



Fachhochschule  
Münster University of  
Applied Sciences



**Durchführung ergänzender Säulenversuche zur Pilotbodenfilteranlage Alsdorf  
Auftrag Nr. 27184 des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen vom 18.08.2000**

Fachhochschule Münster  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Labor für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Prof. Dr.-Ing. M. Uhl

---

**Durchführung ergänzender Säulenversuche zur Pilotbodenfilteranlage Alsdorf  
Auftrag Nr. 27184 des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen vom 18.08.2000**

Münster, den 08.09.03

Sachbearbeiter

Projektleiter

Dipl.-Ing. M. Jübner

Prof. Dr.-Ing. M. Uhl

---

---

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Zielsetzung</b>	<b>1-1</b>
<b>2</b>	<b>Anforderungen an den Boden</b>	<b>2-1</b>
<b>3</b>	<b>Auswahl der Substrate</b>	<b>3-1</b>
3.1	Wesersand 0/2 mm	3-2
3.2	Rheinsand 0/2 mm	3-2
3.3	Wesersand 0/4 mm	3-3
3.4	Rheinsand 0/4 mm	3-5
3.5	Eigenschaften der untersuchten Sande	3-5
<b>4</b>	<b>Schüttelversuche</b>	<b>4-1</b>
4.1.1	Konzentration der Ausgangslösung	4-1
4.1.2	Vorversuch	4-2
4.1.3	Durchführung der Schüttelversuche	4-3
4.1.4	Nachuntersuchungen	4-3
4.1.5	Ergebnisse der Schüttelversuche	4-3
<b>5</b>	<b>Säulenversuche</b>	<b>5-1</b>
5.1	Versuchsaufbau	5-1
5.2	Versuchsdurchführung	5-3
5.2.1	Vorlaufphase	5-3
5.2.2	Beschickungsmedium	5-4
5.2.3	Zeitplan	5-7
5.3	Probenahme und Analytik	5-7
5.4	Datenauswertung	5-8
<b>6</b>	<b>Versuchsergebnisse</b>	<b>6-1</b>
6.1	Beschickungen	6-1
6.2	Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	6-3
6.2.1	Zu- und Ablaufkonzentrationen	6-3
6.2.2	Stoffabbau	6-6
6.3	Ammonium	6-9
6.3.1	Zu- und Ablaufkonzentrationen	6-9
6.3.2	Stoffabbau	6-11
6.4	Nitrat	6-13
6.4.1	Zu- und Ablaufkonzentrationen	6-13
6.4.2	Nitrifikation	6-15
6.5	Phosphor	6-17
6.5.1	Zu- und Ablaufkonzentrationen	6-17
6.5.2	Stoffabbau	6-19

6.6	Abfiltrierbare Stoffe und Glühverlust	6-20
6.7	Einflussfaktoren für den Stoffabbau	6-21
6.7.1	Korngröße	6-21
6.7.2	Karbonatgehalt	6-22
6.7.3	Ablaufdrosselung	6-22
6.7.4	Zulaufkonzentration	6-24
6.7.5	Aufenthaltszeit	6-26
6.7.6	Betriebsdauer	6-27
<b>7</b>	<b>Geotextil</b>	<b>7-1</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b>	<b>8-1</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	
	<b>Verzeichnis der Anlagen</b>	

## BILDERVERZEICHNIS

Bild 2.1: empfohlene Kornverteilung eines Sandes bei der Mischwasserreinigung.....	2-2
Bild 3.1: Gegenüberstellung der Sieblinien aus LFU [1998] und Alsdorf .....	3-1
Bild 3.2: Aufnahme des Wesersandes 0/2 mm.....	3-2
Bild 3.3: Aufnahme des Rheinsandes 0/2 mm .....	3-3
Bild 3.4: Aufnahme des Wesersandes 0/4 mm.....	3-4
Bild 3.5: Aufnahme des Rheinsandes 0/4 mm .....	3-5
Bild 3.6: Sieblinien der eingebauten Sande nach DIN 18123.....	3-6
Bild 4.1: Adsorptionsleistung verschiedener Sande bzgl. Ammonium .....	4-4
Bild 4.2: Adsorptionsleistung verschiedener Sande bzgl. Phosphor.....	4-4
Bild 4.3: Adsorptionsleistung verschiedener Sande bzgl. Schwermetalle .....	4-5
Bild 5.1: Foto der Versuchsanlage.....	5-1
Bild 5.2: Foto der Ablaufvorrichtungen einer gedrosselten und einer freien Ablaufvariante ...	5-3
Bild 5.3: Foto der obersten Bodenschicht nach Ausbau .....	5-5
Bild 5.4: Gegenüberstellung Zulauf und Ablauf der Vorklärung nach Absetzvorgang (30min)	5-5
Bild 6.1: Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. CSB.....	6-5
Bild 6.2: Mittlere Wirkungsgrade des CSB-Abbaus .....	6-8
Bild 6.3: Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. Ammonium.....	6-10
Bild 6.4: mittlere Wirkungsgrade des Ammoniumabbaus .....	6-12
Bild 6.5: Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. Nitrat.....	6-14
Bild 6.6: Mittlere Wirkungsgrade der Nitrifikation.....	6-16
Bild 6.7: Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. Phosphor.....	6-18
Bild 6.8: Mittlere Wirkungsgrade der Phosphorelimination .....	6-20
Bild 6.9: mittlere Wirkungsgrade gleicher Sande unterschiedlicher Korngröße.....	6-21
Bild 6.10: Mittlere Wirkungsgrade der gedrosselten und ungedrosselten Säulen.....	6-22
Bild 6.11: Mittlere Wirkungsgrade bezgl. Nitrifikation der gedrosselten und ungedrosselten Säulen .....	6-23
Bild 6.12: Regressionsgeraden der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. CSB.....	6-24
Bild 6.13: Regressionsgeraden der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. Ammonium .....	6-24
Bild 6.14: Regressionsgeraden der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. Phosphor.....	6-25
Bild 6.15: CSB-Werte bei verschiedenen Aufenthaltszeiten beim Wesersand 0/2 mm.....	6-26
Bild 6.16: CSB-Werte bei verschiedenen Aufenthaltszeiten beim Wesersand 0/4 mm.....	6-27
Bild 6.17: Darstellung der gedrosselten Filtersäulen bezgl. CSB-Abbau .....	6-28
Bild 6.18: Darstellung der gedrosselten Filtersäulen bezgl. Ammoniumabbau.....	6-28
Bild 6.19: Darstellung der gedrosselten Filtersäulen bezgl. Nitrifikation.....	6-29
Bild 6.20: Darstellung der gedrosselten Filtersäulen bezgl. Phosphorelimination .....	6-29

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung Substrateigenschaften LFU [1998] und Alsdorf	3-1
Tabelle 3.2: Bekannte und gewünschte Korngruppen	3-3
Tabelle 3.3: Errechnete Körnungslinie kontrolliert durch Bestimmung nach DIN 18123	3-4
Tabelle 3.4: Eigenschaften der untersuchten Sande	3-6
Tabelle 3.5: Gegenüberstellung der ermittelten Durchlässigkeiten	3-8
Tabelle 3.6: Gegenüberstellung der Aufenthaltszeiten des Wassers in den Säulen bei konstantem hydraulischen Gefälle von $I=2$	3-8
Tabelle 4.1: Konzentrationsbereiche für die Regressionsfunktion (1 bis 5) und die Schüttelversuche (1 bis 4)	4-1
Tabelle 4.2: Konzentrationsbereiche für das Ammonium	4-3
Tabelle 5.1: Nachweis der Filterstabilität nach TERZAGHI	5-2
Tabelle 5.2: Konzentrationen im Ablauf der Vorklärung	5-4
Tabelle 5.3: Konzentrationen im Zulauf der Vorklärung	5-6
Tabelle 5.4: mittlere Zulaufkonzentrationen in den einzelnen Phasen	5-6
Tabelle 5.5: Zeitplan der Mischwasserbeschickungen	5-7
Tabelle 5.6: Bestimmungsverfahren der durchgeführten Abwasseruntersuchungen	5-8
Tabelle 6.1: Konzentrationen untersuchter Parameter bei den Beschickungen	6-1
Tabelle 6.2: Beschickungsfrachten aller untersuchten Parameter (kumuliert)	6-2
Tabelle 6.3: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. CSB der homogenisierten Proben	6-3
Tabelle 6.4: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. CSB der filtrierten Proben	6-4
Tabelle 6.5: Anteile des gelösten CSB am Gesamtwert bezogen auf die Mittelwerte	6-5
Tabelle 6.6: Wirkungsgrade bzgl. CSB der homogenisierten Proben	6-6
Tabelle 6.7: Wirkungsgrade bzgl. CSB der filtrierten Proben	6-7
Tabelle 6.8: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. Ammonium	6-9
Tabelle 6.9: Wirkungsgrade bzgl. Ammonium	6-11
Tabelle 6.10: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. Nitrat	6-13
Tabelle 6.11: Wirkungsgrade bzgl. Nitrifikation	6-15
Tabelle 6.12: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. Phosphor	6-17
Tabelle 6.13: pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit der Zuläufe	6-18
Tabelle 6.14: Wirkungsgrade bzgl. Phosphor	6-19
Tabelle 6.15: Statistische Kenngrößen bzgl. AFS und GV (Zulauf VK, verdünnt)	6-20
Tabelle 6.16: Korrelation der Zu- und Ablaufkonzentrationen	6-25
Tabelle 7.1: Durchlässigkeiten [m/s] der Probenkörper	7-1

## 1 Veranlassung und Zielsetzung

Bodenfilteranlagen haben sich als erfolgversprechende Möglichkeit zur weitergehenden Behandlung von Gewässereinleitungen aus Misch- und Trennsystemen sowie Straßenentwässerungsanlagen herausgestellt. Für Bodenfilteranlagen existieren derzeit noch keine bundesweit anerkannten Regeln der Technik. Ein erster Schritt in diese Richtung stellt das Handbuch Wasser 4 Nr. 10 der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg dar. Die darin beschriebenen Hinweise resultieren hauptsächlich aus Erfahrungen mit Anlagen, in denen bindiges Bodenmaterial eingesetzt wurde. Da diese Anlagen jedoch im Betrieb sehr empfindlich reagieren und der Einbau bindiger Böden einen erheblichen bautechnischen Aufwand mit sich bringt, wird derzeit Sandsubstraten der Vorzug gegeben.

Das Land Nordrhein-Westfalen führte ein mehrjähriges Untersuchungsprojekt an einer großtechnischen Versuchsanlage in der Stadt Alsdorf durch. Die Versuchsergebnisse zeigten geringere Wirkungsgrade als nach bisherigen Untersuchungen an anderen Anlagen zu erwarten war. Als Ursache wurden die geringen Zulaufkonzentrationen, die Substrate und die verwendeten Geotextilien als Trennlagen zwischen unterschiedlichen Bodenschichten vermutet. Jüngst durchgeführte Untersuchungen des Substrates der Anlage in Alsdorf legten die Schlussfolgerung nahe, dass die Filter eine Versauerungstendenz infolge der Abwasserbelastung aufwies, die sie aufgrund der geringen Karbonatgehalte nicht abpuffern konnte. Nach neueren Erkenntnissen kommt dem Karbonatgehalt im Sandmaterial vermutlich eine Schlüsselrolle zumindest für die Ammoniumreduktion zu.

Das Landesumweltamt NRW beauftragte die FH Münster, Prof. Dr.-Ing. Uhl, mit der Durchführung von ergänzenden Säulenversuchen mit sandigen Filtermaterialien. Die Untersuchungsergebnisse sollen zum einen die Interpretation der Daten der Anlage in Alsdorf unterstützen und zum anderen Grundlagen für die Auswahl geeigneter Substrate für halb- oder großtechnisch zu untersuchende Filtersubstrate liefern.

## 2 Anforderungen an den Boden

Der Stofftransport in der Bodenmatrix wird durch die fünf Einzelmechanismen Filtration, Sorption, Abbau, Fällung, Komplexbildung bestimmt. Für den Bodenfilter als Behandlungsanlage in der Mischwasserentlastung kommen vorwiegend die ersten drei Mechanismen zum tragen.

Die Reinigungsleistung von Sandsubstraten zeigt in einigen Punkten ein anderes Verhalten als die von Lehmböden bei der Mischwasserfiltration, bezieht sich aber dennoch auf den Rückhalt partikulärer und gelöster Stoffe. Sande benötigen, was die biologische Wirksamkeit betrifft eine längere Einarbeitungsphase, die bis zu einem halben Jahr betragen kann, da sich auf grobporigem Material eine geeignete Biozönose langsamer bildet als auf feinkörnigem Material. Zudem ist die mikrobielle Tätigkeit bei Sanden abhängig von der Temperatur, sodass sich bei einem Temperaturrückgang die Werte von Ammonium und CSB in den Abläufen erhöhen können. Die Kationenaustauschkapazität ist geringer als bei Lehmböden, was sich im Sorptionspotenzial z.B. bei Phosphor niederschlägt. Eine langfristige Fixierung ist somit nicht zu erwarten, hierzu wäre eine Meliorisation erforderlich. Sandige Substrate verfügen im wesentlichen über eine biotische Sorptionskapazität, die durch mikrobielle Tätigkeit aufgebaut wird (LFU [1998]; GROTEHUSMANN [1999]).

Bei zahlreichen aeroben biochemischen Vorgängen (z.B. Oxidation von Sulfid, Eisensulfid oder Eisen(II)-Verbindungen) entstehen wie bei der Nitrifikation freie  $H^+$  Protonen, die ein Absinken des pH-Wertes mit sich bringen. Ein saures Milieu im Filtersubstrat sollte allerdings vermieden werden, da dies zu einer Mobilisierung bereits festgelegter Schwermetalle und zu einer Behinderung der Nitrifikation führen würde. Dem Absinken des pH-Wertes durch Protonen kann durch eine pH-Anhebung beim Auflösen von Karbonaten entgegengewirkt werden. Deshalb empfiehlt es sich, zur Sicherstellung der Nitrifikation und der Pufferung weiterer, infolge von Redoxreaktionen freigesetzter Protonen, karbonathaltiges Substrat einzusetzen (RETTINGER [1992]; GROTEHUSMANN [1995]).

Gesondert betrachtet werden muss das Sorptionsverhalten des Anions  $PO_4^{3-}$ , da Phosphor im Boden nicht mikrobiell abgebaut, sondern nur an die Bodenmatrix angelagert werden kann, um dann in eventuell stabilere Bindungsformen (z.B.  $FePO_4$ ,  $AlPO_4$  oder  $Ca_3(PO_4)_2$ ) überführt zu werden. Bei den erforderlichen Rahmenbedingungen steht die Phosphatsorption allerdings im Widerspruch zur Nitrifikation. Sie benötigt nämlich entgegen dem Nitrifikationsvorgang einen eher karbonatfreien Boden mit niedrigem pH-Wert. Zudem ist die Phosphatsorption ein endlicher Vorgang, der zum Erliegen kommt, wenn alle Sorptionsplätze für Phosphor belegt sind. Der Ammoniumabbau hingegen ist ein regenerativer Vorgang, der sich zeitlich



nicht erschöpft, da der Kationenspeicher immer wieder von neuem mit Ammonium aufgefüllt, nach der Bildung von Nitrat aber wieder entleert wird (LFU [1998]; BLUME [1992]).

Für Sandsubstrate enthält LFU [1998] folgende Empfehlung:

- Körnung 0/2 mm, eng vorgegebene Sieblinie, gewaschenes Material, Anteil der Ton- und Schlufffraktion und der Anteil der Feinkiesfraktion 2 - 4 mm maximal 5 %
- karbonathaltige Sande mit einem pH-Wert über 7
- Beinschichtiger Filteraufbau aus Sand-Dränagekies, Schichtdicke 1m

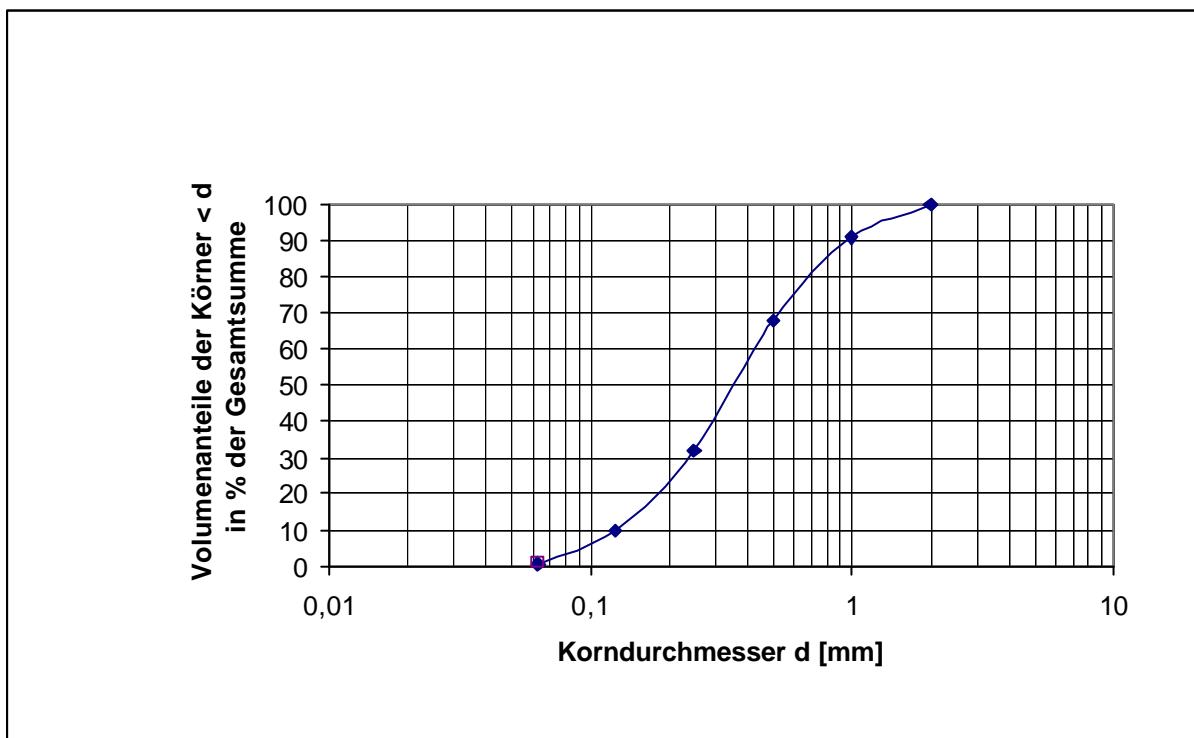


Bild 2.1: empfohlene Kornverteilung eines Sandes bei der Mischwasserreinigung (aus LFU [1998])

### 3 Auswahl der Substrate

Bei der Auswahl der Substrate wurden folgende Entscheidungskriterien berücksichtigt:

- ausreichende Belüftung des Bodenkörpers
- ausreichende hydraulische Leitfähigkeit
- ausreichende Aufenthaltszeit des zu reinigenden Wassers im Bodenkörper
- ausreichend hohe Adsorptionskapazität des Bodenmaterials
- Vermeidung von innerer Kolmation des Bodenfilters

Es werden vier unterschiedliche Substrate verglichen, die in die Säulen eingebaut wurden. Bei der Auswahl der Substrate wurde versucht, die Vorgaben des Handbuchs 4/10 des LFU Baden-Württemberg (LFU [1998]) und die Charakteristik des in der großtechnischen Anlage in Alsdorf eingebauten Sandes zu berücksichtigen. Zusätzlich wurden zwei Referenzsande ausgewählt.

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung Substrateigenschaften LFU [1998] und Alsdorf

Merkmale	Vorgaben LFU [1998]	Anlage Alsdorf
Körnung	0 – 2 mm	0 – 4 mm
Karbonatgehalt	karbonathaltig	karbonatarm
Durchlässigkeit nach HAZEN	$k_f = 1,1 \cdot 10^{-4}$ m/s	$k_f = 2,9 \cdot 10^{-3}$ m/s
Körnungskennzahl $d_{10}$	0,1 mm	0,5 mm

Die HAZEN-Formel ist eine Näherungsformel für die Berechnung von Durchlässigkeiten von Böden. Sie wurde aus Mittelsanden hergeleitet und gilt für den gesättigten Boden. Die hiermit errechneten Werte liegen meist höher als die in den Versuchen ermittelten Werten.

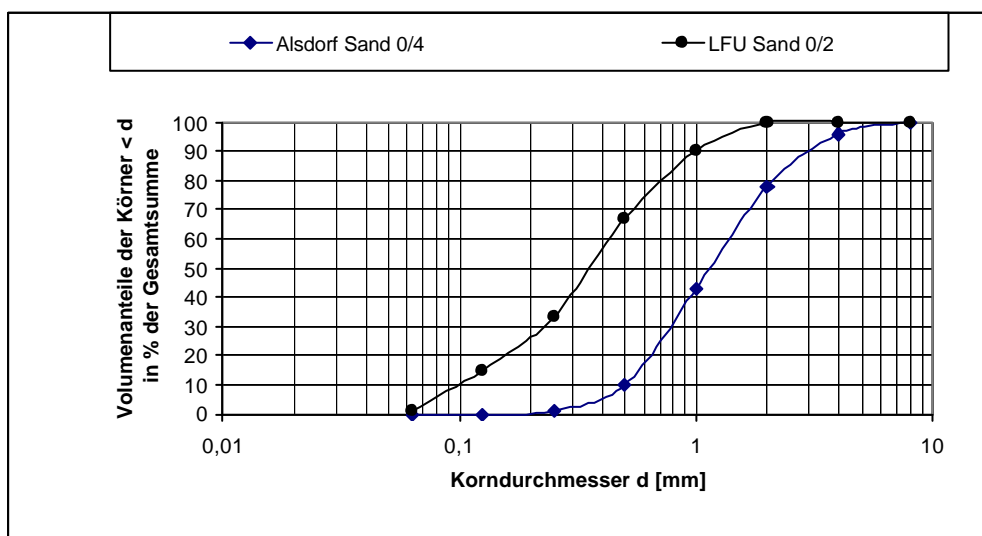


Bild 3.1: Gegenüberstellung der Sieblinien aus LFU [1998] und Alsdorf

(Grotehusmann [1999])

### 3.1 Wesersand 0/2 mm

Der Wesersand 0/2 mm entspricht im wesentlichen den Empfehlungen aus LFU [1998]. Seine Sieblinie hält die zwingenden Bedingungen ein, somit liegt sowohl der Anteil der Ton- und Schlufffraktion ( $< 0,06$  mm) als auch der Anteil der Feinkiesfraktion (2 - 4 mm) jeweils unter 5 %. Er hat einen hohen Gehalt an Karbonat und Eisen. Auf der fotografischen Aufnahme ist die Bildung von Agglomeraten zu erkennen. Es ist davon auszugehen, dass diese Besonderheit einen Einfluss auf die Durchlässigkeit, die spezifische Oberfläche, die Lagerungsdichte und das Setzungsverhalten hat.

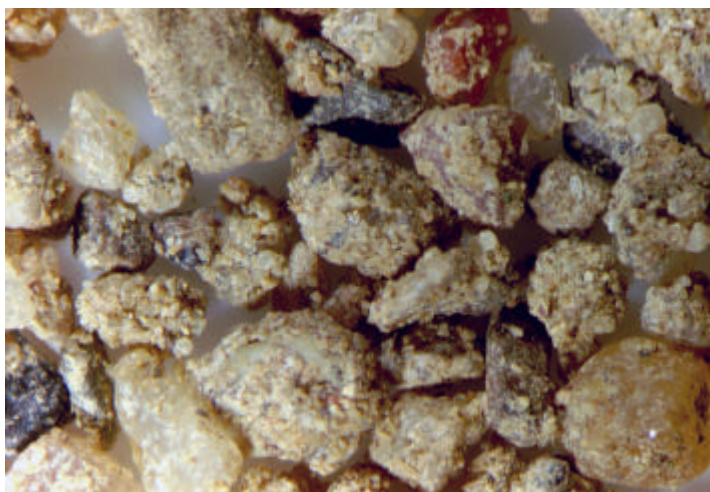


Bild 3.2: Aufnahme des Wesersandes 0/2 mm

Bei der Durchführung der Säulenversuche kolmatierten die Säulen der Wesersande 0/2 mm aufgrund der Beschickung am 04.01.01. Die anderen Säulen zeigten diese Störung nicht. Die Kolmation wurde behoben, indem die oberste Schicht (5 cm) ausgebaut und ausgewaschen wurde. Die Ursache der Störung konnte nicht nachvollzogen werden. Der Gehalt an AFS unterschied sich nicht von den übrigen Beschickungen. Es wurde eine zusätzliche Bestimmung des GV an dem ausgebauten Sand durchgeführt, die aber keine Zunahme der Organik erkennen ließ.

### 3.2 Rheinsand 0/2 mm

Der Rheinsand 0/2 mm ähnelt in der Sieblinie dem Wesersand 0/2 mm und hält ebenfalls die Vorgaben des LFU [1998], die Körnung betreffend, ein. Unterschiede bestehen in einem kleineren Anteil der Feinkornfraktion und in den niedrigeren Karbonat- und Eisengehalten. Er wird als Referenzsand untersucht.

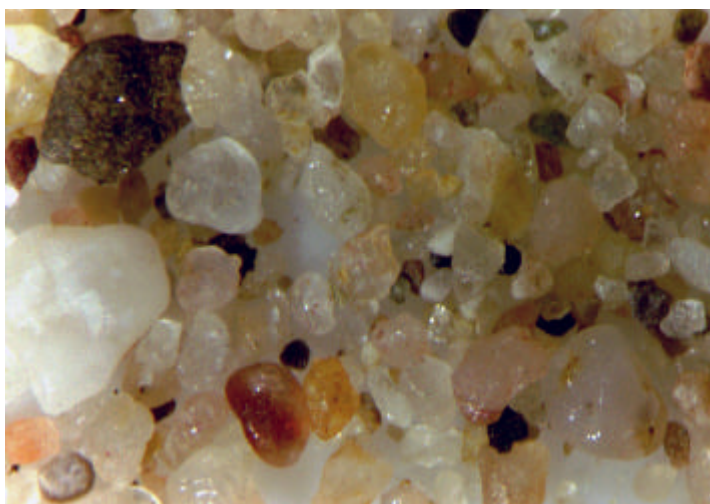


Bild 3.3: Aufnahme des Rheinsandes 0/2 mm

### 3.3 Wesersand 0/4 mm

Für den Wesersand 0/4 mm musste ein Gemisch erstellt werden aus einem Wesersand 0/2 mm und einem Wesersand 1/4 mm, da er als fertiges Gemisch nicht bezogen werden konnte. Die Berechnung des Mischungsverhältnisses der Sieblinien erfolgte über die Körnungsziffer  $k$  als Sieblinienkennwert, so dass sowohl Rheinsand 0/4 mm und Wesersand 0/4 mm eine Körnungsziffer von 3,11 aufweisen. Die Berechnung des Mischungsverhältnisses nach SCHOLZ [1995] über die Körnungsziffer erfolgt über zwei bekannte Sieblinien, die durch ein prozentual angegebenes Mischungsverhältnis zu einer gewünschten Sieblinie zusammen gebracht werden. Um die gewünschte Sieblinie zu erhalten, wurde eine Mischung mit 2% der Korngruppe 0/2 mm und 98 % der Korngruppe 1/4 mm erstellt. Beim Wesersand 0/4 mm sind auf der fotografischen Aufnahme ebenso wie beim Wesersand 0/2 mm Agglomerate zu erkennen.

Tabelle 3.2: Bekannte und gewünschte Korngruppen

Korngruppe	Durchgang in Masse-% durch die Siebe						S	k-Wert
	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0		
bekannte KG 0/2 mm (x)	15	52	84	94	100	100	445	1,55
bekannte KG 1/4 mm (y)	4	10	14	63	95	100	286	3,14
gewünschte KG 0/4 mm	1	11	34	55	88	100	289	3,11

Tabelle 3.3: Errechnete Körnungslinie kontrolliert durch Bestimmung nach DIN 18123

Korngruppe	%	Durchgang in Masse-% durch die Siebe						k
		0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	
KG 0/2 mm	2	0,3	1,0	1,7	1,9	2,0	2,0	
KG 1/4 mm	98	3,9	9,8	13,7	61,7	93,1	98,0	
errechnete KG 0/4 mm	100	4,2	10,8	15,4	63,6	95,1	100,0	3,11 v
Kontrolle aus Siebversuch		2,3	9,1	23,5	55,8	98,0	100	3,11 v

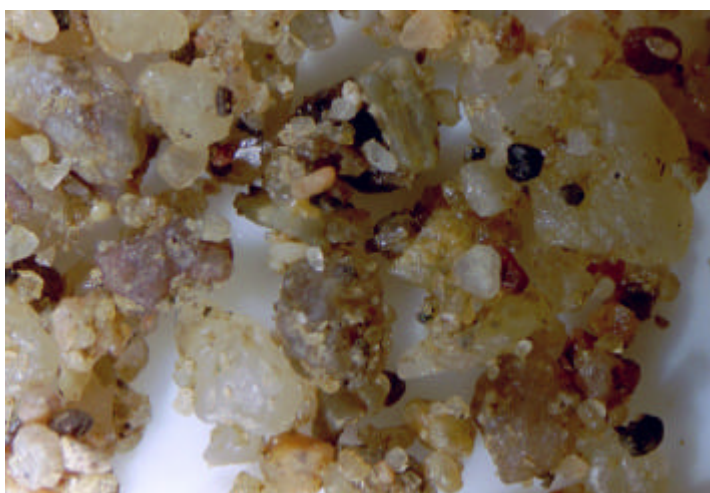


Bild 3.4: Aufnahme des Wesersandes 0/4 mm

### 3.4 Rheinsand 0/4 mm

Der Rheinsand 0/4 mm stimmt in der Körnungsziffer mit dem Wesersand 0/4 mm überein. Er ist vergleichbar mit dem Sand der Bodenfilteranlage Alsdorf, der in den Bodenfiltern 5 und 6 als einschichtiger Filteraufbau eingebaut wurde.



Bild 3.5: Aufnahme des Rheinsandes 0/4 mm

### 3.5 Eigenschaften der untersuchten Sande

Bei den eingebauten Sanden wurden folgende Parameter bestimmt:

- Korngrößenverteilung nach DIN 18123
- Glühverlust nach DIN 18128
- pH-Wert nach DIN ISO 10390
- Karbonatgehalt nach DIN ISO 10693
- Karbonatgehalt nach VDLUFA [1991], Methode A 5.3.1
- Eisengehalt (dithionitlöslich) nach MEHRA und JACKSON [1960]
- Eisengehalt (oxalatlöslich) nach TAMM [1932], mod. nach SCHWERTMANN [1964]
- potentielle Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{pot}$ ) nach MEIWES et. al. [1984]
- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert in Anlehnung an DIN 18130

Tabelle 3.4: Eigenschaften der untersuchten Sande

Parameter	Wesersand 0/2 mm	Wesersand 0/4 mm	Rheinsand 0/2 mm	Rheinsand 0/4 mm
d <sub>10</sub> [mm]	0,17	0,50	0,22	0,49
d <sub>60</sub> [mm]	0,60	2,10	0,59	2,05
U [-]	3,4	4,2	2,7	4,1
pH-Wert [-]	8,0	8,1	8,0	7,8
Glühverlust [%]	1,5	0,5	0,3	0,4
CaCO <sub>3</sub> [%] DIN ISO 10693	11,3	5,3	0,75	0,01
CaCO <sub>3</sub> [%] VDLUFA	11,6	0,3	0,0	0,0
Fe [mg/kg] oxalatlöslich	129,7	54,9	63,5	23,8
Fe [mg/kg] dithionitlöslich	3123,5	546,0	607,4	380,1
KAK <sub>pot</sub> [cmol <sub>c</sub> Element/kg]	3,75	1,10	0,54	0,56

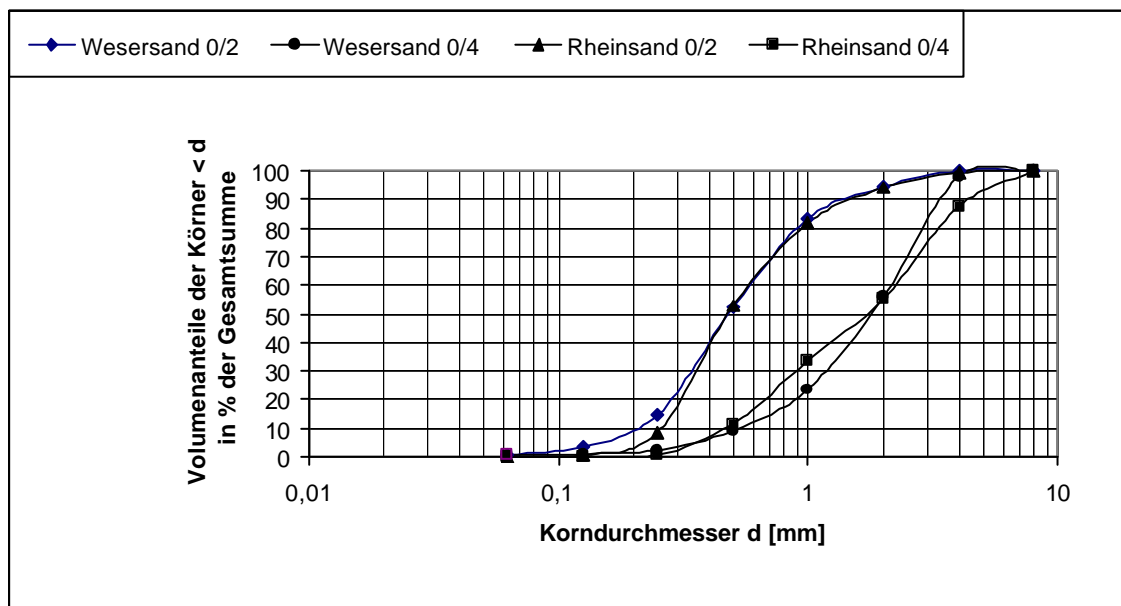
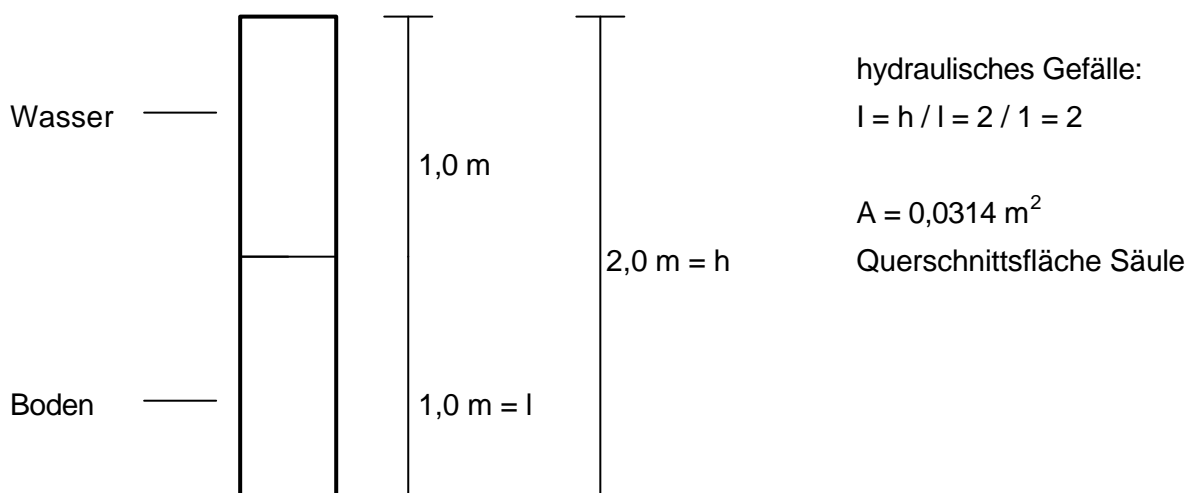


Bild 3.6: Sieblinien der eingebauten Sande nach DIN 18123

Die Durchlässigkeit eines Substrates ist von verschiedenen Parametern wie Korngröße, Korngrößenverteilung, Kornform, Korngefüge, Lagerungsdichte etc. abhängig. Sie wurde bei den eingebauten Sanden in Anlehnung an die DIN 18130 „Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes“ [5/1998] anhand einer Durchflussmessung mit einem konstanten hydraulischen Gefälle von  $I=2$  ermittelt. Vor der eigentlichen Messung wurden die Böden durch zwei Beschickungen mit Reinwasser konsolidiert und gesättigt. Obwohl die Sande ähnliche Sieblinien besitzen, wichen sie in ihrer Durchlässigkeit wesentlich voneinander ab. Durch die Beschickungen war mit einer weiteren Konsolidierung und mit einer Beeinflussung der Durchlässigkeit durch partikuläre Stoffe bzw. eine Biofilmschicht in der oberen Zone des Bodenkörpers zu rechnen. Deshalb sind nach Abschluss der Versuche noch einmal die Durchlässigkeiten auf die gleiche Art bestimmt worden.

Skizze der Säule (unmaßstäblich) :



- Wesersand 0/2 mm

vorher :  $Q_w = 0,18 \text{ l/min}$

$k_f = 4,72 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

nachher :  $Q_w = 0,13 \text{ l/min}$

$k_f = 3,46 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

- Rheinsand 0/2 mm

vorher :  $Q_w = 1,9 \text{ l/min}$

$k_f = 5,04 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

nachher :  $Q_w = 1,55 \text{ l/min}$

$k_f = 4,11 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

- Wesersand 0/4 mm

Vorher :  $Q_w = 7,55 \text{ l/min}$

$k_f = 2,00 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Nachher :  $Q_w = 4,97 \text{ l/min}$

$k_f = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

- Rheinsand 0/4 mm

vorher :  $Q_w = 4,11 \text{ l/min}$

$k_f = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$



nachher :  $Q_w = 3,16 \text{ l/min}$

$k_f = 0,84 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Tabelle 3.5: Gegenüberstellung der ermittelten Durchlässigkeiten

	$k_f$ nach HAZEN	$k_f$ vor Versuchsreihe	$k_f$ nach Versuchsreihe
Wesersand 0/2 mm	$3,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$4,72 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	$3,46 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$
Rheinsand 0/2 mm	$5,6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$5,04 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$4,11 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
Wesersand 0/4 mm	$2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$2,00 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
Rheinsand 0/4 mm	$2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$0,84 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Die Durchlässigkeit der 0/2 mm-Sande liegt um eine 10er Potenz auseinander, obwohl sie in ihrer Sieblinie nicht so gravierend voneinander abweichen. Laut der HAZEN-Berechnung anhand des  $d_{10}$  liegen die Durchlässigkeiten dichter beieinander. Es ist davon auszugehen, dass die Kornform mit Bildung von Agglomeraten beim Wesersand 0/2 mm zu diesem Effekt beiträgt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die aus der Durchlässigkeit bei einem hydraulischen Gefälle von  $I=2$  errechneten mittleren Aufenthaltszeiten eines Wasserteilchens innerhalb der Bodenpassage.

Tabelle 3.6: Gegenüberstellung der Aufenthaltszeiten des Wassers in den Säulen bei konstantem hydraulischen Gefälle von  $I=2$

	vor Versuchsreihe	nach Versuchsreihe
Wesersand 0/2 mm	5,80 h	8,02 h
Rheinsand 0/2 mm	0,55 h	0,67 h
Wesersand 0/4 mm	0,14 h	0,21 h
Rheinsand 0/4 mm	0,25 h	0,33 h

## 4 Schüttelversuche

Für die in den Säulenversuchen verwendeten Substrate sowie für zwei weitere Sande, die nicht in den Säulenversuchen verwendet wurden, sind mittels Schüttelversuchen die Adsorptionsleistungen untersucht worden.

- Wesersand 0/2 mm
- Wesersand 0/4 mm
- Rheinsand 0/2 mm
- Rheinsand 0/4 mm
- Quarzsand 0/2 mm
- Lavasand 0/2 mm
  
- Untersuchte Parameter:
- Zink (DIN 38406 E8)
- Blei (DIN 38406 E6)
- Kupfer (DIN 38406 E7)
- Pges. (ICP-AES)
- Ammonium (DIN 38406 – E5 - 1)

### 4.1.1 Konzentration der Ausgangslösung

Um eine Aussage über das Lösungsverhalten der Schwermetalle und des Ammoniums zu erhalten, werden für diese Parameter Regressionsfunktionen zwischen theoretisch und faktisch gelösten Stoffmengen ermittelt. Die Funktionen umfassen für die Schwermetalle 5 Konzentrationsbereiche und für das Ammonium 4 Konzentrationsbereiche. Zur Erstellung einer Regressionsfunktion werden den x-Werten die theoretisch in der Lösung gelösten Parameter zugewiesen. Die mittels der Analyse ermittelten gelösten Parameter werden als y-Wert aufgetragen.

Tabelle 4.1: Konzentrationsbereiche für die Regressionsfunktion (1 bis 5) und die Schüttelversuche (1 bis 4)

Parameter	Zink [mg/l]	Blei [mg/l]	Kupfer [mg/l]	Ammonium [mg/l]
Konzentrationsbereich 1	0,2	0,1	0,1	1,0
Konzentrationsbereich 2	2,0	1,0	1,0	10,0
Konzentrationsbereich 3	20,0	10,0	10,0	100,0
Konzentrationsbereich 4	200,0	100,0	100,0	1000,0
Konzentrationsbereich 5	400,0	200,0	200,0	-

Die Regressionsfunktion erlaubt eine Aussage über das Lösungsverhalten der einzelnen Parameter. Entsprechend der gewünschten Konzentration wurden die aus der Regressionsfunktion ermittelten Mengen an Schwermetallsalzen bzw. Ammoniumchlorid in eine 0,01 molare  $\text{CaCl}_2$  – Lösung gegeben. Die so erstellten Lösungen wurden in Glasflaschen 16 h bei 3 U/min Über-Kopf geschüttelt (GFL 3040). Anschließend wurden die Lösungen bei 2000 U/min 25 min lang zentrifugiert (Heraeus Christ Digifuge GL). Zur Analyse wurde ein Volumen von 10 ml (Schwermetalle) und 25 ml (Ammonium) abpipettiert. Die Messung des pH-Wertes erfolgte mit dem WTW pH 538. Die Schwermetalllösungen wurden mit der ICP-AES analysiert, wobei die Konzentrationsbereiche 4 und 5 im Verhältnis 1:10 verdünnt wurden. Die Ammoniumlösungen wurden ebenfalls verdünnt. Die Ergebnisse des Versuches, anhand derer die Eichgeraden erstellt wurden sowie die Eichgeraden befinden sich in Anlage 1.

#### 4.1.2 Vorversuch

Als Vorversuche wurden Schüttelversuche mit dem Wesersand 0/2 mm durchgeführt. Dabei wurde folgende Versuchsanordnung eingehalten.

- Substrate werden bei Raumtemperatur ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) getrocknet
- Die Parameter werden entsprechend dem höchsten Konzentrationsbereich in eine 0,01 molare  $\text{CaCl}_2$  – Lösung gegeben.
- Durch Verdünnung dieser Lösung werden die niedrigeren Konzentrationsbereiche hergestellt.
- Das Verhältnis Wasser / Boden beträgt 5 :1
- Das Schütteln erfolgt für 16 h in 0,5l Glasflaschen Über-Kopf bei einer Umdrehung von 3 U/min
- Die Glasflaschen werden für 30 min abgestellt. Anschließend erfolgt das Dekantieren der Gleichgewichtslösung in die Zentrifugenröhrchen.
- Das Zentrifugieren erfolgt in 30 ml –Röhrchen 25 min lang bei 2000 U/min
- Zum Analysieren werden 10 ml abpipettiert (Ammonium 25 ml)
- Der Konzentrationsbereich 4 wird vor dem Analysieren im Verhältnis 1:10 verdünnt
- Die Proben werden mit  $\text{HNO}_3$  angesäuert und bis zur Analyse bei  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  aufbewahrt

Die Daten des Vorversuches befinden sich in Anlage 2.

### 4.1.3 Durchführung der Schüttelversuche

Die Versuchsanordnung der Schüttelversuche entspricht der des Vorversuches. Die Konzentrationsbereiche des Ammoniums wurden verringert.

Tabelle 4.2: Konzentrationsbereiche für das Ammonium

Parameter	Ammonium [mg/l]
Konzentrationsbereich 1	0,1
Konzentrationsbereich 2	1,0
Konzentrationsbereich 3	10,0
Konzentrationsbereich 4	100,0

Die Datenblätter der Substrate befinden sich in Anlage 3.

### 4.1.4 Nachuntersuchungen

Nach der Durchführung der Schüttelversuche wurden folgende Nachuntersuchungen gemacht:

- Für den Wesersand 0/2 mm, den Quarzsand und den Lavasand wurden Schüttelversuche mit der Schwermetalllösung in den Konzentrationsbereichen 3 und 4 durchgeführt. Für den Wesersand 0/2 mm wurden dabei jeweils 4 Proben angesetzt. Bei dem Quarzsand und dem Lavasand wurden jeweils 2 Proben angesetzt.
- Für den Wesersand 0/2 mm wurde ein Schüttelversuch mit dem Parameter Zink für die 4 Konzentrationsbereiche durchgeführt (0,2, 2,0, 20,0 und 200,0 mg/l).
- Für den Wesersand 0/2 mm wurde ein Schüttelversuch mit der Schwermetalllösung für die 4 Konzentrationsbereiche durchgeführt. Die Schüttelzeit betrug 7 Tage.

### 4.1.5 Ergebnisse der Schüttelversuche

Die Darstellung der adsorbierten Stoffmengen über die verschiedenen Konzentrationsbereiche erfolgt grafisch in Form von Isothermen und befindet sich in der Anlage 3. Nachfolgend werden die adsorbierten Stoffmengen für Konzentrationsbereiche, die im Mischwasser gewöhnlich zu erwarten sind, dargestellt. Bei der Adsorption von Ammonium und Phosphor zeigt der Wesersand 0/2 mm gegenüber den übrigen in den Säulenversuchen verwendeten Sanden deutlich höhere Werte. Die Adsorption von Schwermetallen zeigt keine markanten Unterschiede. Eine Ausnahme stellt die niedrige Adsorption des Rheinsandes 0/4 mm bezüg-

lich Zink dar. Auffällig ist das Verhalten des Quarzsandes, welcher bei den verschiedenen Stoffen stark differierende Adsorptionsleistungen aufweist. Die gesamten Analyseergebnisse befinden sich in Anlage 4.

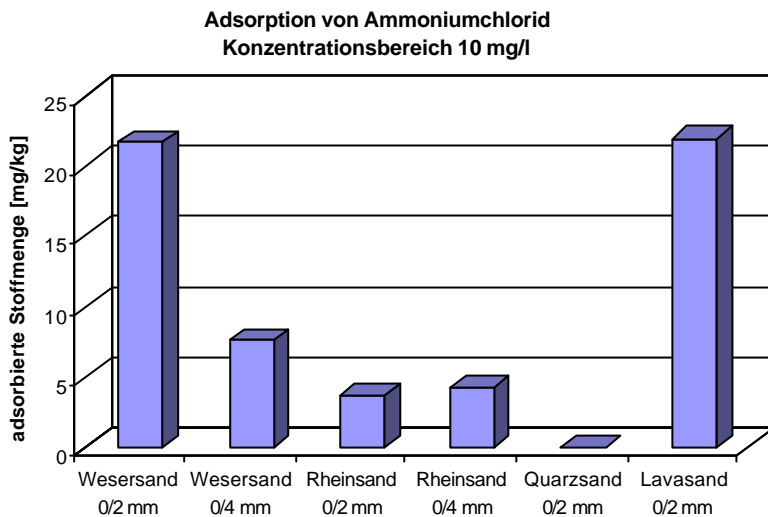


Bild 4.1: Adsorptionsleistung verschiedener Sande bzgl. Ammonium

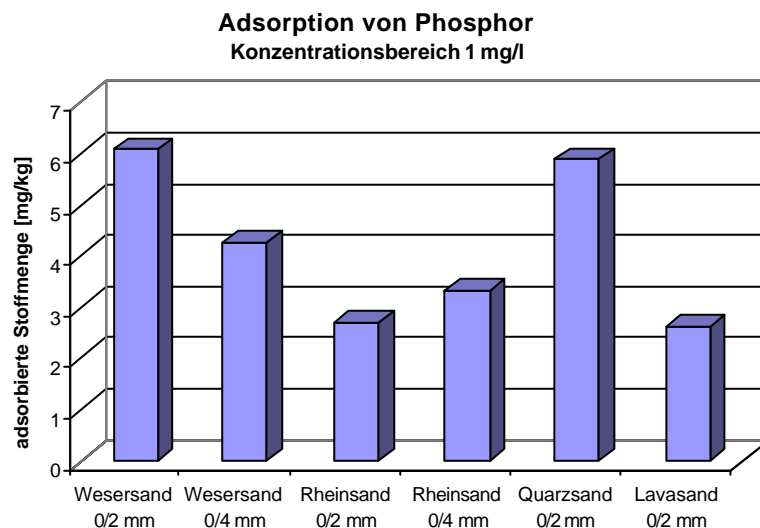


Bild 4.2: Adsorptionsleistung verschiedener Sande bzgl. Phosphor

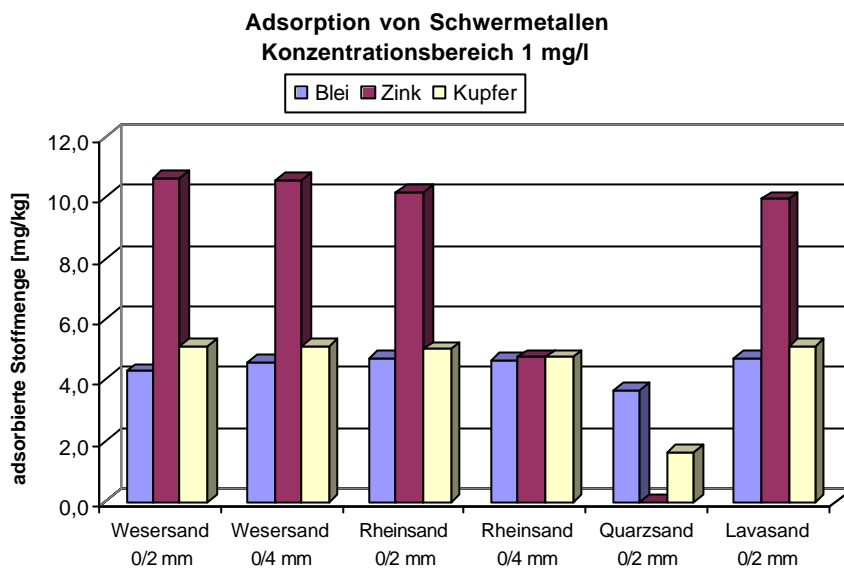


Bild 4.3: Adsorptionsleistung verschiedener Sande bzgl. Schwermetalle

## 5 Säulenversuche

### 5.1 Versuchsaufbau

Als Säulen dienten KG Kunststoffrohre DN 200 mit einer Länge von 2m. Es wurden insgesamt 8 Säulen aufgebaut. Jede Säule wurde mit einem Meter Filteraufbau versehen, sodass sie während der Versuchsreihe mit 1m Wassersäule beschickt werden konnten. Die KG-Rohre wurden an einem Ende mit einem KG Muffenstopfen verschlossen, in dem sich eine Auslassöffnung ( $\varnothing$  5cm) befand. Der Durchgang des Drainagematerials wurde mit einem Kunststoff-Geogitter (Maschenweite 6mm) verhindert. An die Ablauföffnung wurden PVC-Rohre DN 50 angeschlossen, um einen kontrollierten Ablauf zu gewährleisten und das Filtrat in einem Behälter sammeln zu können.



Bild 5.1: Foto der Versuchsanlage

Beim Einbau eines Sandfilters ist lediglich die Schichtenfolge Sand-Drainagekies einzuhalten. Die bei Sanden übliche Setzung von ca. 15 % wurde bei den Schütthöhen berücksichtigt. Zusätzlich mussten bei der Filterbemessung zwei Bedingungen eingehalten werden :

- Stabilität des Filters (Sperrbedingung)
- druck- und rückstaufreier Durchfluss (Durchflussbedingung)

Diese Grundsätze wurden für den Versuchsaufbau nach den Filterregeln von TERZAGHI kontrolliert und bestätigt. Die Schichtung des Filtermaterials sieht von unten nach oben wie folgt aus:

- 10 cm Mittelkies 8/16 mm (Drainageschicht)
- 10 cm Feinkies 2/8 mm (Drainageschicht)
- 80 cm des jeweiligen Sandsubstrates (Filterschicht)

Das Volumen der einzubauenden Sande wurde wie folgt errechnet:

Querschnittsfläche der Säule:  $A = 0,0314 \text{ m}^2$

Schichtdicke 10 cm:  $V = 0,00314 \text{ m}^3 = 3,1 \text{ l}$

Schichtdicke 80 cm:  $V = 1,15 * 0,025 \text{ m}^3 = 28,9 \text{ l}$

Die in den Berechnungen angesetzten 15 % entsprechen dem für die Setzung zu berücksichtigenden Zuschlag. Die einzelnen Schichten wurden durch Schüttung am offenen Ende der Säule so eingebracht, dass eine Verdichtung möglichst vermieden wurde. Die Schütthöhen wurden regelmäßig durch Höhenmessungen kontrolliert, so dass nach der Konsolidierung eine Filterschichtdicke in den einzelnen Säulen von 1 m +/- 3 cm gegeben war, die sich auch während der Versuche nicht nennenswert verändert hat.

Tabelle 5.1: Nachweis der Filterstabilität nach TERZAGHI

	Körnungs- kennzahl $d_{10}$ [%]	Körnungs- kennzahl $D_{60}$ [%]	Ungleich- förmig- keitszahl U [ $U < 5$ ]	Terzaghi $D_{15} \leq 4 * d_{65}$	Terzaghi $D_{15} \geq 4 * d_{15}$
Wesersand 0/2 mm	0,17	0,60	3,4	$2,75 \leq 4 * 1,19$ ✓	$2,75 \geq 4 * 0,22$ ✓
Wesersand 0/4 mm	0,50	2,10	4,2	$2,75 \leq 4 * 3,37$ ✓	$2,75 \geq 4 * 0,67$ ✓
Rheinsand 0/2 mm	0,22	0,59	2,7	$2,75 \leq 4 * 1,21$ ✓	$2,75 \geq 4 * 0,30$ ✓
Rheinsand 0/4 mm	0,49	2,05	4,1	$2,75 \leq 4 * 3,40$ ✓	$2,75 \geq 4 * 0,65$ ✓

Der Volumenstrom des Ablaufes ergibt sich aus der Durchlässigkeit des Filtermaterials. Die bei Sanden recht hohen Durchlässigkeiten haben eine geringe Aufenthaltszeit des Wassers in der Bodenpassage zur Folge. Eine Variante, das Ablaufverhalten zu steuern, bietet die Begrenzung des Abflusses durch eine Drosselung. Für jedes eingebaute Substrat wurde eine Säule mit freiem und eine mit gedrosseltem Auslass errichtet. Der spezifische Drosselabfluss wird von LFU [1998] mit  $0,01 \text{ l}/(\text{s} * \text{m}^2)$  vorgegeben. Auf die spezifische Fläche der Säulen (Säulenquerschnitt  $A = 0,0314 \text{ m}^2$ ) bezogen ergibt sich ein Abfluss von  $0,0003 \text{ l/s}$ . Die Einstellung des Drosselabflusses wurde durch eine volumetrische Abflussmessung kontrolliert. Die Drosselung entspricht einem  $k_f$ -Wert von  $10^{-5} \text{ m/s}$  und bewirkt, dass die Aufenthalts-



zeit des Wassers in der Bodensäule auf etwa 28 Stunden verlängert wird. Die Veränderung des Drosselabflusses mit der Einstauhöhe bleibt dabei unberücksichtigt.

$$\frac{V_B}{Q_d} = t_A \quad \frac{30l}{0,0003l/s} = 100.000s = 27,8h \quad (5.1)$$

mit  $V_B$ = Beschickungsvolumen  
 $Q_d$ = Drosselabfluss  
 $t_A$ = mittlere Aufenthaltszeit



Bild 5.2: Foto der Ablaufvorrichtungen einer gedrosselten und einer freien Ablaufvariante

## 5.2 Versuchsdurchführung

### 5.2.1 Vorlaufphase

Die Vorlaufphase für die Versuchsreihe beinhaltete 4 Beschickungen mit Reinwasser, die der Konsolidierung und der Sättigung der Böden, der Ermittlung der Durchlässigkeiten der Materialien und der Einstellung des erforderlichen Drosselabflusses dienten.

- |                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| • 1. + 2. Beschickung | Konsolidierung und Sättigung   |
| • 3. Beschickung      | Ermittlung der Durchlässigkeit |
| • 4. Beschickung      | Einstellung der Drosselung     |

Anschließend wurden 6 Beschickungen mit Mischwasser durchgeführt, durch die die Filterbelastung erhöht und der Aufbau einer Biozönose ermöglicht wurde. Von diesen Beschickungen

wurde lediglich die erste mit Zu- und Abläufen der Anlage beprobt und analysiert, um den Nullzustand des Bodens festzustellen. Bei den folgenden 5 Beschickungen wurde nur der Zulauf untersucht.

### 5.2.2 Beschickungsmedium

Um an der Versuchsanlage den Betrieb in der Mischwasserreinigung zu simulieren, musste ein geeignetes Medium gefunden werden, welches der Charakteristik eines Mischwasserabflusses entspricht. Zunächst sollte der Ablauf der Vorklärung der Abwasserreinigungsanlage Münster verwendet werden. Dieser ist schon einem mechanischen Reinigungsprozess unterzogen worden, in dem eine Abtrennung von groben Schmutzstoffen und ein Absetzen von kleineren Partikeln in den einzelnen Stufen wie Rechen, Sandfang und Vorklärbecken vollzogen wurde (ähnlich den Prozessen in einer Vorstufe zu einem Bodenfilter z.B. Stauraumkanal oder Regenüberlaufbecken). Anschließend wurden die Konzentrationsbereiche von entlastetem Mischwasser durch Verdünnen des Abwassers mit Reinwasser erzielt. Untersucht wurden CSB, Nitrat, Ammonium, Gesamtphosphor, abfiltrierbare Stoffe AFS und Glühverlust GV.

Tabelle 5.2: Konzentrationen im Ablauf der Vorklärung

	CSB	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P <sub>ges</sub>	AFS	GV
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
Ablauf, original	850	1,9	40,0	2,5	1200	52
Ablauf, verdünnt (1:2)	582	1,9	10,3	0,8	400	78

Daten aus der Beprobung vom 28.11.00

Alle Böden der Anlage sind bereits bei dieser ersten Mischwasserbeschickung kolmatiert. Bei näherer Betrachtung wurde offensichtlich, dass im Ablauf der Vorklärung ein hoher Gehalt an Schlamm vorhanden ist, der auf Faulprozesse während der langen Kanalisationswege und innerhalb des Vorklärbeckens zurückzuführen ist. Dieser Faulschlamm ist voluminös und in seiner Konsistenz zäh, so dass sich eine dunkle Schlammschicht auf der Oberfläche der Substrate gebildet hat, die für das überstehende Wasser nahezu undurchlässig war. Zur Behebung des Schadens wurde die oberste kolmatierte Schicht (Schichtdicke ca.5 cm) des Bodens ausgebaut und durch neues Material ersetzt, sodass der weitere Versuchsbetrieb nicht nachhaltig durch dieses Ereignis beeinflusst wurde.

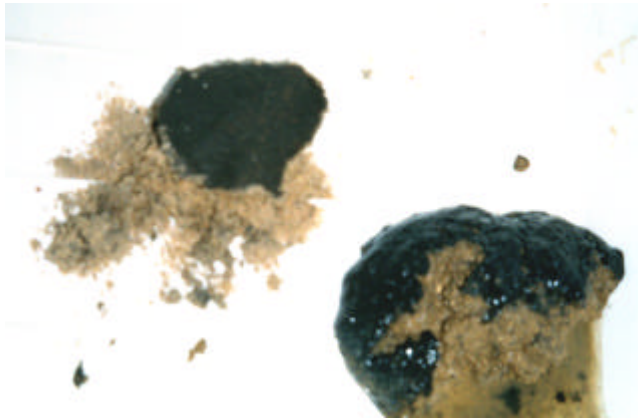


Bild 5.3: Foto der obersten Bodenschicht nach Ausbau

Für die nachfolgenden Beschickungen wurde der Zulauf der Vorklärung verwendet. Nach einem 30-minütigen Absetzvorgang wurde das Medium auf die Filter aufgebracht. Der Überstand aus dem Absetzbehälter wurde in einen Vorlagebehälter (Fassungsvermögen 300l) geschöpft, in dem die Verdünnung im Verhältnis 1:3 ( 1 Teil Schmutzwasser : 3 Teilen Reinwasser) stattfand. Die Beschickung aus dem Vorlagebehälter erfolgte über eine Tauchmotorpumpe, die darüber hinaus eine Homogenisierung des Gemisches gewährleistete. Die Homogenisierung des Gemisches und Überwachung der aufbrachten Menge (1m Wassersäule bei einer Querschnittsfläche von  $0,0314 \text{ m}^2 \sim 30 \text{ l}$ ) durch eine beglaubigte Wasseruhr sorgten dafür, dass jeder Bodenfilter mit der gleichen Fracht beschickt wurde.



Bild 5.4: Gegenüberstellung Zulauf und Ablauf der Vorklärung nach Absetzvorgang (30min)

Tabelle 5.3: Konzentrationen im Zulauf der Vorklärung

	CSB	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P <sub>ges</sub>	AFS	GV
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
Zulauf, original	720	2,3	52,9	2,5	75	60
Zulauf, verdünnt (1:3)	338	2,0	13,6	1,0	40	48

Daten aus Beprobung vom 30.11.00

Die Angaben über die Konzentrationen der einzelnen untersuchten Parameter der verschiedenen Zulaufzustände in Tabelle 5.4 entsprechen den Mittelwerten aus der gesamten Mischwasserbeschickung, d.h. Vorlaufphase und anschließende Versuchsreihe.

Tabelle 5.4: mittlere Zulaufkonzentrationen in den einzelnen Phasen

	CSB	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	P <sub>ges</sub>	AFS	GV
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
Zulauf Vorklärung	650	2,3	41,0	4,5	298	74
Zulauf Vorklärung abgesetzt	414	2,7	36,7	3,9	129	74
Zulauf Vorklärung abgesetzt und verdünnt	131	8,6	11,1	1,4	53	79

### 5.2.3 Zeitplan

Nach der Vorlaufphase durch Reinwasser- und Mischwasserbeschickungen folgte die eigentliche Versuchsreihe durch Aufbringen von abgesetztem und verdünntem Zulauf der Vorklä- rung der Abwasserreinigungsanlage Münster. Die Säulen sind mit 16 m Wassersäule ver- dünnten Abwassers beschickt worden. Das entspricht etwa der Hälfte der nach LFU [1998] jährlich zulässigen Beschickungshöhe. Bei 10 Versuchen wurden Zu- und die Abläufe der jeweiligen Säulen beprobt und analysiert.

Tabelle 5.5: Zeitplan der Mischwasserbeschickungen

Phase	Beschickung	Termin
Vorlauf	1. – 4. Reinwasser	21. und 23. Nov. 2000
	1. + 2. Mischwasser	28. und 30. Nov. 2000
	3. + 4. Mischwasser	04. und 07. Dez. 2000
	5. + 6. Mischwasser	11. und 14. Dez. 2000
Versuchsreihe	7. + 8. Mischwasser	18. und 21. Dez. 2000
	9. + 10. Mischwasser	02. und 04. Jan. 2001
	11. + 12. Mischwasser	08. und 11. Jan. 2001
	13. + 14. Mischwasser	15. und 18. Jan. 2001
	15. + 16. Mischwasser	22. und 25. Jan. 2001

### 5.3 Probenahme und Analytik

An den Abwasserproben wurden folgende Parameter untersucht:

- Abfiltrierbare Stoffe AFS
- Glühverlust GV
- Chemischer Sauerstoffbedarf CSB
- Ammonium  $\text{NH}_4^+$
- Nitrat  $\text{NO}_3^-$
- Gesamtphosphor  $\text{P}_{\text{ges}}$

Die Proben wurden als homogenisierte Mischproben aus einem Auffangbehälter der jeweili- gen Filtersäule entnommen. Da der CSB nicht nur in gelöster Form vorkommt wie  $\text{NO}_3$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$ , wurden hier neben der unfiltrierten Probe auch bei etwa jeder zweiten Beschickung die filtrierten Proben untersucht. Die Analyseverfahren sind der folgenden Tabelle zu entneh- men.

Tabelle 5.6: Bestimmungsverfahren der durchgeführten Abwasseruntersuchungen

Parameter	Methode	Verfahren
AFS	gravimetrisch	DIN 38409 H2
GV	gravimetrisch	DIN 38409 H2
CSB	photometrisch	Küvettest analog DIN 38409 H41
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	photometrisch	Küvettest analog DIN 38406 E5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	photometrisch	Küvettest analog DIN 38405 D9
P <sub>ges</sub>	photometrisch	Küvettest analog DIN 38405 D11

Die Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe und die darauf aufbauende Bestimmung des Glühverlustes werden nur von den einzelnen Phasen des Zulaufmediums (Zulauf original, Zulauf abgesetzt, Zulauf abgesetzt und verdünnt) angegeben, da bei den Säulenabläufen die Bestimmungsgrenze von 10 mg/l jedes Mal unterschritten wurde. Der pH-Wert wurde lediglich für die Zuläufe der Beschickungen vom 02.01.01 bis zum 15.01.01 ermittelt, um Klarheit über eine Besonderheit an den Filtersäulen zu bekommen, die am 02.01.01 auftrat. Es trat eine Rücklösung von Phosphor auf, die mit einer Milieuänderung durch den Zulauf in Verbindung gebracht wurde. Die elektrische Leitfähigkeit wurde aus gleichem Anlass wie der pH-Wert der Zuläufe untersucht.

#### 5.4 Datenauswertung

Die Messergebnisse wurden in Analysenprotokollen festgehalten, die als Anlage 5 beigelegt sind. Die Proben der Zuläufe wurden wie die der Abläufe als homogenisierte Mischproben entnommen. Zur Auswertung der Daten werden statistische Kenngrößen ausgewiesen. In diese Auswertung gehen nur die Ergebnisse aus der Versuchsreihe ein. Die Daten aus der Vorlaufphase werden zur weiteren Auswertung nicht berücksichtigt, da diese der Konsolidierung und Bildung einer Biozönose dienen.

In einigen Fällen wurden die Bestimmungsgrenzen der verwendeten Küvettestests unterschritten. Bei den Parametern Ammonium und Phosphor wurde dann der Wert der Bestimmungsgrenze zur Auswertung verwendet. Beim CSB wurden auch die Werte berücksichtigt, die unterhalb der Bestimmungsgrenze von 15 mg/l lagen, da diese für die Auswertung noch eine Aussagekraft haben. Es ist zu berücksichtigen, dass die Fehlergrenzen des Küvettestests für diesen Konzentrationsbereich nicht mehr gelten.

Sofern Frachten errechnet werden, ergeben sich diese aus der Bestimmung der Konzentration der homogenisierten Mischprobe und des gleichbleibenden Beschickungsvolumens von

30 I. Die Wirkungsgrade sind aus den Konzentrationen der Zu- und Abläufe aus jeweils einer Beschickung errechnet worden.

$$h = \left(1 - \frac{C_{ab}}{C_{zu}}\right) * 100 \quad (5.2)$$

mit	$\eta$	%	Wirkungsgrad
	$C_{ab}$	mg/l	Stoffmengenkonzentration der Mischprobe des Ablaufs
	$C_{zu}$	mg/l	Stoffmengenkonzentration der Mischprobe des Zulaufs

Für die Auswertung sind folgende Fragestellungen zu berücksichtigen:

- Einfluss der Korngröße auf die Reinigungsleistung
- Einfluss der Karbonatgehalte auf die Reinigungsleistung
- Einflusses der Drosselung der Säulenabläufe im Bezug auf die Aufenthaltszeit des Wassers in der Bodenmatrix
- Reinigungsleistung bei zunehmender Beschickung mit besonderem Augenmerk auf die biologische Reinigung
- Einfluss der Höhe der Zulaufkonzentration auf die Reinigungsleistung

## 6 Versuchsergebnisse

### 6.1 Beschickungen

Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht über die durchgeführten Beschickungen und die dabei aufgebrauchten Frachten. Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf das abgesetzte und verdünnte Abwasser, so wie es auf die Filter aufgebracht wurde. Die Frachten sind aus den Konzentrationen der Mischprobe und dem konstanten Volumen von 30 Litern je Beschickung errechnet worden.

Tabelle 6.1: Konzentrationen untersuchter Parameter bei den Beschickungen

Datum	CSB		NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	P <sub>ges</sub>	AFS	GV
	homogen.	filtriert	homogen.	homogen.	homogen.	homogen.	homogen.
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
28.11.00	582	31	8,0	1,9	0,77	400	78
30.11.00	338	84	13,6	2,0	1,00	40	48
04.12.00	137	114	15,7	20,7	1,86	45	14
07.12.00	240	183	2,5	8,4	0,80	39	18
11.12.00	44	31	5,6	2,2	0,70	34	86
14.12.00	38	29	3,2	9,7	0,50	32	81
18.12.00	90	39	10,1	7,9	1,40	30	93
21.12.00	151	n.b.	10,2	8,8	1,80	43	94
02.01.01	87	28	10,5	8,0	1,60	21	78
04.01.01	142	56	16,3	7,1	1,80	49	60
08.01.01	97	41	11,6	2,1	1,20	41	93
11.01.01	137	n.b.	11,1	5,6	1,60	74	76
15.01.01	170	53	17,4	6,6	2,00	42	73
18.01.01	215	n.b.	16,0	5,1	1,74	65	78
22.01.01	162	36	16,9	5,0	1,80	211	85
25.01.01	148	n.b.	11,9	6,1	1,98	38	59
Min.	38	28	2,5	1,9	0,50	21	14
Max.	582	183	17,4	20,7	2,00	400	94
Mittelw.	174	60	11,3	6,7	1,41	75	70
Median	145	40	11,4	6,4	1,60	42	78
Standard.	132	46	4,7	4,5	0,51	97	25
u. Quartil	95	31	9,6	4,3	0,95	37	60



o. Quartil	181	63	15,8	8,1	1,80	53	85
------------	-----	----	------	-----	------	----	----

Tabelle 6.2: Beschickungsfrachten aller untersuchten Parameter (kumuliert)

Datum	CSB	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	P <sub>ges</sub>	AFS
	homogen.	homogen.	homogen.	homogen.	homogen.
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
28.11.00	17	0,2	0,1	0,02	12
30.11.00	28	0,6	0,1	0,05	13
04.12.00	32	1,1	0,7	0,11	15
07.12.00	39	1,2	1,0	0,13	16
11.12.00	40	1,4	1,1	0,15	17
14.12.00	41	1,5	1,3	0,17	18
18.12.00	44	1,8	1,6	0,21	19
21.12.00	49	2,1	1,8	0,26	20
02.01.01	51	2,4	2,1	0,31	21
04.01.01	55	2,9	2,3	0,37	22
08.01.01	58	3,2	2,4	0,40	23
11.01.01	62	3,5	2,5	0,45	25
15.01.01	68	4,1	2,7	0,51	27
18.01.01	74	4,6	2,9	0,56	29
22.01.01	79	5,1	3,0	0,62	35
25.01.01	83	5,4	3,2	0,68	36

## 6.2 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

### 6.2.1 Zu- und Ablaufkonzentrationen

In den nachfolgenden Tabellen werden die Zu- und Ablaufkonzentrationen aller Säulen aufgeführt. Der CSB der untersuchten Proben besteht aus einem abfiltrierbaren und einem gelösten Anteil. Da etwa bei jeder zweiten Beprobung auch der CSB der filtrierten Probe untersucht worden ist, ist die Berechnung des gelösten Anteils möglich.

Tabelle 6.3: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. CSB der homogenisierten Proben

	Zulauf homogen.	Filterablauf homogenisiert							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
18.12.00	90	5	5	27	17	40	10	43	17
21.12.00	151	16	9	52	15	58	16	71	21
02.01.01	87	10	12	28	13	27	18	37	18
04.01.01	142	12	11	35	28	36	21	53	23
08.01.01	97	12	11	22	14	22	19	23	18
11.01.01	137	7	5	38	17	44	19	47	16
15.01.01	170	13	11	49	25	60	41	71	26
18.01.01	215	10	8	63	26	77	33	94	32
22.01.01	162	13	11	46	21	52	30	56	24
25.01.01	148	13	13	36	17	43	23	45	22
Min.	87	5	5	22	13	22	10	23	16
Max.	215	16	13	63	28	77	41	94	32
Mittelw.	140	11	10	40	19	46	23	54	22
Median	145	12	11	37	17	44	20	50	22
Standard.	40	3	3	13	5	16	9	20	5
u. Quartil	107	10	8	30	15	37	18	44	18
o. Quartil	159	13	11	48	24	57	28	67	23

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Tabelle 6.4: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. CSB der filtrierten Proben

Datum	Zulauf filtriert.	Filterablauf filtriert							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
18.12.00	39	4	5	22	9	26	7	29	13
02.01.01	28	7	7	22	12	20	16	23	14
04.01.01	56	9	9	22	16	26	13	28	14
08.01.01	41	13	9	18	13	18	16	14	14
15.01.01	53	10	9	39	22	44	30	47	23
22.01.01	36	12	11	29	17	28	21	29	21
Min.	28	4	5	18	9	18	7	14	13
Max.	56	13	11	39	22	44	30	47	23
Mittelw.	42	9	8	25	15	27	17	28	16
Median	40	9	9	22	15	26	16	29	14
Standard.	11	3	2	8	4	9	8	11	4
u. Quartil	37	7	8	22	13	22	14	24	14
o. Quartil	50	12	9	27	17	28	19	29	19

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Die Ablaufwerte der Säulen mit den Wesersanden 0/2 mm liegen sowohl beim gesamten wie auch beim gelösten CSB deutlich unter der Bestimmungsgrenze von 15 mg/l und auch niedriger als die der übrigen Säulen. Die Anteile des gelösten CSB am Gesamtwert sind aus den Mittelwerten der 6 Beschickungen, bei der der CSB sowohl von der homogenisierten wie auch von der filtrierten Probe bestimmt worden ist, errechnet worden und nachfolgend dargestellt. Der Anteil des gelösten CSB ist bei allen Filterabläufen deutlich höher als beim Zulauf. Daraus ist ersichtlich, dass in den Säulen vornehmlich der partikuläre CSB abgebaut wird. Bei den ungedrosselten Säulen sind die Ablaufwerte und der partikuläre CSB deutlich erhöht.

Tabelle 6.5: Anteile des gelösten CSB am Gesamtwert bezogen auf die Mittelwerte

	Zulauf	Filterablauf							
		1	2	3	4	5	6	7	8
CSB <sub>gesamt</sub> [mg/l]	140	11	10	40	19	46	23	54	22
CSB <sub>gelöst</sub> [mg/l]	42	9	8	25	15	27	17	28	16
Anteil [%]	30,0	81,8	80,0	62,5	78,9	58,7	73,9	51,9	72,7

- 1: Wesersand 0/2 mm
- 3: Rheinsand 0/2 mm
- 5: Wesersand 0/4 mm
- 7: Rheinsand 0/4 mm

- 2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt
- 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt
- 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt
- 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Die grafische Darstellung der Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen verdeutlicht die in den Tabellen dargestellten Zusammenhänge. Die Ablaufkonzentrationen sind bei den Säulen mit gedrosseltem Ablauf deutlich geringer als bei den ungedrosselten Säulen. Eine Ausnahme bildet der Wesersand 0/2 mm, bei dem ähnliche Werte der beiden Säulen vorliegen.

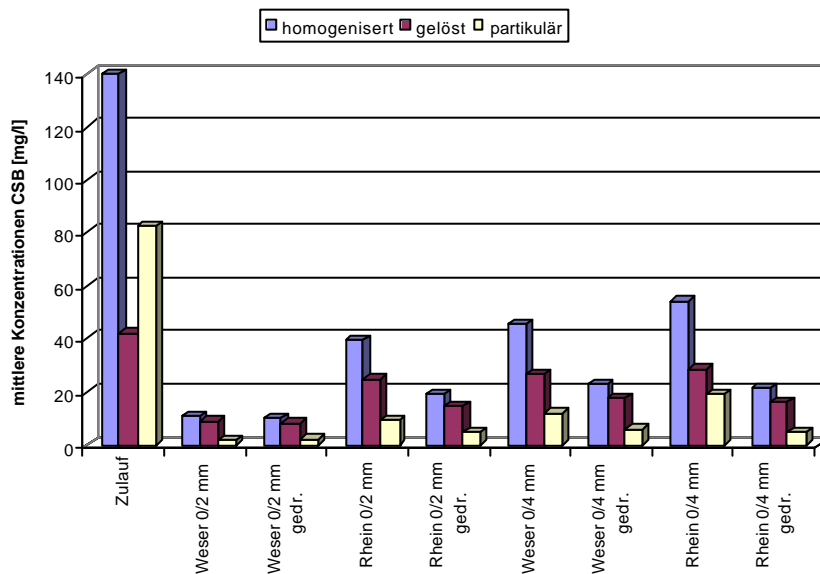


Bild 6.1: Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. CSB

## 6.2.2 Stoffabbau

Der Stoffabbau wird über den aus den Konzentrationen berechneten Wirkungsgrad beschrieben. Die vorangegangenen Auswertungen bilden die Grundlage der Berechnungen. Der Wirkungsgrad wird ebenfalls für den gesamten und den gelösten CSB angegeben.

Tabelle 6.6: Wirkungsgrade bzgl. CSB der homogenisierten Proben

Datum	Wirkungsgrade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	%	%	%	%	%	%	%	%
18.12.00	94,2	94,2	69,9	81,6	56,0	89,2	52,4	81,4
21.12.00	89,5	94,1	65,4	90,2	61,3	89,5	52,9	86,0
02.01.01	88,0	85,8	67,4	85,4	69,1	79,6	57,0	79,4
04.01.01	91,3	92,1	75,4	80,6	74,9	85,4	62,5	84,2
08.01.01	88,1	88,3	77,9	85,9	77,3	80,5	75,9	82,0
11.01.01	94,9	96,2	72,4	87,3	67,7	86,0	65,6	88,2
15.01.01	92,6	93,6	71,1	85,4	64,8	76,1	58,3	84,5
18.01.01	95,4	96,2	70,9	88,0	64,2	84,9	56,5	85,2
22.01.01	91,8	93,0	71,7	87,1	68,0	81,5	65,4	85,5
25.01.01	91,3	91,1	75,4	88,4	71,1	84,4	69,3	85,0
Min.	88,0	85,8	65,4	80,6	56,0	76,1	52,4	79,4
Max.	95,4	96,2	77,9	90,2	77,3	89,5	75,9	88,2
Mittelw.	91,7	92,5	71,7	86,0	67,5	83,7	61,6	84,1
Median	91,6	93,3	71,4	86,5	67,8	84,6	60,4	84,8
Standard.	2,7	3,3	3,8	3,0	6,3	4,3	7,6	2,5
u. Quartil	90,0	91,4	70,2	85,4	64,4	80,8	56,6	82,5
o. Quartil	93,8	94,2	74,7	87,8	70,6	85,8	65,6	85,4

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Tabelle 6.7: Wirkungsgrade bzgl. CSB der filtrierten Proben

Datum	Wirkungsgrade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	%	%	%	%	%	%	%	%
18.12.00	90,3	86,7	44,9	77,3	34,4	81,1	26,8	67,9
02.01.01	76,3	74,2	23,3	56,5	27,9	43,5	18,7	50,2
04.01.01	83,8	84,9	60,7	71,7	53,4	76,7	49,5	75,6
08.01.01	68,8	77,1	56,5	67,8	56,3	60,9	65,6	66,6
15.01.01	82,1	82,8	26,6	58,9	17,9	43,0	12,1	56,4
22.01.01	65,4	70,4	20,1	52,5	20,7	42,7	19,8	42,7
Min.	65,4	70,4	20,1	52,5	17,9	42,7	12,1	42,7
Max.	90,3	86,7	60,7	77,3	56,3	81,1	65,6	75,6
Mittelw.	77,8	79,4	38,7	64,1	35,1	58,0	32,1	59,9
Median	79,2	80,0	35,8	63,3	31,2	52,2	23,3	61,5
Standard.	9,5	6,5	17,7	9,6	16,4	17,7	20,9	12,3
u. Quartil	70,7	74,9	24,1	57,1	22,5	43,1	19,0	51,7
o. Quartil	83,4	84,4	53,6	70,7	48,6	72,8	43,8	67,5

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Der Wirkungsgrad der Wesersande 0/2 mm liegt mit etwa 90 % beim gesamten und etwa 80 % beim gelösten CSB höher als die der übrigen Sande. Die anderen Säulen zeigen einen wesentlichen Unterschied zwischen den gedrosselten und den ungedrosselten Abläufen. Die gedrosselten Säulen erreichen einen Wirkungsgrad von etwa 85 % beim gesamten CSB. Beim gelösten CSB liegt der mittlere Wirkungsgrad der gedrosselten Säulen zwischen 58 % und 64 %. Die ungedrosselten Säulen zeigen Wirkungsgrade von 60 % bis 71 % beim gesamten CSB und von 32 % bis 39 % beim gelösten CSB. Die Streuung um die Mittelwerte ist bei den Säulen mit höherem Wirkungsgrad weniger stark als bei den Säulen mit niedrigerem Wirkungsgrad. Die folgende Grafik zeigt, dass die niedrigen Abbauleistungen beim gelösten CSB für die mäßigen Wirkungsgrade der ungedrosselten Säulen verantwortlich sind.

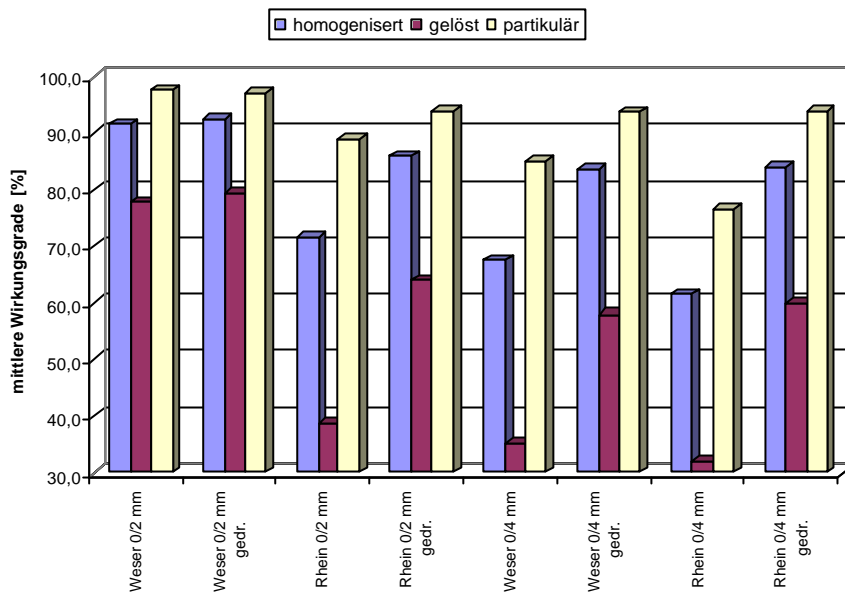


Bild 6.2: Mittlere Wirkungsgrade des CSB-Abbaus

## 6.3 Ammonium

### 6.3.1 Zu- und Ablaufkonzentrationen

Tabelle 6.8: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. Ammonium

Datum	Zulauf.	Filterablauf							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
18.12.00	10,10	0,10	0,02	7,90	1,10	7,60	0,10	8,30	2,10
21.12.00	10,20	0,10	0,10	8,10	0,10	7,70	0,10	8,80	0,10
02.01.01	10,50	0,10	0,10	6,20	0,30	7,90	3,10	9,40	1,80
04.01.01	16,25	0,02	0,02	10,06	1,03	8,77	0,26	12,13	0,77
08.01.01	11,61	0,02	0,02	6,97	0,02	8,51	1,42	9,29	0,65
11.01.01	11,09	0,03	0,03	9,66	1,81	9,03	1,55	8,90	1,29
15.01.01	17,42	0,05	0,04	11,61	3,87	12,90	8,51	14,45	5,42
18.01.01	16,00	0,05	0,06	9,87	1,84	11,08	1,95	13,55	3,47
22.01.01	16,90	0,04	0,04	12,85	1,86	11,25	2,85	10,95	4,01
25.01.01	11,86	0,08	0,04	7,39	0,97	7,97	1,44	9,29	1,91
Min.	10,10	0,02	0,02	6,20	0,02	7,60	0,10	8,30	0,10
Max.	17,42	0,10	0,10	12,85	3,87	12,90	8,51	14,45	5,42
Mittelw.	13,19	0,06	0,05	9,06	1,29	9,27	2,13	10,50	2,15
Median	11,73	0,05	0,04	8,88	1,07	8,64	1,50	9,34	1,85
Standard.	3,04	0,03	0,03	2,12	1,14	1,83	2,48	2,16	1,67
u. Quartil	10,65	0,03	0,02	7,52	0,47	7,92	0,55	9,00	0,90
o. Quartil	16,19	0,09	0,06	10,01	1,84	10,57	2,63	11,83	3,13

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Die mittleren Ablaufkonzentrationen an Ammonium liegen bei den Wesersanden 0/2 mm mit einem Mittelwert von 0,05 mg/l bzw. 0,06 mg/l mit Abstand niedriger als die der übrigen Sande. Die anderen Sande lassen sich in die Gruppe der gedrosselten und in die der ungedrosselten teilen. Die gedrosselten Säulen weisen Mittelwerte von 1,29 mg/l bis 2,15 mg/l auf, während bei den ungedrosselten Säulen die Werte 9,06 mg/l bis 10,50 mg/l betragen.



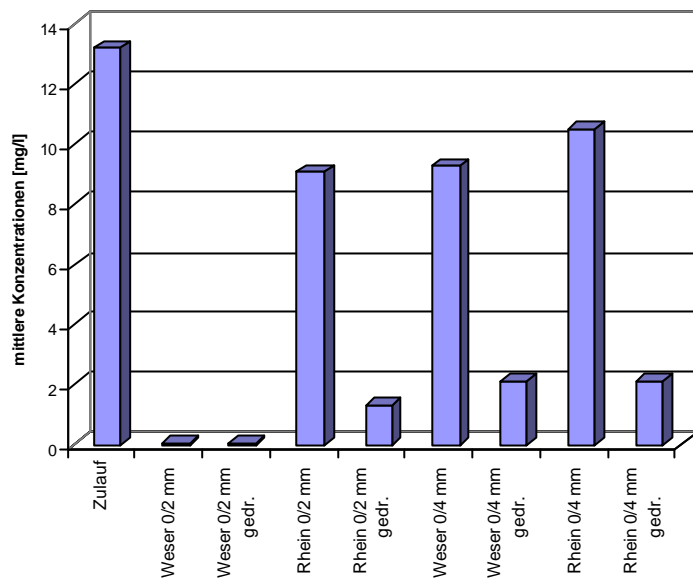


Bild 6.3: Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. Ammonium

### 6.3.2 Stoffabbau

Tabelle 6.9: Wirkungsgrade bzgl. Ammonium

Datum	Wirkungsgrade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	%	%	%	%	%	%	%	%
18.12.00	99,0	99,9	21,8	89,1	24,8	99,0	17,8	79,2
21.12.00	99,0	99,0	20,6	99,0	24,5	99,0	13,7	99,0
02.01.01	99,0	99,0	41,0	97,1	24,8	70,5	10,5	82,9
04.01.01	99,9	99,9	38,1	93,7	46,0	98,4	25,4	95,2
08.01.01	99,8	99,9	40,0	99,8	26,7	87,8	20,0	94,4
11.01.01	99,8	99,8	12,9	83,7	18,6	86,0	19,8	88,4
15.01.01	99,7	99,8	33,3	77,8	25,9	51,1	17,0	68,9
18.01.01	99,7	99,6	38,3	88,5	30,7	87,8	15,3	78,3
22.01.01	99,8	99,8	24,0	89,0	33,4	83,1	35,2	76,3
25.01.01	99,3	99,7	37,6	91,8	32,8	87,8	21,7	83,9
Min.	99,0	99,0	12,9	77,8	18,6	51,1	10,5	68,9
Max.	99,9	99,9	41,0	99,8	46,0	99,0	35,2	99,0
Mittelw.	99,5	99,6	30,8	91,0	28,8	85,1	19,6	84,6
Median	99,7	99,8	35,5	90,5	26,3	87,8	18,8	83,4
Standard.	0,4	0,3	10,0	6,9	7,5	14,8	6,9	9,6
u. Quartil	99,1	99,6	22,3	88,6	24,8	83,9	15,8	78,5
o. Quartil	99,8	99,9	38,3	96,3	32,2	95,8	21,2	92,9

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Die Wirkungsgrade der Wesersande 0/2 mm liegen bei nahezu 100 %, während die übrigen Sande nur in den gedrosselten Säulen relativ hohe Wirkungsgrade erreichen. Die Mittelwerte betragen bei den Säulen mit gedrosseltem Ablauf 85 % bis 91 % und bei den ungedrosselten Säulen 20 % bis 31 %. Die Streuung ist bei den Sanden 0/4 mm stärker als bei den Sanden 0/2 mm.

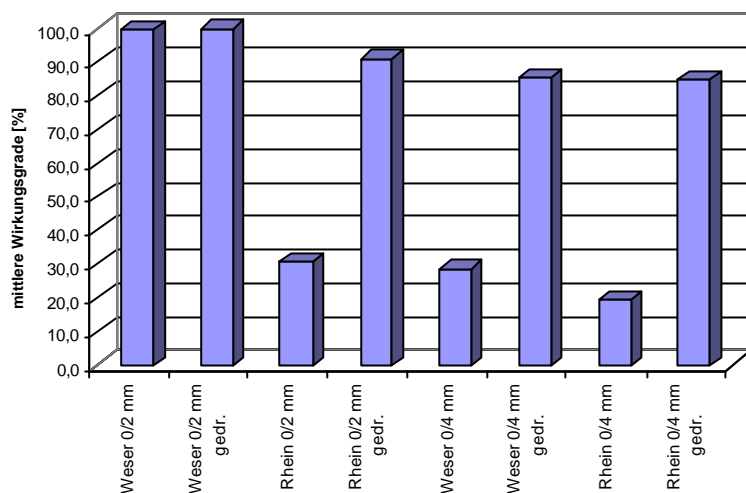


Bild 6.4: mittlere Wirkungsgrade des Ammoniumabbaus

## 6.4 Nitrat

### 6.4.1 Zu- und Ablaufkonzentrationen

Tabelle 6.10: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. Nitrat

Datum	Zulauf.	Filterablauf							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
18.12.00	7,9	25,4	16,0	8,6	33,8	9,5	58,0	9,0	29,2
21.12.00	8,8	45,6	53,2	9,3	41,2	11,1	43,0	9,7	38,1
02.01.01	8,0	58,5	86,8	14,6	44,7	11,8	24,4	9,3	35,1
04.01.01	7,1	58,5	86,8	14,6	44,7	11,8	24,4	9,3	35,1
08.01.01	2,1	9,9	12,8	3,0	9,4	2,3	6,5	2,5	7,7
11.01.01	5,6	20,5	22,6	9,2	30,3	12,3	28,8	11,3	33,5
15.01.01	6,6	43,9	87,7	10,6	35,9	10,2	21,3	9,3	31,0
18.01.01	5,1	40,0	93,9	10,0	34,2	10,1	28,7	7,8	29,1
22.01.01	5,0	63,8	76,2	9,5	46,5	18,9	39,0	23,5	39,0
25.01.01	6,1	52,7	66,9	10,6	31,3	13,1	37,2	10,9	35,8
Min.	2,1	9,9	12,8	3,0	9,4	2,3	6,5	2,5	7,7
Max.	8,8	63,8	93,9	14,6	46,5	18,9	58,0	23,5	39,0
Mittelw.	6,2	41,9	60,3	10,0	35,2	11,1	31,1	10,3	31,4
Median	6,4	44,7	71,5	9,7	35,1	11,5	28,8	9,3	34,3
Standard.	1,9	18,0	32,1	3,3	10,8	4,1	14,0	5,2	9,0
u. Quartil	5,2	29,1	30,2	9,2	31,9	10,1	24,4	9,1	29,7
o. Quartil	7,7	57,1	86,8	10,6	43,8	12,2	38,5	10,6	35,6

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Das verwendete Abwasser wurde durch die Verdünnung mit Trinkwasser in einen für Mischwasser typischen Konzentrationsbereich an Abwasserinhaltsstoffen gebracht. Der Parameter Nitrat stellt insofern eine Ausnahme dar, dass dieser im Trinkwasser in höheren Konzentrationen vorliegt als im Abwasser. Die mittlere Konzentration von 6,2 mg/l des Zulaufes wurde also durch die Verdünnung mit Trinkwasser verursacht (siehe Anlage 5).

Die Ablaufkonzentrationen liegen bei den Wesersanden 0/2 mm am höchsten. Die gedrosselte Säule erreicht mit 60 mg/l im Mittel einen deutlich höheren Wert als die ungedrosselte Säule des Wesersandes 0/2 mm mit 42 mg/l. Die Mittelwerte der übrigen Sande betragen 31 mg/l bis 35 mg/l bei den gedrosselten Säulen und 10 mg/l bis 11 mg/l bei den ungedrosselten Säulen. Die Streuung ist bei allen Säulen gering.

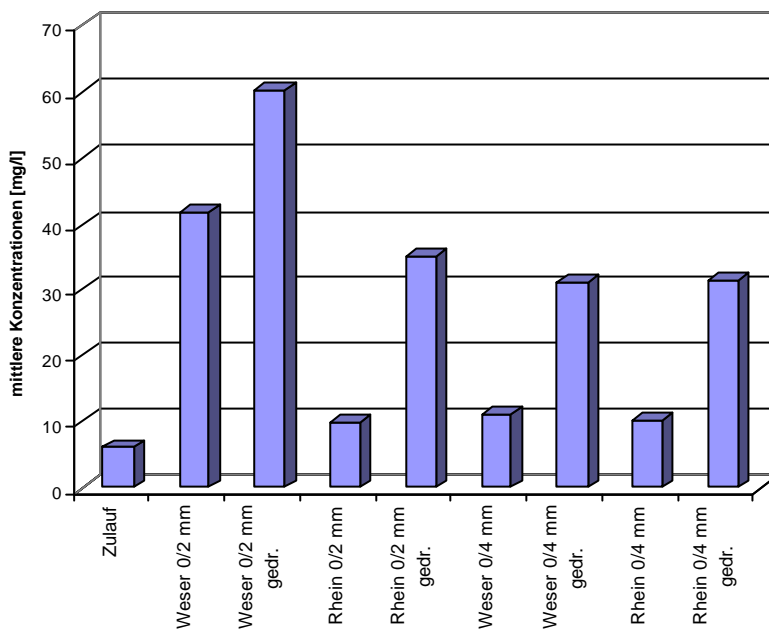


Bild 6.5: Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. Nitrat

## 6.4.2 Nitrifikation

Tabelle 6.11: Wirkungsgrade bzgl. Nitrifikation

Datum	Wirkungsgrade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	%	%	%	%	%	%	%	%
18.12.00	-221,5	-102,5	-8,9	-327,8	-20,3	-634,2	-13,9	-269,6
21.12.00	-418,2	-504,5	-5,7	-368,2	-26,1	-388,6	-10,2	-333,0
02.01.01	-631,3	-985,0	-82,5	-458,8	-47,5	-205,0	-16,3	-338,8
04.01.01	-725,3	-1124,6	-106,0	-530,6	-66,5	-244,2	-31,2	-395,2
08.01.01	-371,4	-509,5	-42,9	-347,6	-9,5	-209,5	-19,0	-266,7
11.01.01	-266,7	-304,8	-64,3	-442,9	-120,6	-415,9	-102,4	-500,0
15.01.01	-560,0	-1220,0	-60,0	-440,0	-53,3	-220,0	-40,0	-366,7
18.01.01	-693,0	-1759,6	-98,2	-578,1	-100,0	-468,4	-54,4	-475,4
22.01.01	-1185,7	-1435,7	-91,1	-837,5	-280,4	-685,7	-373,2	-685,7
25.01.01	-768,6	-1002,2	-74,5	-416,1	-116,1	-512,4	-78,8	-489,8
Min.	-1185,7	-1759,6	-106,0	-837,5	-280,4	-685,7	-373,2	-685,7
Max.	-221,5	-102,5	-5,7	-327,8	-9,5	-205,0	-10,2	-266,7
Mittelw.	-584,2	-894,9	-63,4	-474,8	-84,0	-398,4	-73,9	-412,1
Median	-595,6	-993,6	-69,4	-441,4	-59,9	-402,3	-35,6	-380,9
Standard.	285,9	526,6	35,0	149,2	79,4	178,0	109,4	128,3
u. Quartil	-717,2	-1196,2	-88,9	-512,7	-112,0	-501,4	-72,7	-486,2
o. Quartil	-383,1	-505,8	-47,1	-380,2	-31,5	-226,1	-16,9	-334,4

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Die aus den Nitratkonzentrationen errechneten Wirkungsgrade werden als Maß für das Ablau-  
 fen der Nitrifikation verwendet. Da in den Filtersäulen keine anoxischen Zustände bestehen,  
 findet eine Denitrifikation nicht statt. Die höchsten Ablaufkonzentrationen erreichen ein Vielfa-  
 ches der Zulaufkonzentrationen. Die mittleren Wirkungsgrade betragen bei dem Wesersand  
 0/2 mm mit gedrosseltem Ablauf -895 % und bei der ungedrosselten Säule -584 %. Bei den  
 übrigen Sanden liegen die Werte bei den gedrosselten Säulen bei -398 % bis -474 % und bei  
 den ungedrosselten Säulen bei -63 % bis -84 %. Die Streuung ist bei den ungedrosselten  
 Säulen größer als bei den gedrosselten.

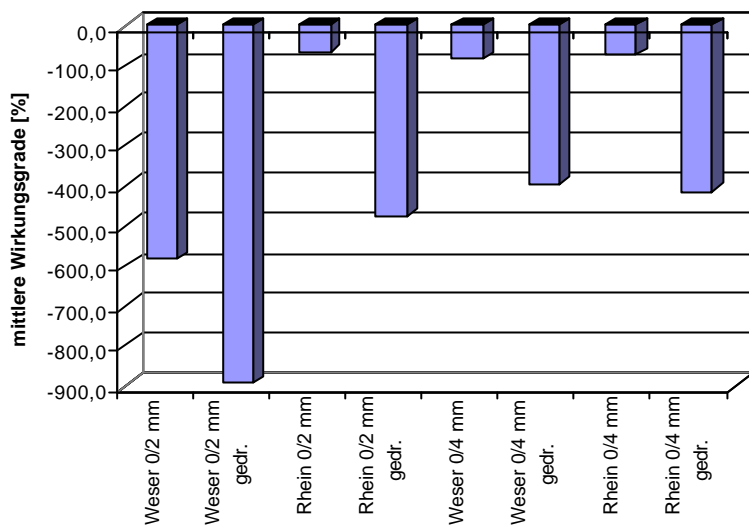


Bild 6.6: Mittlere Wirkungsgrade der Nitrifikation

## 6.5 Phosphor

### 6.5.1 Zu- und Ablaufkonzentrationen

Tabelle 6.12: Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. Phosphor

Datum	Zulauf.	Filterablauf							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
18.12.00	1,40	0,40	0,10	1,10	0,60	1,10	0,90	1,10	0,60
21.12.00	1,80	0,01	0,01	1,10	0,60	0,90	0,50	1,20	1,10
02.01.01	1,60	0,40	0,20	3,40	*13,10	1,10	1,00	1,40	5,50
04.01.01	1,80	0,01	0,01	0,90	0,80	1,00	0,70	1,00	0,60
08.01.01	1,20	0,01	0,01	0,70	0,70	0,80	0,70	0,80	0,60
11.01.01	1,60	0,04	0,04	1,44	1,11	1,40	1,07	1,30	1,01
15.01.01	2,00	0,03	0,03	1,60	1,30	1,70	1,50	1,70	1,30
18.01.01	1,74	0,03	0,03	1,54	1,37	1,60	1,30	1,68	1,30
22.01.01	1,80	0,07	0,11	1,60	1,70	1,40	1,96	2,20	1,40
25.01.01	1,98	0,05	0,04	1,24	1,35	1,18	1,30	1,17	1,29
Min.	1,20	0,01	0,01	0,70	0,60	0,80	0,50	0,80	0,60
Max.	2,00	0,40	0,20	3,40	1,70	1,70	1,96	2,20	5,50
Mittelw.	1,69	0,11	0,06	1,46	1,06	1,22	1,09	1,36	1,47
Median	1,77	0,04	0,04	1,34	1,11	1,14	1,04	1,25	1,20
Standard.	0,25	0,16	0,06	0,75	0,40	0,30	0,44	0,41	1,45
u. Quartil	1,60	0,02	0,02	1,10	0,70	1,03	0,75	1,12	0,70
o. Quartil	1,80	0,07	0,09	1,59	1,35	1,40	1,30	1,61	1,30

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

\* der gekennzeichnete Wert geht in die Auswertung nicht ein

Bei der Beschickung am 02.01.01 liegen die Ablaufkonzentrationen der Säulen 3, 4 und 8 höher als die Zulaufkonzentrationen. Es muss also zu einer Rücklösung von Phosphat gekommen sein. Von den Zuläufen sind daraufhin in dem Zeitraum vom 02.01. bis 15.01. auch der pH-Wert und die elektr. Leitfähigkeit bestimmt worden. Es ist am 02.01. ein erhöhter pH-Wert beobachtet worden, der für die Rücklösung ursächlich sein könnte.



Tabelle 6.13: pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit der Zuläufe

Datum	pH-Wert (bei 20°C) [-]	elektr. Leitfähigkeit [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]
02.01.01	8,3	741
04.01.01	7,2	846
08.01.01	7,3	778
11.01.01	7,1	802
15.01.01	7,3	810

Die Mittelwerte der Ablaufkonzentrationen betragen bei den Wesersanden 0/2 mm 0,06 mg/l bis 0,11 mg/l. Bei den übrigen Sanden liegen die Werte zwischen 1,06 mg/l und 1,47 mg/l. Eine Tendenz hinsichtlich der Unterscheidung von Säulen mit gedrosseltem und ungedrosseltem Ablauf ist nicht zu erkennen. Die Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert ist bei allen Säulen gering.

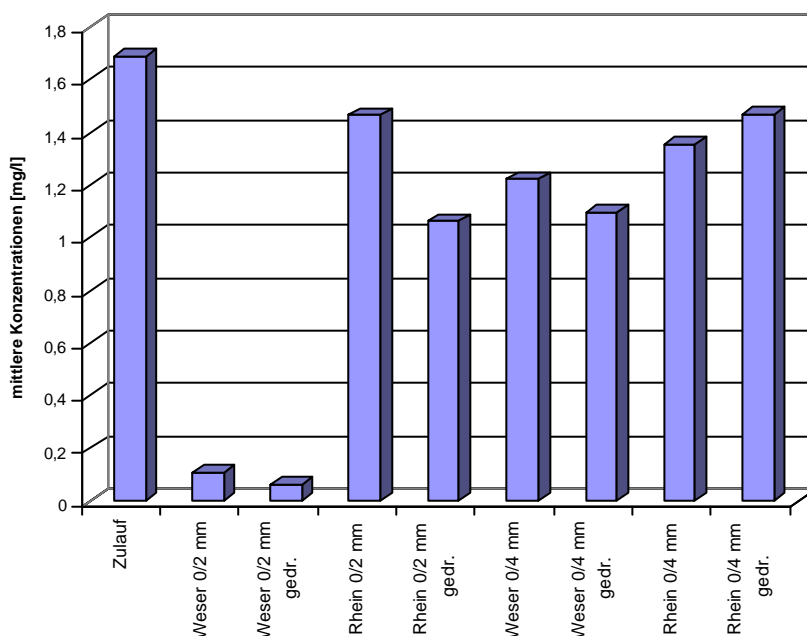


Bild 6.7: Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen bezgl. Phosphor

## 6.5.2 Stoffabbau

Tabelle 6.14: Wirkungsgrade bzgl. Phosphor

Datum	Wirkungsgrade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	%	%	%	%	%	%	%	%
18.12.00	71,4	92,9	21,4	57,1	21,4	35,7	21,4	57,1
21.12.00	99,4	99,4	38,9	66,7	50,0	72,2	33,3	38,9
02.01.01	75,0	87,5	-112,5	Ausr.	31,3	37,5	12,5	-243,8
04.01.01	99,4	99,4	50,0	55,6	44,4	61,1	44,4	66,7
08.01.01	99,2	99,2	41,7	41,7	33,3	41,7	33,3	50,0
11.01.01	97,5	97,5	10,0	30,6	12,5	33,1	18,8	36,9
15.01.01	98,5	98,5	20,0	35,0	15,0	25,0	15,0	35,0
18.01.01	98,3	98,3	11,5	21,3	8,0	25,3	3,4	25,3
22.01.01	96,1	93,9	11,1	5,6	22,2	-8,9	-22,2	22,2
25.01.01	97,5	98,0	37,4	31,8	40,4	34,3	40,9	34,8
Min.	71,4	87,5	-112,5	5,6	8,0	-8,9	-22,2	-243,8
Max.	99,4	99,4	50,0	66,7	50,0	72,2	44,4	66,7
Mittelw.	93,2	96,5	12,9	38,4	27,9	35,7	20,1	12,3
Median	97,9	98,1	20,7	35,0	26,7	35,0	20,1	35,9
Standard.	10,6	3,9	46,4	19,2	14,3	21,7	19,8	91,0
u. Quartil	96,5	94,8	11,2	30,6	16,6	27,2	13,1	27,7
o. Quartil	99,0	99,0	38,5	55,6	38,6	40,6	33,3	47,2

1: Wesersand 0/2 mm  
 3: Rheinsand 0/2 mm  
 5: Wesersand 0/4 mm  
 7: Rheinsand 0/4 mm

2: Wesersand 0/2 mm gedrosselt  
 4: Rheinsand 0/2 mm gedrosselt  
 6: Wesersand 0/4 mm gedrosselt  
 8: Rheinsand 0/4 mm gedrosselt

Die mittleren Wirkungsgrade der Wesersande 0/2 mm betragen 93 % und 97 %. Die übrigen Sande erreichen einen Wirkungsgrad von im Mittel 12 % bis 38 %. Eine eindeutige Tendenz der Auswirkungen der Drosselung ist nicht zu erkennen.

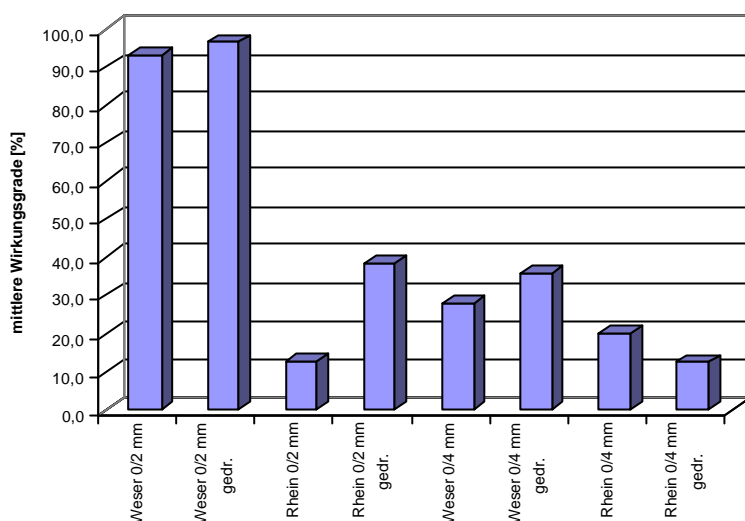


Bild 6.8: Mittlere Wirkungsgrade der Phosphorelimination

## 6.6 Abfiltrierbare Stoffe und Glühverlust

Die AFS und der daraus ermittelte GV konnte für keine der Säulenabläufe bestimmt werden, da die Bestimmungsgrenze von 10 mg/l ausnahmslos unterschritten wurde. Die mittlere Zulaufkonzentration an AFS aus den Beschickungen mit dem verdünnten Abwasser des Zulaufes zur ARA, d.h. ohne Berücksichtigung der Beschickung am 28.11.01, beträgt 54 mg/l. Der GV liegt im Mittel bei 69 %. Sowohl die Konzentration an AFS als auch der GV unterlagen deutlichen Schwankungen.

Tabelle 6.15: Statistische Kenngrößen bzgl. AFS und GV (Zulauf VK, verdünnt)

	AFS [mg/l]	GV [%]
Anzahl	15	15
Minimum	21	14
Maximum	211	94
Mittelwert	54	69
Median	41	78
Standardabw.	45	25
unteres Quartil	36	60
oberes Quartil	47	86

## 6.7 Einflussfaktoren für den Stoffabbau

### 6.7.1 Korngröße

Zur Darstellung des Einflusses der Korngrößen auf das Abbauverhalten ließen sich grundsätzlich die Sande gleicher Herkunft, d.h. Wesersand bzw. Rheinsand, mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung vergleichen. Bei den verwendeten Sanden muss beachtet werden, dass bei dem Wesersand hinsichtlich des Karbonatgehaltes, der Kationenaustauschkapazität sowie der Adsorptionsleistung ein erheblicher Unterschied zwischen dem Sand 0/2 mm und dem Sand 0/4 mm vorliegt, deren Einfluss nicht quantifiziert werden kann. Deshalb kann ein Vergleich der Reinigungsleistung der Wesersande unterschiedlicher Korngröße nicht als repräsentativ angesehen werden. Beim Rheinsand dagegen unterscheiden sich die obigen Eigenschaften bei den verschiedenen Körnungen nur wenig. Daher lässt nur der Rheinsand einen Vergleich des Einflusses der verschiedenen Korngrößen zu. Die Aufenthaltszeit bei ungedrosseltem Ablauf wird von der Korngrößenverteilung bestimmt, weshalb nur der Vergleich der gedrosselten Säulen sinnvoll ist.

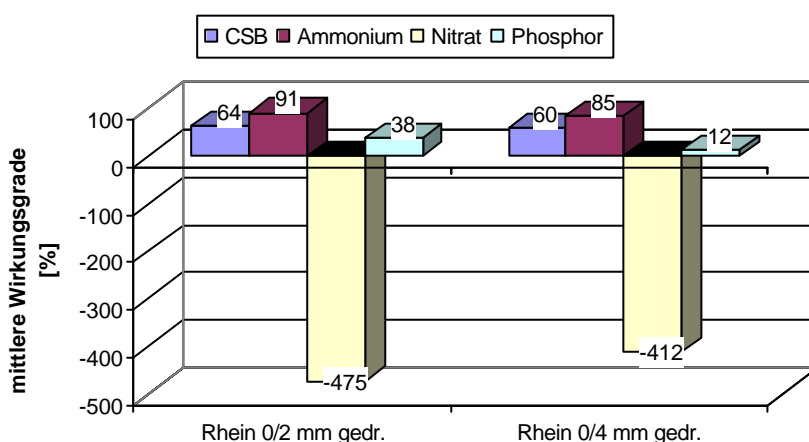


Bild 6.9: mittlere Wirkungsgrade gleicher Sande unterschiedlicher Korngröße

Die beiden Rheinsande 0/2 mm und 0/4 mm unterscheiden sich bei gedrosseltem Ablauf hinsichtlich ihres Wirkungsgrades beim CSB-Abbau, beim Ammoniumabbau und bei der Nitrifikation nur wenig. Bei der Phosphorelimination weisen die mittleren Wirkungsgrade mit 38 % und 12 % einen größeren Unterschied auf. Es ist aber zu beachten, dass es bei diesen beiden Sanden am 02.01.01 zu einer Phosphatrücklösung kam, die diese Kennwerte wesentlich bestimmt hat. Darüber hinaus hat der Rheinsand 0/2 mm einen höheren Eisengehalt als der Rheinsand 0/4 mm (siehe Tabelle 3.4), was einen nicht quantifizierbaren Einfluss gehabt haben könnte.

### 6.7.2 Karbonatgehalt

Die Karbonatgehalte differieren bei den verschiedenen Sanden aufgrund ihrer unterschiedlichen Herkunft. Grundsätzlich wäre es möglich, die Reinigungsleistung von Weser- und Rheinsanden gleicher Korngrößenverteilung miteinander zu vergleichen. Es sind jedoch neben dem Karbonatgehalt weitere Eigenschaften nicht vergleichbar, wie z. B. die Kornform, die Adsorptionsleistung oder die Kationenaustauschkapazität. Bei dem Wesersand 0/2 mm liegen die Kennwerte des Karbonat- und Eisengehaltes, der Adsorptionsleistung sowie der Kationenaustauschkapazität erheblich über denen der anderen Sande. Bei dem Wesersand 0/4 mm ist der Karbonatgehalt nach zwei unterschiedlichen Verfahren bestimmt worden, die abweichende Werte geliefert haben (siehe Tabelle 3.4). Damit liegt bei den Sanden 0/4 mm kein eindeutiger Unterschied im Karbonatgehalt vor.

Es ist davon auszugehen, dass der hohe Karbonatgehalt des Wesersandes 0/2 mm die Reinigungsleistung, im Besonderen die Nitrifikation, günstig beeinflusst hat. Zur Quantifizierung wären weitere Versuche notwendig, bei denen Substrate mit weitgehend gleichen Eigenschaften untersucht werden sollten.

### 6.7.3 Ablaufdrosselung

Die Drosselung verlängert die durch die Durchlässigkeit gegebenen Aufenthaltszeiten des Wassers in der Bodenmatrix auf ca. 28 Stunden. Zur Darstellung des Einflusses der unterschiedlich langen Aufenthaltszeiten des Abwassers in dem Bodenkörper auf die Reinigungsleistung eignet sich der Vergleich aller ungedrosselten Säulen mit der jeweiligen Säule gleichen Bodens mit gedrosseltem Ablauf.

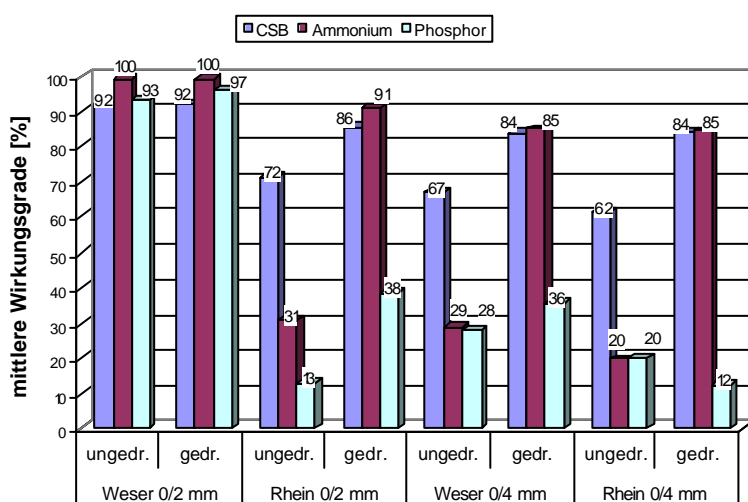


Bild 6.10: Mittlere Wirkungsgrade der gedrosselten und ungedrosselten Säulen

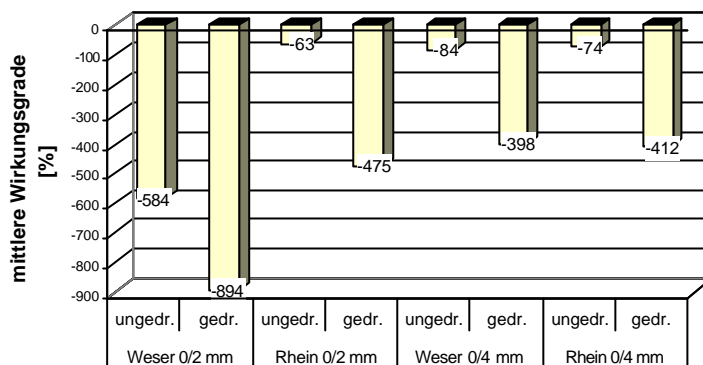


Bild 6.11: Mittlere Wirkungsgrade bezgl. Nitrifikation der gedrosselten und ungedrosselten Säulen

Bei allen Sanden ist der mittlere Wirkungsgrad der Parameter CSB und Ammonium der Säulen mit gedrosseltem Ablauf erheblich höher als bei den gleichen Sanden mit freiem Ablauf. Lediglich bei dem Wesersand 0/2 mm ist kein Unterschied vorhanden. Beim Parameter Phosphor ist ein eindeutiger Einfluss der Drosselung nicht zu erkennen. Die Nitrifikation läuft in allen gedrosselten Säulen erheblich besser ab als in den ungedrosselten Säulen.

### 6.7.4 Zulaufkonzentration

Der Zusammenhang zwischen der Höhe der Zulaufkonzentrationen und der Höhe der Ablaufkonzentrationen wird als Regressionsgerade  $c_{ab}=f(c_{zu})$  dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten werden ermittelt und in Tabellenform dargestellt.

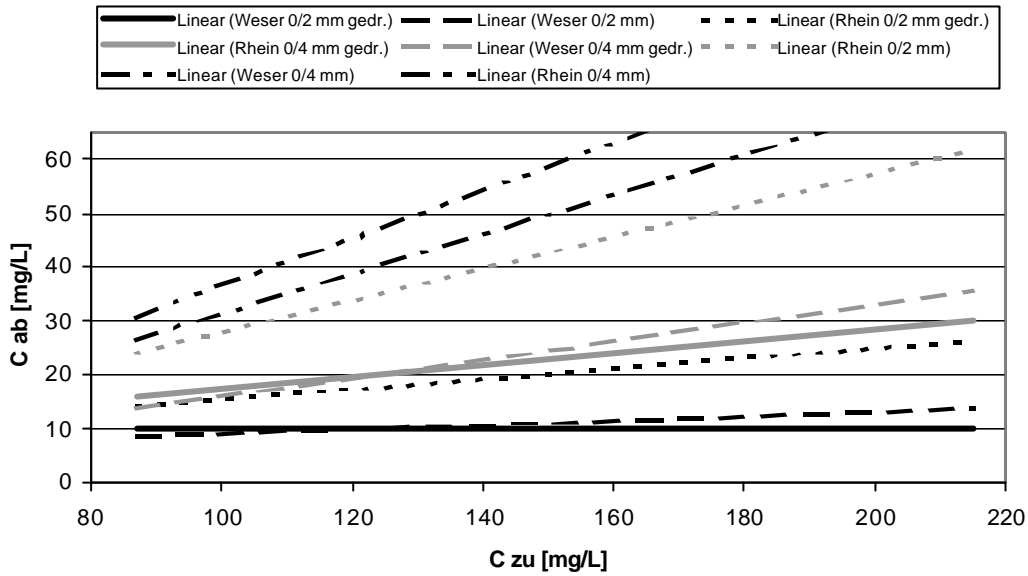


Bild 6.12: Regressionsgeraden der Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. CSB

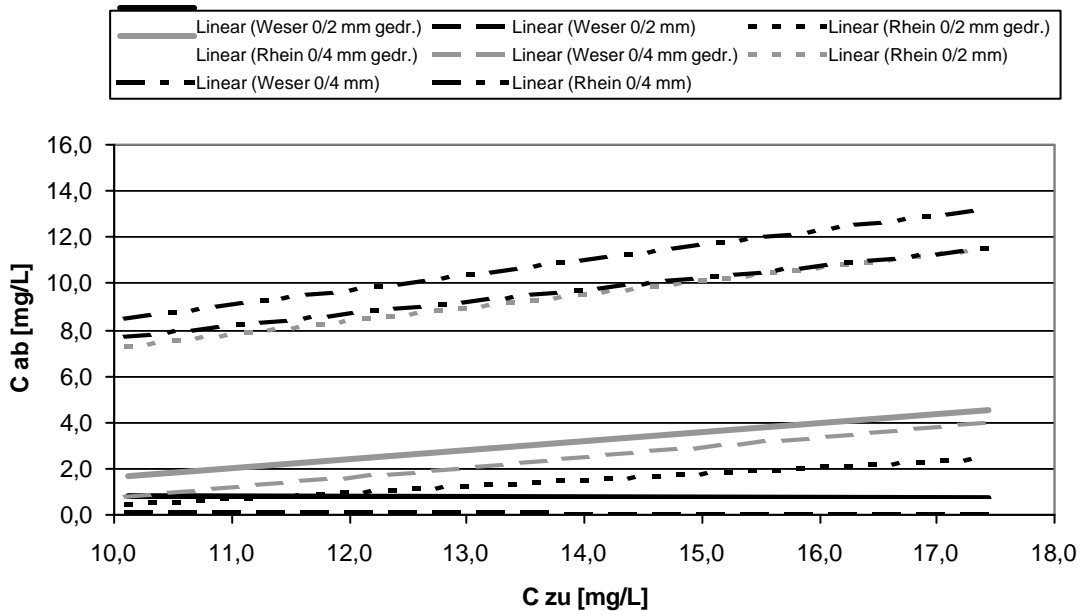


Bild 6.13: Regressionsgeraden der Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. Ammonium

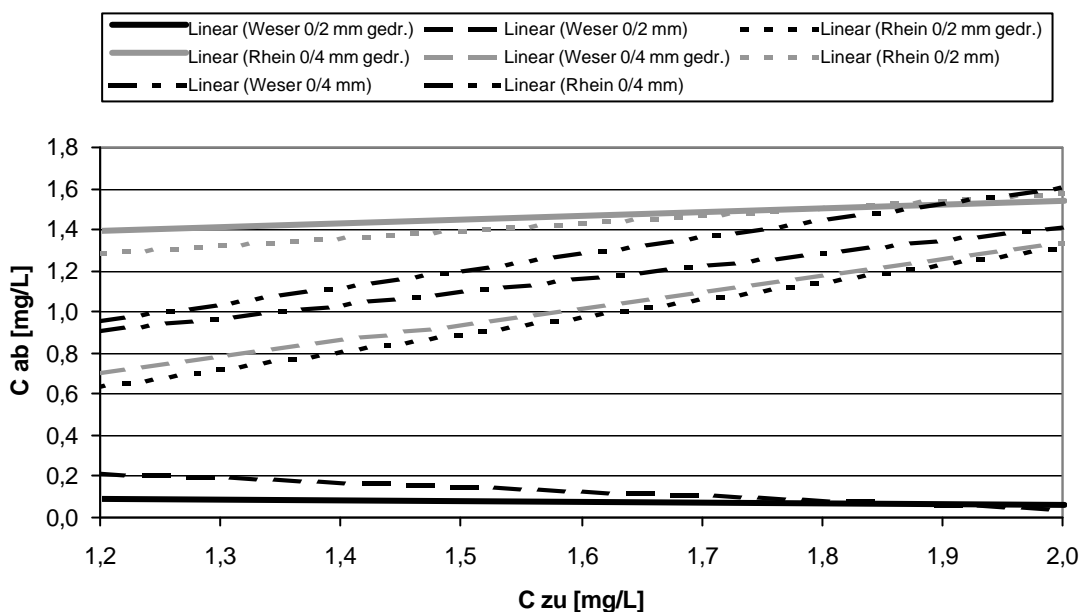


Bild 6.14: Regressionsgeraden der Zu- und Ablaufkonzentrationen bzgl. Phosphor

Die Abhängigkeit zwischen Zu- und Ablaufkonzentrationen ist beim CSB mit Korrelationskoeffizienten um 0,9 bei den ungedrosselten Säulen des Rheinsandes, bei der ungedrosselten Säule des Wesersandes 0/4 mm sowie bei der gedrosselten Säule des Rheinsandes 0/4 mm deutlich ausgeprägt. Die Konzentrationen an Ammonium weisen mit Korrelationskoeffizienten um 0,85 bei den ungedrosselten Säulen des Rheinsandes und bei der ungedrosselten Säule des Wesersandes 0/4 mm noch einen Zusammenhang auf. Beim Wesersand 0/2 mm ist bei keinem Parameter ein Zusammenhang zwischen Zu- und Ablaufkonzentrationen zu erkennen. Die Konzentrationen an Phosphor weisen bei keiner Säule einen ausgeprägten Zusammenhang auf.

Tabelle 6.16: Korrelation der Zu- und Ablaufkonzentrationen

	Korrelationskoeffizient [-]		
	CSB	Ammonium	Phosphor
Wesersand 0/2 mm	0,47	-0,33	-0,36
Wesersand 0/2 mm gedr.	0,27	-0,29	-0,14
Rheinsand 0/2 mm	0,93	0,86	0,12
Rheinsand 0/2 mm gedr.	0,72	0,70	-0,07
Wesersand 0/4 mm	0,90	0,84	0,50
Wesersand 0/4 mm gedr.	0,75	0,45	0,44
Rheinsand 0/4 mm	0,89	0,86	0,47
Rheinsand 0/4 mm gedr.	0,90	0,65	0,03



### 6.7.5 Aufenthaltszeit

An jedem Sand wurden für die einzelnen Beschickungen drei Wertepaare ermittelt:

- die Ausgangskonzentration zum Zeitpunkt Null (Zulauf)
- die Konzentration für die Aufenthaltszeit der jeweiligen ungedrosselten Filtersäulen mit freiem Auslass und
- die Konzentration für die Aufenthaltszeit der jeweiligen gedrosselten Filtersäule (28 Stunden)

Das Wasser hat bei dem Wesersand 0/4 mm ohne Drossel mit etwa 0,15 Stunden die geringste Aufenthaltszeit. Der Wesersand 0/2 mm weist bei freiem Auslass eine Aufenthaltszeit des Wassers von etwa 6 Stunden auf. Für diese beiden Sande wird exemplarisch der CSB-Abbau über die Zeit durch die Verbindung der Wertepaare dargestellt.

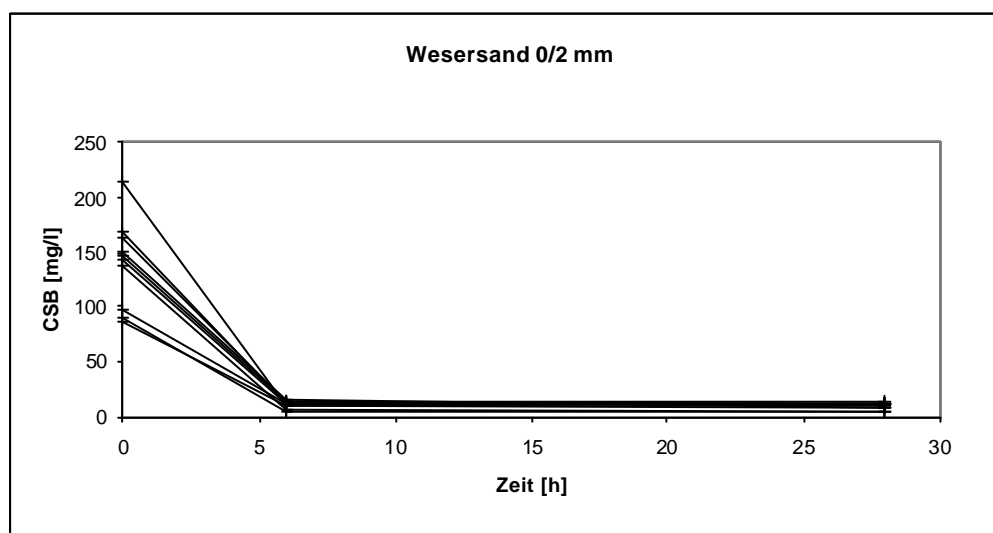


Bild 6.15: CSB-Werte bei verschiedenen Aufenthaltszeiten beim Wesersand 0/2 mm

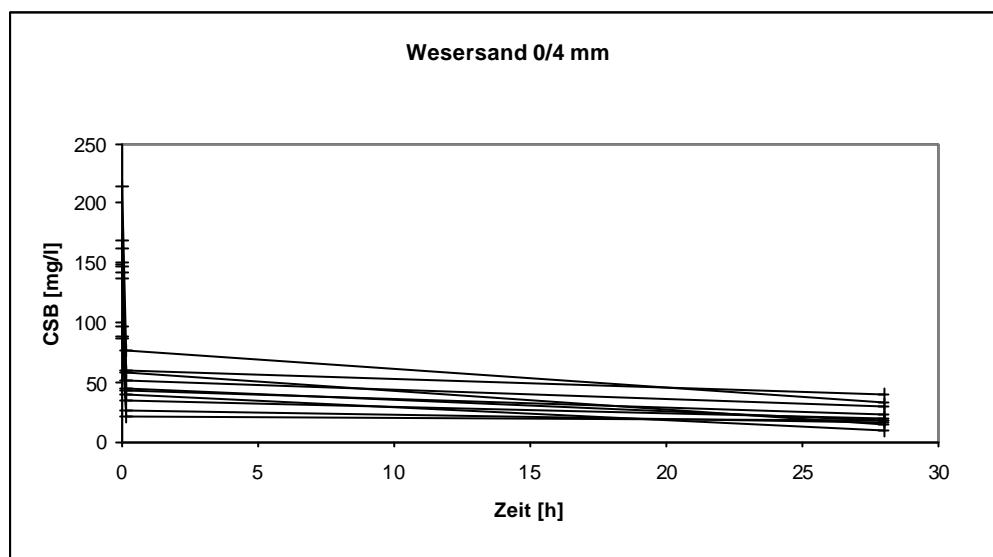


Bild 6.16: CSB-Werte bei verschiedenen Aufenthaltszeiten beim Wesersand 0/4 mm

Es wird deutlich, dass bereits nach kurzer Aufenthaltszeit ein großer Teil des Abbaues erfolgt ist. Beim Wesersand 0/2 mm hat die weitere Verlängerung der Aufenthaltszeit kaum eine Auswirkung auf den CSB-Abbau, während beim Wesersand 0/4 mm noch ein erheblicher Teil abgebaut wird. Als Ergebnis der Säulenversuche liegen nur Werte für sehr kurze und sehr lange Aufenthaltszeiten vor. Die Ermittlung weiterer Wertepaare würde eine Aussage zu der notwendigen Aufenthaltszeit und der damit verbundenen Einstellung des Drosselabflusses erlauben.

#### 6.7.6 Betriebsdauer

Die Darstellung des Einflusses der Betriebsdauer erfolgt, indem die Wirkungsgrade der einzelnen Beschickungen über den Beschickungszeitraum aufgetragen werden. Da sich die gedrosselten Säulen von denen mit freiem Auslass tendenziell kaum unterscheiden werden nur die gedrosselten Säulen dargestellt.

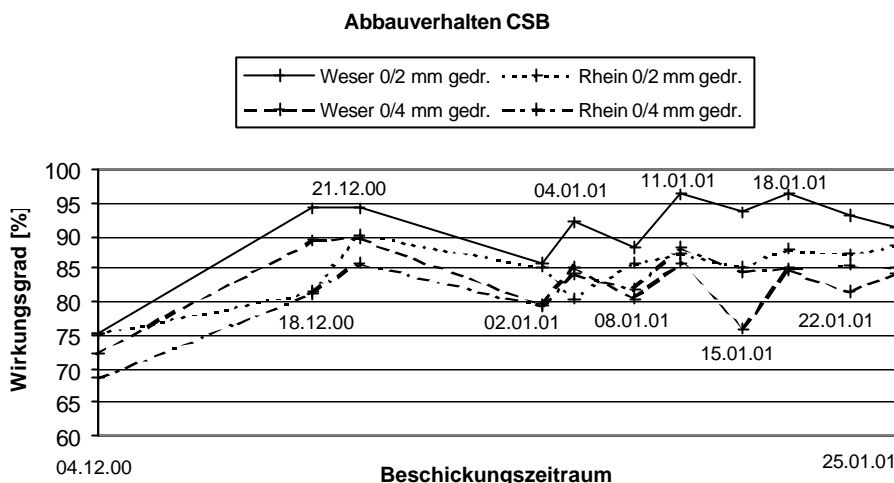


Bild 6.17: Darstellung der gedrosselten Filtersäulen bezgl. CSB-Abbau

Beim CSB liegen die Wirkungsgrade im Nullzustand am 04.12.00 mit 68 % bis 75 % niedriger als in der folgenden Versuchsreihe. Die beiden ersten Beschickungen der Versuchsreihe weisen vergleichsweise hohe Wirkungsgrade auf. Nach der Beschickungspause vom 21.12.00 bis zum 02.01.01 sind die Wirkungsgrade zunächst wieder abgesunken. Im weiteren Verlauf steigen sie wieder an. Das Verhalten zeigt, dass die biotische Sorptionskapazität, die erst nach Ausbildung einer Biozönose vorhanden ist, beim CSB-Abbau eine wichtige Rolle spielt. Beim Ammonium ist die gleiche Tendenz zu beobachten. Eine Ausnahme bildet der Wesersand 0/2 mm, dessen Wirkungsgrad von Beginn an nahe 100 % beträgt und sich auch nicht verändert. Dieses Verhalten ist mit der hohen Kationenaustauschkapazität dieses Sandes zu begründen. Die Streuung bei den Sanden 0/4 mm ist beim Ammonium stärker als beim CSB.

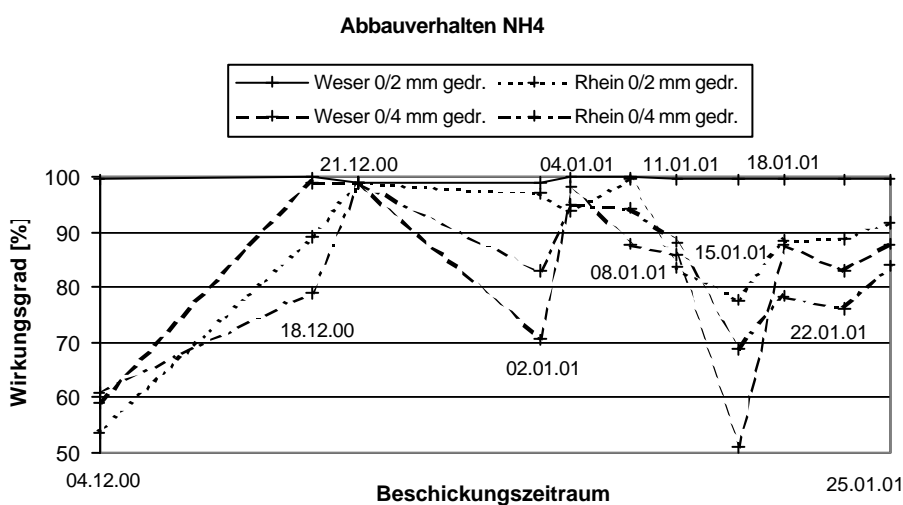


Bild 6.18: Darstellung der gedrosselten Filtersäulen bezgl. Ammoniumabbau

Die Beschickung vom 04.12.00 hat bei keiner Säule zu einer Nitrifikation geführt. Im Nullzustand wird Nitrat noch abgebaut. Zu Beginn der Versuchsreihe am 18.12.00 hat bei allen Säulen die Nitrifikation eingesetzt. Im weiteren Verlauf der Versuchsreihe ist eine steigende Tendenz der Nitrifikation zu erkennen. Erst nach Ausbildung einer ausreichenden biologischen Aktivität kann die Nitrifikation ablaufen.

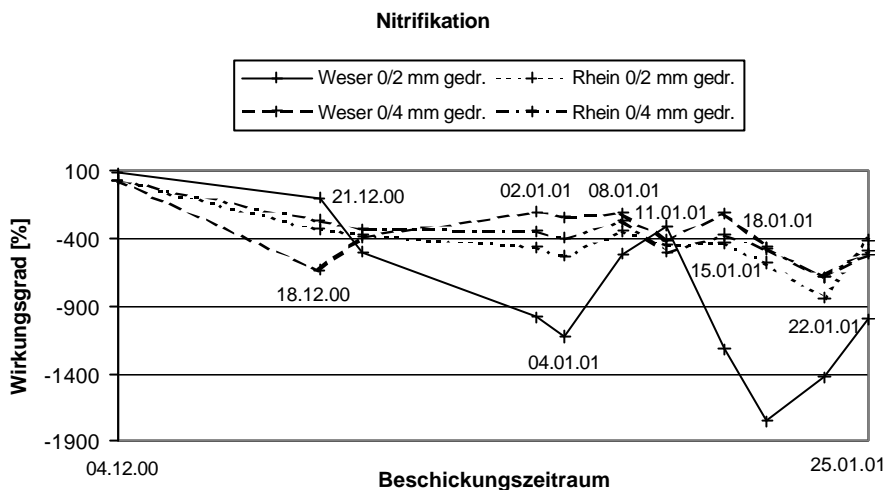


Bild 6.19: Darstellung der gedrosselten Filtersäulen bezgl. Nitrifikation

Die Wirkungsgrade des Phosphorabbaus liegen bereits im Nullzustand relativ hoch. Im weiteren Verlauf der Versuchsreihe geht die Tendenz zu abnehmenden Wirkungsgrade, wobei es auch zu Rücklösungen kommt, die sehr hohe Ablaufkonzentrationen bewirken. Eine Ausnahme bildet der Wesersand 0/2 mm, dessen Wirkungsgrade konstant hoch liegen. Das Verhalten zeigt, dass beim Phosphatabbau die biotische Sorption keine Rolle spielt. Offensichtlich ist nur der Wesersand 0/2 mm in der Lage, fixiertes Phosphat langfristig gebunden zu halten.

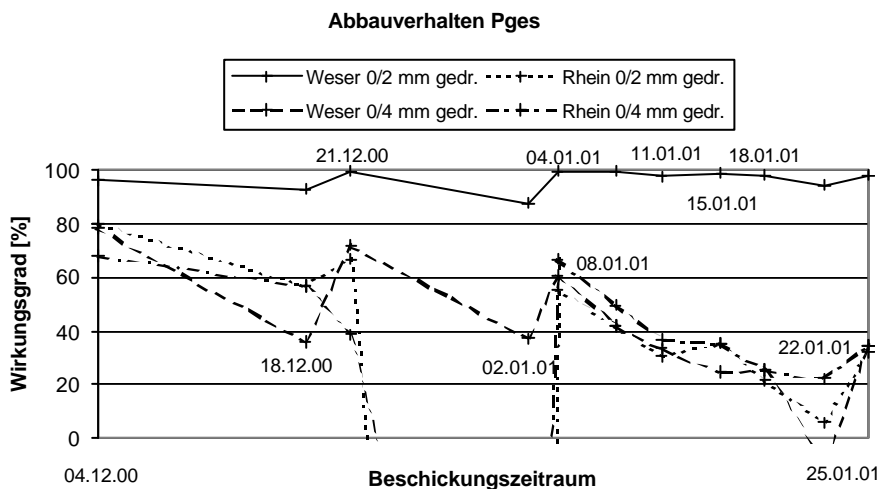


Bild 6.20: Darstellung der gedrosselten Filtersäulen bezgl. Phosphorelimination

## 7 Geotextil

Als eine Ursache für die geringe Reinigungsleistung der Bodenfilteranlage Alsdorf wurde eine Behinderung des Gasaustausches durch die als Trennlagen eingebauten Geotextilien vermutet. Diese Behinderung könnte durch eine zu starke Wasserspeicherkapazität des Geotextils, ein Zusetzen der Öffnungen durch Feinteile des Bodens oder des aufgetragenen Mediums oder durch die Entstehung eines Biofilms an dem Geotextil entstanden sein. Deshalb wurde eine Probe des eingebauten Geotextils aus der Anlage Alsdorf ausgebaut und auf seine Durchlässigkeit hin untersucht, um so etwaige Veränderungen zum Originalzustand festzustellen.

Für die Bestimmung der Durchlässigkeit eines Geotextils gibt es den Entwurf einer DIN-Vorschrift, die DIN 60500 T4. Das Prüfgerät besteht aus einer zylindrischen Durchlässigkeitsprüfzelle mit Anschlüssen für die Messung des infolge des Fließwiderstandes entstehenden Druckabfalls über der Probe. Die Probe wird zwischen zwei perforierte Sinterbronze-Filterscheiben eingelegt, die einen gleichmäßigen Durchfluss bewirken und zur Lastverteilung bei der möglichen spannungsabhängigen Prüfung dienen. Die Untersuchungen fanden in Anlehnung an die DIN statt.

Die folgende Tabelle stellt die endgültigen Durchlässigkeitsbeiwerte der Geotextilproben dar.

Tabelle 7.1: Durchlässigkeiten [m/s] der Probenkörper

	Auflast		
	2 KN/m <sup>2</sup>	20 KN/m <sup>2</sup>	200 KN/m <sup>2</sup>
Probe 1	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-5}$
Probe 2	$2,40 \cdot 10^{-3}$	$7,57 \cdot 10^{-4}$	$9,37 \cdot 10^{-5}$
Probe 3	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$7,69 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$
Sinter-Scheiben	$1,96 \cdot 10^{-3}$	$2,02 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$

Eine Aussage über eine Veränderung der Durchlässigkeit durch den Versuchsbetrieb kann an dieser Stelle nicht explizit getroffen werden, da es nicht möglich war, die Daten des Geotextils im Originalzustand in Erfahrung zu bringen. Die an der Anlage auftretende Belastung durch die maximale Einstauhöhe (1 m) und den überstehenden Boden (0,8 m), die auf das Geotextil aufgebracht wird, entspricht in etwa der Spannung von 20 KN/m<sup>2</sup>. Der Versuch hat nachgewiesen, dass die Durchlässigkeit der bodenbesetzten Probe immer noch höher ist als die des gesamten Filteraufbaus 2 der Anlage Alsdorf ( $8,4 \cdot 10^{-5}$  m/s). Diese Durchlässigkeit wird maßgeblich durch die schwach durchlässige Mutterbodenschicht geprägt. Annahmen gehen dahin, dass das wassergesättigte Geotextil bzw. ein Biofilm, der sich durch den mikrobiellen

Abbau am Geotextil bilden könnte, den Belüftungsvorgang nachhaltig beeinflusst. Um hierzu genauere Aussagen treffen zu können, müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

## 8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In 8 Säulen wurden 4 Sandsubstrate der Körnungen 0/2 mm und 0/4 mm mit unterschiedlichen Karbonatgehalten, Kornformen und Drosselabflüssen untersucht. Die Beschickung erfolgte mit dem Zulauf der Hauptkläranlage der Stadt Münster, der durch Dekantieren und Verdünnung aufbereitet wurde, um Konzentrationsbereiche von entlastetem Mischwasser zu erhalten. Die Mischwasserbeschickung entsprach 16 m Wassersäule in 8 Wochen. Die Beschickungen erfolgten in regelmäßigen Abständen mit jeweils gleicher Wassermenge als Batch-Versuch. Variationen der Dauer von Beschickungen oder von beschickungsfreien Zeiten wurden nicht untersucht. Folgende Hauptergebnisse sind festzuhalten:

### Reinigungsleistungen

- Die untersuchten Wesersande 0/2 mm weisen hinsichtlich aller Parameter die höchste Reinigungsleistung und die größte Prozessstabilität auf. Die mittleren Wirkungsgrade betragen beim CSB-Abbau etwa 91 %, beim Ammoniumabbau etwa 100 % und bei der Nitrifikation –890 bis –580%. Die Streuung um die Mittelwerte ist beim CSB und beim Ammonium mit Variationskoeffizienten von 0,003 bis 0,03 gering. Der Parameter Nitrat streut mit Variationskoeffizienten von 0,49 bis 0,59 stärker.
- Die Säule des Wesersandes 0/4 mm mit gedrosseltem Ablauf sowie die Säulen des Rheinsandes mit gedrosseltem Ablauf erreichen hinsichtlich der Parameter CSB und Ammonium eine hohe Abbauleistung. Die mittleren Wirkungsgrade betragen beim CSB etwa 85 % und beim Ammonium 85 % bis 91 %. Die Variationskoeffizienten liegen beim CSB im Bereich von 0,03 bis 0,05 und beim Ammonium zwischen 0,08 und 0,18. Eine Nitrifikation findet bei diesen Säulen in beachtlichem Umfang statt. Die mittleren Wirkungsgrade betragen –470 % bis –400 %. Die Streuung liegt beim Nitrat mit Variationskoeffizienten von 0,31 bis 0,45 im Bereich des Wesersandes 0/2 mm.
- Die Säule des Wesersandes 0/4 mm mit freiem Ablauf sowie die Säulen des Rheinsandes mit freiem Ablauf erreichen hinsichtlich der Parameter CSB und Ammonium eine geringere Abbauleistung. Die mittleren Wirkungsgrade betragen beim CSB 65 % bis 75 % und beim Ammonium 20 % bis 31 %. Die Variationskoeffizienten liegen beim CSB im Bereich von 0,05 bis 0,12 und beim Ammonium zwischen 0,26 und 0,35. Die Nitrifikation findet bei diesen Säulen mit einem Wirkungsgrad von -63 % bis –74 % nur noch geringfügig statt. Die Variationskoeffizienten liegen im Bereich von 0,55 bis 1,48.
- Bei der Phosphorelimination erreicht nur der Wesersand 0/2 mm eine hohe Reinigungsleistung mit einem mittleren Wirkungsgrad von etwa 95 %. Die Streuung ist mit Variationskoeffizienten von 0,04 bis 0,1 gering. Bei den übrigen Sanden liegen die Wir-

kungsgrade im Mittel zwischen 12 % und 38 %. Die Streuung ist bei Variationskoeffizienten zwischen 0,50 und 7,39 stark ausgeprägt.

- Ein Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen von über 10 mg/l war bei keiner der Säulen im Ablauf nachweisbar.

#### Abhängigkeiten der Reinigungsleistung

- Eine Körnung 0/2 mm mit einer Beschränkung für die Ton-/ Schlufffraktion ( $< 0,06$  mm) und die Feinkiesfraktion ( $2 - 4$  mm)  $< 5$  % stellt günstige Voraussetzungen für die Reinigungsleistungen zur Verfügung. Es ist anzunehmen, dass die hohe spezifische Oberfläche die bei Sanden den hohen Anteil biotischer Sorption sowie den Abbau durch Mikroorganismen begünstigt.
- Eine gleiche Körnung (z.B. 0/2 mm) und Sieblinie genügen nicht, um vergleichbare hohe Reinigungsergebnisse zu erzielen, da weitere physiko-chemische Substrateigenschaften die Reinigungsleistung beeinflussen. Als Leitgrößen sind u.a. Karbonatgehalt, Adsorptionskapazität, Kornform zu nennen. Ein begründetes praxisgerechtes Anforderungsprofil bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.
- Die Drosselung des Ablaufes begünstigt die Reinigungsleistung der Bodensäulen nachhaltig, wenn sie zu einer längeren Aufenthaltszeit des Wassers gegenüber dem ungedrosselten, freien Ausfluss führt. Eine vorsichtige Optimierung der Drosselabflüsse innerhalb der untersuchten Spanne  $0,01$  l/(s×ha) und freier Ausfluss ist zu empfehlen. Anhaltspunkte hierzu können aus den Versuchen abgeleitet werden.
- Die Stabilität der Reinigungsleistung ist beim Wesersand 0/2mm sowie den gedrosselten Varianten der anderen Körnungen hoch. Die Prozessstabilität wird offensichtlich primär durch die Aufenthaltszeit geprägt.
- Von einer Körnung im Bereich bis 4 mm kann bei günstigen physiko-chemischen Eigenschaften sowie künstlicher Ablaufdrosselung eine hohe Reinigungsleistung erwartet werden. Es ist zu vermuten, dass die biotische Sorption eine dominante Rolle spielt, so dass bei langen Beschickungspausen eine zunächst geringe Prozessstabilität zu vermuten ist, bis eine ausreichende Biozönose etabliert ist. Die Neigung zu äußerer Kolmation dürfte bei gröberer Körnung geringer als bei feinen Körnungen sein. Fragen zur inneren Kolmation, Prozessstabilität bei Beschickungspausen und Wasserversorgung der Filtervegetation bleiben derzeit noch offen.

Gesicherte Aussagen zum Kolmationsverhalten der untersuchten Substrate sind aufgrund der kurzen Versuchsdauer und der vergleichsweise geringen Beschickungshöhen nicht möglich. Erfahrungen zu Versuchsbeginn und in einem anderen Untersuchungsvorhaben verdeutlichen jedoch die Empfindlichkeit der Bodenfilter insbesondere hinsichtlich feinpartikulären und schlammigen Stoffeinträgen, wenn die Schutzwirkung der Filtervegetation nicht gegeben



ist. Der untersuchte Wesersand 0/2 mm lässt eine höhere Kolmationsneigung erkennen, welche die ansonsten hohen Reinigungsleistungen aus betrieblicher Sicht relativieren.

Die Laboruntersuchung der in der Anlage Alsdorf eingesetzten Geotextilien ließ keine Besorgnis erregende Verminderungen der Wasserdurchlässigkeit unter die des umgebenden Bodens erkennen. Rückschlüsse auf die Gasdurchlässigkeit des Geotextils beim Filterbetrieb können aus den Untersuchungen nicht abgeleitet werden. Der Einsatz von Geotextilien ist jedoch grundsätzlich verzichtbar bei einschichtigen Aufbauten unter Beachtung der Filterregeln.

Sandsubstrate eignen sich zur weitergehenden Mischwasserbehandlung gut unter folgenden Voraussetzungen:

- Sieblinien im Bereich 0/2 mm oder 0/4 mm mit geringem Feinstkornanteil
- hohes Adsorptionspotential
- hoher Karbonatgehalt und pH-Wert
- künstlich eingestellte Aufenthaltszeit durch Drosselung des Filterablaufes

Um praxismgerechte Anforderungsprofile für Substrate und Betriebsweisen aufzustellen, sind längerfristig angelegte Untersuchungen erforderlich, die folgende Themenkreise zum Gegenstand haben:

- Zumischung von Karbonaten zu karbonatfreien Sandsubstraten
- Kolmationsverhalten mit zunehmender Betriebsdauer
- günstigste Drosselabflüsse
- Betriebsstabilität nach Beschickungspausen
- Maximalbeschickungen

## Literaturverzeichnis

BLUME [1992]: Handbuch des Bodenschutzes, 2. Auflage, ecomed Verlag

DIN 18123 (1983) : Bestimmung der Korngrößenverteilung, Beuth Verlag Berlin

DIN 18128 (1990) : Bestimmung des Glühverlustes, Beuth Verlag Berlin

DIN 18130 T1 (1983) : Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes – Laborversuche, Teil 1, Beuth Verlag Berlin

DIN 38404 C5 (1984) : Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) – Bestimmung des pH-Wertes, Beuth Verlag Berlin

DIN 38404 C8 (1993) : Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) – Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit, Beuth Verlag Berlin

DIN 60500 T4 (1997) : Prüfung von Geotextilien, Teil4 – Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Geotextilien senkrecht zu ihrer Ebene unter Auflast bei konstantem hydraulischen Höhenunterschied, Entwurf, Beuth Verlag Berlin

E DIN ISO 10390 (1993) :Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes, Beuth Verlag Berlin

E DIN ISO 10693 (1993) : Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Karbonatgehaltes – Volumetrisches Verfahren, Beuth Verlag Berlin

GROTEHUSMANN [1995]: Versickerung von Niederschlagsabflüssen unter Berücksichtigung des Grundwasserschutzes; Dissertation Universität Hannover

GROTEHUSMANN [1999]: Abschlussbericht der Pilotbodenfilteranlage Alsdorf, MURL NRW

LFU [1998]: Handbuch 4/10 der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg „Bodenfilter zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem“, Karlsruhe

RETTINER [1992]: Wasser- und Stoffdynamik bei der Abwasserperkolatation, Berichte aus Wassergüte und Abfallwirtschaft, TU München

SCHOLZ [1995]: Baustoffkenntnis, 13. Auflage, Werner Verlag

## **Verzeichnis der Anlagen**

Anlage 1: Eichgeraden der Schüttelversuche

Anlage 2: Daten des Vorversuches der Schüttelversuche

Anlage 3: Datenblätter der Substrate der Schüttelversuche

Anlage 4: Analyseergebnisse der Schüttelversuche

Anlage 5: Analysenprotokolle der Säulenversuche