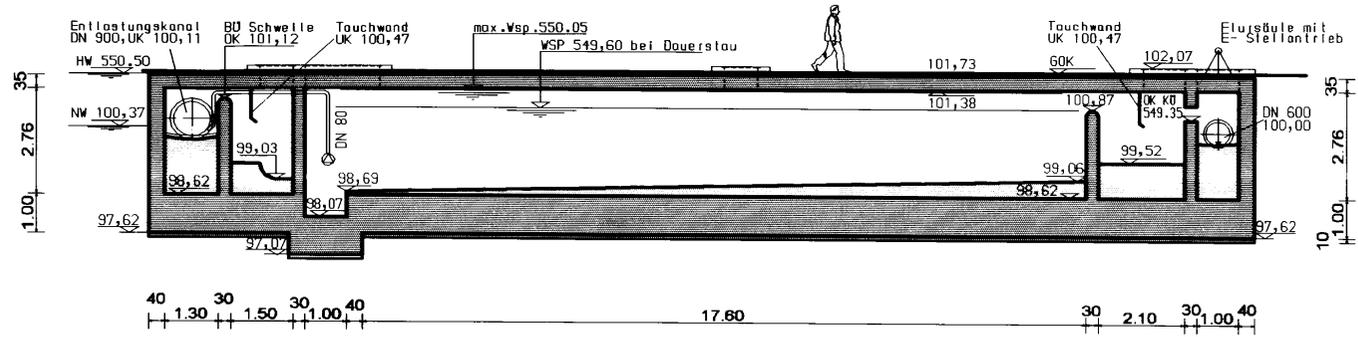
gelangt zusammen mit den Schwimmstoffen und dem Bodenschlamm in den Schmutzwasserkanal und zum Klärwerk.

Bild 23 zeigt ein Beispiel für diese Bauweise.

Dieses Becken ist wie ein Durchlaufbecken gebaut. Das Wasser tritt in das Becken ein, wird durch eine Lamellenwand auf Parallelströmung ausgerichtet, durchläuft eine speziell für den Leichtstoffrückhalt ausgebildete Tauchwandkammer und läuft am gedrosselten Klärüberlauf über. Zuflüsse, die den Volumenstrom Q_{RKB} überschreiten, entlasten am Beckenüberlauf. Nach Regenende werden die oberen zwei Drittel der Füllung mit einer Pumpe über den Beckenüberlauf entleert. Anschließend geht der Strahlreiniger in Betrieb. Das untere Drittel der Füllung sowie die Schwimmstoffe werden dann durch eine weitere Pumpe in den Schmutzwasserkanal entleert.

Diese Bau- und Betriebsweise wird im Bewertungsschema nach [4] im Vergleich zu anderen Formen von Regenklärbecken recht gut bewertet. Ergänzend sei darauf hingewiesen, daß der Beckenüberlauf (BÜ) in Bild 23 in Baden-Württemberg bis vor kurzem Entlastungsbauwerk (EB) genannt wurde.

Nicht zu vertreten sind Regenklärbecken, die über die bloße Beckenentleerung hinaus eine ständig geöffnete Verbindung zu einem Schmutzwasser- oder Mischwasserkanal besitzen. Ein formales Trennsystem, dessen Regenwasserkanal bei Regenwetter einen permanenten Drosselabfluß in den Schmutzwasserkanal aufweist, stellt eine Entartung des echten Trennsystems dar. Der Grundgedanke einer Entlastung des Klärwerks durch Trennung ist dann aufgehoben. Zu dieser Gruppe von Regenklärbecken gehören auch die zur Zeit intensiv propagierten hydrodynamischen Abscheider, die in der Regel zur laufenden Ableitung des abgetrennten Sediments einen permanent geöffneten Drosselabfluß in einen Schmutzwasserkanal einleiten. Je größer der Drosselabfluß gewählt wird, um so besser ist dabei die Abscheidewirkung. Hydrodynamische Abscheider (Zyklon- und Wirbelabscheider), kommen für den Einsatz beim Trennsystem deshalb nur in Sonderfällen in Frage. Anwendungsfälle für eine permanent offene Verbindung zum Schmutzwasserkanal sind lediglich Fehlentwicklungen, die einst als Trennsystem geplant wurden, bei denen aber die Zahl der Fehlschlüsse und Einschüttungen soweit fortgeschritten ist, daß sie als Mischsystem behandelt werden müssen.



Grundriß

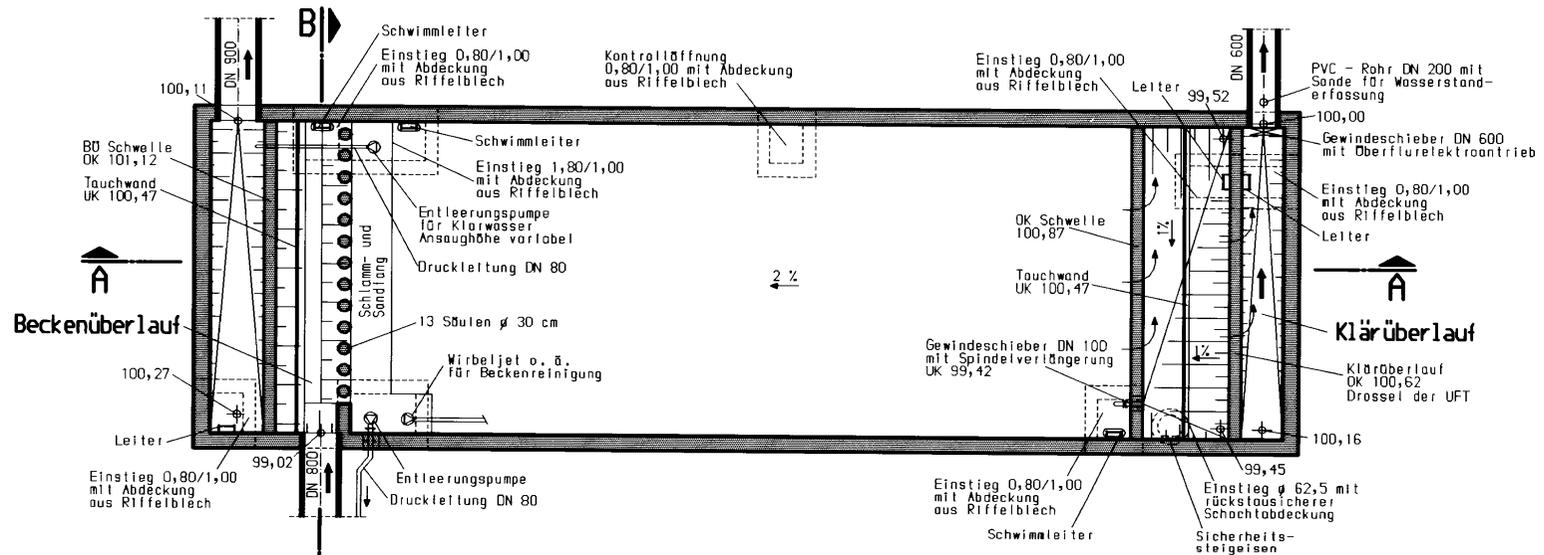


Bild 23: Regenklärbecken in Betonbauweise mit teilweiser Entleerung in den Schmutzwasserkanal

Regenklärbecken mit Dauerstau sind ständig mit Wasser gefüllt. Konstruktiv werden sie wie Durchlaufbecken ausgebildet. Die Reinigung der Becken erfolgt erfahrungsgemäß nur ein- bis zweimal jährlich. Besonders bei kleinen Becken wird deshalb öfters auf Einrichtungen für eine maschinelle Beckenreinigung verzichtet und die Reinigung von Hand durchgeführt. Zum Zwecke des Katastrophenschutzes bei Unfällen ist in einem Regenklärbecken mit Dauerstau ein Rückhalteraum für 5 m³ Leichtflüssigkeiten vorzusehen [2].

Durch den Abbau von Zehrstoffen bedingte anaerobe Verhältnisse im Wasserkörper des Dauerstaus führen zu Rücklösungen von Metallen und Phosphor aus dem Sediment. Um dies einzuschränken müssen geschlossene Regenklärbecken mit Dauerstau belüftet werden. Anzustreben ist deshalb die offene Bauweise, bei der ein Dauerstau natürlich belüftet wird.

Vom Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Fachhochschule Karlsruhe in Zusammenarbeit mit dem Regierungspräsidium Karlsruhe durchgeführte Erhebungen in Baden-Württemberg ergaben, daß von den Planern geschlossene Regenklärbecken mit Dauerstau in Betonbauweise stark bevorzugt werden, und daß bei den erforderlichen Vorrichtungen für die Belüftung und eine ausreichend große Leichtstoffrückhaltung Defizite vorhanden sind.

Am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft wurden Untersuchungen über die Kosten von geschlossenen rechteckigen Regenklärbecken durchgeführt. Das Ergebnis ist in Bild 24 dargestellt. Es enthält spezifische Kosten DM/m³ bezogen auf das Jahr 1995, in Abhängigkeit vom Nutzvolumen oder Volumen des Dauerstaus. Die Baunebenkosten und Grundstückskosten sind darin nicht enthalten. Eine Aufgliederung in Becken mit und ohne Dauerstau konnte wegen der geringen verfügbaren Datendichte nicht vorgenommen werden.

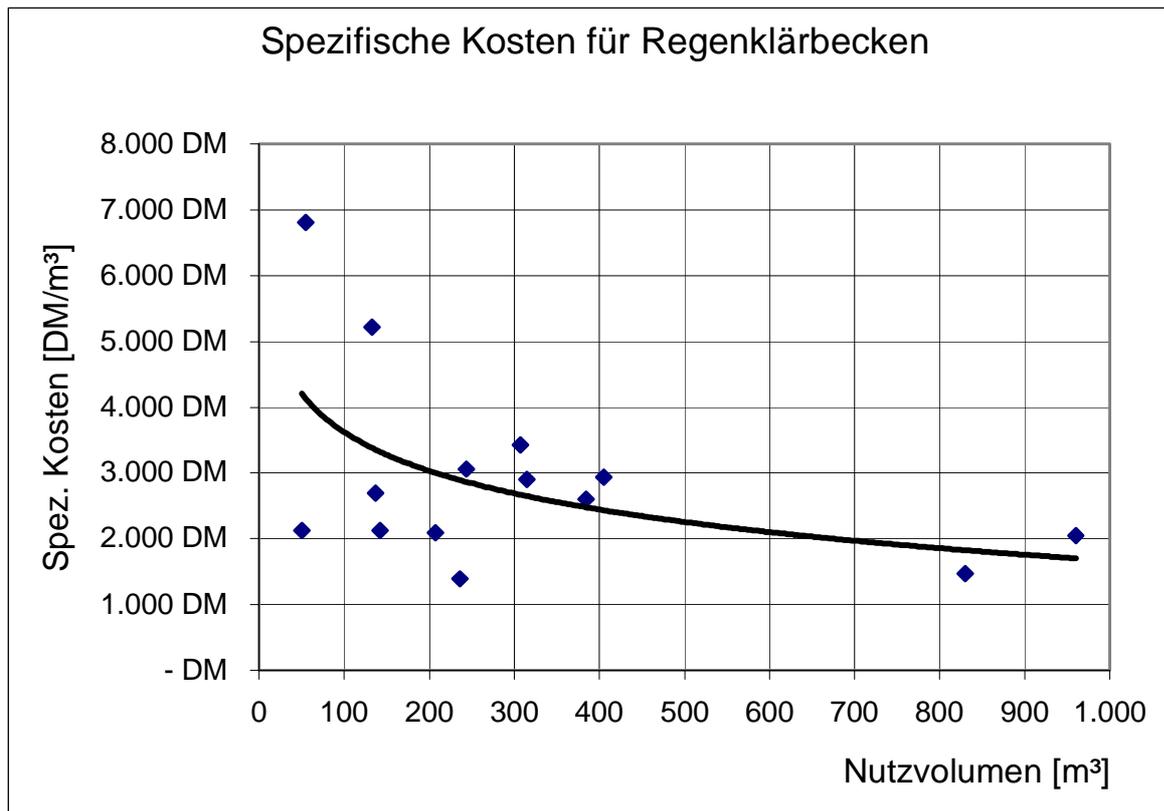
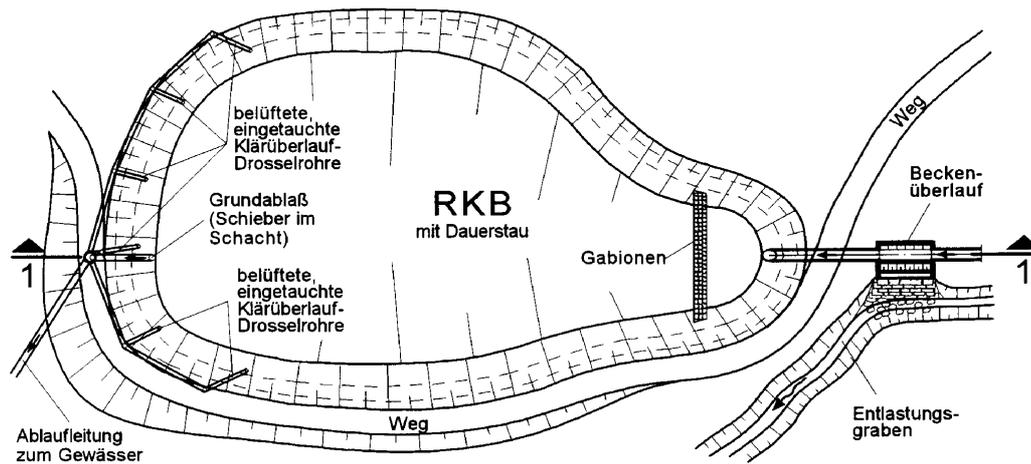


Bild 24: Spezifische Kosten von geschlossenen Regenklärbecken in Betonbauweise (Bezugsjahr 1995)

Aus Bild 24 kann man folgern, daß aufwendig und teuer gebaut wird. Die Kosten von Regenklärbecken mit Reinigungsvorrichtungen etwa im Bereich der Kosten von Regenüberlaufbecken (Bild 21). Nur bei Verzicht auf Komfort bei der Beckenreinigung lassen sich bei geschlossenen Becken günstigere Kosten erreichen.

Wesentlich preisgünstiger lassen sich Regenklärbecken in Erdbauweise herstellen. Bild 25 zeigt als kostengünstigen Vorschlag der Gruppe AGB ein Regenklärbecken mit Dauerstau in Erdbauweise.



Schnitt 1-1

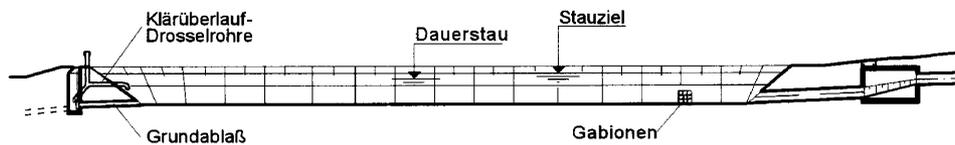


Bild 25: Regenklärbecken mit Dauerstau in Erdbauweise

Um eine optimale Durchströmung des Sedimentationsraumes zu ermöglichen, wurden an Stelle der herkömmlichen überströmten schmalen Klärüberlaufschwelle mehrere über die gesamte Ablaufseite verteilte, verdeckte Drosselrohre angeordnet. Diese übernehmen gleichzeitig die Funktion der Tauchwand.

Die Frage nach dem Wirkungsgrad von Regenklärbecken wurde in der Vergangenheit nicht gestellt, da sie in erster Linie als Anlagen des Katastrophenschutzes und Vorrichtungen zur Aufdeckung und Korrektur von Mißständen im Regenwassernetz angesehen wurden. Erst in jüngster Zeit werden Regenklärbecken als Regenwasserbehandlungsanlagen interpretiert und ihnen eine konkrete Bewertung zugewiesen [4].

Es existieren Untersuchungen von Abscheideanlagen, die an Autobahnen und Bundesstraßen in Baden-Württemberg durchgeführt wurden [23]. Diese werden wesentlich großzügiger bemessen als in der Siedlungswasserwirtschaft. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind ernüchternd. Krauth und Stotz fordern als Konsequenz aus den von ihnen beobachteten geringen Wirkungsgraden, die Bemessungs-Oberflächenbeschickung für Abscheider von Straßenabflüssen auf 0,2 m/h zu senken [23].

Von Bedeutung ist, daß im Regenwasserabfluß der Siedlungsgebiete partikuläre Stoffe primär in kleinen Korngrößen vorliegen. Ihr Hauptanteil im Regenwasserabfluß umfaßt nach Tabelle 4 die Korngrößen zwischen 0,006 und 0,15 mm [22].

Verteilung der partikulären Stoffe im Regenwasserabfluß auf Korngrößen							
Partikuläre Fraktion mm	AFS %	Pb %	Cd %	PAK %	KW %	Cu %	Zn %
< 0,006 mm	38	15	15	15	50	15	15
0,006 - 0,060 mm	49	75	75	40	40	75	75
0,060 - 0,150 mm	7	10	10	20	5	10	10
0,150 - 0,350 mm	4			25	5		
> 0,350 mm	2						
Summe	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 4: Verteilung der partikulären Stoffe des Siedlungsabflusses auf Korngrößen (Modell HAuSS)

Dabei wird die Fraktion unter 0,006 mm als stark belastete nicht absetzbare Stoffe klassifiziert, die Fraktion 0,006 – 0,060 mm als stark belastete absetzbare Stoffe, die Fraktion 0,06 bis 0,6 mm als mäßig belastete absetzbare Stoffe [22]. Eine halbwegs wirksame Regenwasserbehandlung erfordert danach mindestens die Entfernung der partikulären Stoffe über 0,01 mm Korngröße. Von Dachwasserabflüssen ist bekannt, daß sich partikuläre Metalle bei der von Krauth und Stotz [23] geforderten Oberflächenbeschickung von 0,2 m/h gerade zu 50 % abscheiden lassen. Regenklärbecken im Trennsystem der Siedlungsgebiete werden aber nicht mit 0,2 m/h, sondern mit 10 m/h bei einer kritischen Regenspende von 15 l/s•ha bemessen.

Das Wissen um die Wirksamkeit derartig ausgelegter in Siedlungs- und Gewerbegebieten eingesetzten Regenklärbecken mit Dauerstau ist gering. Verfügbar ist eine am Regenklärbecken Karlsruhe-Grünwinkel durchgeführte Untersuchung [25]. Dabei wurden die in der Tabelle 5 zusammengestellten Wirkungsgrade gefunden.

Parameter	Konzentration im Zulauf mg/l	Wirkungsgrad %
AFS	52,0	43
CSB	55,0	36
Pb	0,051	36
Zn	1,030	12
Cd	0,001	38
Ni	0,028	17

Tabelle 5: Zulaufkonzentrationen und Wirkungsgrade des Regenklärbeckens Karlsruhe-Grünwinkel [25]

Die Abscheidewirkung liegt bei einigen Parametern bei einem Drittel, bei anderen Parametern deutlich darunter. Bei den in Trennsystemen an Regenklärbecken vorliegenden realen Bedingungen können keine besseren Wirkungsgrade erwartet werden. Insgesamt gesehen ist die Wirkung eines RKB mD als bescheiden einzustufen.

2.3 Weitergehende Regenwasserbehandlung beim Trennsystem

Weitergehende Anforderungen an eine Regenwassereinleitung ergeben sich aus der Schutzwürdigkeit oder den Nutzungen des Gewässers. Empfindliche und schutzwürdige Gewässer wie

- Grundwasser,
- Gewässer, die Trinkwasserschutzgebiete durchfließen,
- Badegewässer,
- Fischgewässer und Gewässer mit Fischzuchtanlagen,
- Gewässer der Güteklasse I und I-II,
- Gewässer, die noch nicht durch Kläranlagen vorbelastet sind,
- Gewässer mit geringer Fließgeschwindigkeit und stehende Gewässer,
- Gewässer mit geringer Niedrigwasserführung,
- Gewässer mit Erosionsproblemen.

erfordern besondere Schutzmaßnahmen [9].

Dabei werden folgende Reinigungsziele angestrebt:

Beim Grundwasser, in Trinkwasserschutzgebieten und bei Badegewässern steht die Keimelimination im Vordergrund.

Bei stehenden und sehr langsam fließenden Gewässern kann die P-Elimination das Reinigungsziel darstellen.

Bei einem hohen Anteil an stark befahrenen Straßen und Parkplätzen und bei Gewerbegebieten kann die Entfernung von Kohlenwasserstoffen zur Zielvorstellung gehören.

Bei leistungsschwachen und erosionsempfindlichen Gewässern bildet die Abflußdämpfung ein Element der Behandlung.

Bei gering belasteten echten Trennsystemen ist eine weitergehende Regenwasserbehandlung nur ausnahmsweise erforderlich. Die Notwendigkeit stellt sich bei hoher Luftverschmutzung, hohe Verkehrsbelastung, bei Gewerbegebieten und erst recht beim unechten Trennsystem mit Fehllanschlüssen und Einschüttungen. Da sich gerade letzteres Phänomen schwer im Voraus prognostizieren läßt, haben beim Trennsystem weitergehende Behandlungsmaßnahmen auch vorbeugenden Charakter.

2.3.1 Herkömmliche Methode der weitergehenden Regenwasserbehandlung

Die traditionelle Maßnahme zum Schutz empfindlicher Gewässer bei Regenwassereinleitungen besteht in der Vergrößerung der Regenklärbecken. Bei der Festlegung der Beckenoberfläche wird die dem Bemessungszufluß Q_{RKB} zugrunde gelegte kritische Regenspende r_{krit} von 15 l/s•ha auf 30, 45, 60, 80, 100, 120 l/s•ha vergrößert [4]. Damit wird die Durchflußzeit verlängert und indirekt die real vorhandene Oberflächenbeschickung gesenkt.

Über die Auswirkungen dieser Vergrößerung auf die Reinigungsleistung der Becken gibt es keine gesicherten Erkenntnisse. Einige Rückschlüsse lassen sich aus einem Sonderprogramm in Berlin ziehen, in dessen Rahmen zum erhöhten Schutz von Berliner Seen einige besonders große geschlossene Regenklärbecken mit Dauerstau gebaut wurden. Am Regenklärbecken Dianasee, das mit 55 m³/ha^x fünfmal so groß wie ein Standard-RKB ausgelegt ist, wurden die in Tabelle 6 angegebenen Zulaufkonzentrationen und Wirkungsgrade gemessen [28].

Parameter	Zulaufkonzentration mg/l	Wirkungsgrad %
AFS	139,000	62
CSB	153,000	55
P	1,000	47
Pb	0,168	59
Zn	1,730	31
Cu	0,120	65
Cr	0,070	77

Tabelle 6: Zulaufkonzentrationen und Wirkungsgrade des Regenklärbeckens Dianasee (Becken mit Dauerstau)

Angesichts des Umstandes, daß es sich lediglich um eine einfache Absetztechnik handelt, sind das sehr gute Ergebnisse, die allerdings entsprechend Bild 24 einen hohen Preis haben. Die Wirkungsgrade liegen bereits in der Größenordnung, die mit realen Absetzbecken überhaupt erreichbar ist. Sie beruhen ausschließlich auf der Sedimentation

der partikulären Fraktion. Diese wird durch die Betonkonstruktion, die den pH-Wert in den basischen Bereich anhebt, unterstützt. Wenn man sich der von Krauth und Stotz [23] geforderten Oberflächenbeschickung von 0,2 m/h annähert, lassen sich auch mit Groß-Regenklärbecken absetzbare Stoffe halbwegs abscheiden. Die Wirkungsgrade der Tabelle 6 müssen allerdings im Zusammenhang mit den hohen Zulaufkonzentrationen gesehen werden, die sich bereits im vom Mischwasser bekannten Bereich bewegen.

Unter dem Aspekt einer Kosten-Nutzen-Betrachtung ist das Ergebnis nicht befriedigend. Die Ablaufkonzentrationen sind immer noch relativ hoch.

2.3.2 Weitergehende Regenwasserbehandlung durch Filteranlagen

Zur Verbesserung der Regenwasserreinigung wurden Filteranlagen entwickelt. Diese haben die Aufgabe, zumindest die partikulär gebundenen Stoffe abzutrennen und darüber hinaus je nach Erfordernis auch gelöste Stoffe zu entfernen.

In der Praxis werden die unterschiedlichsten Bauformen von Filteranlagen eingesetzt:

Bodenfilter: Es handelt sich um Filteranlagen zur mechanisch-biologischen Regenwasserbehandlung durch Abtrennung partikulärer und biologischen Abbau gelöster Stoffe. Der benötigte Retentionsraum kann über dem Filter integriert werden (Retentionsbodenfilter RBF) oder vor dem Filter angeordnet sein (Bodenfilter mit vorgeschalteter Retention BFvR).

Mechanische Filter MF: Es handelt sich um Filteranlagen zur mechanischen Regenwasserreinigung durch Abtrennung partikulärer Stoffe. Auch hier kann der benötigte Retentionsraum über dem Filter integriert werden (Mechanischer Retentionsfilter MRF) oder vor dem Filter angeordnet sein (Mechanischer Filter mit vorgeschalteter Retention MFvR).

Nach den Ausführungen in Kapitel 2.1 können Regenwasserabflüsse ganz unterschiedlich verschmutzt sein. Wenn die Verschmutzung in partikulärer Form vorliegt, genügt ein mechanischer Filter. Beim echten Trennsystem ist das häufig der Fall. Liegt die Verschmutzung in größerem Umfang in gelöster Form vor, wird ein Bodenfilter benötigt. Das ist beim unechten Trennsystem immer der Fall. Schwierig ist die Prognose bei Neubaugebieten und bei Gewerbegebieten mit ihren häufigen Nutzungsänderungen. Die Planer haben erfahrungsgemäß Probleme mit der korrekten Prognose der sich in den kommenden Jahrzehnten einstellenden Verschmutzung des Regenwasserabflusses. Sofern man nicht gleich ein modifiziertes Mischsystem wählt, fällt die Entscheidung aus Gründen des vorsorgenden Gewässerschutzes oft zugunsten des Bodenfilters.

Eine eigenständige Bauform stellen die Retentionsfilter des Kantons Zürich dar [1]. Sie weisen Merkmale auf, die teils für den Bodenfilter und teils für den mechanischen Filter typisch sind. Dieser Filterart übernimmt die Aufgabe der Filterwirkung des bewachsenen Oberbodens und wird in der Schweiz hauptsächlich vor zentralen und dezentralen Rohr- oder Schachtversickerungen als Reinigungsstufe eingesetzt [1]

Im Rahmen einer Filterplanung beim Trennsystem ist zunächst eine Analyse der vom Einzugsgebiet ausgehenden Verschmutzung durchzuführen und eine entsprechende Bewertung vorzunehmen. Nach dem Ergebnis dieser Bewertung richtet sich die Wahl der Filterart. Dabei ist der Trend zu modifizierten Entwässerungssystemen zu berücksichtigen. Infolge der Abtrennung von gering belasteten Flächen ist in Zukunft im Rumpfsystem mit wesentlich stärker konzentrierten Abflüssen zu rechnen als sich aus der Tabelle 3 ablesen läßt.

Es hat sich eingebürgert, jeden Filter als Bodenfilter zu bezeichnen, auch wenn es sich dabei eindeutig um einen mechanischen Filter oder um einen Retentionsfilter der Bauart des Kantons Zürich handelt. Damit in Zukunft Mißverständnisse vermieden werden, sollten die Begriffe korrekt angewendet werden.

Im geplanten ATV-Merkblatt M 153 werden Absetzanlagen sehr positiv bewertet, obgleich Messungen eher eine bescheidene Wirkung zeigen [23], [25] und [28]. Gemäß dem M 153 können mit großzügig dimensionierten Absetzanlagen ähnliche Durchgangswerte wie mit Bodenfiltern erzielt werden [4]. Es wäre falsch daraus zu folgern, daß großzügig ausgelegte Absetzanlagen einem Bodenfilter gleichwertig sind. Mit Absetzvorgängen kommt man günstigstenfalls in die Nähe der Wirkung einer Filtration. Biologische und adsorptive Vorgänge sind bei Absetzbecken jedoch von untergeordneter Bedeutung.

2.4 Anordnung von Bodenfiltern für die Regenwasserbehandlung

Nachfolgend werden schematisch verschiedene in der Praxis angewandte und diskutierte Konzepte für die Behandlung des Regenwasserabflusses in Bodenfiltern dargestellt. Sie bauen auf dem Prinzip auf, daß absetzbare Stoffe vor der Filtration in einer vorgeschalteten Stufe abgetrennt werden müssen.

Bild 26 zeigt zunächst die Bauform mit einem vorgeschalteten Regenklärbecken (RKB) und einem nachgeschalteten Retentionsbodenfilter (RBF).

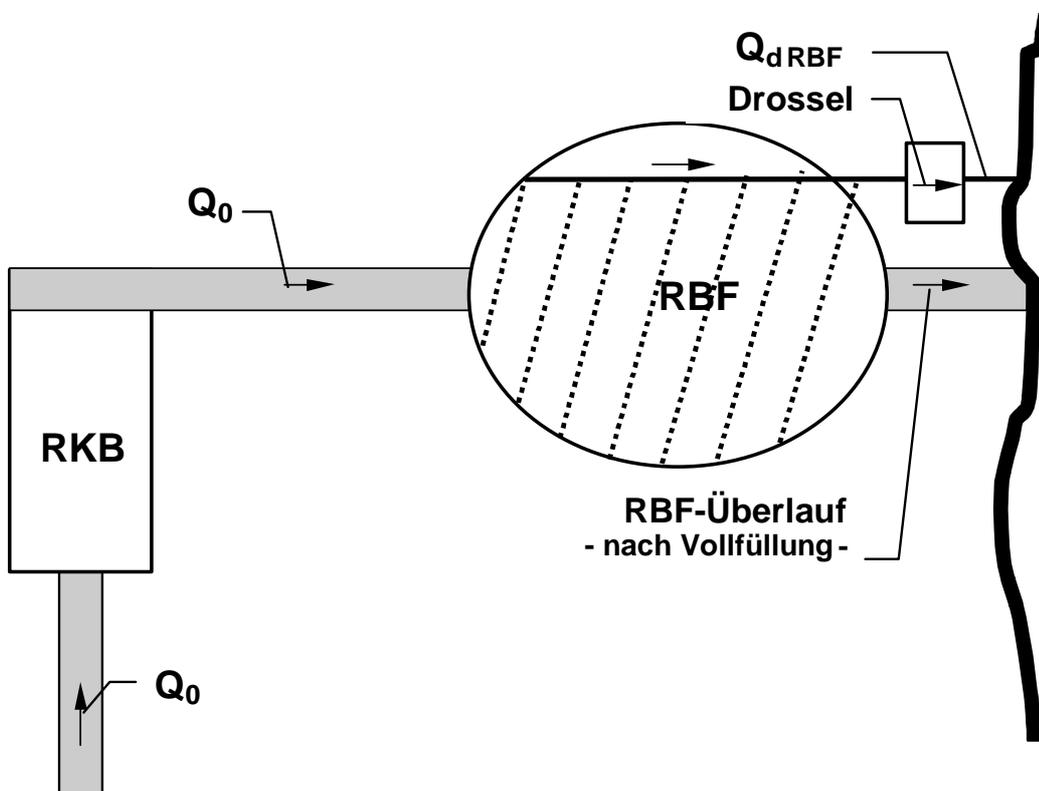


Bild 26: Regenklärbecken mit nachgeschaltetem Retentionsbodenfilter

Diese Ausführungsform hat den Nachteil, daß der gesamte ankommende Regenwasserabfluß durch das Regenklärbecken geleitet wird und in die Filteranlage gelangt. Das mindert bei Starkregen die Wirkung des RKB und kann zu Schlammausspülungen auf den Filter führen. Eine sorgfältige Ausbildung und Energieumwandlung im Einlauf des Regenklärbeckens und Filters ist hier besonders wichtig. Der Vorteil der Bauweise besteht in einer guten Abflußdämpfung für das Gewässer, da die Seeretention der großen Filterfläche für die Dämpfung voll genutzt wird.

In Bild 27 ist dem Regenklärbecken und Retentionsbodenfilter ein Regenrückhaltebecken nachgeschaltet. Diese Anordnung kann sinnvoll sein, wenn eine sehr starke hydraulische Entlastung des Vorfluters erforderlich ist und der Rückhalteraum deshalb nur sehr selten entlasten darf. Je nach den örtlichen Verhältnissen kann der Rückhalteraum auch über dem Retentionsraum des Filters angeordnet werden. Der Rückhalteraum ist in allen nachfolgenden Skizzen als Regenrückhaltebecken (RRB) dargestellt. Andere Formen wie Regenrückhaltegräben oder Regenrückhaltekanäle sind je nach den örtlichen Verhältnissen ebenfalls möglich.

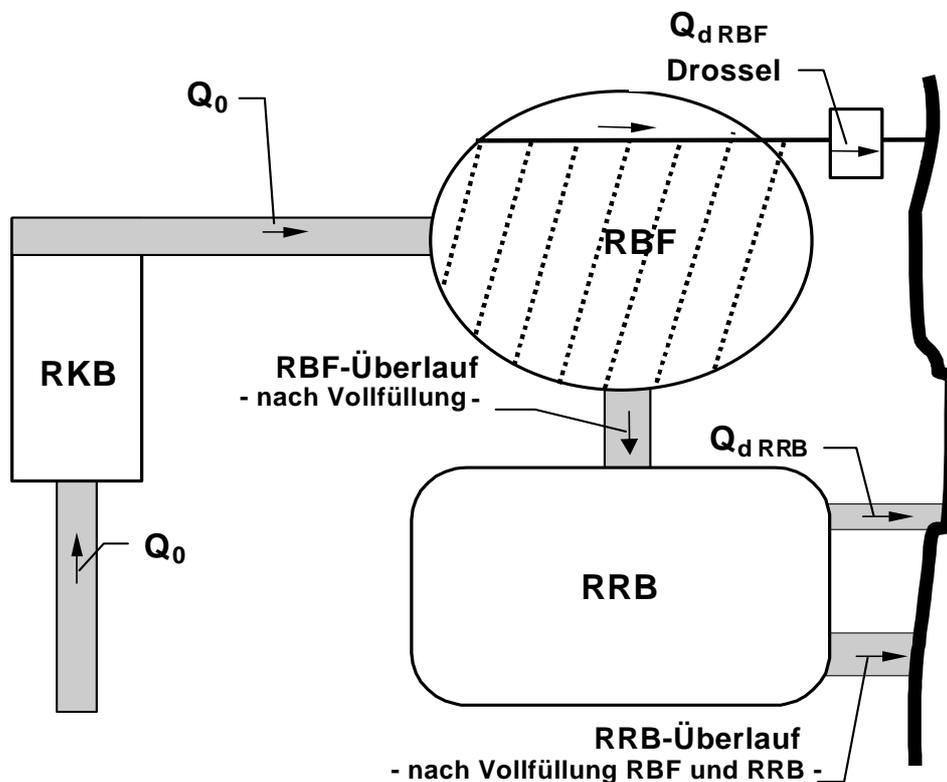


Bild 27: Kombination Regenklärbecken-Retentionsbodenfilter-Regenrückhaltebecken

Die Kombination dreier Bauwerke - Regenklärbecken, Filterbecken, Regenrückhaltebecken - ist eine aufwendige Sache. Zur Kostensenkung wird versucht, das Filterbecken und das Regenrückhaltebecken in einem Bauwerk zusammenzufassen. Dabei wird ein Teil der Beckensohle durchlässig als Filter, ein anderer Teil undurchlässig ausgebildet. Hier wird auf Kosten der Filterbelastung gespart. Vom Bau derartiger Zwitterbecken ist im Hinblick auf das damit verbundene hohe Kolmationsrisiko abzuraten.

Bild 28 stellt eine Variante der Anlage nach Bild 26 dar.

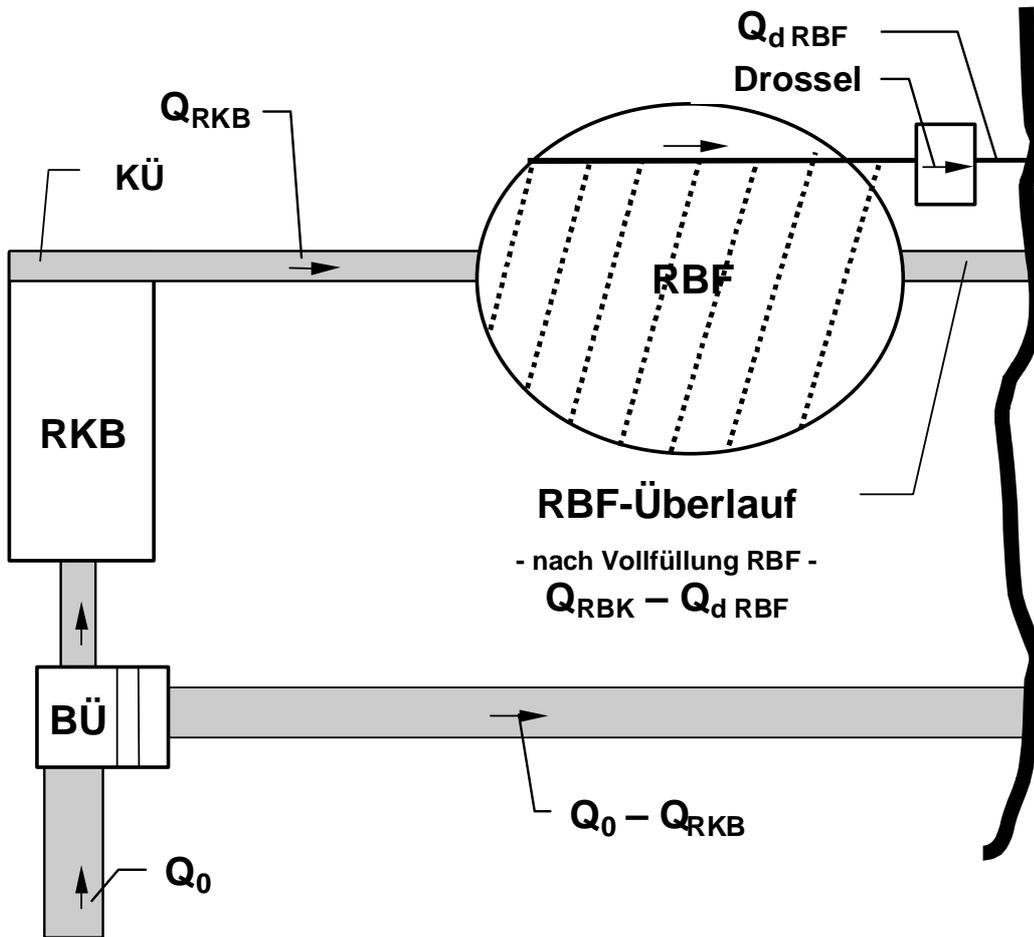


Bild 28: Regenklärbecken mit vorgeschaltetem Beckenüberlauf und nachgeschaltetem Retentionsbodenfilter

Dem Regenklärbecken ist ein Beckenüberlauf (BÜ) vorgeschaltet, welcher den Durchfluß durch das RKB durch Drosselung auf einen definierten Bemessungszufluß Q_{RKB} begrenzt. Es handelt sich hier um die Standardbauweise der Regenklärbecken, wie sie in Bild 25 bereits dargestellt wurde. Diese Bauweise soll das Ausspülen des RKB-Bodenschlammes auf den Filter bei Starkregen verhindern. Bei Anlagen, bei denen Regenklärbecken und Filter über Pumpen beschickt werden müssen, ist die Lösung nach Bild 28 auch aus wirtschaftlichen Gründen erforderlich. Nachteilig ist, daß die Abflußspitzen von Starkregen voll an das Gewässer weitergegeben werden. Das kommt zwar selten vor, dann aber intensiv.

Diesen Nachteil versucht die Lösung nach Bild 29 zu mildern.

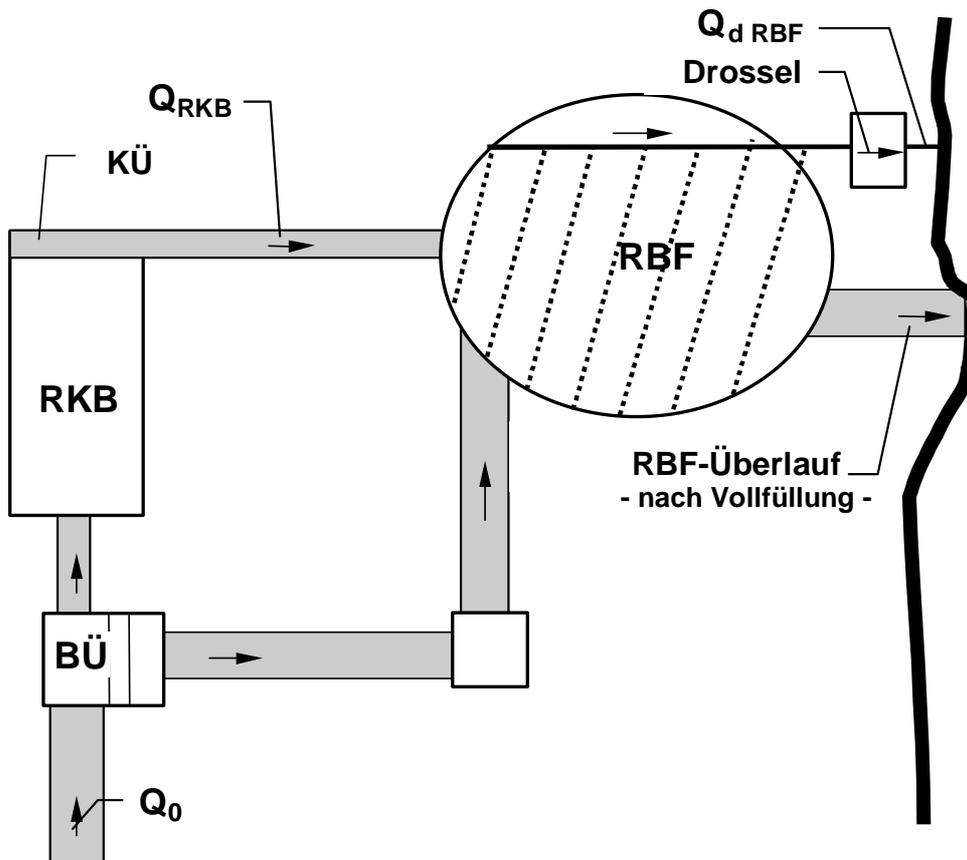


Bild 29: Regenklärbecken mit Bypass und nachgeschaltetem Retentionsbodenfilter

Die am Beckenüberlauf (BÜ) abgeschlagenen Zuflußspitzen umgehen das Regenklärbecken und werden in den Retentionsbodenfilter eingeleitet. Die Bypassleitung dient dem Schutz des RKB vor Ausspülung bei Starkregen.

Bild 30 stellt eine Variante von Bild 27 dar.

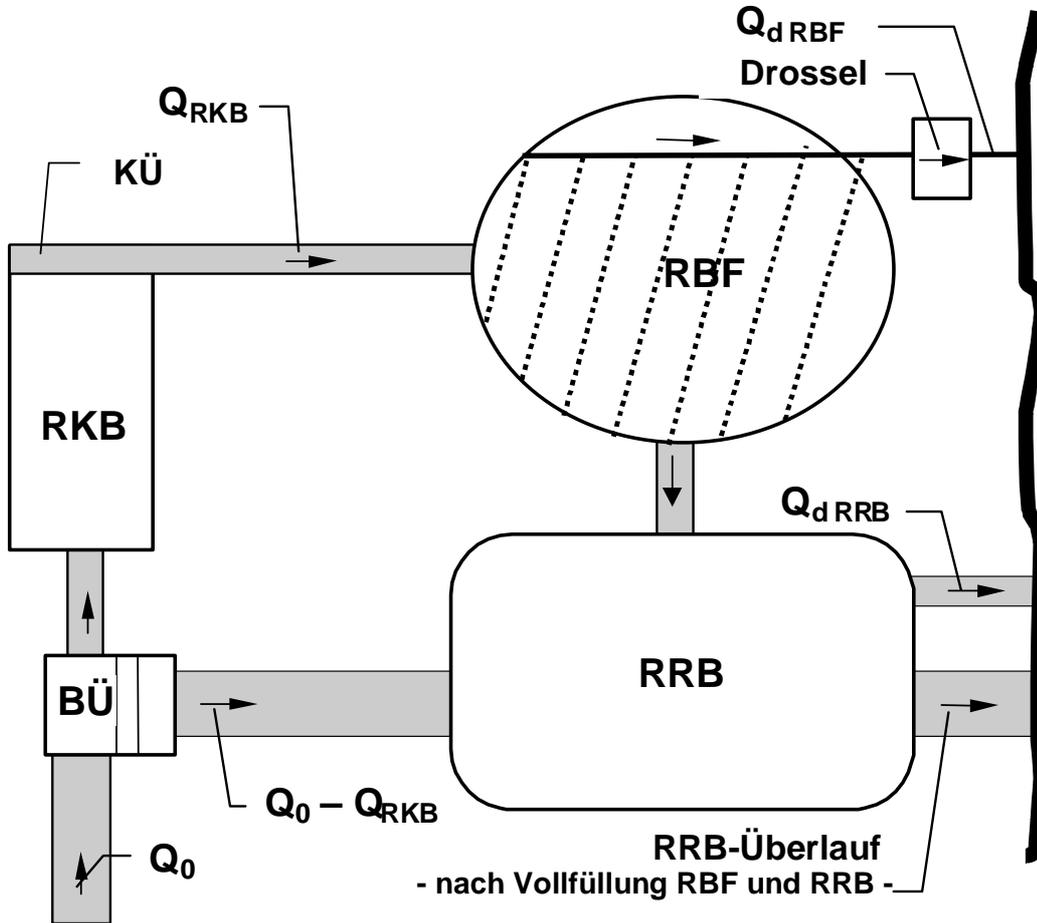


Bild 30: Kombination Regenklärbecken mit Entlastung-Retentionsbodenfilter- Regenrückhaltebecken

Das Regenklärbecken von Bild 27 besitzt jetzt einen Beckenüberlauf für die Starkregenspitzen. Diese werden in ein nachgeschaltetes Regenrückhaltebecken geleitet. Der Bypass des RKB begrenzt wie bereits bei Bild 28 und 29 das Kolmationsrisiko der Filteranlage und sorgt für eine optimal dem Vorfluter angepaßte Abflußdämpfung.

Im Bild 31 werden Retention und Filterung räumlich getrennt.

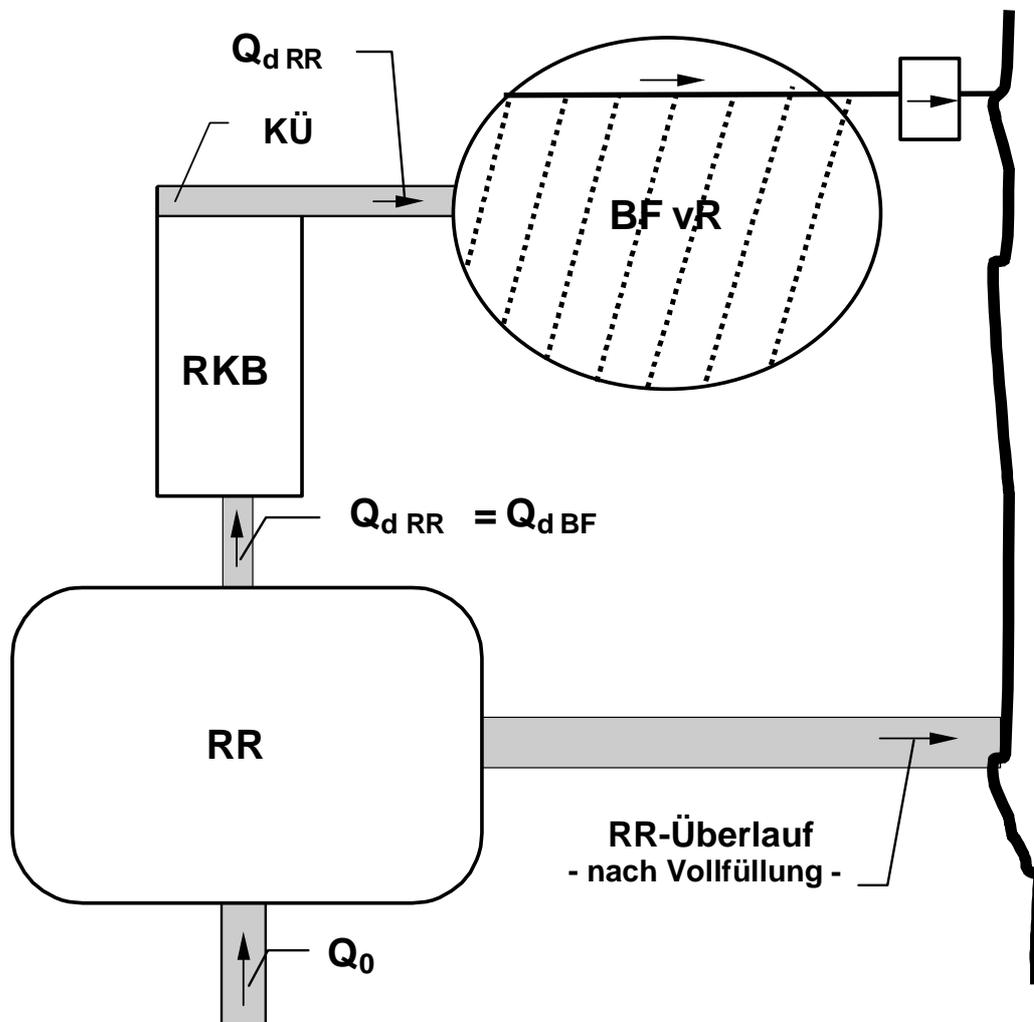


Bild 31: Regenklärbecken mit vorgeschalteter Retention und nachgeschaltetem Bodenfilter

Der Retentionsraum (RR) ist vor der Filteranlage angeordnet. Diese Lösung läßt sich noch weiter variieren. Beispielsweise kann das Regenklärbecken im vorgeschalteten Retentionsraum integriert werden.

Die vorstehenden Bilder zeigen, daß bei der Filterplanung eine Vielzahl von Variationen möglich sind. Letztlich sind es die örtlichen Verhältnisse, die Kosten und die am Einzelfall orientierte Zielvorstellung, die darüber entscheiden, welche Variante zur Anwendung kommt.

2.5 Bemessung von Bodenfiltern beim Trennsystem

2.5.1 Bemessung der Absetzanlage

Die Dimensionierung der vorgeschalteten Absetzstufe kann nicht losgelöst von der Größe der nachgeschalteten Filterstufe gesehen werden. Wird der Filter sehr großzügig bemessen und weist er dadurch eine sehr niedrige stoffliche Belastung auf, dann könnte man im Extremfall auf ein Regenklärbecken ganz verzichten. Dieser Weg wird bei einigen Filtern der Bauart Kanton Zürich beschritten. Dort begnügt man sich mit Naßgullys und einem dem Filter nachgeschalteten Ölabscheider für den Katastrophenfall. Zum Ausgleich wird die Filterfläche um ein Mehrfaches größer gebaut als sich aus der nachfolgenden Dimensionierung der Gruppe AGB ergibt [1].

Die Gruppe AGB schlägt eine andere Vorgehensweise vor. Sie empfiehlt, die Ölabscheidung und Entschlammung vor den Filter zu nehmen. Dem Filter ist ein Regenklärbecken vorgeschaltet, das zugleich als Leichtstoffabscheider entsprechend den Vorgaben des Arbeitsblattes ATV-A 166 mindestens 5 m³ Leichtstoffe speichern kann.

Zwischen einer Filteranlage und einer zentralen Versickerungsanlage für Regenwasserabflüsse gibt es eine Reihe von Parallelen. Beide sind durch Kolmation gefährdet. Beide bekämpfen diese Gefahr durch die Vorschaltung von Absetzbecken. Beide ziehen die Erdbauweise der Betonbauweise vor.

Für das Volumen der Absetzanlage einer zentralen Versickerungsanlage wird gefordert [5]:

$$V_{\text{erf.}} = \frac{A_u \times r_{15,1} \times h_B \times 3,6}{q_A} \quad [\text{m}^3] \quad (1)$$

Dabei soll die Oberflächenbeschickung q_A unter 10 m/h, die nutzbare Beckentiefe über 1 m sein. Für die Verhältnisse in Baden-Württemberg (mindestens $r_{15,1} = 120 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$) ergibt sich daraus je Hektar undurchlässige Fläche

$$V_{\text{erf.}} = \frac{1 \times 120 \times 1 \times 3,6}{10} = 44 \quad [\text{m}^3/\text{ha}^x] \quad (2)$$

Damit liegt man bereits im Bereich der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Groß-Regenklärbecken.

Die Gruppe AGB schließt sich dieser Vorgehensweise nicht an. Nach den Untersuchungen von Krauth und Stotz wird die Wirkung von Absetzanlagen in hohem Maß auch von deren konstruktiven Ausbildung beeinflusst [23]. Insbesondere bei flachen Absetzanlagen fanden sie schlechte Wirkungsgrade. Die von der Gruppe AGB vorgeschlagenen Absetzteiche arbeiten mit einer vergrößerten Dauerstautiefe und Einrichtungen zur Wandlung der Zulaufenergie. AGB-Becken kommen deshalb mit einem Volumen des Absetzraumes von 10 m³/ha^x zurecht, bezogen auf die angeschlossene undurchlässige Fläche. Bei einem überdurchschnittlich hohen Anteil an Straßen werden größere Volumina benötigt. Entsprechend ist die speicherbare Leichtstoffmenge über 5 m³ zu erhöhen.

2.5.2 Bemessung des Bodenfilters

Retentionsbodenfilter im Trennsystem haben die wasserwirtschaftliche Aufgabe, einen Teil des Regenwassers zu behandeln. Der Anteil des nicht behandelten Regenwassers wird mit Entlastungsrate bezeichnet. Eine Entlastungsrate von "Null" ist nicht mit vertretbarem Aufwand möglich.

Bei der Dimensionierung von Filteranlagen des Trennsystems gelten die gleichen Grundsätze wie sie im Teil 1 für die Mischwasserfiltration bereits dargelegt wurden. Im Vordergrund der Überlegungen muss der Gesichtspunkt des Filterversagens stehen. Bei der Planung müssen die Konsequenzen eines Filterversagens vorweg geklärt sein. Beim Filterversagen wird aus der Filteranlage infolge Kolmation ein Teich, also ein weiteres Regenklärbecken mit Dauerstau. Kolmatisierte Anlagen in Form von Teichen sind nicht gleichwertig einer Filteranlage. Zu kleine Filterflächen oder zu hohe hydraulische und stoffliche Flächenbelastungen erhöhen das Kolmationsrisiko erheblich. Solange ein Planer beim Anlagenversagen nicht zur Sanierung verpflichtet wird, mag das verbreitete Bestreben nach möglichst hoher stofflicher und hydraulischer Flächenbelastung angehen. Wird hingegen ein durch Kolmation entstandener Teich nicht akzeptiert, kommt ein Anlagenversagen den Planer teuer zu stehen.

Die Auslegung eines Filters allein mit Hilfe des Darcy Gesetzes bietet keine ausreichende Sicherheit gegen Kolmation. Nicht zulässig ist die verbreitete Vorgehensweise, Sickerleistungen mit empirischen Beziehungen, z.B. nach Beyer oder Hazen zu ermitteln, da durch die Einlagerung von partikulären Stoffen und Auflagen von Sedimenten sich bereits nach kurzer Zeit deutlich geringere Werte einstellen, die obendrein stark inhomogen sind.

Wie beim Mischwasser werden auch beim Regenwasserabfluss die Ablaufkonzentrationen einer Filteranlage von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Die wichtigsten sind die Struktur und Kornverteilung des Filtermaterials, die Filterstärke und die Filtergeschwindigkeit. Eine sichere Vorhersage der exakt erzielbaren Ablaufkonzentrationen ist derzeit noch nicht möglich. Das gilt analog für die Wirkungsgrade. Nicht zulässig ist es, bei Mischwasseranlagen festgestellte Wirkungsgrade unbesehen auf Trennsysteme zu übertragen. Bei niedrigen Zulaufkonzentrationen ergeben sich zwangsweise niedrigere Wirkungsgrade als bei hohen Zulaufkonzentrationen.

Bei geringer Regenwasserverschmutzung mit geringem gelösten Anteil ist der Unterschied zwischen einem mechanischen Filter und einem Bodenfilter klein. Je stärker das Regenwasser verschmutzt ist und je mehr es sich zum Mischwasser hin entwickelt, um so größer werden die Unterschiede zugunsten des Bodenfilters. Es gelten dann die in Teil 1 getroffenen Aussagen über die beeinflussbaren Stoffparameter.

Der nachfolgende Bemessungsansatz der Gruppe AGB Baden-Württemberg legt die hydraulische Flächenbelastung als Bemessungskriterium zugrunde, da hierbei gegenüber stofflichen Parametern die größte Sicherheit erreicht wird [17]. Bedingt durch das in der Regel gegenüber Mischwasser geringer verschmutzte Medium Regenwasserabfluss kann eine höhere Filtergeschwindigkeit und hydraulische Flächenbelastung angesetzt werden. Die zulässige hydraulische Filterbelastung von $h_s = 40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ ist eine empirische Größe [14]. Sie wurde von der Gruppe AGB an mehreren seit Jahren in Betrieb befindlichen Anlagen verifiziert. In einzelnen, besonders nassen Jahren wird die jährliche hydraulische Filterbelastung auf 60 m/a ansteigen, ohne dass es zum Filterversagen kommen darf.

Die Bemessung kann nur durch Einsatz eines Niederschlags-Abfluss-Modells mit Speicherelementen erfolgen. Dazu kann z. B. der Niederschlags-Abfluss-Teil üblicher Schmutzfrachtmodelle verwendet werden. Als Datengrundlage sind langjährige (ca. 30 Jahre) und lückenlose Niederschlagsreihen für das betreffende Gebiet erforderlich. Da solche

Messreihen i.d.R. nicht vorliegen, bietet sich die Verwendung von synthetischen Niederschlagsreihen an. Diese können kurzfristig bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg bezogen werden.

Bemessungsschritte:

1. Filterfläche A_F [m²] wählen.
2. Drosselabfluss Q_{dRBF} [l/s] aus dem Filter festlegen:
Vereinfacht kann über den gesamten Füllungs- und Entleerungsvorgang von einem mittleren spezifischen Drosselabfluss von 0,015 l/s•m² ausgegangen werden.
 $Q_{dRBF} \leq 0,015 \times A_F$ [l/s] (3)
3. Einstautiefe h und Böschungsneigungen wählen:
Im Regelfall gilt: $0,50 \leq h \leq 1,00$ [m]. (4)
4. Den nach 1. bis 3. definierten Retentionsbodenfilter und die vorgeschaltete erste Stufe als Speicherelemente in das Entwässerungssystem einfügen, Langzeitsimulation für das gesamte Entwässerungssystem durchführen.
5. Aus den Ergebnissen der Niederschlag-Abfluss-Simulation lassen sich folgende Kenngrößen entnehmen:
 VQ_E [m³/a] mittlerer jährlicher Entlastungsabfluss aus erster und zweiter Stufe,
 VQ_F [m³/a] mittlerer jährlicher hydraulischer Filterdurchsatz,
 VQ_r [m³/a] mittlere jährliche Regenabflusssumme, die der ersten Stufe zufließt.
6. Ermittlung der Entlastungsrate $e = \frac{VQ_E}{VQ_r} \times 100$ [%]. (5)
7. Nachweis der zulässigen Entlastungsrate e_{zul} :
Es muss gelten: $e < e_{zul}$. (6)
 e_{zul} ist entsprechend den Randbedingungen des Einzelfalls in Abstimmung mit der zuständigen Genehmigungsbehörde festzulegen.
8. Berechnung der hydraulischen Filterbelastung (Stapelhöhe) h_s [m/a]:
 $h_s = \frac{VQ_F}{A_F}$ [m³/m²•a = m/a].
Es muss gelten: $h_s \leq 40 = zulhs$ [m/a]. (7)

Für eine ausgewählte Anlage sind in den Bildern 32 und 33 beispielhaft die Ergebnisse der beschriebenen Rechenschritte dargestellt.

Um das erforderliche Volumen des Retentionsbodenfilters zu bestimmen, wurden zunächst Modellrechnungen für die ausgewählten Volumen 100, 200, 300, 400 und 500 m³ durchgeführt. Die Punkte in den Diagrammen der Bilder 32 und 33 sind die Ergebnisse der Simulationsrechnung.

Für eine vorgesehene Entlastungsrate von 20 % ist ein Volumen von 200 m³ erforderlich (Bild 32). 80 % des jährlichen Regenwasserabflusses werden somit gefiltert. Aus Bild 33 ergibt sich, dass die zulässige Stapelhöhe von $h_s = 40$ m/a dann gerade noch eingehalten ist.

Würde wegen der besonderen Schutzwürdigkeit des Vorfluters die Filtration von 90 % des jährlichen Regenwasserabflusses verlangt (Entlastungsrate: 10 %), wäre nach Bild 32 ein Bodenfilter mit 300 m³ Retentionsvolumen erforderlich. Die jährliche Stapelhöhe würde dann nur noch 27 m/a betragen.

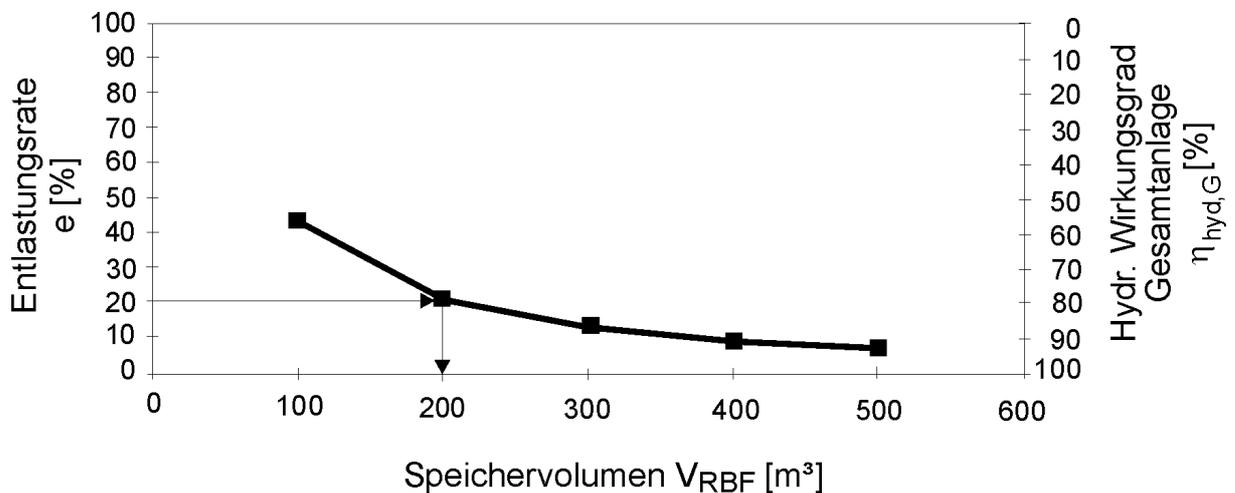


Bild 32: Beispiel für eine ausgewählte Anlage (nicht übertragbar): Zusammenhang zwischen der Entlastungsrate bzw. dem hydraulischen Wirkungsgrad³ der ersten und zweiten Stufe und dem Speichervermögen eines Retentionsbodenfilters

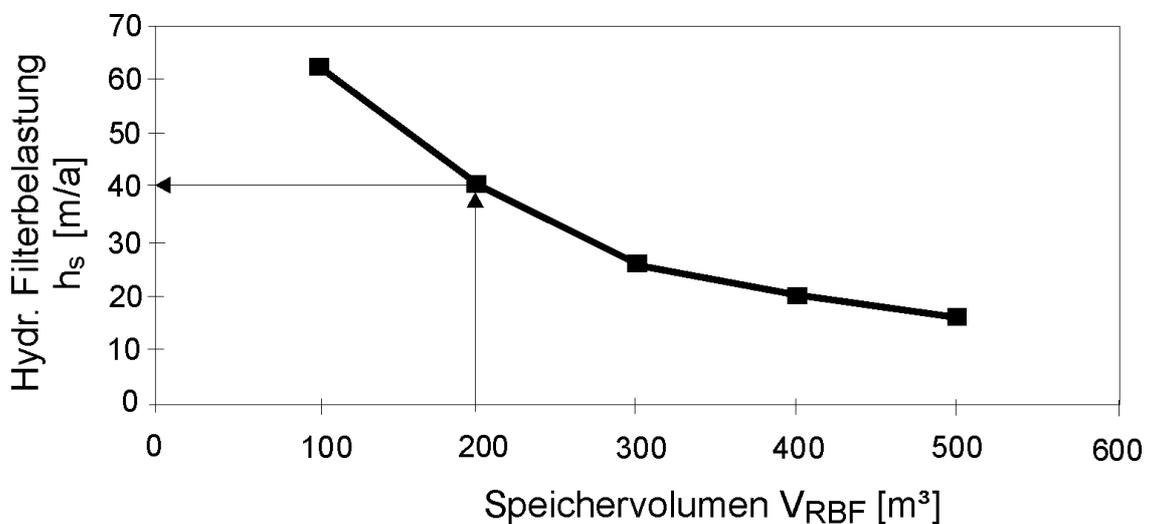


Bild 33: Beispiel für eine ausgewählte Anlage (nicht übertragbar): Zusammenhang zwischen der hydraulischen Filterbelastung h_s (Stapelhöhe) und dem Retentionsvolumen V_{RBF} eines Retentionsbodenfilters

³ Die Entlastungsrate e ist hierbei ein Maß für den Anteil des ungereinigt entlasteten Regenwassers, der hydraulische Wirkungsgrad $\eta_{\text{hyd,G}}$ gibt dagegen den Anteil der behandelten Wassermenge wieder. Es gilt: $\eta_{\text{hyd,G}} = 100\% - e$

Bei gleicher Einzugsgebietsgröße ist die erforderliche Filterfläche bei einem Trennsystem in der Regel größer als bei einem Mischsystem. Wegen der meist geringeren Verschmutzung von Regenwasserabflüssen hätte man eher das umgekehrte Verhältnis erwartet. Der erhöhte Flächenbedarf beim Trennsystem liegt darin begründet, dass die gefilterte jährliche Regenwassermenge und die Häufigkeit der Filterbeschickung in der Regel ungleich größer sind als beim Mischsystem. Dort wird die Hauptlast der Reinigung über das vorgeschaltete Regenüberlaufbecken vom zentralen Klärwerk getragen. Der Filter ist nur ein zusätzliches dezentrales Mischwasserklärwerk. Besonders deutlich wird das, wenn einem Mischwasserfilter beispielsweise ein Regenüberlauf vorgeschaltet ist. Dann werden höchstens 20 % des jährlichen Regenwasserabflusses zum Filter entlastet. Entsprechend gering sind dann die erforderliche Filterfläche und das Retentionsvolumen. Beim Trennsystem wird bei gleicher Entlastungsrate eine viel größere Regenwassermenge über den Filter geleitet. Das bedingt auch größere Filterflächen.

Der Brutto-Flächenbedarf ist bei naturnaher Bauweise deutlich größer als die Filterfläche, da zusätzlich Platz für die Böschungen des Retentionsraumes, das Freibord sowie für die Unterhaltung benötigt wird. Das kann nur unter Verzicht auf die Erdbauweise durch senkrechte Wände vermieden werden.

2.6 Konstruktive Gestaltung von Retentionsbodenfiltern des Trennsystems

In diesem Kapitel werden konstruktive Hinweise zu einer Retentionsbodenfilteranlage für die Regenwasserbehandlung gegeben. Im Einzelnen werden folgende wesentliche Komponenten behandelt:

- Erste Stufe(RKB)
- Zulaufbauwerk
- Vorbehandlungsstufe
- Retentionsraum
- Bepflanzung
- Filterkörper
- Drainagesystem
- Abdichtung
- Ablaufbauwerk
- Entlastungsbauwerk
- Umzäunung.

Die eigentliche Filteranlage mit den Elementen Retentionsraum, Bepflanzung, Filterkörper, Drainage, Abdichtung, Ablaufbauwerk und Entlastungsbauwerk unterscheidet sich beim Trennsystem nicht grundlegend vom Mischsystem. Deshalb gelten die in Kapitel 1.9 gemachten Aussagen grundsätzlich auch für das Trennsystem. Aufgrund der in der Regel geringeren Verschmutzung von Regenwasserabflüssen sind beim Trennsystem aber auch Spielräume für Abweichungen vorhanden. Die nachfolgenden Ausführungen gehen auf die einzelnen Elemente nur noch ein, soweit Unterschiede zum Mischsystem bestehen.

Erste Stufe

Bei der Vorbehandlungsstufe unterscheidet sich ein Filter des Trennsystems deutlich vom Filter des Mischsystems. An die Stelle eines Regenüberlaufbeckens tritt ein Regenklärbecken. Dieses hat zunächst die Aufgabe einer Entschlammungsanlage. Das ist besonders wichtig in Gebieten mit hoher Bautätigkeit, weil dort durch die Erosion von Feststoffen ein Filter besonders stark gefährdet ist. Zusätzlich muß die Vorbehandlungsstufe die Funktion eines Leichtstoffabscheiders übernehmen. Die Anordnung eines separaten Abscheiders vor dem Filter [24] oder nach dem Filter [1] ist dann nicht erforderlich.

Als Vorbehandlungsstufe kommt ein Regenklärbecken ohne Dauerstau mit einer Betriebsweise nach Bild 1 in Frage. Entsprechend Bild 2 ist diese Bauweise teuer. Die Gruppe AGB hat eine preisgünstige und gut in die Landschaft integrierfähige Lösung für Bodenfilteranlagen in Form eines Regenklärbeckens mit Dauerstau entwickelt. Ein Teich schmiegt sich an das Filterbauwerk an und gibt das zu filternde Regenwasser unmittelbar an den Filter weiter. Der Damm zwischen dem Vorteich und der Filteranlage kann als überströmte Dammscharte ausgebildet werden. Bei der AGB Bauweise sind beide Teile durch verdeckte Rohre miteinander verbunden. Diese Rohre ermöglichen ein optisch ansprechendes Bauen. In der Ausbildung als getauchte Rohre entsprechend Bild 12 übernehmen diese zugleich die Wirkung einer Tauchwand, um im Teich einen Rückhalt von 5 m³ aufschwimmenden Leichtstoffen zu gewährleisten. Zugleich ermöglichen Rohre eine gute Verteilung des Regenwassers auf der

Filterfläche. Das unerwünschte Umlegen des Schilfbewuchses wird vermieden. Eine punktförmige Belastung im Einlaufbereich tritt nicht auf.

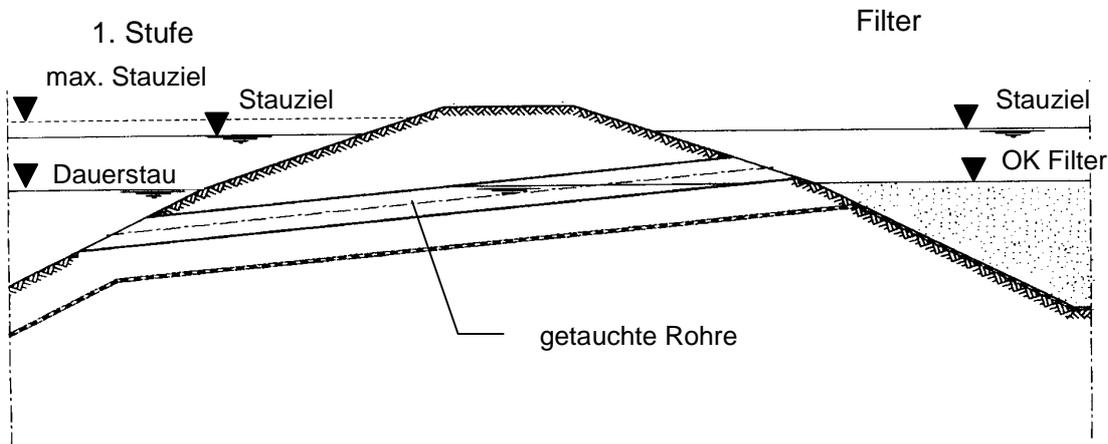


Bild 34: Schnitt durch den Damm zwischen Vorteich und Filterbauwerk nach Gruppe AGB

Bei der Ausführung nach Bild 26 und 27 wird der gesamte Zufluß durch den Teich und durch den Zwischendamm auf den Filter geleitet. Das erfordert eine sorgfältige Energieumwandlung im Einlauf des Absetzteiches und große Rohre. Alternativ dazu kann etwa die Hälfte des maximalen Zuflusses durch die Rohre, die andere Hälfte über den durch Vegetationsmatten gesicherten Zwischendamm geleitet werden.

Bei der Ausführung nach Bild 28, 29, 30 wird der Durchfluß durch den Teich auf den Bemessungszufluß Q_{RKB} begrenzt. Die Rohre sind dann als Drosseln auszulegen und werden kleiner. Vor dem Teich ist in Analogie zu Bild 25 ein Beckenüberlauf (BÜ) mit Entlastungsgraben erforderlich.

Legt man den Dauerstau im Vorteich auf die Höhe der Oberkante des Filtermaterials, dann erfolgt beim Aufstau des Retentionsraumes zwangsläufig eine Vergrößerung von Volumen und Oberfläche im Vorteich entsprechend Bild 35. Das verbessert dessen Wirksamkeit. Die Bereiche der Wasserwechselzone sind baulich besonders zu sichern. Dafür haben sich Vegetationsmatten bewährt.

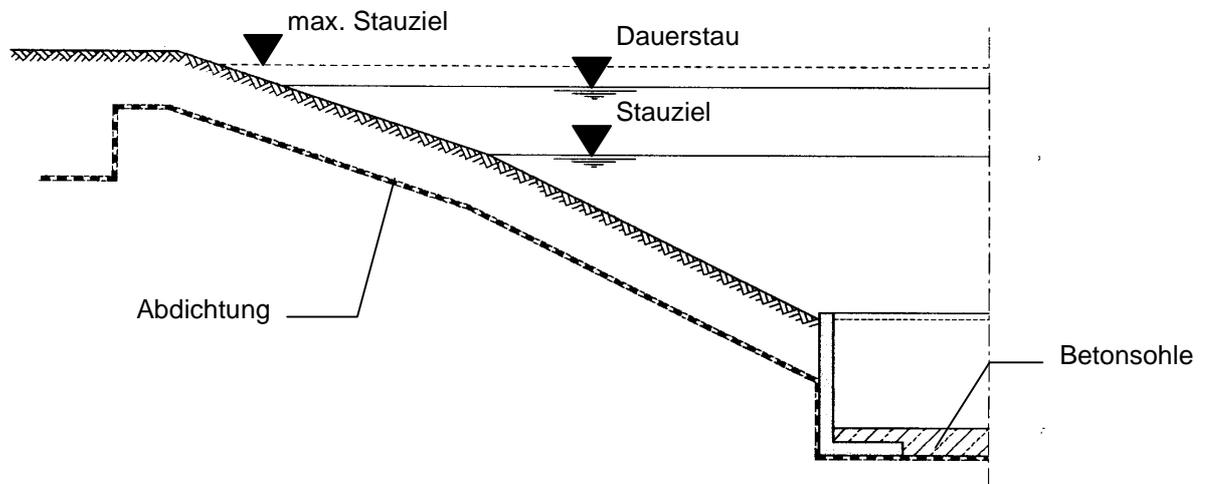


Bild 35: Schnitt durch die Vorstufe eines Retentionsbodenfilters nach Gruppe AGB

Wegen der erforderlichen Mindesttiefe von 2 m stößt bei kleinen Einzugsgebieten die Bauweise der Erdteiche an Grenzen. In diesen Fällen könnte anstelle eines Teiches in Erdbauweise ein Schlammloch in Betonbauweise erstellt werden, dessen Konstruktion sich an die Grundsätze von Rundsandfängen anlehnt. Ein aus konstruktiven Gründen überdimensionierter Erdteich ist aber preisgünstiger als eine bezüglich ihres Volumens minimierte Betonkonstruktion.

Filterkörper

Die Eigenschaften unterschiedlicher Filtermaterialien wurden in Kapitel 1.4 beschrieben. Regenwasserabflüsse des Trennsystems sollten eigentlich geringere Konzentrationen aufweisen als aus Regenüberlaufbecken entlastetes Mischwasser. Insbesondere sollten die Konzentrationen an Ammonium und Phosphor geringer sein als beim entlasteten Mischwasser.

Bei den von der Gruppe AGB betreuten Bodenfiltern des Trennsystems wurden folgende Filtermaterialien eingesetzt:

- Bodenfiltersand 0/2 entsprechend Bild 1.
- Kombinationen von Lehmboden und darunter liegender Bodenfiltersandschicht 0/2.

Kombinationen von Lehmboden und darunter liegender Sandschicht sind dort angebracht, wo hohe Ansprüche an die Ablaufqualität gestellt werden. Typische Anwendungsfälle sind Trinkwasserschutzgebiete und Einzugsgebiete mit hohem potentiellem Verschmutzungsrisiko wie z.B. Gewerbegebiete. Die Stärke des Lehmbodens soll mindestens 0,15 m, die von Sand mindestens 0,60 m, insgesamt also mindestens 0,75 m betragen. Zusammen mit der Drainageschicht ist das mindestens 1,00 m.

Beim halbwegs sauberen Trennsystem genügt der reine Sandfilter mit einer Mindeststärke von 0,60 m. Zusammen mit der Drainageschicht ist das mindestens 0,85 m.

Wenn Ammonium nur in geringen Mengen vorliegt, werden auch nicht in großem Umfang Protonen gebildet. Dann ist auch das Vorhandensein von Karbonaten nicht von entscheidender Bedeutung. Es ist dann auch die Verwendung von Quarzsand möglich.

Beim echten Trennsystem, bei dem gelöste Stoffe nur eine untergeordnete Rolle spielen, ist man nicht zwingend auf den Bodenfilter angewiesen. In diesem Fall reicht auch ein mechanischer Filter mit 0,6 m Kiessand, der die partikuläre Fraktion abtrennt. Bei zahlreichen in der Vergangenheit gebauten Filtern des Trennsystems handelt es sich um mechanische Filter, die neuerdings unkorrekterweise Bodenfilter genannt werden oder die sich im Laufe der Jahre durch Ablagerung und Einlagerung von Sedimenten in Richtung Bodenfilter hin entwickelt haben, wenngleich dieser Prozeß inhomogen und anlagenspezifisch verläuft.

In einem Mehrschichtfilter findet in horizontalen Lagen ein Wechsel der Kornzusammensetzung statt, beispielsweise beim Übergang Lehm-Sand oder beim Übergang Sand-Drainagekies. An diesen Stellen muß Filterstabilität gewährleistet sein. Im Gegensatz zum Mischsystem ist beim echten Trennsystem auch der Einsatz von Geovliesen denkbar, da das Risiko des Zuwachsens durch biologischen Bewuchs geringer ist. Es entsteht dadurch ein weiterer Kostenfaktor, der durch die Einhaltung der Filtergesetze vermieden werden kann.

Bild 36 zeigt einen Schnitt durch einen Retentionsbodenfilter des Trennsystems in der Kombination Lehm-Sand-Kies.

In Bild 37 ist ein Retentionsbodenfilter des Trennsystems in der landschaftsgestalterischen Ansprüchen gerecht werdenden Tropfenform der Gruppe AGB dargestellt. Der Vorteich bildet mit getauchten Rohren die Vorstufe und zugleich die breitflächige Beschickungsvorrichtung des Filters. Zusätzliche Beschickungsleitungen, über die der Filter bei kleinen Ereignissen beschickt wird entlasten den Einlaufbereich. Ein vorgeschaltetes Entlastungsbauwerk führt Spitzenabflüsse von Starkregen um den Vorteich herum. Der Bypass wird konstruktiv so ausgestaltet, daß er bei Bedarf die Außerbetriebnahme der Anlage ermöglicht. Verdeckte Entlastungsleitungen erlauben eine präzise Ausführung und übernehmen die Funktion einer Tauchwand.

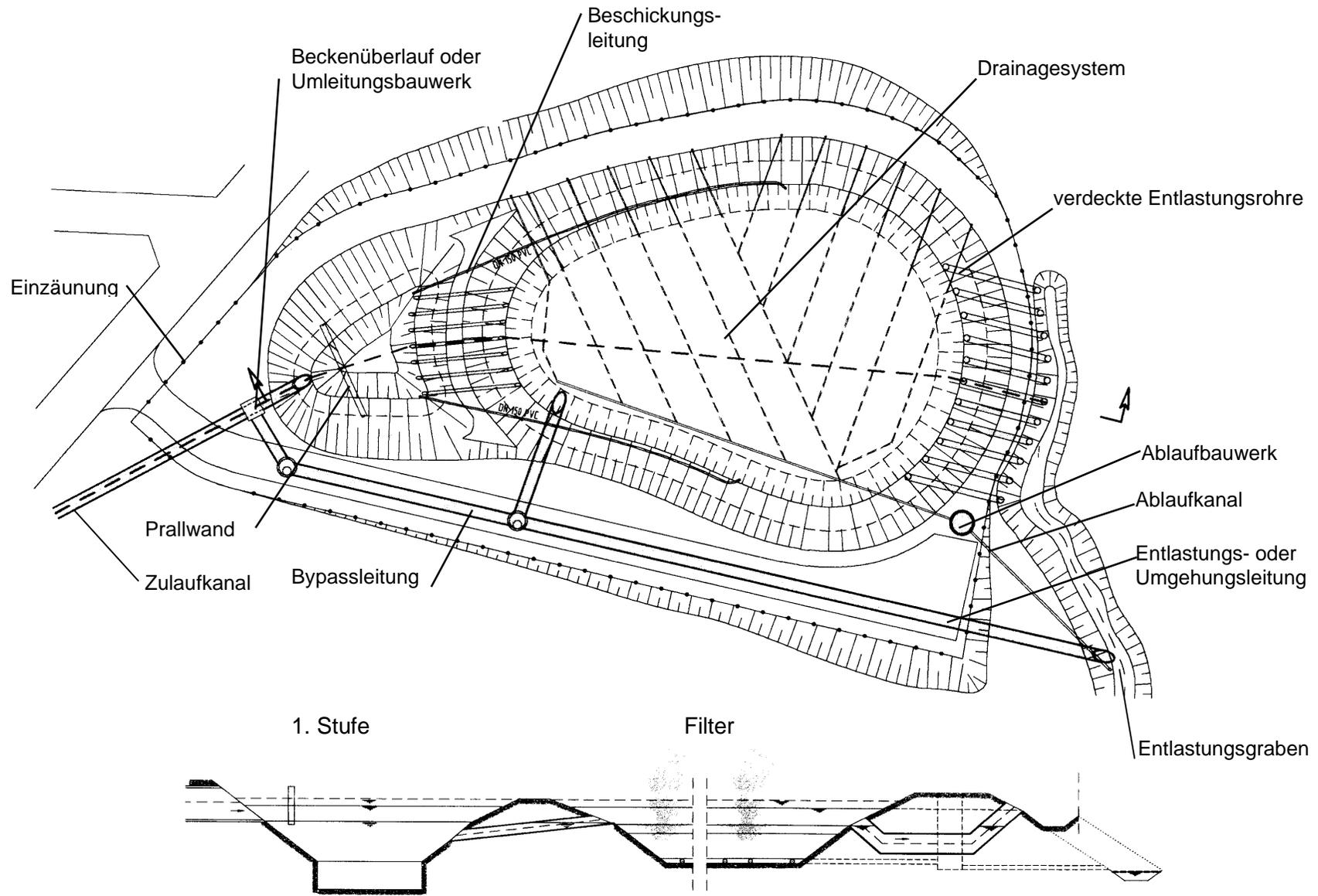


Bild 37: Retentionsbodenfilteranlage des Trennsystems in Tropfenform nach Gruppe AGB

2.7 Hinweise zum Betrieb

Die Ausführungen von Kapitel 1.12 gelten auch für die Filter des Trennsystems. Zusätzliche Aufmerksamkeit ist der Vorstufe zu widmen. Wird diese im Sinne eines Regenklärbeckens mit Dauerstau als Teich ausgebildet, dann ist bereits bei der Planung zu bedenken, wie die Schlammräumung sowie der Abzug von Leichtflüssigkeiten und anderen Schwimmstoffen erfolgen soll. Die Vorstufe muß für einen Schlammsaugwagen zugänglich sein. Zum Schutze des nachgeschalteten Filters vor der Ausspülung von Schlamm aus dem Vorteach wäre eine vierteljährliche Räumung angebracht. Die Erfahrung zeigt, daß das nicht geschieht, da der Aufwand dafür groß ist. Diese Aussage gilt für Regenklär Becken allgemein. Realistischerweise kann nur von einer einjährigen Schlammräumung ausgegangen werden. Auch die erfolgt in der Regel nur dann, wenn sie im Wasserrechtsbescheid vorgeschrieben ist. Rechtzeitig muß geklärt werden, wohin das Räumgut gebracht werden soll. Bei unerfahrenen Gemeinden kann es vorkommen, daß das Räumgut vom Unternehmer als Sonderabfall deklariert und teuer in Rechnung gestellt wird. Die Abwehr solcher unberechtigter Forderungen ist vorweg bei der Beauftragung der Räumung zu regeln. Wegen des mineralischen Anteils sind Kläranlagen an einer Annahme oft nicht interessiert. Möglich ist eine Behandlung im Klärwerk in der Regel dennoch. In Frage kommt auch die Behandlung in einer Recyclinganlage oder die Deponierung nach einer natürlichen Entwässerung.

2.8 Kosten von Retentionsbodenfiltern des Trennsystems

Retentionsbodenfilter werden beim Trennsystem nach ähnlichen Regeln wie beim Mischsystem gebaut. Deshalb kann bei den spezifischen Kosten DM/m³ von den Werten des Bild 22 ausgegangen werden. Da die Gesamtstärke von Filter und Drainageschicht beim Trennsystem gegenüber Bild 22 um 0,2 m – 0,3 m geringer sein kann, liegen die Kosten etwas darunter.

Hinzu kommen die Kosten des vorgeschalteten Regenklärbeckens. Wird dieses in Betonkonstruktion ausgeführt, dann ist von den in Bild 24 angegebenen hohen spezifischen Kosten auszugehen. Wesentlich preiswerter sind die Teiche der Gruppe AGB. Deren spezifische Kosten liegen bei 300,00 DM/m³ bei kleinen Teichen und sinken auf 200,00 DM/m³ bei großen Teichen.

Die Gesamtkosten einer Retentionsbodenfilteranlage des Trennsystems sind in der Regel höher als die Kosten eines Regenklärbeckens in Betonbauweise (Bemessen mit 10 m³/ha^x). Von diesen Kosten sind die Einsparungen als Ausgleichsmaßnahme abzusetzen. Der Vorteil der Anlagen liegt in der hydraulischen und stofflichen Entlastung der Gewässer, in der naturnahen Gestaltung und in der Verbesserung des Kleinklimas in Siedlungsgebieten. Filteranlagen sind in diesem Zusammenhang eine kostengünstige und wasserwirtschaftlich hochwertige Alternative zu modifizierten Entwässerungssystemen.

2.9 Zusammenfassende Bewertung

- Bodenfilter sind mechanisch-biologische Regenwasserkläranlagen mit Rückhaltefunktion. Sie sind keineswegs nur für den ländlichen Raum geeignet, sondern kommen für alle Arten von Erschließungsmaßnahmen in Stadt und Land in Frage. Allerdings ist der erforderliche Flächenbedarf höher als bei anderen Behandlungsverfahren vergleichbarer Qualität.

- Bodenfilter sind Anlagen der weitergehenden Regenwasserbehandlung. Bezüglich ihrer Reinigungsleistung stellen Anlagen mit Fällung/Filtration oder Fällung/Flotation den Vergleichsmaßstab dar.
- Bodenfilter entfernen die partikulären Stoffe des Regenwasserabflusses und entfernen gelöste Stoffe, soweit sie einem biologischen Abbau und Adsorption zugänglich sind.
- Bodenfilter sind Multifunktionsbauwerke zur Verbesserung der Gewässergüte, Erosionsbekämpfung, Driftverhinderung und Abflußdämpfung. Sie verhindern den Ausstoß von Grobstoffen, Schlamm und Trübung. Sie beseitigen die Wirkung von Fehlanschlüssen und Fehleinleitungen der unechten Trennsysteme.
- Müssen zum Schutz des Vorfluters vor Erosion oder hydrobiologischer Überlastung abflußdämpfende Maßnahmen ergriffen werden, bildet ein Retentionsbodenfilter die ideale Verknüpfung von Regenwasserbehandlung und Abflußdämpfung.
- Mit Schilf bepflanzte Filterbecken haben Bedeutung als Ausgleichsmaßnahme.
- Retentionsbodenfilter weisen eine hohe Integrationsfähigkeit in die Landschaft auf und stellen bei entsprechender Ausführung ein landschaftsgestaltendes Element dar.

3 Abbildungen ausgeführter Filteranlagen

Die nachfolgenden Bilder geben einen optischen Überblick der in Baden-Württemberg realisierten Filteranlagen. Zudem sind einige konstruktive Details dargestellt. Die Bilder wurden nicht nach Anlagen aus dem Misch- und Trennsystem getrennt zusammengestellt, da sich insbesondere bei der konstruktiven Gestaltung die einzelnen Elemente nicht grundsätzlich unterscheiden.



Abbildung 1: Retentionsfilteranlage mit natürlicher Basisdichtung, im Bau.
Filteraufbau: Lehmboden, Bodenfiltersand, Drainagekies (Trennsystem).



Abbildung 2: Retentionsfilteranlage mit künstlicher Basisdichtung (Bentonitmatten), im Bau.
Filteraufbau: Bodenfiltersand, Drainagekies (Mischsystem).



Abbildung 3: Retentionsfilteranlage nach Abschluß der Erdarbeiten.
Filteraufbau: eisenhaltiger Bodenfiltersand, Drainagekies (Mischsystem).



Abbildung 4: Retentionsfilteranlage. Der Lehm Boden ist zum Schutz vor Verschlämmung mit Mulch abgedeckt (Trennsystem).



Abbildung 5: Punktförmiges Zulaufbauwerk mit Gabionen. Filteranlage noch nicht in Betrieb. Der Lehm Boden wird gerade mit Mulch abgedeckt (Mischsystem).



Abbildung 6: Punktförmiges Zulaufbauwerk mit Steinschüttung und Energieumwandlung. Filteranlage noch nicht in Betrieb (Mischsystem).



Abbildung 7: Breitflächiges Zulaufbauwerk. Filteranlage noch nicht in Betrieb (Mischsystem).



Abbildung 8: Retentionsfilteranlage in Tropfenform. Der Filter ist zur Förderung des Schilfwachstums zeitweise überstaut (Mischsystem).



Abbildung 9: Mechanischer Filter mit Grasbewuchs (Mischsystem).



Abbildung 10: Retentionsbodenfilteranlage mit Schilfbepflanzung im Anwachsstadium. Schilfmatten (rechte Bildhälfte) und Setzlingen, 4St/m² (linke Bildhälfte) (Mischsystem).



Abbildung 11: Retentionsbodenfilter mit voll entwickeltem Schilfbewuchs (Trennsystem).



Abbildung 12: Regenwasserteich als 1. Stufe einer Retentionsfilteranlage (Trennsystem).



Abbildung 13: Retentionsfilteranlage nach Abschluss der Bauarbeiten (Trennsystem).



Abbildung 14: Retentionsfilteranlage vor Inbetriebnahme (Trennsystem).



Abbildung 15: Retentionsfilteranlage in Betrieb (Trennsystem).



Abbildung 16: Entlastungsbauwerk (verdeckte Entlastungsrohre) mit Ableitungsgraben (Trennsystem).



Abbildung 17: Entlastungsbauwerk (verdeckte Entlastungsrohre) mit Ableitungsgraben (Mischsystem).



Abbildung 18: Entlastungsbauwerk (verdeckte Entlastungsrohre) in Betrieb (Trennsystem).



Abbildung 19: Verdeckte, vorgefertigte Entlastungsrohre beim Einbau (Trennsystem).

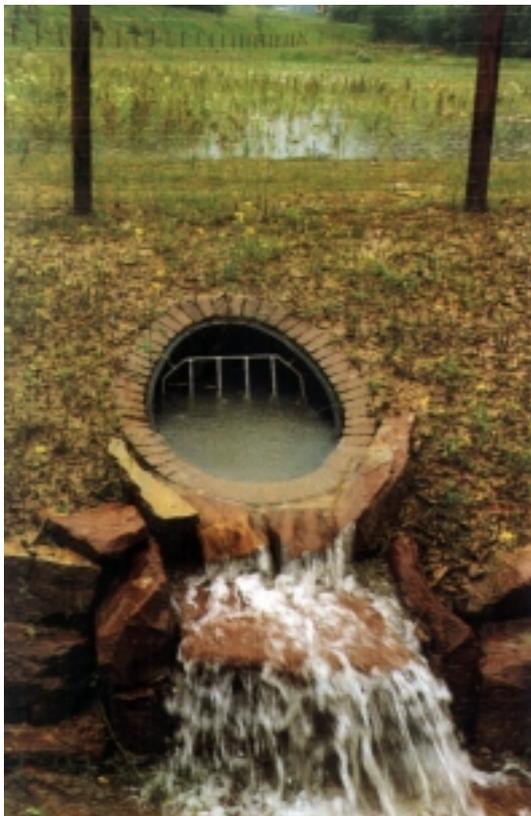


Abbildung 20: Verdeckte Entlastungsrohre in Betrieb (Trennsystem).



Abbildung 21: Ein lebendiger Quell. Ablauf der Drainage einer Retentionsfilteranlage (Trennsystem).



Abbildung 22: Eine Bereicherung der Landschaft. Retentionsfilteranlage in einem Naturschutzgebiet (Mischsystem).

Verzeichnisse

Im Sinne dieses Handbuches gelten folgende Abkürzungen, Zeichen und Fachausdrücke:

Abkürzungen

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
BFvR	Bodenfilter mit vorgeschalteter Retention
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
BÜ	Beckenüberlauf
C/N	Kohlenstoff/Stickstoffverhältnis
Cd	Cadmium
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
Cu	Kupfer
DB	Durchlaufbecken
EB	Entlastungsbauwerk
FB	Fangbecken
G	Kies
KAK	Kationenaustauschkapazität
KÜ	Klärüberlauf
KW	Kohlenwasserstoffe
MF	Mechanischer Filter
MFvR	Mechanischer Filter mit vorgeschalteter Retention
MRF	Mechanischer Retentionsfilter
Ni	Nickel
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
RBF	Retentionsbodenfilter
RKB	Regenklärbecken
RKB mD	Regenklärbecken mit Dauerstau

RKB oD	Regenklärbecken ohne Dauerstau
RR	Retentionsraum
RRB	Regenrückhaltebecken
RÜ	Regenüberlauf
RÜB	Regenüberlaufbecken
S	Sand
SKA	Sammelkläranlage
SKO	Stauraumkanal mit oberliegender Entlastung
SKU	Stauraumkanal mit untenliegender Entlastung
T	Ton
TB	Trennbauwerk
U	Schluff
Zn	Zink

Zeichen und Fachausdrücke

Zeichen	Einheit	Fachausdruck
η_{hyd}	[%]	jährl. hydraul. Wirkungsgrad des Retentions-Bodenfilters
$\eta_{\text{hyd,G}}$	[%]	jährl. hydraul. Wirkungsgrad der Gesamtanlage
1:n _S	[-]	Böschungsneigung – Speicher-/ Retentionsraum
A _F	[m ²]	Oberfläche des Filters
A _{F u}	[m ²]	Sohlfläche des Filters
A _S	[m ²]	Stauzielfläche des Speicher-/ Retentionsraums
A _u	[ha ^x]	undurchlässige Fläche im Einzugsgebiet
B	[kg/m ² a]	Jahresflächenbelastung
d	[m]	reinigungsrelevante Filterdicke (ohne Drainage)
e	[%]	Jahresentlastungsrate
e ₀	[%]	zulässige Jahresentlastungsrate

Zeichen	Einheit	Fachausdruck
f	[m]	Freibord
h	[m]	Einstauhöhe Retentionsraum
h_{Na}	[mm]	mittlere langjährige Niederschlagshöhe
h_S	[m]	Jährl. hydraul. Filterbelastung (Stapelhöhe: m^3/m^2a)
k_f	[m/s)	Durchlässigkeitsbeiwert
Q_0	[l/s]	Bemessungsabfluß Kanal des Einzugsgebietes
Q_d	[l/s]	Drosselabfluß Trennbauwerk in Richtung Sammelkläranlage
Q_{dDB}	[l/s]	Drosselabfluß Durchlaufbecken in Richtung Sammelkläranlage
Q_{dFB}	[l/s]	Drosselabfluß Fangbecken in Richtung Sammelkläranlage
Q_{dRBF}	[l/s]	Drosselabfluß des Retentionsbodenfilters ins Gewässer
Q_{dRR}	[l/s]	Drosselabfluß Retentionsraum in Richtung Gewässer
Q_{dRRB}	[l/s]	Drosselabfluß Regenrückhaltebecken in Richtung Gewässer
Q_{RKB}	[l/s]	Bemessungsabfluß Regenklärbecken in Richtung Gewässer
Q_{dSKU}	[l/s]	Drosselabfluß Stauraumkanal in Richtung Sammelkläranlage
r_{krit}	[l/sha]	kritische Regenspende
V_F	[m ³]	Volumen des Filters
V_{Fp}	[m ³]	Porenvolumen des Filters
VQ_E	[m ³ /a]	mittlerer jährl. Entlastungswasserabfluss des Filters und der vorgeschalteten ersten Stufe
VQ_F	[m ³ /a]	mittlerer jährl. hydraul. Filterdurchsatz
VQ_r	[m ³ /a]	mittlere jährl. Regenabflusssumme, die der ersten Stufe zufließt
V_{RBF}	[m ³]	nutzbares Speicher-/ Retentionsvolumen des Filters

Literatur

- [1] Amt für Gewässer- Die Versickerung von Regenwasser auf der Liegenschaft.
schutz und Was- 2. Auflage Kanton Zürich, Zürich 1996
serbau
- [2] ATV Arbeitsblatt A-166 Bauwerke der zentralen Regenwasserbehand-
lung und –rückhaltung. Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung.
GFA, Hennef 1998
- [3] ATV Umgang mit Regenwasser – derzeitiger Stand der Regenwasser-
behandlung im Trennsystem, Arbeitsbericht der Gruppe 1.4.3
Korrespondenz Abwasser S. 304, 1994
- [4] ATV Merkblatt M 153
Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser.
GFA, Hennef 1999 (geplant)
- [5] ATV Hinweise zur Versickerung von Niederschlagsabflüssen.
Arbeitsbericht der Gruppe 1.4.1
Korrespondenz Abwasser S. 797, 1995
- [6] ATV Arbeitsblatt A 128, Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung
von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen
GFA, Hennef 1992
- [7] ATV Arbeitsblatt A 262, Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb
von Pflanzenbeeten für kommunales Abwasser bei Anlagen-
größen bis 1000 Einwohnerwerten,
GFA, Hennef 1998
- [8] ATV Bedeutung der Abwasserfiltration aus der Sicht der Gewässer,
ATV Arbeitsgruppe 2.1.6
Korrespondenz Abwasser, S. 519, 1997
- [9] ATV Weitergehende Anforderungen an Mischwasserentlastungen,
ATV Arbeitsgruppe 2.1.1.
Korrespondenz Abwasser, S. 802, 1993
- [10] Bolder J.; Planung und Bau des Retentionsbodenfilters in Freiburg.
Lindinger Th.; Korrespondenz Abwasser S. 315, 1998
Zech H.
- [11] Born W.: Bodenfilterbecken – eine sinnvolle Ergänzung zur konventio-
nellen Regenwasserbehandlung?
Schriftenreihe des Fachgebiets Siedlungswasserwirtschaft an der
Universität Kassel Nr. 18, Verein zur Förderung des Fachgebiets
Siedlungswasserwirtschaft an der Universität Kassel, 1998
- [12] Brombach H Feststoffe in der Mischwasserkanalisation,
Michelbach S. Korrespondenz Abwasser 1993, S. 1910
Wöhrle C.

- [13] Brunner P.G.: Bodensfilterssysteme für die weitergehende Mischwasserbehandlung. Schriftenreihe des Fachgebiets Siedlungswasserwirtschaft an der Universität Kassel, Nr.7, S. 215. Verein zur Förderung des Fachgebiets Siedlungswasserwirtschaft an der Universität Kassel, 1991
- [14] Brunner P.G. Weitergehende Regenwasserbehandlung durch Bodensfilter. ATV Schriftenreihe Nr. 04, S. 523, GFA, Hennef 1996
- [15] Brunner P.G. Regenwasserbehandlung in Bodensfilterbecken, Wasserwirtschaft S. 134, 1995
- [16] Brunner P.G. Weitergehende Maßnahmen bei der Mischwasserbehandlung, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Nr. 136, S. 149. Verlag R. Oldenbourg, München 1995
- [17] Brunner P.G.
Lambert B.
Zech H.
Haller B.
Roth H. Vorinformation Bodensfilter zur Regenwasserbehandlung Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, Handbuch Wasser 4, Karlsruhe 1997
- [18] Dunbar K. Leitfaden für die Abwasserreinigungsfrage. Verlag R. Oldenbourg, München 1907
- [19] Grotehusmann D.
Kerpen Th.
Ruß H.J. Mischwasserbehandlung in Bodensfilteranlagen, Gewässerschutz -Wasser- Abwasser, Heft 158 Beitrag Nr. 10, Aachen 1997
- [20] Heinzmann B. Beschaffenheit und weitergehende Aufbereitung von städtischen Regenabflüssen. VDI Fortschritt Berichte, Reihe 15, Nr. 113, VDI Verlag, Düsseldorf 1993
- [21] Imhoff K. Bodensfilter, Gesundheitsingenieur, S. 405, 1941
- [22] Jacobs J.;
Karavokiros G.;
Zimmermann J.;
Rammacher J.;
Schmidt Th. Anwendung des Simulationsmodells HAuSS zur Schadstoffberechnung, Stoffströme in der Urbanhydrologie. Schriftenreihe des ISWW Karlsruhe, Nr. 86, S. 49, Verlag Oldenbourg, München 1997
- [23] Krauth, Kh.;
Stotz G. Qualitativer und quantitativer Einfluss von Absetzanlagen auf den Betrieb von Versickerungsbecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Nr. 672, Bundesminister für Verkehr, Bonn 1993
- [24] Lorenz U.;
Osterkamp, S. Weitergehende Behandlung von schadstoffbelastetem Oberflächenabfluss mit Pflanzenkläranlagen. Institut für Ökologie, Universität Bremen, Bremen 1996

- [25] Pfeifer R.;
Hahn H. Regenwasserbehandlung in Trennsystemen.
Schriftenreihe des ISWW Karlsruhe, Nr. 73, S. 483. Verlag
Oldenbourg, München 1995
- [26] Rettinger S. Wasser- und Stoffdynamik bei der Abwasserperkolatation,
Berichte aus Wasserwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen
Nr. 97. Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Wasser-
wirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, München 1991.
- [27] Schmitt Th.
Welker A. Schmutzfrachtberechnung zum Langzeitverhalten von Boden-
filteranlagen
Wasserwirtschaft, S. 168, 1998
- [28] Terzioglu, K.;
Peter, A.;
Sarfert F. Regenklärbecken am Dianasee in Berlin.
Korrespondenz Abwasser, S. 1296, 1987
- [29] Zech H. Erfahrungen mit dem Bodenfilter Waldangelloch,
Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 27,
S. 3, SUG Verlagsgesellschaft Hannover 1994