

Erhebungsuntersuchung zur Optimierung der Retentionsbodenfilter in NRW

- Berichtsteil -



Moosbewachsene Filteroberfläche des schwachbelasteten RBF Rohren

Endbericht, November 2016

Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie

Dr. Dieter Grotehusmann, Dipl.-Ing. Johannes Rüter
Stiftstraße 12, 30159 Hannover, Tel 0511/701391-13
Email grotehusmann@ifs-hannover.de

Bioplan-Landeskulturgesellschaft

Dipl.-Ing. Benedikt Lambert
Pfohlhofstraße 20, 74889 Sinsheim-Steinsfurt
Tel. 07261/5995, Email bioplan-lambert@t-online.de

Karlsruher Institut für Technologie, KIT

Dr. Stephan Fuchs
Bereich Siedlungswasserwirtschaft, Gotthard-Franz-Str. 3,
76131 Karlsruhe, Tel. 0721 608-46199,
Email stephan.fuchs@kit.edu

Fachhochschule Münster

Prof. Dr. Mathias Uhl, M.Sc. Dominik Leutnant
Corrensstraße 25, 48149 Münster, Tel. 0251/83-65201
Email uhl@fh-muenster.de

Inhalt:

1	Einleitung.....	1
2	Untersuchungsziele.....	1
3	Methodik.....	2
3.1	Wasserstichproben.....	2
3.2	Feststoffproben.....	3
4	Filteranlagen.....	5
4.1	Erhebung und Auswertung vorhandener Planungs- und Baudaten.....	5
4.1.1	Statistische Auswertung der Kenndaten von RBF im Trennsystem.....	6
4.1.2	Statistische Auswertung der Kenndaten von RBF im Mischsystem.....	8
4.1.3	Statistische Auswertung der Einzugsgebietsparameter.....	10
4.1.4	Selektion repräsentativer Retentionsbodenfilter.....	11
4.2	Auswahl der Anlagen für die Erhebungsuntersuchung.....	12
5	Ergebnisse.....	16
5.1	Filtermaterial.....	16
5.2	Filterbelastung.....	22
5.2.1	Feinpartikelbelastung.....	22
5.2.2	Feinpartikelbelastung auf der Filterfläche.....	29
5.2.3	Erfassung der Feinpartikelsedimentation über kurze Zeiträume (Vliesscheibenuntersuchung).....	39
5.2.4	Weitere Indikatoren der Filterbelastung.....	40
5.2.5	Sekundärfilterbildung.....	43
5.3	Carbonatdepot.....	47
5.4	Schadstoffdepot.....	55
5.5	Wurzelmassenbestimmung.....	60
5.6	Betrieb der Bodenfilter im Einstau oder Teileinstau.....	61
5.7	Sonderanwendungen.....	71
5.8	Reinigung von Straßenabflüssen.....	75
5.8.1	Muldenentwässerung.....	75
5.8.2	Absetzbecken.....	78
6	Schlussfolgerungen und Vorschläge.....	83
6.1	Filtermaterial.....	83
6.2	Filteraufbau.....	83
6.3	Filterbelastung.....	84
6.4	Sonderanwendungen.....	85
6.5	Filterbetrieb.....	85
6.6	Hydraulische Betriebskontrolle.....	85
6.7	Visuelle und stoffliche Betriebskontrolle.....	86
6.8	Betriebliche Carbonatausbringung.....	86

6.9	Muldenentwässerung und Absetzbecken bei Straßen.....	86
7	Literatur.....	87
8	Anhang	89
8.1	Wasser	89
8.2	Feststoffe.....	91
8.3	Visuelle Betriebsindikatoren für RBF.....	109

Abbildungen:

Bild 3-1:	Vliesscheiben zur Ermittlung der Feststoffbelastung der Filterflächen. RBF Kenten, zulaufnah, 24.12.2012. Links neue, rechts alte Vliesscheibe.....	4
Bild 4-1:	Übersichtskarte der RBF in NRW mit Anzahl der RBF in den einzelnen Regierungsbezirken (REBEKA Version A13, abgerufen Februar 2011).....	5
Bild 4-2:	Lage der untersuchten und beprobten Anlagen (vgl. Tabelle 4-6) sowie der zusätzlich in die Auswertung aufgenommenen Mischsystem-Anlagen Elsdorf-Ost, Fliesteden, Rohren und Rollesbroich-Rossbach.....	16
Bild 5-1:	Ortsteinbildung in der unteren Filterschicht durch Zugabe von Holzhäcksel, RBF-Glessen, Inbetriebnahme 1999, Beprobung 14.05.2011.....	19
Bild 5-2:	Magerer Brennesselbestand auf der Filtervorfläche des 13-jährigen RBF Elsdorf zeigt die sehr geringe Feststoffbelastung an.....	22
Bild 5-3:	RBF-Kenten, Zulaufbereich. Die auch zulaufnah nur selten hohe Feinpartikelbelastung kann an der üppigen Vegetation der Zulaufpflasterung (rechts, 26.05.2012) nach einer hohen Feinpartikelfracht (links, 24.12.2011) erkannt werden.....	24
Bild 5-4:	Die besonders große Sedimentationsfläche vor der Filterfläche des RBF Vanikum minderte die auf der Filterfläche ermittelte Feinpartikelbelastung.....	24
Bild 5-5:	Vorfläche des RBF Erbach Süd. Das Sediment der Vorfläche (240 m ²) ist größer als das der Filterfläche (3.300 m ²).....	25
Bild 5-6:	RBF-Rollesbroich-Rossbach. Beispiel für konzentrationsbedingte Schwachlastigkeit eines Mischwasserfilters. Rechte Bildhälfte: Im Bereich des Zulaufkanales sind keine Sedimente erkennbar.....	27
Bild 5-7:	Feststoffbelastung von Bodenfiltern im Mischsystem.....	28
Bild 5-8:	Vergleich der Feststoffbelastung von Bodenfiltern im Mischsystem in NRW und BW.....	29
Bild 5-9:	RBF Vanikum: homogener Schilfbestand (Links: zulaufnah; rechts: zulauffern).....	31
Bild 5-10:	Schilfbestand im RBF Wermelskirchen (oben links: zulaufnah; oben rechts: zulauffern) lange Zulaufrinne mit Steinschüttung als Begrenzung zum Filter (unten).....	32
Bild 5-11:	RBF Wermelskirchen. Verteilung der Feinpartikel auf der Filterfläche. Probenahme 08.10.2012, 0 – 10 cm Tiefe.....	33
Bild 5-12:	RBF-Kenten, Vliesscheibenoberfläche unmittelbar nach einem größeren Beschickungsereignis am 24.12.2011 (links: zulaufnah, rechts: zulauffern).....	35
Bild 5-13:	RBF Kenten, oben links, zulauffern Juli 2008, oben rechts, zulauffern Juli 2012, unten links, zulaufnah Mai 2014, unten rechts, zulauffern Mai 2014.....	36
Bild 5-14:	RBF-Kenten, verfrachtetes Schilfstreu (links) und teilweise blanke Filteroberflächen (rechts) durch geringe Feinpartikelbelastung.....	37
Bild 5-15:	RBF Benninghoferweg, ungleichmäßige Filterbelastung (links: zulaufnah, rechts: zulauffern).....	37
Bild 5-16:	RBF Hans-Humpert-Str., Moosbewuchs auf der Filteroberfläche als Indikator geringer Sedimentfracht.....	38
Bild 5-17:	RBF Harwick, Eine geringe Feinpartikelbelastung (Ø 0,51 kg T+U/m ² *a) und eine quadratische Beetform führt zu sehr ungleicher Belastung der Filterfläche. Rechts: Schilflücke und fehlendes Sediment der 5-jährigen Beetfläche rechts hinten.....	38

Bild 5-18:	Feinpartikelbelastung und P-Gehalt des Dränablaufes von Mischwasserfiltern	42
Bild 5-19:	RBF Geilenkirchen, zulaufnahes Sediment, Bioturbation durch Bodenwürmer	45
Bild 5-20:	T+U-Belastung und Carbonatverbrauch	53
Bild 5-21:	Zulaufnahme Wurzelmassen des Schilfes im rechten Beet des RBF Harwick	60
Bild 5-22:	Kolmation zu Betriebsbeginn bei üblicher Feinpartikelbelastung (4 kg TM_T+U/m^2AF^*a), RBF Bentelerstraße, Trennsystem. Fehlende Althalme zeigen die Schilfernte an (links). Der Einstau des Sedimentes führt zu einer hydraulisch undurchlässigen Algengallerte (rechts)	62
Bild 5-23:	Durch die Schilfernte besitzt nicht nur der 2-jährige RBF Bentelerstraße (links), sondern auch der 5-jährige RBF Humpert-Straße (rechts) eine scharfe Grenze zwischen Sediment und Filtersubstrat. Diese scharfe Grenze zeigt die geringe Strukturierung und geringe hydraulische Leitfähigkeit des Sedimentes an	63
Bild 5-24:	RBF-Benhausen, 4. Betriebsjahr, 24.05.2012. Trotz der geringen Filterbelastung ist durch den Teileinstau (rechte Bildhälfte, Dränablaufschacht) der Schilfbestand geschlossen (linke Bildhälfte).....	64
Bild 5-25:	Der über Wochen anhaltende Filterüberstau im Frühjahr wird aus Gründen der Förderung des Schilfbestandes vorgenommen. RBF Wermelskirchen, 18.05.2011	64
Bild 5-26:	Einstau von Trennsystemsediment, RBF Glessen, Vorstufenrinne, 14.05.11	66
Bild 5-27:	RBF-Kenten, Dränablaufschacht. Die auch 2014 noch erkennbaren Ockerschleier an den Dränablaufschachtwänden zeigt einen früheren hohen Teileinstau an (vermutlich vor 2011)	68
Bild 5-28:	RBF-Altendorf. Blick in den Dränablaufschacht. Der dortige Teileinstau verursachte nur eine Manganfreisetzung aus dem sandigen Filtermaterial (schwarzer Wandbelag).....	70
Bild 5-29:	Muldenentwässerung im Einzugsgebiet des RBF A3, östlich Köln, Westseite, A 3.1.....	77
Bild 5-30:	RBF A3, Köln-Ost, Westseite, A 3.1	78
Bild 5-31:	Absetzbecken Maarhäuserweg, 03.07.2011	80
Bild 8-1:	Obwohl der Schilfbestand des RBF Frelenberg (Beet rechts) sehr mächtig ist, kommt es zulauffern zu großen Lücken im Schilfbestand, die auf die geringe Beschickungshäufigkeit zurückgeführt werden können.....	110
Bild 8-2:	Die geringe Beschickungshäufigkeit führte beim RBF Wylen dazu, dass der ursprüngliche Schilfbestand weitgehend durch Brennessel ersetzt wurde. Blick vom Zulauf Richtung Filterüberlauf.	110
Bild 8-3:	Große Tierhöhlungen sind ein Zeichen sehr geringer Beschickungshäufigkeit. Bei den meisten Anlagen mit Tierhöhlungen sind diese zulauffern anzutreffen, was nicht nur auf eine geringe feinpartikuläre, sondern auch auf eine hydraulische Belastung dieses Filterteiles hinweist. RBF Kenten.....	111
Bild 8-4:	Durch die geringe Beschickungshäufigkeit der zulauffernen Fläche des RBF Kenten kommt es u.a. zur Ansiedlung von Mäusen, die von den Böschungen einwandern. Die Mäuse zerlegen die Schilfhalme in kleine Stücke, wodurch ihre Verfrachtung bei den seltenen Überstaus auf die Böschung erleichtert wird.	111
Bild 8-5:	Bei geringer Beschickungshäufigkeit können sich Bodenwürmer ansiedeln. Diese wurden nicht nur in dem mächtigen Sediment, sondern auch im sandigen Filtersubstrat angetroffen. RBF Schömberg.	112

Bild 8-6:	Von den Bodenwürmern wird sandiges Filtersubstrat in das feinpartikuläre Sediment eingemischt. Das zulaufnahe, 20 cm mächtige Sediment des RBF Geilenkirchen wurde aufgrund der Existenzmöglichkeit der Bodenwürmer (geringe Beschickungshäufigkeit) zu 60 % mit sandigem Filtersubstrat vermischt.	112
Bild 8-7:	Durch die starke Durchmischung von Sediment und Filtersubstrat wird die ursprüngliche scharfe und gerade Grenzlinie sehr diffus und wellig. Zulaufnaher Filterteil des RBF Geilenkirchen.	113
Bild 8-8:	Sehr geringe Beschickungshäufigkeit und fehlende Sedimentbildung kann zur Ansiedlung von trockenheitsanzeigenden Pflanzen (Sedumarten) führen. Ablaufseitiger Teil der RBF-Anlage Köln Ost-Westseite.	113
Bild 8-9:	Aufgrund der vergleichsweise hohen ablaufseitigen Feinpartikelbelastung von 0,92 kgTM/m ² *a (Σ 10,2 kgTM/m ² in 11 Jahren) kann auch ablaufseitig das Sediment optisch sicher erkannt werden. RBF Benninghoferweg.	114
Bild 8-10:	Bei geringer Feinpartikelbelastung und hohem Dauereinstau, der einen üppigen Schilfbestand ermöglicht, bildet sich eine mächtige Schilfstreu aus, die nicht durch Feinpartikelbeladung kompaktiert und mineralisiert wird. RBF Marscheiderbach.	114
Bild 8-11:	Die fehlende Feinpartikelbeladung der Schilfstreu führt zu deren Aufschwimmen bei Filtereinstau. Bei Filterüberlauf ohne Tauchwand kann die Schilfstreu ausgetragen werden.	115
Bild 8-12:	Die auch nach mehreren Jahren Betrieb nicht messbare Feinpartikelbelastung wird durch die flächendeckende Moosbesiedlung der Filteroberfläche angezeigt.	115
Bild 8-13:	Ein mehrwöchiger Filterüberstau lässt sich an den oberirdischen Wurzeln der Schilfhalme erkennen. Frühjahrseinstau des RBF Hunpert zur Förderung des Schilfbestandes.	116
Bild 8-14:	Die Algenfladen auf der Filteroberfläche sind durch Filterüberstau im Frühjahr (Förderung der Schilfentwicklung) entstanden, RBF Bentelerstraße. Die ganzflächige Fladenentwicklung setzt eine geringe Feinpartikelbelastung während der Entwicklungszeit voraus.	116
Bild 8-15:	Filter die lange eingestaut sind, zeigen auch bei hohem Grobkornanteil des Sedimentes keine Poren auf der Filter- bzw. Sedimentoberfläche. Oberfläche von stark mit Straßenfeststoffen belastetem, unbepflanztem Rinnenfilter.	117
Bild 8-16:	Bei Filtern, die ein sehr grobes Filtersubstrat besitzen (hoher Kiesanteil) oder Kurzschlüssigkeit durch Höhlungen bis zur Dränschicht, kann es zum Feinpartikeldurchbruch kommen.	117
Bild 8-17:	Der unvollständige Abbau der gelösten, organischen Substanz ist an der Überlaufschwelle des Dränablaufes (hoher Teileinstau) durch den grauen Biofilm erkennbar.	118
Bild 8-18:	Carbonatausfällung im Dränablaufschacht (RBF Buchen) ist im Vergleich zu Mangan- und Eisenausfällung selten. Die Ausfällung kann hohe Schwermetallgehalte u.a. Zink enthalten. Der Überschuss an CO ₂ bzw. die Carbonatausfällung im Dränablauf kann u.a. durch Filtereinstau und sehr geringe hydraulische Belastung verursacht sein.	118
Bild 8-19:	Die tief schwarze Ausfällung am Dränablauf des RBF Fellenweg zeigt an, dass Mangan gegenüber Eisenausfällung dominiert. Die Dominanz der Manganausfällung zeigt gegenüber der des Eisens ein geringeres Sauerstoffdefizit im Filter an.	119
Bild 8-20:	Der hohe permanente Einstau des Filters bis in die Sedimentschicht führt zur Eisenrücklösung, die teilweise im Ablaufschacht als Ockererz wieder ausfällt.	119

Bild 8-21: Bei sehr hohem Sauerstoffdefizit im Filter, z.B. verursacht durch permanenten Teileinstau, kommt es im Filter zur Sulfatatmung. Das gebildete H_2S gas am Ablaufschacht aus und oxidiert zu Schwefelsäure, die die Abdeckung des Ablaufschachtes korrodiert. 120

Tabellen:

Tabelle 4-1	Deskriptive Statistik ausgewählter Kenndaten der Retentionsbodenfilter im Trennsystem	7
Tabelle 4-2	Deskriptive Statistik ausgewählter Kenndaten der Retentionsbodenfilter im Mischsystem	9
Tabelle 4-3	Deskriptive Statistik ausgewählter Einzugsgebietsparameter	10
Tabelle 4-4	Übersicht der Kriterien zur Selektion von Retentionsbodenfilter	11
Tabelle 4-5	Namen der selektierten Retentionsbodenfilter	11
Tabelle 4-6:	beprobte Retentionsbodenfilteranlagen.....	14
Tabelle 5-1:	Ausgangszustand von Filtermaterialien.....	17
Tabelle 5-2:	Stoffgehalte im Dränablaufschacht nach Dränende des Trennsystem-RBF-Glessen	20
Tabelle 5-3:	Ausgangsgehalte von Filtermaterialien bei unterschiedlicher Probenahme.....	21
Tabelle 5-4:	Abschätzung der Feinpartikelsedimentation vor der Filterfläche.....	23
Tabelle 5-5:	Feinpartikelbelastung von Bodenfiltern im Mischsystem.....	26
Tabelle 5-6:	Verteilung der Feinpartikel auf der Filterfläche	30
Tabelle 5-7:	RBF-Wermelskirchen, Flächenverteilung der Stoffgehalte in 0 – 10 cm Filtertiefe	34
Tabelle 5-8:	Räumliche Differenzierung der NO ₃ -N-Gehalte im Schilfstreu und im Substrat, RBF Kenten, Probenahme 16.05.2011.....	35
Tabelle 5-9:	RBF-Altendorf, Stoffgehalte in 0 – 10 cm Filtertiefe, Probenahme 09.10.2012	39
Tabelle 5-10:	Feinpartikelsedimentation (T+U) auf Vliesscheiben (Installation der Vliesscheiben 13.05.2011).....	39
Tabelle 5-11:	NO ₃ -N-Gehalte als Indikator für die Filterbelastung	41
Tabelle 5-12:	Feinpartikeldepot und P _{ges} -Dränablaufgehalt	42
Tabelle 5-13:	Glühverluste und Lagerungsdichten (LD) der obersten Filterschicht (0 – 10 cm) von RBF-Bodenfiltern in NRW.....	44
Tabelle 5-14:	RBF-Geilenkirchen, Eigenschaften des Sedimentes, Probenahme 22.05.2012.....	44
Tabelle 5-15:	RBF Geilenkirchen, Gehalte des Filtermaterials	45
Tabelle 5-16:	Profilgehalte des Feinkornanteiles nach mehreren Betriebsjahren, Mai 2011 (Ausgangsgehalte Filtersubstrat siehe Tabelle 5-1).....	46
Tabelle 5-17:	Verteilung der vertikalen NO ₃ -N-Gehalte in zulaufnahen Filterprofilen	47
Tabelle 5-18:	Carbonatgehalte von Anlagensedimenten	48
Tabelle 5-19:	Abnahme des CaCO ₃ -Gehaltes der Sedimente entlang des Fließweges, RBF Köln-Ost, Westseite, A 3.1, 19.05.2011	48
Tabelle 5-20:	Basenstatus von alten Mischwasserfiltern ohne CaCO ₃ im Filtermaterial bei Betriebsbeginn	51
Tabelle 5-21:	Profilgehalte von CaCO ₃ und pH des Filtermaterials von Erbach-Süd und Geilenkirchen	51
Tabelle 5-22:	Carbonatverbrauch (CaCO ₃) von Mischwasser-RBF nach 6 Betriebsjahren.....	52
Tabelle 5-23:	Vergleich des Carbonatverbrauches im Filtermaterial.....	52

Tabelle 5-24:	Carbonatverbrauch im Filtersediment des RBF Fritz-Reuter-Str. in Solingen durch Mineralisation, 21.05.2011.....	54
Tabelle 5-25:	Filtermaterialbürtige Carbonatzufuhr ins Filtersediment von RBF für Mischwasser, zulaufnah (Lambert/Fuchs, 2014).....	54
Tabelle 5-26:	Anreicherung von Zink in den obersten Schichten des Filtermaterials von Mischwasserfilter	55
Tabelle 5-27:	Mittlere rechnerische Zinkgehalte der Feinpartikel von Mischwasserfilter	56
Tabelle 5-28:	Profilverteilung von Carbonat und Schwermetallen beim RBF Benninghoferweg, Beprobung 17.05.11	56
Tabelle 5-29:	Profilverteilung von Carbonat und Schwermetallen beim RBF Wermelskirchen, anlagenmittige Beprobung, 04.07.11.....	57
Tabelle 5-30:	RBF-Geilenkirchen, Profilgehalte des Filtermaterials, 06.07.2011, zulaufnah.....	58
Tabelle 5-31:	Profilverteilung von Carbonat und Schwermetallen beim RBF Erbach-Süd mit sehr geringer partikulärer Carbonatzufuhr - zulaufferne Beprobung -, 17.05.2011	58
Tabelle 5-32:	Zinkgehalte des oberflächennahen Filtermaterials beim RBF Erbach-Süd, 17.05.2011	58
Tabelle 5-33:	Profilverteilung von Carbonat und Schwermetallen beim RBF Harwick, Beprobung 21.05.11	59
Tabelle 5-34:	RBF Rollesbroich-Rossbach, jahreszeitliche Konzentrationsverteilung - nach Daten des Landes NRW -.....	66
Tabelle 5-35:	Dränablauf des teileingestauten RBF Frelenberg, Probenahme 10.10.2012	67
Tabelle 5-36:	Stoffverteilung des dauereingestauten RBF-Frelenberg - Probenahme 10.10.2012 -.....	68
Tabelle 5-37:	NH ₄ -Elimination des RBF-Kenten mit und ohne [2] Teileinstau	69
Tabelle 5-38:	Mineralstickstoffumsatz von Mischwasser-RBF in NRW, nach Daten des Landes NRW	70
Tabelle 5-39:	NH ₄ -Elimination von RBF in NRW - nach Daten des Landes NRW -.....	71
Tabelle 5-40:	Konzentrationen des RBF-Rohren - nach Daten des Landes NRW -.....	72
Tabelle 5-41:	NH ₄ -Elimination des RBF-Kenten während des unbekanntes hohen Teileinstaus - nach Analysen des Erftverbandes -.....	73
Tabelle 5-42:	Eisen- und Zinkgehalte im Dränablauf von trockenfallenden RBF, Stichprobenuntersuchung.....	74
Tabelle 5-43:	Mittlere Keimkonzentration von zwei RBF zur Mischwasserbehandlung in NRW	74
Tabelle 5-44:	Verlauf der P _{ges} -Konzentrationen beim RBF-Kenten.....	75
Tabelle 5-45:	Salzgehalte von flachen Absetzbecken an Autobahnen im Bereich Köln.....	81
Tabelle 5-46:	Salz- und O ₂ -Gehalte im Einstauwasser besonnter Regenklärbecken an der A3 östlich Köln.....	81
Tabelle 5-47:	Salz- und O ₂ -Gehalt im Einstauwasser eines besonnten RKB an der A1 Richtung Dortmund, nördlich Wermelskirchen, A1.2, 04.07.11.....	82
Tabelle 5-48:	Wasserprobenahme während eines Gewitters am 10.07.12, RKB, A1 Richtung Dortmund, nördlich Wermelskirchen.....	82

1 Einleitung

Retentionsbodenfilteranlagen (RBF) werden mittlerweile seit mehr als 25 Jahren zur Misch- und Regenwasserbehandlung eingesetzt. Erstmals wurden Erfahrungen zu diesen Regenwasserbehandlungsanlagen im Handbuch Wasser 4 der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LFU, 1998) zusammengestellt. Ausgehend von einer groß angelegten Erhebungsuntersuchung in Nordrhein-Westfalen (Bofitec, 2001) wurde 2003 das Handbuch Retentionsbodenfilter NRW (MUNLV, 2003) veröffentlicht. Von der DWA sind erstmals 2005 bundesweit einheitliche Richtlinien zu Planung und Bau von Retentionsbodenfilteranlagen als Merkblatt DWA-M 178 (DWA, 2005) erschienen. Während die ersten Bodenfilter vorwiegend mit bindigen Filtersubstraten ausgestattet wurden, werden mittlerweile ausschließlich sandige Substrate mit einer strikten Begrenzung des Feinanteils empfohlen. Die zulässige Belastung der Bodenfilteranlagen wurde vor allem durch die Festlegung der mittleren jährlichen hydraulischen Belastung ausgedrückt als Stapelhöhe begrenzt. Damit sollte vor allem die Kolmationsgefahr der Filterfläche vermieden werden. Aus gleichem Grund sind auch Mindestanforderungen an die Vorstufen vor den eigentlichen Filteranlagen gestellt worden.

In den vergangenen 10 Jahren sind etliche neue RBF nach den Vorgaben des Handbuchs Retentionsbodenfilter NRW von 2003 gebaut und betrieben worden. Über eine neue umfangreiche Erhebungsuntersuchung an RBF in NRW sollten Erfahrungen aus dem langjährigen Betrieb der Anlagen erfasst werden, die letztendlich zur Überprüfung der alten Bemessungsansätze, der Zusammensetzung des Filtersubstrates und konstruktiver Merkmale führen sollte. Die Ergebnisse dieser Untersuchung, die bereits in das neue Handbuch für Bodenfilter NRW (MKULNV, 2015) eingeflossen sind, werden hiermit vorgelegt.

2 Untersuchungsziele

Die Erhebungsuntersuchung sollte vor allem folgende Fragestellungen beantworten:

- Ist die bisherige Vorstufengröße notwendig oder (im Trennsystem) sogar kontraproduktiv?
- Ist die bisher realisierte Filtergröße überdimensioniert und führt sie zu hohen Betriebskosten oder zur mechanischen Zerstörung des Filters durch Gehölze und Tierbauten?
- Ist die bisherige restriktive Vorgabe zur Korngrößenverteilung des Substrates notwendig, oder kann hier besonders im Grobkornbereich eine Lockerung der Vorgaben erfolgen?
- Vermeidet die derzeitige Carbonatzuschlagempfehlung auch bei der Kombination von carbonatfreiem Sediment und hohen NH_4 -Gehalten des Mischwassers die Filterversauerung und Minderleistung beim NH_4 -Rückhalt?

- Sind saure Filtersedimente vorhanden, die durch betriebliche Kalkung im pH-Wert angehoben werden sollten?
- Sind die sich bildenden Schadstoffdepots im Sediment und Filtersubstrat längerfristig immobil oder müssen betriebliche Eingriffe zu dessen pH- Stabilisierung ergriffen werden?
- Welche Erfahrungen liegen mit der kolmationsmindernden Wirkung der Schilfbepflanzung und dem Wurzeleinwuchs in die Dränageröhre vor?
- Welche Betriebserfahrungen liegen zu der Elimination der „Sonderparameter“ Phosphor und Keime vor und welche zusätzlichen Maßnahmen müssen ergriffen werden, um diese Parameter im hohen Maße zu eliminieren?
- Welche Erfahrungen liegen zur Betriebsführung der RBF vor (Beetalternierung, Dränablaufdrosselung, Teileinstau)?
- Welche einfachen Indikatoren zeigen eine hohe Filterleistung und ein Filterversagen an?

3 Methodik

Die Untersuchungsmethodik sah vor, statt einer sehr detaillierten Untersuchung weniger Anlagen mit automatischer Probenahme von Zu- und Ablaufproben, möglichst viele langjährig betriebene Anlagen zu untersuchen, um eine breitere Datenbasis zu erhalten. Dabei wurden Indikatoren für Anlagenbelastung (Sediment, Filtersubstrat, Schilf, Drainage) untersucht, um daraus Konsequenzen für Größe von Vorstufe und Filter, Filtersubstrat, Betriebsweise und konstruktive Details abzuleiten. Im Einzelnen wurden folgende Untersuchungen vorgenommen:

- Untersuchung des Einstauwassers von Vorstufen im Dauerstau
- Erfassung eingetragener Feststoffmengen über Feststoffbeprobungen der Vorstufe, der Filteroberfläche und über ausgelegte Filtervliese
- Dokumentation des Stoffdepots im Filtersubstrat durch Beprobung mit Bohrstock oder von einer Profilgrube aus
- Erfassung der Filtervegetation und der Filterfauna (Sedimentwürmer, grabende Tiere)
- Untersuchung der Dränsammler und des Dränablaufschachtes auf Sedimente und Ausfällungen

3.1 Wasserstichproben

Aus dem Einstauwasser der dauereingestauten Vorstufen (für RBF im Bereich von Straßen) erfolgte die Wasserprobenahme bis auf eine Ausnahme (Anlage A1.2) bei Trockenwetter.

Zusätzlich wurden bei einem Teil der Vorstufen von Straßenanlagen vertikale Salz- und O₂-Profile aufgenommen. Aus einem Teil der Dränablaufschächte wurden ebenfalls bei Trockenwetter Wasserproben gezogen.

Die Rohdaten der Stichprobenuntersuchung sind in Anhang 8.1 dokumentiert.

3.2 Feststoffproben

Die Probenahme der Feststoffe (Sediment, Filtermaterial) erfolgte meist zulaufnah und zulauffern. Bei Anlagen mit komplizierter horizontaler Filterflächenbelastung wurde ein Kataster aus mehreren Querprofilen erstellt.

Sofern eine separate Sedimentschicht vorhanden war, wurde diese getrennt von dem Filtermaterial beprobt. Aufgrund der geringen Belastung der untersuchten Anlagen war eine separate Sedimentbeprobung meist nicht möglich.

Auch wenn eine getrennte Sedimentschicht optisch erkennbar war und diese auch getrennt beprobt wurde, zeigten die Analysen in hohem Umfang eine Bioturbation zwischen den Schichten. So konnte Sand des Filtermaterials in der Sedimentschicht festgestellt werden. Die Filterbelastung mit Feinpartikeln aus dem Zulauf zum RBF wurde deshalb auch in der Sedimentschicht ausschließlich aufgrund der gemessenen T+U-Gehalte bestimmt.

Da nicht nur bei optisch separater Sedimentschicht eine starke Abnahme der Lagerungsdichte auftreten kann, wurde auch bei der oberflächennahen Filterschicht die Lagerungsdichte bestimmt (Stechzylinderproben), um daraus die Feinpartikelbelastung zu berechnen. Die Ermittlung der spezifischen Feinpartikelbelastung der Filterfläche erfolgte nach folgender Beispielrechnung:

1. Filtermächtigkeit mit T+U-Anreicherung: 0,10 dm
2. Volumen der Filterschicht: 100 dm³/m²
3. Gemessene Lagerungsdichte: 1,20 kg TM/dm³
4. Trockenmasse: 120 kg TM/m²
5. Zuwachs an T+U bezogen auf den Ausgangsgehalt
 $\Delta T+U = \text{Messwert} - \text{Ausgangsgehalt}$
 $\Delta T+U: 5,0 \text{ M-\%}$
6. Feinpartikelbelastung: 120 kg TM/m² * 0,05= 6,0 kg T+U/m²
7. Betriebszeit: 10 Jahre
8. Spezifische jährliche Feinpartikelbelastung: 0,60 kg T*U/m²*a

Bei der Ermittlung der T+U-Belastung der Filter wurde davon ausgegangen, dass die Abnahme an organischer Sedimentsubstanz (Mineralisierung) durch die Streubildung kompensiert wird. Diese beiden Größen wurden nicht in die Berechnung der Feinpartikelbelastung mit aufgenommen.

Es wurden 3 Beprobungsarten angewendet:

- a) Stechzylinderbeprobung im Sediment und Filtermaterial in 0 - 10 cm Tiefe: Es wurden je 6 Stechzylinderproben zu einer Mischprobe vereinigt.
- b) Schürfgrubenbeprobung: Diese wurde dann angewendet, wenn geklärt werden musste, wo die Horizontgrenzen, z.B. zwischen Sediment und Filtermaterial, liegen.
- c) Bohrstockbeprobung: Diese wurde ausschließlich für die flächenhafte Erfassung des Filtermaterials verwendet. Sedimente wurden bei dieser Beprobung ausgeklammert. Der Nullpunkt der Beprobung war Oberkante Filtermaterial. Es wurden immer folgende feste Tiefenraster verwendet: 0 - 15, 15 - 30, 30 - 45, 45 - 60, 60 - 75, 75 - 90 cm.

Bei den drei Anlagen Vanikum, Glehn und Kenten wurden Vliesscheiben ausgelegt (4 x zulaufnah, 4 x zulauffern). Mit Hilfe dieser Scheiben wurde die aktuelle Sedimentation vom Mai 2011 bis Juli 2012 erfasst. Während des Untersuchungszeitraumes erfolgte ein 3-maliger Wechsel der Vliesscheiben. Die Feinpartikel in und auf den Vliesscheiben wurden durch Wiegen vor und nach dem Auswaschen ermittelt. In Bild 3-1 sind die exponierten Vliesscheiben abgebildet.



Bild 3-1: Vliesscheiben zur Ermittlung der Feststoffbelastung der Filterflächen. RBF Kenten, zulaufnah, 24.12.2012. Links neue, rechts alte Vliesscheibe

Die Korngrößenverteilung wurde bei allen Proben durch Handnasssiebung vorgenommen. Der Glühverlust wurde bei 540° C bis zur Gewichtskonstanz bestimmt. Das CaCO₃ wurde gasvolumetrisch nach Scheibler ermittelt. Die Elementuntersuchung der Feststoffe erfolgte aus dem Königswasseraufschluss (Gesamtgehalte). Die Rohdaten der Feststoffuntersuchung sind im Anhang 8.2 dokumentiert.

4 Filteranlagen

4.1 Erhebung und Auswertung vorhandener Planungs- und Baudaten

Eine statistische Auswertung der Attribute der in Nordrhein-Westfalen liegenden Retentionsbodenfilter (RBF) erfolgte auf Basis der REBEKA Datenbank Version A13 (Februar 2011). Anlagen, die nicht in REBEKA aufgenommen worden sind, wurden nicht berücksichtigt (z.B. RBF, die von Straßen.NRW betreut werden). Zur Analyse wurde die Software *PASW Statistics 18.0.3* verwendet. Ziel war es, Retentionsbodenfilter mit repräsentativem Charakter zu identifizieren, um an diesen stellvertretend weitere Untersuchungen im Rahmen des Projektes durchzuführen.

Zum Zeitpunkt der Datenauswertung umfasste die REBEKA-Datenbank 127 Retentionsbodenfilter. Die größte Anzahl an Retentionsbodenfiltern sind demnach im Regierungsbezirk (RB) Köln errichtet worden (53), gefolgt von den RB Detmold (36), Düsseldorf (20), Arnsberg (9) und Münster (8). Eine Übersichtskarte der räumlichen Verteilung innerhalb der Bezirke ist Bild 4-1 zu entnehmen.

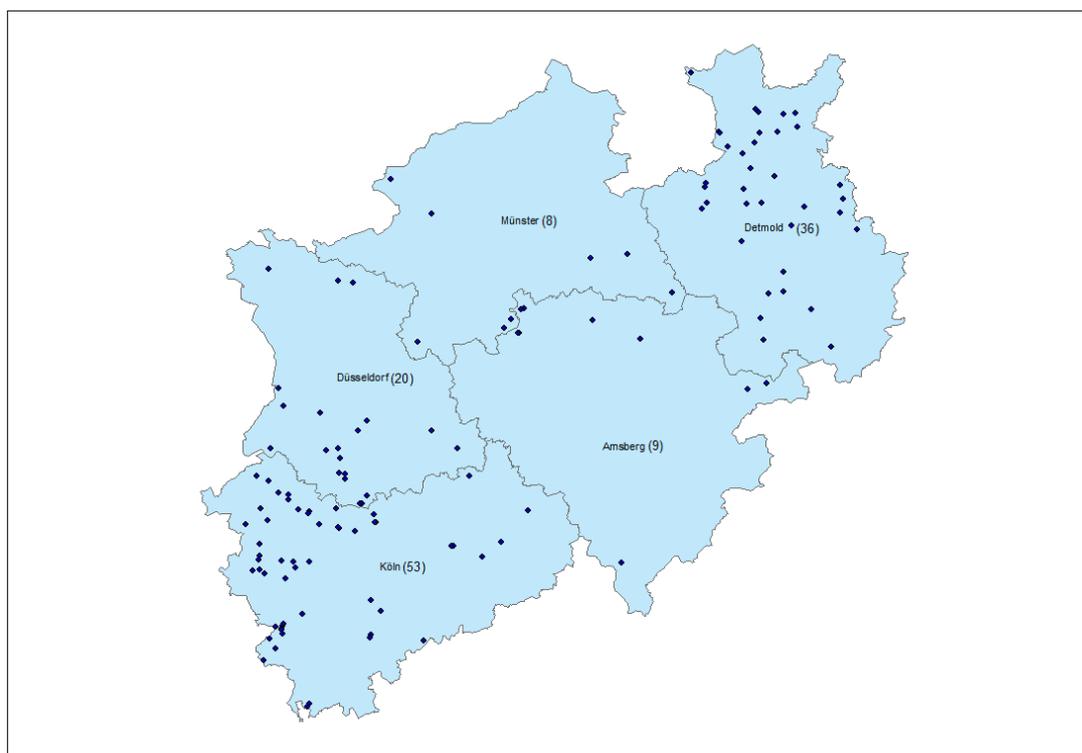


Bild 4-1: Übersichtskarte der RBF in NRW mit Anzahl der RBF in den einzelnen Regierungsbezirken (REBEKA Version A13, abgerufen Februar 2011)

In einem weiteren Schritt wurden die Bodenfilter in Abhängigkeit des Entwässerungssystems gruppiert, um die Charakteristika von Trennsystemen und Mischsystemen differenziert zu betrachten. Den deutlich größeren Anteil machen danach die Retentionsbodenfilter im Mischsystem aus (105), wohingegen lediglich 22 an Trennsystemen angeschlossen sind. Die weitere deskriptive Auswertung wurde gruppenspezifisch und anhand der REBEKA-Attribute (i) Drosseldurchfluss, (ii) Filterbelastung, (iii) Filtergeschwindigkeit, (iv) spezifische

Filterfläche, (v) hydraulischer Wirkungsgrad, (vi) Filterkörperhöhe, (vii) Überlaufhäufigkeit, (viii) Volumen über Filter, (ix) spezifisches Volumen über Filter sowie (x) Speicherlamellenvolumen vorgenommen.

4.1.1 Statistische Auswertung der Kenndaten von RBF im Trennsystem

Einen Überblick über die deskriptive Statistik ausgewählter Kenndaten der RBF im Trennsystem gibt Tabelle 4-1. Der rechnerische Drosselabfluss der RBF im Trennsystem war demnach bei 13 von 22 Anlagen hinterlegt und liegt zwischen 9 und 140 l/s. Der Mittelwert beträgt 49 l/s und ist nahe dem Median (43 l/s). 75 % der Anlagen weisen einen geringeren Drosselabfluss als 50 l/s auf. Für das Attribut jährliche, hydraulische Filterbelastung konnten 11 RBF statistisch ausgewertet werden. Die Spanne der Beschickungshöhe liegt im Bereich von 1,2 bis 63 m/a. Der Mittelwert befindet sich mit ca. 37 m/a ebenfalls nahe dem Median (39 m/a). Hinsichtlich der Filtergeschwindigkeit sind die Richtwerte der gängigen Regelwerke erkennbar (DWA-M 187, bzw. MUNLV-NRW, 2003), die eine Drosselabflussspende von 0,01 l/s/m² und 0,02 l/s/m² vorschlagen. Der Maximalwert von 2,8 l/s/m² lässt auf einen Ausreißer schließen, der durch einen fehlerhaften Datenbankeintrag begründet sein kann.

Die kleinste Filterfläche der untersuchten RBF beträgt 7 m² (Aachen), die größte umfasst 2421 m² (Bad Wünnenberg). Die spezifische Filterfläche, die sich als Quotient von Filterfläche und angeschlossener befestigter Fläche errechnet, weist eine Spanne von 70 bis 700 m²/ha auf. Allerdings wird hier der Maximalwert durch den RBF mit der kleinsten Filterfläche beeinflusst, da bei dieser Anlage die angeschlossene Fläche nach REBEKA lediglich 0,01 ha beträgt. Dies erklärt den relativ großen Abstand zwischen Maximalwert und 3. Quartil (240 m²/ha). Unter Ausschluss dieses Ausreißers beträgt die größte spez. Filterfläche 300 m²/ha. Alle untersuchten Anlagen zeigen einen höheren hydraulischen Wirkungsgrad als 79 %. Hierzu liegen allerdings nur 9 gültige Datensätze vor, somit weniger als 50 % aller RBF im Trennsystem. Der Filteraufbau zeichnet sich bei Anlagen im Trennsystem durch eine Filterhöhe von 0,4 bis 1 m aus. 75 % der Anlagen weisen eine Filterhöhe größer 0,5 m auf. Die zwei RBF mit kleinerem Filteraufbau (0,4 m) sind angeschlossenen an befestigte Flächen kleiner 1 ha.

Im Median beträgt die rechnerische Überlaufhäufigkeit der Anlagen 0,5 1/a, der Maximalwert liegt bei 16 1/a. Hierdurch ergibt sich im Mittel eine rechnerische Überlaufhäufigkeit von ca. 3 1/a. Zu beachten ist auch bei diesem Attribut die hohe Anzahl an fehlenden Werten (13 von 22). Das Volumen über dem Filter der RBF im Trennsystem liegt zwischen 13 und 2491 m³. Etwa 50 % der Anlagen haben weniger als 1000 m³ Einstauvolumen. Bezogen auf die angeschlossene befestigte Fläche ergibt sich das spezifische Volumen über dem Filter, das zwischen 83 m³/ha und 1300 m³/ha liegt. Der Median liegt in etwa bei 120 m³/ha. In 8 der 22 untersuchten Anlagen liegen Angaben über das Volumen bei vorhandener Speicherlamelle vor. Hier liegt die Spanne zwischen 50 und 1.400 m³, wobei die 50 % des Interquartilbereiches zwischen ca. 200 und 1.000 m³ liegen.

Tabelle 4-1 Deskriptive Statistik ausgewählter Kenndaten der Retentionsbodenfilter im Trennsystem

	Entwässerungsverfahren										
	Trennsystem										
	Drosseldurchfluss	Filterbelastung	Filtergeschwindigkeit	Filterfläche	spezifische Filterfläche (Filterfläche/Befestigtes Gebiet)	Hydraul. Wirkungsgrad	Höhe Filterkörper	Überlaufhäufigkeit	Volumen über Filter	spezifisches Volumen über Filter (Volumen über Filter/Befestigtes Gebiet)	Speicherlamelle
	l/s	m/a	l/m ² /s	m ²	m ² /ha	%	m	1/a	m ³	m ³ /ha	m ³
Gesamtanzahl	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Gültige N	13	11	11	13	12	9	13	9	14	13	8
Fehlend	9	11	11	9	10	13	9	13	8	9	14
Minimum	6	1,2	0,0	7	70	79	0,4	0,2	13	83	50
1. Quartil	27	32,5	0,01	420	134	87	0,5	0,2	255	102	193
Median	43	39,7	0,01	900	161	92	0,8	0,5	876	123	786
3. Quartil	50	45	0,02	1767	240	95	0,9	4	1659	258	975
Maximum	140	63	2,8	2421	700	100	1,0	16	2491	1300	1400
Mittelwert	49	37,4	0,27	1053	239	90	0,7	3,1	991	277	670
Standardabweichung	36	15,2	0,84	788	192	7	0,2	5,2	834	349	485

4.1.2 Statistische Auswertung der Kenndaten von RBF im Mischsystem

Auszüge der Ergebnisse der deskriptiven Statistik der RBF im Mischsystem sind in Tabelle 4-2 dargestellt. Das Attribut Drosseldurchfluss war bei 97 von 105 RBF eingetragen. Bei 75 % der Anlagen wird der Ablauf kleiner 60 l/s gedrosselt. Der Maximalwert von 900 l/s liegt bei einer Anlage der Stadt Paderborn vor. Die Filterbelastung liegt bei 82 untersuchten Anlagen sowohl im Mittel als auch im Median bei etwa 24 m/a; die Spanne der Beschickungshöhe reicht von 0,9 bis 47 m/a. Wie auch bei RBF im Trennsystem entspricht die Filtergeschwindigkeit (Drosselabflussspende) bei RBF im Mischsystem häufig den Vorgaben des gegenwärtig gültigen Regelwerks. Zu erkennen ist dies ebenfalls am Median (0,01 l/m²/s) und dem 3. Quartil (0,02 l/m²/s). Bei 5 RBF liegt der Wert oberhalb von 1 l/m²/s und erreicht im Maximum 2,1 l/m²/s. Fehler in der REBEKA Datenbank sind bei diesen Werten ebenfalls nicht auszuschließen.

Die größte Filterfläche mit 13.000 m² besitzt der RBF Moselbach (Stadt Waltrop), dem gegenüber steht der RBF Wachendorf mit 80 m² (Stadt Mechernich). Die mittlere Filterfläche der 95 untersuchten RBF beträgt 2.295 m², der Median liegt bei 1.465 m². Die Spanne der spezifischen Filterfläche der RBF im Mischsystem liegt zwischen 1,91 und 444 m²/ha. Mehr als 75 % der Anlagen liegen allerdings unter 100 m²/ha. Ein fehlerhafter Datenbankeintrag konnte beim Attribut Hydraulischer Wirkungsgrad festgestellt werden (Max.: 784 %). Für die weitere statistische Berechnung wurde dieser daher nicht verwendet. In etwa 25 % der Fälle liegt der Wirkungsgrad oberhalb von 95 %. Der Interquartilbereich liegt zwischen 67 und 94 %. Die Filterkörperhöhe war bei 92 RBF hinterlegt und liegt zwischen 0,5 und 1,5 m.

Im rechnerischen Mittel beträgt die Überlaufhäufigkeit der Anlagen 1,7 1/a, der Maximalwert beläuft sich auf 9,3 1/a. Weniger als 25 % der Anlagen laufen min. 5 mal pro Jahr über. Zur Auswertung des Attributs Volumen über Filter waren 100 von 105 verfügbar. Das größte Volumen hat demnach der RBF Moselbach mit 27.000 m³, das kleinste Volumen weist der RBF Unterdahl auf mit 80 m³. Das mittlere Einstauvolumen beträgt etwa 3.100 m³, im Median liegt es bei ca. 2.100 m³. Bezogen auf die angeschlossene, befestigte Fläche ergeben sich spezifische Einstauvolumina zwischen ca. 2 und 630 m³/ha (Mittelwert: 117 m³/ha, Median: 88 m³/ha). In 37 der 105 Fälle war das Volumen einer Speicherlamelle verfügbar. 75 % der RBF haben kleinere Volumina als ca. 1.100m³. Der Maximalwert von 9.300 m³ ist dem RBF Werler Strasse (Stadt Hamm) zuzuordnen. Der Median (555 m³) entspricht etwa der Hälfte des Mittelwerts (1071 m³) bzw. des 3. Quartils (1163 m³).

Tabelle 4-2 Deskriptive Statistik ausgewählter Kenndaten der Retentionsbodenfilter im Mischsystem

	Entwässerungsverfahren										
	Mischsystem										
	Drosseldurchfluss	Filterbelastung	Filtergeschwindigkeit	Filterfläche	spezifische Filterfläche (Filterfläche/Befestigtes Gebiet)	Hydraul. Wirkungsgrad	Höhe Filterkörper	Überlaufhäufigkeit	Volumen über Filter	spezifisches Volumen über Filter (Volumen über Filter/Befestigtes Gebiet)	Speicherlamelle
	l/s	m/a	l/m ² /s	m ²	m ² /ha	%	m	1/a	m ³	m ³ /ha	m ³
Gesamtanzahl	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
Gültige N	97	82	76	95	89	60	92	63	100	94	37
Fehlend	8	23	29	10	16	45	13	42	5	11	68
Minimum	2	0,9	0,00	80	1,91	1	0,5	0,0	80	2,19	0
1. Quartil	13	16,7	0,00	840	34	67	0,8	0,2	1040	51,52	131
Median	30	24,3	0,01	1465	57,14	85	1,0	1,0	2073	88,72	555
3. Quartil	60	30	0,02	3298	93,46	94	1,0	2,3	4444	138,82	1163
Maximum	900	47	2,1	13000	444	100	1,5	9,3	27000	632,90	9300
Mittelwert	59,8	23,7	0,1	2295	84,8	75	0,9	1,7	3146	117,15	1071
Standardabweichung	106	10,2	0,4	2127	82,3	27	0,2	2,0	3403	108,84	1740

4.1.3 Statistische Auswertung der Einzugsgebietsparameter

Nachstehende Tabelle 4-3 stellt die deskriptive Statistik ausgewählter Einzugsgebietsparameter dar. Hierzu wurden die Attribute (i) Beiwert befestigte Fläche, (ii) Befestigtes Gebiet, (iii) Kanalisiertes Gebiet, (iv) Befestigungsgrad Einzugsgebiet und (v) Undurchlässiges Einzugsgebiet ausgewertet. Der Parameter Beiwert befestigte Fläche beschreibt den Abflussbeiwert zur Berechnung des abflusswirksamen Niederschlags. Im Mittel beträgt dieser 0,84, wobei 75 % der Einzugsgebiete einen größeren Beiwert als 0,7 aufweisen. Das Attribut Befestigtes Gebiet drückt die Summe aller befestigten Flächen im Einzugsgebiet aus. Hier liegt die Spanne zwischen 0,01 und 734 ha. Mit einem Median von 15,7 ha und einem 3. Quartilswert von 48,1 ha wird deutlich, dass 75 % der Flächen kleiner als 50 ha sind. Lediglich zehn Einzugsgebiete lagen über dem Schwellwert von 100 ha. Zur Analyse des Parameters Kanalisiertes Gebiet konnten 100 Einzugsgebiete statistisch ausgewertet werden. Hier erstrecken sich die Werte auf einen Bereich von 0,01 bis 874 ha. Der 3. Quartilswert deutet auch hier an, dass etwa 75 % der Einzugsgebiete kleiner 100 ha sind. Das Attribut Befestigungsgrad Einzugsgebiet lag ebenfalls bei 100 von 127 Fällen vor. Hier betragen Median und Mittelwert etwa 0,4. Die Auswertung des Attributs Undurchlässiges Einzugsgebiet zeigt die Ähnlichkeit zum Parameter Befestigtes Gebiet. Lediglich marginale Unterschiede des 3. Quartils lassen auf eine andere Datenbasis schließen. Demzufolge fallen auch die Unterschiede der statistischen Kenngrößen Mittelwert und Standardabweichung gering aus.

Tabelle 4-3 Deskriptive Statistik ausgewählter Einzugsgebietsparameter

	Beiwert befestigte Fläche	Befestigtes Gebiet	Kanalisiertes Gebiet	Befestigungsgrad Einzugsgebiet	Undurchlässiges Einzugsgebiet
	-	ha	ha	-	ha
Gesamtanzahl	127	127	127	127	127
Gültige N	55	122	100	100	122
Fehlend	72	5	27	27	5
Minimum	0,1	0,01	0,01	0,0	0,0
1. Quartil	0,7	5,2	6,60	0,24	5,2
Median	1,0	15,7	29,55	0,41	15,7
3. Quartil	1,0	48,1	108,40	0,53	43,3
Maximum	1,0	733,8	874	1	733,8
Mittelwert	0,84	41,1	87,89	0,41	39,2
Standardabweichung	0,24	81,5	143,99	0,28	80,6

4.1.4 Selektion repräsentativer Retentionsbodenfilter

Basierend auf den Ergebnissen der deskriptiven Statistik der Retentionsbodenfilter im Misch- und Trennsystem wurden nun Kriterien definiert, um eine Auswahl an repräsentativen RBF zu erhalten. Die Kriterien berücksichtigen sowohl hydraulische als auch bautechnische Bedingungen. Zudem werden vorhandene Messungen des Drosselabflusses und des Füllstandes als Bedingung angesehen. Eine Auflistung der Kriterien ist Tabelle 4-4 zu entnehmen. Weiterhin wurden die Kriterien hinsichtlich ihres Abfragetyps kategorisiert. D.h., dass Abfragen entweder primär oder sekundär sein können. Primäre Abfragen müssen in jedem Fall erfüllt sein, sekundäre hingegen nur dann wenn die Auswahl weiter eingeschränkt werden soll. Die Anwendung der Abfragekriterien auf die 127 Retentionsbodenfilter in NRW führte zu den in Tabelle 4-5 aufgeführten Bauwerken.

Tabelle 4-4 Übersicht der Kriterien zur Selektion von Retentionsbodenfilter

Kriterium	Wertebereich	Abfragetyp
Filterbelastung	10 – 40 m/a	Primär
Filtergeschwindigkeit	0 – 0,3 l/m ² /s	Primär
Spez. Filterfläche	0 – 200 m ² /ha	Primär
Höhe Filterkörper	0,6 – 1,2 m	Sekundär
Befestigungsgrad Einzugsgebiet	0,3 – 0,8	Sekundär
Bauwerk ist hochwasserfrei	Ja	Primär
Messung: Drosselabfluss	Ja	Primär
Messung: Füllstand	Ja	Primär
Inbetriebnahme	>= 2005 (-)	Primär

Tabelle 4-5 Namen der selektierten Retentionsbodenfilter

Name	Laufende Nummer gem. REBEKA	Name	Laufende Nummer gem. REBEKA	Name	Laufende Nummer gem. REBEKA
Kaster	5046	KA Brake	8746	Weidestraße	8971
ABS Gerderath	8522	Herbram-Wald	8747	Speckfeld	8975
ABS Tenholt	8526	Brake / Bergstraße	8756	Häver	8980
ABS Hetzerath	8527	Große Twete	8760	Im Niederfeld	8981
ABS Lövenich	8528	Hans-Humpert-Straße	8775	Im Dornsiek	8982
Fliesteden	8539	KA Detmold	8777	RBF Ralshoven	8995
Paulswiese	8743	KA Schlangen	8781	RBF Titz	8997
Füllenbruchstraße	8745	Glashütte	8782	RBF Meerhof	8998

4.2 Auswahl der Anlagen für die Erhebungsuntersuchung

Neben den beprobten Filteranlagen der

Tabelle 4-6 wurden noch weitere Anlagen besucht und mit in die Auswertung einbezogen. Bei diesen Anlagen wurden Wasser- und/oder Feststoffproben entnommen. Die Lage dieser RBF ist Bild 4-2 zu entnehmen. Von den über den Datenbestand des Landes NRW ausgewählten Anlagen (Tabelle 4-6) wurde nur ein Teil untersucht. Die Vorkenntnis der älteren RBF über die Erhebungsuntersuchung aus dem Jahr 2000 beschrieb die Anlagen zuverlässiger als die Auswertung des Datenbestandes. Die jüngeren Anlagen wurden vor allem wegen der Auskünfte der Anlagenbetreiber ausgewählt.

Die beprobten Anlagen sind in Tabelle 4-6 aufgelistet. Neben den beprobten Anlagen wurden noch folgende Anlagen besucht und mit in die Auswertung einbezogen:

- Elsdorf-Ost, Mischsystem
- Fliesteden, Mischsystem
- Rohren, Mischsystem
- Rollesbroich-Roszbach, Mischsystem

Im **Mischsystem** wurden insgesamt 24 Anlagen untersucht. Die Anlagen Vanikum, Glehn und Kenten wurden parallel zu diesen Erhebungsuntersuchungen von Tondera u.a. (2013) im Zu- und Ablauf untersucht. Ursprünglich sollte der Belastungsgradient zwischen den drei Anlagen erfasst werden (Vanikum < Glehn < Kenten). Die Zu- und Ablaufuntersuchung musste sich aufgrund der geringen Beschickungsereignisse von Vanikum und Glehn auf Kenten beschränken. Der vorgesehene Vergleich zwischen herkömmlicher Ermittlung der Belastung über Zulaufmessungen und –beprobungen und Erfassung der Belastung über Sedimentmessungen konnte deshalb nur für die Anlage Kenten vorgenommen werden.

Die Anlagen 4 - 8 sind die ältesten Anlagen; sie wurden schon bei der ersten Erhebungsuntersuchung im Jahr 2000 (Bofitec, 2001) untersucht. Sie hatten zu Betriebsbeginn kein bzw. sehr wenig CaCO₃ im Filtermaterial. An diesen Anlagen sollte die Auswirkung des fehlenden CaCO₃ auf das Schwermetalldepot erfasst werden.

Die Anlagen 9 und 10 sind ebenfalls alt. Bei ihnen wurden sehr T+U-reiche Filtermaterialien verwendet. Es sollte geprüft werden, ob der hohe T+U-Gehalt zur hydraulischen Minderleistung führt. Die Anlagen 11 - 21 wurden primär wegen der Ermittlung der Filterbelastung und der Ausgangsgehalte des Filtermaterials untersucht.

Die Anlagen 22 (Altendorf) und 23 (Witzerath) wurden wegen der dort gemessenen hohen Keimelimination in die Untersuchung aufgenommen. Es sollte geklärt werden, ob bei diesen Anlagen ein besonders feinkörniges Filtermaterial vorhanden ist.

Die Anlagen 24 (Fritz Reuter) und 25 (Lübeckerstraße) werden zwischenzeitlich nicht mehr als Retentionsbodenfilter sondern als Rückhaltebecken betrieben. Insbesondere die ganzflächig über 20 cm hohe Sedimentschicht der Anlage Fritz Reuter wurde beprobt, um über die Sedimentmineralisierung und den dadurch bedingten Carbonatverbrauch Auskunft zu erhalten.

Es wurden vier RBF im **Trennsystem** untersucht (Nr. 26 - 29). Diese Untersuchung diente u.a. der Ermittlung der Filterbelastung.

Die Anlage 26 Glessen wurde wegen der in das Filtermaterial eingemischte Holzhäcksel untersucht. Es sollte geklärt werden, welche Auswirkung die Zumischung von Holzhäcksel mit sich bringt.

Anlage 28 Bentelerstraße wurde wegen der aufgetretenen Filterkolmation mit in die Untersuchung aufgenommen. Von allen untersuchten Anlagen war dies die einzige, bei der eine Kolmation aufgetreten ist. Diese Anlage wird im Gegensatz zu den anderen Anlagen im Trennsystem mit dem Drosselabfluss aus einem Stauraumkanal beschickt und besitzt lediglich eine Filterfläche von 18 m² je ha angeschlossene Fläche. Damit ist sie besonders belastet.

Die Anlage 29 Weilerzwist war noch nicht in Betrieb. Die Filtermaterialuntersuchung dieser Anlage diente der Ermittlung der Ausgangsgehalte.

Es wurden fünf Retentionsbodenfilteranlagen für die **Straßenentwässerung** untersucht (A 3.1, A 3.2, A 3.3, A 1.2, A 1.3). Davon waren vier ältere aber sehr schwach belastete Anlagen. Auf eine genauere Quantifizierung der Filterbelastung musste aufgrund geringer Belastung verzichtet werden. Die Filterfläche der Anlage A 3.1 wurde im Vergleich zur Muldenentwässerung in deren Einzugsgebiet untersucht. Die 5. Filteranlage (A 3.3) war noch nicht in Betrieb. Die Untersuchung an dieser Anlage wurde wegen der Ermittlung der Ausgangsgehalte vorgenommen.

Die Vorstufen der fünf RBF für die Straßenentwässerung sowie vier weitere Absetzanlagen waren dauereingestaute, offene Becken. Die Untersuchung dieser dauereingestauten Absetzbecken sollte mögliche Güteeffekte durch Makrophytenbesiedlung bei Erdbecken (A 3.6) und durch die Salzsichten bei tieferen Betonbecken dokumentieren.

Tabelle 4-6: beprobte Retentionsbodenfilteranlagen

Nr.	Bezeichnung	System	Ort	Inbetriebnahme	Au	Vol über Filter		Fläche Filter		Ablaufdrossel	
					ha	m³	m³/ha	m²	m²/ha	l/s	l/s/m²
1	Vanikum	MS	Vanikum	2005	10,6	790	74	650	61	16	0,025
2	Glehn	MS	Glehn	2006	31,5	3.200	102	2.100	67	62	0,030
3	Kenten	MS	Kenten	2005		3.970		2.210		60	0,027
4	Erbach-Süd	MS	Wülfrath	1995	14,6	9.215	633	3.600	247	25	0,007
5	Benninghoferweg	MS	Mettmann	2000	25,76	2.650	103	2.150	83	30	0,014
6	Wermelskirchen	MS	Wermelskirchen	2000	128	3.290	26	3.000	23	300	0,100
7	Geilenkirchen	MS	Geilenkirchen	1998	2,21	6.000	2.715	6.000	2.715	120	0,020
8	Frelenberg	MS	Frelenberg	1999	8,51	6.000	705	5.300	623	ohne	
9	Nettelstedt	MS	Lübbecke	1998	3,25	500	154	500	154	50	0,100
10	Gehlenbeck	MS	Lübbecke	1997	10,69	1.000	94	800	75	100	0,125
11	Alsdorf	MS	Alsdorf	2002	43,3	1.638	38	3.360	78	ohne	
12	Harwick	MS	Gescher	2006	12,5	7.790	623	4.910	393	157	0,032
13	Herongen	MS	Herongen	2006	30	6.089	203	3.700	123		0,000
14	Madfeld	MS	Brilon	2004	17	1.897	112	1.500	88	50	0,033
15	Hille	MS	Hartum	2004	50,2	870	17	950	19	10	0,011
16	Tengern	MS	Hüllhorst	2006	90,22	1.180	13	2.000	22	40	0,020
17	Extertal	MS	Extertal	2006	13,82	4.375	317	3.000	217	45	0,015
18	Benhausen	MS	Paderborn	2008	9,7	1.007	104	710	73	20	0,028
19	Benhauserstraße	MS	Paderborn								
20	Hans Humpert Str.	MS	Paderborn	2006	207,5	4.200	20	1.980	10	900	0,455
21	Hallschlag	MS	Hallschlag	2007				1.650			0,000
22	Altendorf	MS		2005	18,8	782	42	707	38	10,5	0,015
23	Witzerath	MS		2005	2,1	440	213	320	155	3,2	0,010

Nr.	Bezeichnung	System	Ort	Inbetriebnahme	Au	Vol über Filter		Fläche Filter		Ablaufdrossel	
					ha	m³	m³/ha	m²	m²/ha	l/s	l/s/m²
24	Fritz-Reuterstr.	MS	Solingen	2000	112,8	5.500	49	1.177	10	165	0,140
25	Lübeckerstraße	MS	Solingen	2000	62,4	5.160	83	3.170	51	157	0,050
26	Glessen	TS	Bergheim	1999	33	3.240	98	1.940	59	56	0,029
27	Graf- Zeppelin-Straße	TS	Wünnenberg		20,8	2.491	120	2.421	116	73	0,030
28	Benteler Str.	TS	Paderborn	2010	7,5	78	10	136	18	4	0,029
29	Weilerswist	TS	Weilerswist								
30	A3.1	S	RBF_5008998_Köln-Ost, Westseite	2003	8,5	1.570	185	1.570	185	ohne	
31	A3.2	S	RBF_5008999_KölnOst-Ostseite	>2000	2,08	640	308	1.525	733		0,000
32	A3.3	S	RBF_A3_Anschlussstelle_Köln	2010	9,4	660	70	1.640	174		
33	A3.4	S	RRB_5309-794								
34	A3.5	S	RBF_5209-762								
35	A3.6	S	RRB_MaarhäuserWeg		3,6					Rohrdrossel DN200	
36	A1.1	S	RRB_5007-630, Köln West	2011							
37	A1.2	S	RBF_4809-505 Wermelskirchen	2011	5,5	3.100	559	2.600	469		
38	A1.3	S	RBF_Marscheider_Bach	1996	5,6	1.850	330	1.375	256	ohne	0,000



Bild 4-2: Lage der untersuchten und beprobten Anlagen (vgl. Tabelle 4-6) sowie der zusätzlich in die Auswertung aufgenommenen Mischsystem-Anlagen Elsdorf-Ost, Fliesteden, Rohren und Rollesbroich-Roszbach

5 Ergebnisse

5.1 Filtermaterial

Die Erhebungsuntersuchung sollte auch die Ausgangseigenschaften der Filtermaterialien erfassen:

- Korngrößenverteilung
- Organische Substanz (Glühverlust)
- CaCO_3 -Gehalt
- Ausgangsgehalte der königswasserlöslichen Schwermetalle (Zn, Cd, Cu, Pb, Cr, Ni)

Die ersten 3 Parameter bestimmen den Umfang der Reinigungsleistung für AFS, CSB, NH₄ und Schwermetalle. Die Ausgangsgehalte an Schwermetallen können im hohen Umfang schwanken. Ohne sie kann eine sichere Beurteilung des sich bildenden Filterdepots nicht vorgenommen werden. Die Ausgangseigenschaften des Filtersubstrates sind in Tabelle 5-1 zusammengestellt.

Nur bei einem kleinen Teil der Anlagen sind Analysen des Filtermaterials zum Zeitpunkt des Einbaues vorhanden. Daher wurde die Annahme getroffen, dass die zulauffernen und dränschichtnahen Gehalte im Substrat die Ausgangsgehalte repräsentieren. Diese Annahme wird weiter unten belegt (Tabelle 5-3).

Tabelle 5-1: Ausgangszustand von Filtermaterialien

Nr.	Anlage	Inbetriebnahme	T+U	fS	mS	gS	fG	CaC O ₃	Fe	Zn	Cd	Cu	Pb
			in M-%					in mg/kg					
1	Vanikum	2005	2,1	18,8	61,3	16,3	1,5	24,0	0,14	43,7	0,19	1,1	231
2	Glehn	2006	2,7	7,7	58,6	24,3	6,7	23,7	0,11	20,4	<0,07	1,5	1,5
3	Kenten	2005	2,2	16,0	64,1	16,1	1,6	32,2	0,10	36,4	0,09	1,0	334
4	Erbach-Süd	1995	8,8	15,5	71,6	3,8	0,3	0,00	0,43	19,7	0,08	2,8	6,0
5	Benninghoferweg	2000	0,8	3,9	57,0	31,5	6,8	0,00	0,59	13,0	<0,07	3,6	3,6
7	Geilenkirchen	1998	1,2	6,7	59,1	27,7	5,9	0,00	0,13	10,3	<0,07	2,6	2,6
9	Nettelstedt (2000) ¹⁾	1998	37,3	10,6	35,1	16,9	0,0	0,0					
9	Nettelstedt (2011) nach Filtertausch	1998	2,4	5,6	69,6	19,7	2,7	8,6					
12	Harwick	2006	1,0	5,1	59,5	20,5	13,1	1,70	0,48	10,9	<0,07	2,9	2,7
13	Herongen	2006	2,3	5,5	37,2	16,8	38,2	13,8	0,57	13,8	0,06	3,2	3,1
14	Madfeld	2004	5,3	19,7	50,7	18,9	5,4	48,5	0,53	18,1	0,13	3,5	2,7
16	Tengern	2006	4,7	9,9	65,0	17,5	2,9	11,6	0,12	38,6	<0,07	4,9	1,8
17	Extertal	2006	5,5	20,6	56,0	14,5	3,4	13,1	0,13	33,1	<0,07	4,5	2,8
18	Benhausen	2008	1,6	15,0	67,3	12,9	1,9	11,1	0,12	6,9	<0,07	1,1	1,3
19	Benhauserstraße	2010	1,3	17,1	65,2	13,6	2,8	15,1	0,13	10,2	<0,07	1,2	0,1
21	Hallschlag	2007	2,0	14,7	64,6	16,6	2,1	15,6	0,21	19,8	0,07	1,4	180
22	Altendorf	2005	2,2	20,6	62,5	13,4	1,3	29,9	0,12	42,0	0,27	1,1	368
23	Witzerath	2005	1,7	16,6	51,0	25,3	5,4	19,0	0,21	7,4	<0,07	0,8	0,8
28	Benteler Str.	2010	0,8	13,6	66,5	18,9	0,2	23,7	0,14	19,8	<0,07	2,3	0,3
29	Weilerswist	2011	5,0	7,8	50,3	29,7	7,2	3,30	0,36	16,5	<0,07	2,9	6,3
32	A 3.3	2011	10,8	7,7	17,2	33,4	30,9	7,30	0,34	44,1	<0,07	31,7	12,3
37	A 1.2	-	13,0	11,9	25,0	29,8	20,3	1,94	0,63	32,2	<0,07	7,5	5,1

1) Angaben des Jahres 2000 nach Bofitec (2001)

Feinkornanteil des Filtermaterials

Insbesondere bei älteren Filtern wurden teilweise Filtermaterialien mit hohem T+U-Gehalt verwendet. Zwei solcher Filter wurden bei der Erhebungsuntersuchung im August 2000 beprobt. Die Ausgangsgehalte an T+U betragen 29 % (Gehlenbeck) bzw. 37 % (Nettelstedt). Im Rahmen der Erhebungsuntersuchung sollte geklärt werden, welches Betriebsverhalten aus den hohen T+U-Gehalten resultiert. An beiden Anlagen wurde das T+U-reiche Filtermaterial durch ein T+U-armes ersetzt. Offensichtlich war ein störungsfreier Filterbetrieb mit kurzen Filterüberstauzeiten nicht möglich. In Tabelle 5-1 ist für den RBF-Nettelstedt die alte und neue Korngrößenverteilung des Filtermaterials aufgeführt. Das neue Filtermaterial besitzt einen T+U-Gehalt, der eine ausreichend hohe hydraulische Ausgangsleitfähigkeit erlaubt. Auch wenn keine k_f -Messungen zu den alten, T+U-reichen Filtermaterialien vorliegen, kann nach bisheriger Erfahrung davon ausgegangen werden, dass sandiges Filtermaterial mit T+U-Gehalten von 29 % - 37 % eine zu geringe hydraulische Ausgangsleitfähigkeit besitzt, die u.a. zum hydraulischen Versagen des Filters führt.

Die Übersicht der Tabelle 5-1 zeigt, dass jüngere RBF keine so hohen T+U-Gehalte besitzen wie die ursprünglichen Filtermaterialien der alten Anlagen Gehlenbeck und Nettelstedt. Allerdings liegen die T+U-Gehalte teilweise noch auf einem hohen Niveau, die eventuell zur Verlagerung oder zum Austrag von filtermaterialbürtigem T+U führen können. Die für Standardfiltermaterial geforderten T+U-Gehalte < 1 % werden nach Tabelle 5-1 nur von einem kleinen Teil der Anlagen eingehalten.

Grobkornanteil des Filtermaterials

Für eine ausreichend hohe Partikelfiltration und eine geringe Eindringtiefe der zuflussbürtigen Feinpartikel muss die gS- und fG-Fraktion des Filtermaterials begrenzt werden. Nach bisheriger Erfahrung sollte der gS-Anteil 30 % und insbesondere der fG-Anteil 5 % nicht übersteigen. Aus der Tabelle 5-1 ist zu ersehen, dass insbesondere ältere Anlagen (Herongen) bzw. Anlagen für Straßenabflüsse einen hohen fG-Anteil besitzen. Der Großteil der Anlage hat einen ausreichend geringen Grobkornanteil. Dieser Umstand ist besonders bemerkenswert, da diese Aussage auch für Filtermaterialien mit Carbonatbrechsandzuschlag zutrifft. So zeigen z.B. die 3 Anlagen Vanikum, Glehn und Kenten trotz hoher Carbonatgehalte (24 %- 32 % CaCO_3) einen geringen Grobkornanteil (Tabelle 5-1). Trotz der Zumischung des grobsanddominierten Carbonatbrechsandes sind somit ausreichend geringe Grobkornanteile in fertigem Filtermaterial erzielbar.

Organische Substanz (Glühverlust)

Untersuchungen zum Einfluss der organischen Substanz im Filtermaterial zeigen, dass dessen Zugabe zum sandigen Filtermaterial zu einem starken Abbau derselben führt. Dieser Abbau kann u.a. die Verlagerung von Kupfer bewirken (Lambert, 2007). Die neuen RBF besitzen nach der vorgenommenen Erhebungsuntersuchung ausschließlich Gehalte im geogenen Hintergrundbereich von fluviatilen Sanden (ca. 0,40 M-% GV).

Bei dem 1999 erstellten Trennsystem - RBF Glessen wurde Holzhäcksel in das sandige Filtermaterial eingemischt. Der Grund für diese Zumischung lag vermutlich darin, hierdurch die Kationenaustauschkapazität zu erhöhen. Aufgrund der sehr geringen Belastung des Filters konnte, im Unterschied zu Messungen an einer Lysimeteranlage in Augsburg (Lambert, 2007), keine Kupfer- aber eine Fe- und Mn-Verlagerung innerhalb des Filterprofils beobachtet werden (Bild 5-1).

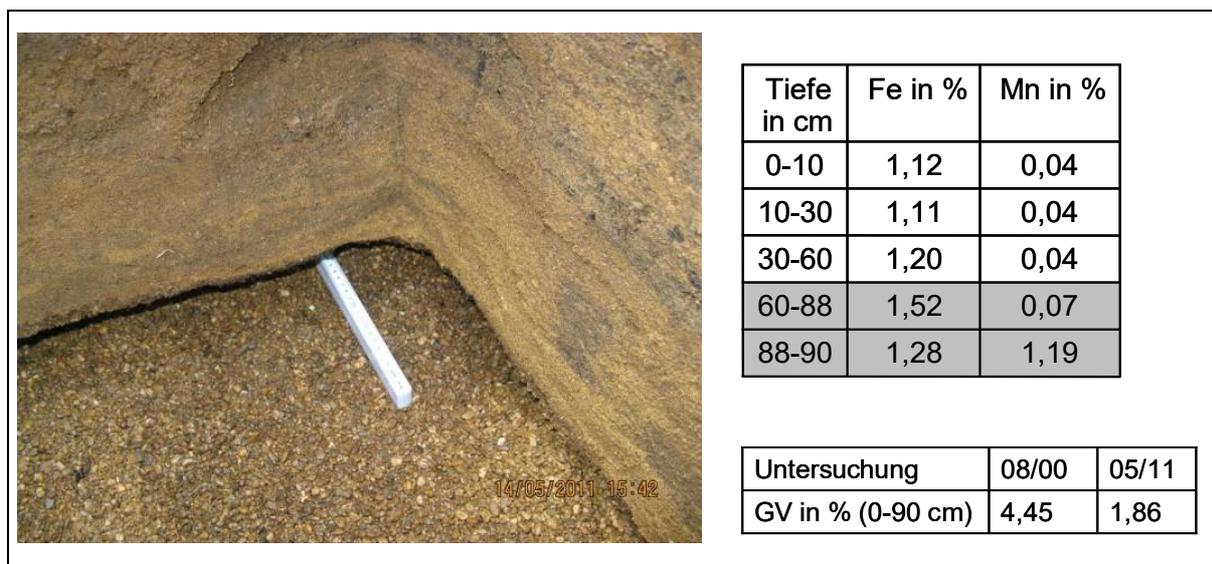


Bild 5-1: Ortsteinbildung in der unteren Filterschicht durch Zugabe von Holzhäcksel, RBF-Glessen, Inbetriebnahme 1999, Beprobung 14.05.2011

Die Profilgehalte deuten darauf hin, dass insbesondere Mangan nicht nur verlagert, sondern mit dem Dränablauf ausgetragen wurde (Tabelle 5-2). Wie an den Stichproben des Dränablaufes zu erkennen ist, dürfte der Hauptabbau zwischenzeitlich abgeschlossen sein. Die hohen $\text{NO}_3\text{-N}$ - und P_{ges} -Gehalte deuten aber noch auf einen weiteren Abbau hin. Dieser kann zu einer filtermaterialbürtigen Nährstoffbelastung des Gewässers führen.

In der unteren Filterschicht (60 - 90 cm) sind die Sandkörner des Filtermaterialies durch die Wiederausfällung des Eisens verbacken. Diese Verbackung war u.a. daran erkennbar, dass Dränkies unter dem Filtermaterial entfernt werden konnte, ohne dass das Filtermaterial nachrutschte. Aufgrund der sehr geringen Filterbelastung führte das Verbacken der Sandkörner zu keinen hydraulischen Problemen.

Die angeführte Untersuchung zeigt, dass die Zugabe von organischer Substanz ins sandige Filtermaterial kontraproduktiv ist.

Tabelle 5-2: Stoffgehalte im Dränablaufschacht nach Dränende des Trennsystem-RBF-Glessen

	22.08.2000	14.05.2011
Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$	1590	425
$\text{K}_{\text{S}4,3}$ in mmol/l	15,2	2,64
CSB in mg/l	90,8	20,0
$\text{NO}_3\text{-N}$ in mg/l	4,18	16,2
P_{ges} in mg/l	-	0,351
Fe_{ges} in mg/l	-	0,02

Messungen vom 22.08.2000 nach (Bofitec, 2001)

Carbonatgehalt des Filtermaterials

Wie Tabelle 5-1 zu entnehmen ist, besitzen insbesondere die neueren Mischwasserfilter hohe Carbonatgehalte (Vanikum, Glehn, Kenten). Hingegen war ein Teil der alten Filter schon im Ausgangszustand carbonatfrei (Erbach-Süd, Benninghoferweg, Geilenkirchen). Es ist davon auszugehen, dass in NRW hohe Carbonatgehalte nur durch Zumischung von Carbonatbrechsand erreichbar sind. Aufgrund der geringen Carbonatgehalte der Trennsystemanlage Weilerswist und der beiden Straßenanlagen (A 3.3, A 1.2) sind dort vermutlich keine Carbonate zugemischt worden. Die geringen Carbonatgehalte der Trennsystem- und Straßenanlagen deuten darauf hin, dass die Anlagenplaner davon ausgehen, dass für diese Anwendungen eine Carbonatzumischung nicht notwendig ist. Der bisherige Kenntnisstand zu diesen beiden Anwendungsbereichen zeigt hingegen, dass es bei fehlender partikulärer Carbonatzufuhr aus dem Niederschlagszufluss zu einer Versauerung von Filtersediment und Filtermaterial kommen kann.

Schwermetallgehalte des Filtermaterials

Die Ausgangsgehalte an Schwermetallen wurden bisher nicht systematisch im Rahmen der Fremdüberwachung (Filtermaterialeinbau) ermittelt. Bisher bestand die Auffassung, dass dies bei T+U-armen Sanden nicht notwendig ist. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die Ausgangsgehalte an Schwermetallen über die Bestimmung der ablaufseitigen, tieferen Filterschichten ermittelt. Bei drei der insgesamt 21 Anlagen der Tabelle 5-1 lagen auch Messungen kurz nach der Inbetriebnahme vor. Anhand dieser Anlagen (Erbach-Süd, Benninghoferweg, Geilenkirchen) soll abgeschätzt werden, wie groß der Fehler bei der angewandten Methode der Ermittlung der Ausgangsgehalte ist (Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Ausgangsgehalte von Filtermaterialien bei unterschiedlicher Probenahme

Nr.	Anlage		Tiefe	T+U	Fe	Zn	Cd	Cu	Pb
			in cm	in M-%		in mg/kg			
4	Erbach-Süd	1	5 – 30	5,7	0,36	18,0	0,08	3,3	4,7
		2	60 - 90	8,8	0,43	19,7	0,08	2,8	6,0
5	Benninghoferweg	1	5 – 30	0,9	0,55	15,0	0,02	4,1	3,2
		2	15 – 30	0,8	0,59	13,0	<0,07	3,6	3,6
7	Geilenkirchen	1	5 – 30	1,5	0,13	19,0	0,04	2,2	2,3
		2	15 – 45	1,2	0,13	10,3	<0,07	2,6	2,6

1 Probenahme zu Betriebsbeginn im August 2000

2 Zulaufferne Probenahme im Mai 2011

Der Vergleich der Probenahmen zeigt, dass die Ausgangsgehalte denen in tieferen ablauffernen Schichten sehr ähnlich sind. Es ist daher davon auszugehen, dass die Ausgangsgehalte mit hinreichender Genauigkeit durch die Probenahmen in ablauffernen tieferen Bodenschichten abgeschätzt werden können. Die vorgenommene Erhebungsuntersuchung weist allerdings darauf hin, dass dennoch vor dem Einbau das Filtermaterial auf Schwermetalle hin untersucht werden sollte. Zwei Gründe sprechen für dieses Vorgehen (vgl. Tabelle 5-1):

1. In Abhängigkeit der Sandherkunft können die Ausgangsgehalte stark schwanken.
2. Die Herkunft des Carbonatbrechsandes kann zu sehr hohen Bleigehalten im Filtermaterial führen.

Für die spätere Ermittlung des Schwermetalldepots sind die anlagenindividuellen Ausgangsgehalte notwendig. Nur durch diese Ausgangsgehalte lässt sich erkennen, in welchem Umfang eine Schwermetallanreicherung in den dränablaufnahen Filterschichten stattgefunden hat. Diese Information wird für die Beurteilung der Immobilität des Schwermetalldepots und für die des Schwermetallrückhaltes des Filters benötigt.

Von den 21 in Tabelle 5-1 aufgeführten Anlagen besitzen vier einen sehr hohen Bleigehalt (Vanikum, Kenten, Hallschlag, Altendorf). Diese hohen Gehalte sind nicht durch den Eintrag des Mischwassers, sondern vermutlich durch sehr hohe geogene Ausgangsgehalte des zugemischten Carbonatbrechsandes entstanden.

Die Verwendung von extrem bleihaltigem Carbonatbrechsand sollte zukünftig durch Beprobungen und Analysen vor dem Einbau ausgeschlossen werden.

5.2 Filterbelastung

Die Filterbelastung wird im Folgenden vorwiegend anhand der Feinpartikelbelastung dargestellt.

5.2.1 Feinpartikelbelastung

Bevor die Feinpartikelbelastung der Filterfläche beschrieben wird, wird eine Abschätzung der Feinpartikelsedimentation auf Flächen vor der eigentlichen Filterfläche vorgenommen. Hierdurch soll geklärt werden, ob diese Vorsedimentation die Feinpartikelfrachten auf der eigentlichen Filterfläche deutlich reduzieren kann.

Vorsedimentation

Sind auf Vorflächen von alten Filteranlagen keine Sedimente vorhanden, ist dies ein sicheres Zeichen dafür, dass eine sehr geringe Filterbelastung vorliegt. Der RBF Elsdorf-Oststraße ist hierfür ein typisches Beispiel. Hier ist eine separate Sediment-Erfassung weder der Vorfläche noch der Filterfläche möglich. Die lückenhafte und magere Vegetation der Vorfläche zeigt ebenfalls die Schwachlastigkeit an (Bild 5-2). Dieser Filter konnte aufgrund der geringen Feinpartikelbelastung nicht beprobt werden, da die Belastung unter der Bestimmungsgrenze liegt.



Bild 5-2: Magerer Brennesselbestand auf der Filtervorfläche des 13-jährigen RBF Elsdorf zeigt die sehr geringe Feststoffbelastung an

Im Gegensatz zum extrem schwach belasteten Filter Elsdorf hatten 7 Filteranlagen Vorflächen, die eine deutlich sichtbare Sedimentschicht aufwiesen. Für diese 7 Anlagen wurde abgeschätzt, welchen Anteil das Sediment der Vorfläche im Vergleich zur Filterfläche

einnimmt. Nach dieser Abschätzung beträgt die Spanne 4 - 519 % der Filterfläche (Tabelle 5-4).

Bei zwei der 7 untersuchten Anlagen findet auf der Vorfläche ein relevanter Anteil an Feinpartikelsedimentation statt (Vanikum 179 %, Erbach-Süd 476 % des Filterflächendepots). Die Vorflächen dieser Anlagen sind, bezogen auf die Filterfläche, die größten der untersuchten Anlagen (32 bzw. 7 %, Tabelle 5-4). Trotz der hohen Vorsedimentation bei diesen beiden Anlagen, soll eine Korrektur der Filterflächenbelastung nicht vorgenommen werden. Der Befund dieser beiden Anlagen zeigt, dass bei großen Vorflächen die Feinpartikelbelastung der Filterfläche in relevantem Umfang reduziert werden kann. Hingegen zeigen die übrigen Anlagen mit 1 – 4 % Vorflächen an der Filterfläche nur geringe Reduzierung der Filterflächenbelastung (Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: Abschätzung der Feinpartikelsedimentation vor der Filterfläche

Nr.	Anlage	Filterfläche, A_F			Vorfläche, A_V						
		A_F	T+U	T+U	A_V	h_s	TM_{ges}	T+U(1)	T+U(2)	T+U(3)	A_V/A_F
		in m^2	in kg/m^2	in kg	in m^2	in cm	in kg	in %	in kg	in %	in %
1	Vanikum	650	0,54	351	210	0,5	1.050	60	630	179	32
2	Glehn	2.100	0,84	1.764	20	1	160	60	96	4	1
3	Kenten	2.210	1,03	2.276	65	1	520	60	312	13	3
4	Erbach-Süd	3.600	0,37	1.332	240	4	9.600	66	6.336	476	7
5	Benninghoferweg	2.150	2,27	4.880	50	5	2.000	80	1.600	33	2
12	Harwick	4.910	0,51	2.504	200	1	1.600	15	240	10	4
13	Herongen	3.700	1,32	4.884	120	2	1.920	60	1.152	24	3

h_s : Geschätzte \emptyset Sedimenthöhe

Ermittlung der TM der Vorfläche mit Lagerungsdichte = 0,80 kgTM/l

T+U(1): Anteil von T+U am Gesamtsediment, Anlage 1-3 geschätzt

T+U(3): T+U-Anteil der Vorfläche bezogen auf den T+U-Anteil der Filterfläche

Das Vorsediment ist insbesondere nach Großereignissen leicht erkennbar. So konnte beim RBF Kenten mit einer geringen Vorsedimentation diese während der vegetationsarmen Jahreszeit und nach einem großen Regenereignis gut erkannt werden. Während der Vegetationszeit und fehlender Großereignisse war das Vorsediment vollständig durch Vegetation überdeckt (Bild 5-3). Durch einen Profilausschnitt kann die Vorsedimentation, insbesondere bei ebenen Vorflächen, sicher quantifiziert werden.



Bild 5-3: RBF-Kenten, Zulaufbereich. Die auch zulaufnah nur selten hohe Feinpartikelbelastung kann an der üppigen Vegetation der Zulaufpflasterung (rechts, 26.05.2012) nach einer hohen Feinpartikelfracht (links, 24.12.2011) erkannt werden

Beim RBF Vanikum ist im Gegensatz zum RBF Kenten eine große Vorfläche vorhanden. Sie beträgt 32 % der Filterfläche (Kenten: 3 %). Diese große Vorfläche (Bild 5-4) führt zu einer relevanten Vorsedimentation, die 179 % der Sedimentmenge der Filterfläche beträgt (Tabelle 5-4). Die Vegetation zeigt die weitgehend geschlossene Sedimentdecke an.



Bild 5-4: Die besonders große Sedimentationsfläche vor der Filterfläche des RBF Vanikum minderte die auf der Filterfläche ermittelte Feinpartikelbelastung

Das Vorsediment der Anlage Erbach-Süd ist sehr augenfällig (Bild 5-5). Die als Steinschüttung ausgebildete Vorfläche ist vollständig mit Sediment überdeckt, wodurch der sich angesiedelte Brennesselbestand dicht und üppig ausgebildet ist.



Bild 5-5: Vorfläche des RBF Erbach Süd. Das Sediment der Vorfläche (240 m²) ist größer als das der Filterfläche (3.300 m²)

Durch große Vorflächen wird die ohnehin geringe Belastung vieler Filterflächen noch einmal vermindert. Durch die zukünftig vorgeschlagene längsseitige Beschickung (Kapitel 6.3) werden große Vorflächen vermieden. Aus der langen Zulaufrinne werden insbesondere die feinstpartikulären Sedimente bei kräftigen Zuflüssen wieder erodiert und auf der Filterfläche verteilt. Die Vorsedimentation ist unter diesen Bedingungen dann gering.

Durchschnittliche Feinpartikelbelastung

Die durchschnittliche Feinpartikelbelastung bezieht sich ausschließlich auf 24 Bodenfilter im Mischsystem. Es kann davon ausgegangen werden, dass für Bodenfilter im Trennsystem und für Straßen vergleichbare Belastungsspektren vorhanden sind. Allerdings ist die Anzahl an Anlagen in NRW zu gering, um für diese Anwendungen sichere Angaben machen zu können. Bei den untersuchten Trennsystemanlagen sind sowohl eine extrem gering belastete Anlage (Glessen) als auch eine höhere belastete (Benteler Str.) vorhanden. Bei den Bodenfiltern für Straßenabflüsse können alle Anlagen als schwach belastet angesehen werden.

Die gemessenen Feinpartikelbelastungen der Anlagen sind in Tabelle 5-5 aufgeführt. Das Vorgehen zur Ermittlung der Feststoffbelastung ist in Kapitel 3.2 beschrieben. Die Berechnung der Feinpartikelbelastung der untersuchten Mischwasser-Anlagen ist im Anhang 8.2 dokumentiert.

Tabelle 5-5: Feinpartikelbelastung von Bodenfiltern im Mischsystem

	Anlage		zulaufnah	zulauffern	Ø
in kg T+U/(m ² *a)					
1	Varnikum		0,56	0,53	0,54
2	Glehn		1,68	0,00	0,84
3	Kenten		1,59	0,48	1,03
4	Erbach-Süd		0,96	0,00	0,37
5	Benninghoferweg		3,63	0,92	2,27
6	Wermelskirchen		0,88	0,77	0,82
7	Geilenkirchen		5,28	0,48	2,41
8	Frelenberg		5,00	0,38	2,69
10	Gehlenbeck				<0,05
12	Harwick		0,99	0,04	0,51
13	Herongen		2,64	0,00	1,32
14	Madfeld		1,51	0,37	0,94
15	Hille		0,07	0,02	0,04
16	Tengern		0,57	0,43	0,50
17	Extertal		1,26	0,41	0,78
18	Benhausen				<0,05
20	Hans-Humpert-Str.		2,16	0,54	1,35
21	Hallschlag				<0,05
22	Altendorf		5,81	0,45	3,13
23	Witzerath				<0,05
	Rollersbroich-Roszbach				<0,05
	Rohren				<0,05
	Elsdorf-Ost				<0,05
	Fliesteden				<0,05

Der Mittelwert ist bei Erbach aus 3, bei Geilenkirchen aus 8, bei Tengern und Extertal aus 6 Mischproben ermittelt.

Von den 24 Mischsystem-Anlagen (Tabelle 5-5, Bild 5-7) konnte bei 8 Anlagen aufgrund der geringen Sedimentmenge keine Auswertung vorgenommen werden, obwohl die Anlagen z.T. bereits langjährig in Betrieb waren (z.B. Elsdorf-Ost 13 Jahre). Drei dieser 8 Anlagen (Rohren, Rollesbroich, Witzerath) wurden zum Schutz von Talsperren trotz geringer prognostizierter Filterbelastung erstellt.

Bei den 8 Anlagen, bei denen die Sedimentmenge nicht gemessen werden konnte, ist von einer extrem geringen Feinpartikelbelastung auszugehen. ($\leq 0,05$ kg T+U/m²*a). Dieser Wert beträgt nur ca. 1 % der ursprünglich für Retentionsbodenfilter als verträglich angesehenen Referenzbelastung von 4 kg T+U/(m²*a) (LFU, 1998). Aber auch die sicher messbaren Feststoffbelastungen der anderen Anlagen liegen alle unter dieser Referenzbelastung.

Die Ursache für diese geringen Belastungen dürfte an einer geringeren Zuflussmenge, aber auch einer geringen Zulaufkonzentration liegen. Da von den meisten Anlagen keine auswertbaren hydraulischen Filterbelastungen vorliegen, kann die Ursache nicht ermittelt werden. Bei den Anlagen mit nicht messbarer Feinpartikelbelastung ist allerdings davon auszugehen, dass sowohl Abfluss und Zulaufkonzentration gering sind.

Bei der Anlage Rollesbroich-Rossbach konnte ermittelt werden, dass die AFS-Zulaufkonzentrationen um Faktor 6,2 unter dem zu erwartenden Wert liegt (16,2 mg T+U/l statt 100 mg T+U/l; Bild 5.6). Mit dieser geringen Zulaufkonzentration und einer Feinpartikelbelastung von weniger als 0,05 kg T+U/(m²*a) ergibt sich eine hydraulische Filterbelastung von lediglich 3,1 m³/(m²*a), die damit um den Faktor 13 unter dem Referenzwert (40 m³/m²*a) liegt. Die Ursachen der geringen Feinpartikelbelastung sind daher hier sowohl durch die geringe Zulaufkonzentration (zu 32 %) als auch durch die geringe Zulaufwassermenge (zu 68 %) begründet.



	Zulauf	Ablauf
Lf in µS/cm	331	340
AFS in mg/l	16,2	5,6
NH ₄ -N in mg/l	1,41	0,40
NO ₃ -N in mg/l	3,78	5,40
P _{ges} in mg/l	0,36	0,10

nach Untersuchungen des WVER, 11/2004 – 08/2010, n = 27

Bild 5-6: RBF-Rollesbroich-Rossbach. Beispiel für konzentrationsbedingte Schwachlastigkeit eines Mischwasserfilters.

Rechte Bildhälfte: Im Bereich des Zulaufkanales sind keine Sedimente erkennbar.

Bei der ebenfalls extrem gering belasteten Anlage Hille (0,04 kg T+U/m²*a) kann durch die Zulaufmengenmessung von Namuth (2006) von 8,5 m³/(m²*a) ebenfalls eine Aufschlüsselung in Wassermenge und Konzentration vorgenommen werden. Die um Faktor 100 geringere Feinpartikelbelastung ist zu 18 % durch die geringe Wassermenge und zu 82 % durch die geringe Konzentration bedingt.

Bei der Anlage Kenten konnte eine mittlere AFS-Konzentration von 50 mg/l gemessen werden (Tondera u.a., 2013). Die gemessene Zulaufmenge lag mit $32 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{A}_F \cdot \text{a})$ vergleichsweise hoch. Daraus kann eine theoretische Feinpartikelbelastung von $1,6 \text{ kgT+U}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ berechnet werden. Die mit $1,03 \text{ kgT+U}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ gemessene geringere Feinpartikelbelastung lässt darauf schließen, dass die tatsächliche Zulaufkonzentration unter der gemessenen liegt. Zuflussmenge (Dränablaufmenge via MID) und Feinpartikelbelastung ($\text{kg T+U}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$) können vergleichsweise sicher erfasst werden. Die mittlere Zulaufkonzentration konnte nur für die 9 beprobten Ereignisse ermittelt werden.

Für üblich bemessene Bodenfilter im Mischsystem dürfte die geringe Zulaufkonzentration eine maßgebliche Größe für die geringe Feinpartikelbelastung der Filter sein. Eine höhere Filterbelastung ist deshalb primär bei höherer hydraulischer Belastung zu erwarten.

Für die zukünftige Filterbemessung sollte geklärt werden, welche Anteile die Zuflussmenge und welche die Zuflusskonzentration an der Feinpartikelfracht besitzt. Die vorgeschlagene zukünftige hydraulische und stoffliche Betriebsüberwachung kann diese Frage klären.

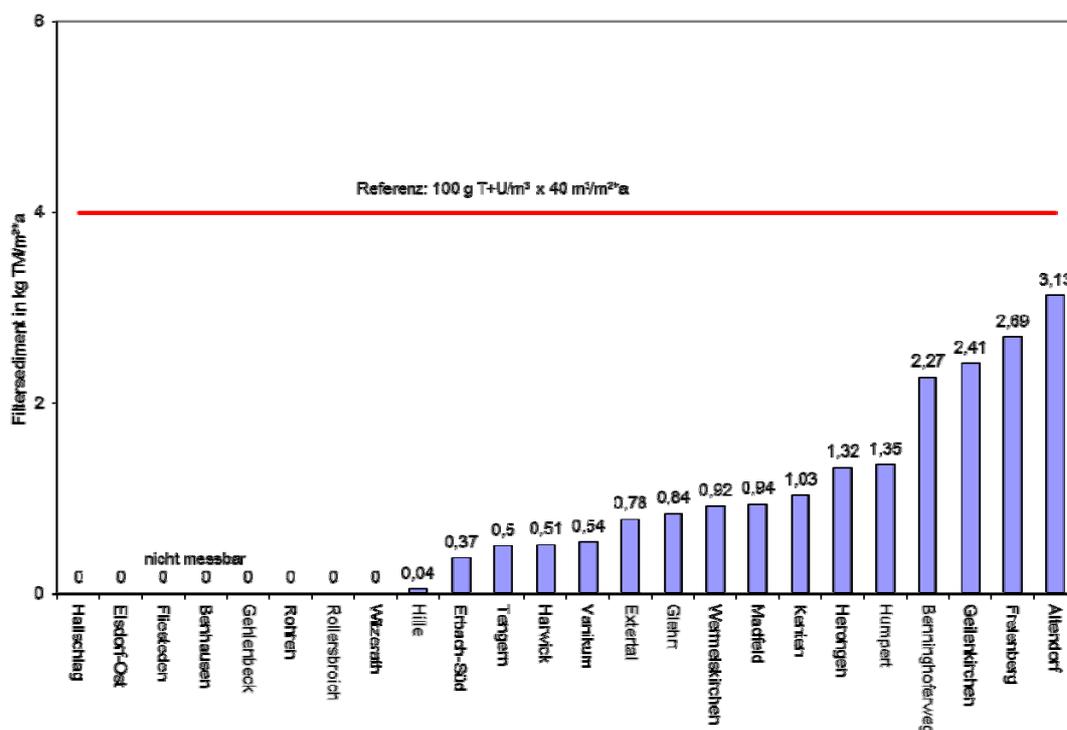


Bild 5-7: Feststoffbelastung von Bodenfiltern im Mischsystem

Vergleicht man die untersuchten Bodenfilter von NRW mit denen von Baden-Württemberg (Lambert/Fuchs, 2014) fällt die durchschnittlich höhere Belastung in Baden-Württemberg auf (Bild 5-8). Hier lagen 6 der 20 untersuchten Anlagen über der Referenzbelastung von $4 \text{ kg T+U}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Auch bei dieser stark belasteten Gruppe an Filteranlagen kam es zu keiner hydraulischen Minderleistung.

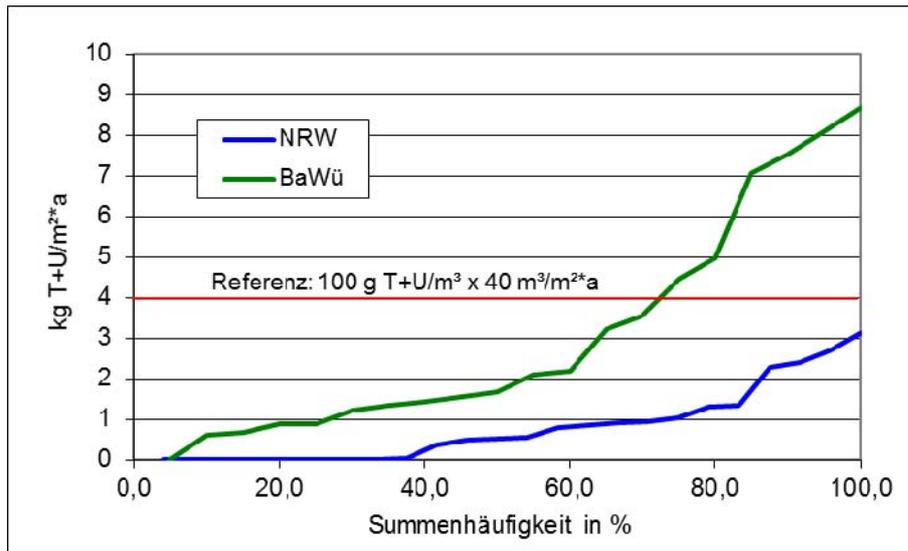


Bild 5-8: Vergleich der Feststoffbelastung von Bodenfiltern im Mischsystem in NRW und BW

5.2.2 Feinpartikelbelastung auf der Filterfläche

Eine gleichmäßige Filterbelastung ist aus folgenden Gründen anzustreben:

- Hohe Elimination von CSB, NH_4 , Schwermetallen
- Gleichmäßiger Verbrauch des CaCO_3
- Ganzflächiger Schilfbestand ohne Pflegeaufwand
- Keine mechanische Zerstörung des Filterprofils durch höhlengrabende Tiere

Die insgesamt 16 Anlagen, bei denen eine zulaufnahe und zulaufferne Filterbelastung ermittelt werden konnten, sind in Tabelle 5-6 in zwei Kategorien unterteilt (Anlagen mit Beschickung über die lange bzw. über die kurze Seite). Die angeführten Werte der Tabelle 5-6 zeigen, dass die Beschickung über die lange Seite mit großem Abstand eine gleichmäßigere Filterbelastung bewirkt als die Beschickung über die kurze Seite. Zu der gleichen Aussage kam auch die Erhebungsuntersuchung in Baden-Württemberg (Lambert und Fuchs, 2014).

Tabelle 5-6: Verteilung der Feinpartikel auf der Filterfläche

		zulaufnah (n)	zulauffern (f)
		in kg T+U/(m ² *a)	
Nr.	Anlagen mit Beschickung über die lange Seite		
1	Vanikum	0,56	0,53
6	Wermelskirchen	0,88	0,77
14	Madfeld	1,51	0,37
16	Tengern	0,57	0,43
	n = 4 Ø	0,88	0,52 n/f = 1,69
	Anlagen mit Beschickung über die kurze Seite		
2	Glehn	1,68	0,00
3	Kenten	1,59	0,48
4	Erbach-Süd	0,96	0,00
5	Benninghoferweg	3,63	0,92
7	Geilenkirchen	5,28	0,48
8	Frelenberg	5,00	0,38
12	Harwick	0,99	0,04
13	Herongen	2,64	0,00
15	Hille	0,07	0,02
17	Extertal	1,26	0,41
20	Hans-Humpert-Str.	2,16	0,54
22	Altendorf	5,81	0,45
	n = 12 Ø	2,59	0,31 n/f = 8,35

Die Auswirkungen der Art der Filterbeschickung soll im Folgenden an Beispielen geschildert werden.

Die Anlage **Vanikum** wird über die lange Seite des Filters beschickt und besitzt die homogenste Filterbeschickung aller untersuchten Anlagen. In Bild 5-9 ist zu erkennen, dass die homogene Filterbelastung zu einem gleichmäßigen Schilfbestand ohne Gehölze geführt hat. Tierbauten waren zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht vorhanden. Die geringe Filterbelastung von nur 0,54 kg T+U/(m²*a) kann aber dazu führen, dass, wie beim RBF Kenten zu beobachten, der Schilfbestand ausfällt und Tierbauten entstehen. Der homogene Schilfbestand im Juli 2012 kann neben der schnellen Filterbespannung durch die Beschickung über die Längsseite aber auch auf den bis 2011 vorhandenen Teileinstau des Filters zurückzuführen sein.



Bild 5-9: RBF Vanikum: homogener Schilfbestand (Links: zulaufnah; rechts: zulauffern)

Die besonders ausgeprägte Beschickung über die lange Seite der Anlage **Wermelskirchen** (Bild 5-10) kann als Grund für die weitgehend homogene Filterbelastung angesehen werden. Wäre diese schlauchartige Anlage über die kurze Seite beschickt worden, wäre mit großer Sicherheit das zulaufferne Schilf verkümmert. Diese Aussage stützt sich auf Beobachtungen der Anlage Diedesheim in Baden-Württemberg (Lambert und Fuchs, 2014). Aufgrund der Beschickung über die kurze Seite ist dort das zulaufferne Schilf vollständig ausgefallen. Die beiden Anlagen besitzen folgende Kennziffern:

	Wermelskirchen	Diedesheim
Länge (L) in m	172	118
Breite (B) in m	20	24
L/B	8,6	4,9
zulaufnah (n) in kg T+U/m ² *a	0,88	11,4
zulauffern (f) in kg T+U/m ² *a	0,77	2,76
n/f	1,14	4,13
Ø in kg T+U/m ² *a	0,82	7,08

Trotz des größeren L/B-Verhältnisses und der deutlich geringeren Filterbelastung trat bei Wermelskirchen kein Schilfausfall auf und die Filterbelastung war deutlich homogener.



Bild 5-10:Schilfbestand im RBF Wermelskirchen (oben links: zulaufnah; oben rechts: zulauffern)
lange Zulaufrinne mit Steinschüttung als Begrenzung zum Filter (unten)

Um die flächenhafte Sedimentation der sehr langen Anlage Wermelskirchen genauer erfassen zu können, wurden 8 Mischproben über eine Filtertiefe von 0 - 10 cm erstellt (Bild 5-11). Die Proben 1 – 4 werden der zulaufnahen, die Proben 5 – 8 der zulauffernen Filterfläche zugeordnet. Anhand dieser Proben lässt sich die weitgehend gleichmäßige Filterbelastung erkennen. Das Bild zeigt allerdings auch, dass jeweils die zulaufnernen Filterflächen geringer belastet sind. Durch die im Vergleich zur Anlagenlänge geringe Distanz ist dieser Unterschied jedoch klein.



Probe	LD	T+U	T+U	T+U
	in kg TM/l	in M-%	in kg/m ²	in kg/m ² *a
1	1,03	10,5	10,8	0,98
2	1,25	5,4	6,75	0,61
3	1,12	9,9	11,1	1,01
4	1,23	7,8	9,59	0,87
5	1,04	12,2	12,7	1,15
6	1,30	5,5	7,15	0,65
7	1,26	4,5	5,67	0,51
8	1,27	5,6	7,11	0,65

Ausgangsgehalt Jahr 2000: 3,0 M-% T+U, Betriebszeit: 11 Jahre, dargestellt sind die Messwerte abzgl. der Ausgangsgehalte

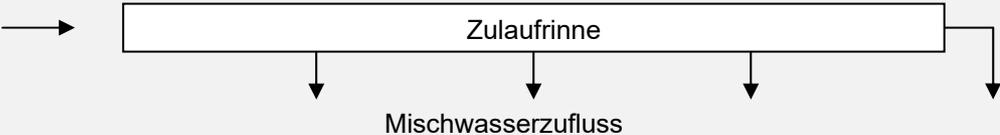
Bild 5-11:RBF Wermelskirchen. Verteilung der Feinpartikel auf der Filterfläche.
Probenahme 08.10.2012, 0 – 10 cm Tiefe

Neben der Querverteilung über die kurze Seite der Anlage ist auch die Längsverteilung über die lange Seite der Anlage sehr gleichmäßig (Tabelle 5-6). So beträgt die Feinpartikelbelastung der zulaufnahen Filterfläche (Probe 1 – 4) durchschnittlich 0,87, die der zulauffernen Filterfläche (Probe 5 – 8) 0,74 kg/(m²*a).

Die Zulaufrinne ist nicht über die gesamte Anlagenlänge ausgebildet. Das Profil 4 (Probe 7+8) liegt außerhalb der Zulaufrinne (Bild 5-11). Erst in diesem Profil findet ein messbarer Abfall der Filterbelastung statt. Entlang der Zulaufrinne kann die Längsverteilung als homogen betrachtet werden. Dies zeigen die ersten 3 Profile der Tabelle 5-7 nicht nur für die

Feinpartikel. Die Tabelle 5-7 zeigt allerdings auch, dass das im Vergleich zu den Feinpartikeln deutlich leichter sedimentierbare CaCO_3 immer noch einen markanten Konzentrationsgradienten aufweist. Dieser Befund belegt, dass CaCO_3 -Partikel auch bei Längsbeschickung nicht gleichmäßig auf der Filterfläche verteilt werden können. Diese zwangsläufig ungleiche CaCO_3 -Verteilung auf der Filteroberfläche hat zu einer erkennbaren pH-Differenzierung geführt (Tabelle 5-7). Dieser eventuell zukünftig stärkerer pH-Abnahme der zulauffernen Sedimentschicht kann nur durch betriebliche Carbonatausbringung begegnet werden.

Tabelle 5-7: RBF-Wermelskirchen, Flächenverteilung der Stoffgehalte in 0 – 10 cm Filtertiefe



Profil	1 (Probe 1, 2)	2 (Probe 3, 4)	3 (Probe 5, 6)	4 (Probe 7, 8)
T+U in M-%	10,9	11,8	11,8	8,0
GV in M-%	3,94	4,39	4,00	2,69
CaCO_3 in M-%	0,99	0,51	0,34	0,39
pH	6,5	6,2	6,0	6,0
Zn in mg/kg	192	191	183	126
Cu in mg/kg	33,8	34,7	33,1	21,2
Pb in mg/kg	47,3	50,2	45,6	30,1

Mittelwerte aus rinnennah und rinnenfern

Die Anlage **Kenten** wird an der kurzen Seite beschickt. Obwohl die mittlere Filterbelastung $1,03 \text{ kg T+U}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ und die zulaufferne noch $0,48 \text{ kg T+U}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ beträgt, kam es bei dieser Anlage nach der Aufgabe des Teileinstaubes im Jahr 2011 zu einer starken Rückentwicklung des Schilfes der zulauffernen Filterhälfte und zur Ausbildung von tiefen Tierhöhlen. Die unter Teileinstaubbedingungen ermittelte zulaufferne Filterbelastung von $0,48 \text{ kg T+U}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ wurde unter trockenfallenden Betriebsbedingungen nicht mehr erreicht. Das ist optisch anhand der Vliesscheiben zu erkennen, die die Sedimentation unmittelbar nach einem großen Regenereignis zeigen (Bild 5-12). Fast die gesamte Feinpartikelfracht wurde zulaufseitig deponiert.



Bild 5-12:RBF-Kenten, Vliesscheibenoberfläche unmittelbar nach einem größeren Beschickungsereignis am 24.12.2011 (links: zulaufnah, rechts: zulauffern)

Auch die Nitratmessungen am Ende der Teileinstauperiode (Mai 2011) zeigen die ungleichmäßige Belastung der Filterfläche an. Im zulaufnahen Bereich sind die Nitratgehalte von Schilfstreu und Filtersubstrat wesentlich höher als im zulauffernen Bereich (Tabelle 5-8). Die sehr starke Rückentwicklung des Schilfes der zulauffernen Filterhälfte muss ursächlich durch eine Abnahme der stofflichen Belastung dieser Fläche entstanden sein, da die hydraulische Filterbelastung von $32 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Tondera et al., 2013) recht hoch ist

Tabelle 5-8: Räumliche Differenzierung der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte im Schilfstreu und im Substrat, RBF Kenten, Probenahme 16.05.2011

Tiefe	zulaufnah	zulauffern
in cm	in mg $\text{NO}_3\text{-N}/100\text{g}$	
Schilfstreu	81,3	37,7
0 – 5	14,4	7,65
5 – 10	2,91	1,77
20 – 30	1,85	1,22

Der zulaufferne Schilfbestand war unter Teileinstaubedingungen zwar weniger üppig als zulaufnah, aber vollständig geschlossen (Bild 5-13 oben). Große Lücken konnten hingegen nach der Aufgabe der Teileinstauens nur zulauffern beobachtet werden (Bild 5-13, unten). Die Schilflücken wurden teilweise durch Brennnessel besiedelt.



Bild 5-13:RBF Kenten, oben links, zulauffern Juli 2008, oben rechts, zulauffern Juli 2012, unten links, zulaufnah Mai 2014, unten rechts, zulauffern Mai 2014

Durch die Schilflücken und die geringe Feinpartikelbelastung kam es zur Verfrachtung der nicht sedimentbeschwerten Schilfstreu. Ablaufseitig konnten an den Böschungen hohe Haufen an Schilfstreu und andererseits blanke Filterfläche ohne Sediment und Streu beobachtet werden (Bild 5-14).



Bild 5-14:RBF-Kenten, verfrachtetes Schilfstreu (links) und teilweise blanke Filteroberflächen (rechts) durch geringe Feinpartikelbelastung

Auswirkungen ungleichmäßiger Feinpartikelverteilung unter trockenfallenden Betriebsbedingungen können allerdings noch bei deutlich höherer Feinpartikelbelastung auftreten. Während bei der Anlage **Benninghoferweg** die zulaufnahe Filterbelastung mit $3,63 \text{ kg T+U/m}^2\cdot\text{a}$ vergleichsweise hoch ist, ist die zulaufferne Feinpartikelbelastung mit $0,92 \text{ kg T+U/m}^2\cdot\text{a}$ deutlich geringer und bewirkt einen kümmerlichen Schilfbestand (Bild 5-15).



Bild 5-15:RBF Benninghoferweg, ungleichmäßige Filterbelastung (links: zulaufnah, rechts: zulauffern)

Bei ähnlich geringer zulaufferner Feinpartikelbelastung (RBF **Hans-Humpert-Str.**: $0,54 \text{ kg T+U}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$) konnte selbst durch Teileinstau kein üppiger Schilfbestand erzielt werden. Auf der Filteroberfläche entwickelte sich eine Moosdecke, die nur bei lückigem Schilf und geringer Feinpartikelbelastung entstehen kann (Bild 5-16). Vermutlich ist Nährstoffmangel die Ursache für den lückigen, ablaufseitigen Schilfbestand des RBF Hans-Humpert-Str..



Bild 5-16:RBF Hans-Humpert-Str., Moosbewuchs auf der Filteroberfläche als Indikator geringer Sedimentfracht

Die Anlage **Harwick** hat durch die quadratische Beetform im Vergleich zu anderen Anlagen mit schmalseitiger Beschickung bessere Bedingungen. Trotz dieses Umstandes ist die Filterflächenbelastung extrem ungleich (zulaufnah: 0,99 kg T+U/m²*a, zulauffern: 0,04 kg T+U/m²*a). Trotz des zwischenzeitlich 5-jährigen Filterbetriebes hat die zulaufferne Filterfläche Schilflücken und eine blanke sandige Filteroberfläche (Bild 5-17). Dieses Beispiel zeigt, dass eine quadratische Beetform mit Beschickungsrinne am Beetrand für die gleichmäßige Filterbelastung nicht ausreichend ist. Erst eine langseitige Beschickung mit länglicher Beetform kann eine Vergleichmäßigung der Filterbelastung bewirken.



Bild 5-17:RBF Harwick, Eine geringe Feinpartikelbelastung ($\bar{\varnothing}$ 0,51 kg T+U/m²*a) und eine quadratische Beetform führt zu sehr ungleicher Belastung der Filterfläche.
Rechts: Schilflücke und fehlendes Sediment der 5-jährigen Beetfläche rechts hinten

Die Ergebnisse von Harwick decken sich mit denen des RBF **Altendorf**. Auch diese Anlage besitzt eine quadratische Beetform. Die zulaufnahe Feinpartikelfracht ist 12,9-fach größer als die zulaufferne. Die sehr unterschiedliche Filterbelastung kann auch an weiteren Parametern ersehen werden (Tabelle 5-9). Neben der Anreicherung von Schadstoffen ist auch die Abreicherung an CaCO_3 stark unterschiedlich (Tabelle 5-9). Aufgrund des fehlenden partikulären Carbonates im Anlagenzulauf, das für die Niederrheinische Bucht typisch ist, und der hohen zulaufseitigen Beschickung fand innerhalb von 6 Betriebsjahren oberflächennah eine deutliche Carbonatabnahme statt (Tabelle 5-9). Zulauffern hingegen war der Carbonatgehalt um 9,6 Mass-% höher. Die ungleiche Carbonatabnahme kann zwar durch eine Längsbeschickung nicht aufgehoben werden, es können hierdurch aber Extreme vermieden werden.

Tabelle 5-9: RBF-Altendorf, Stoffgehalte in 0 – 10 cm Filtertiefe, Probenahme 09.10.2012

	T+U	GV	CaCO_3	Fe	Zn
	in M-%				in mg/kg
zulaufnah	36,7	7,34	18,1	1,03	409
zulauffern	4,2	1,35	27,7	0,23	80,2

5.2.3 Erfassung der Feinpartikelsedimentation über kurze Zeiträume (Vliesscheibenuntersuchung)

Im Unterschied zur Untersuchung des gesamten Bodenfiltersedimentes erlaubt die Vliesscheibenuntersuchung die Erfassung der Feinpartikelbelastung über kurze Zeiträume, da eine sehr geringe Bezugsmasse (Vliesscheibe) verwendet werden kann (vgl. Bild 3-1). Für die auch von Tondera et al. (2013) untersuchten Bodenfilteranlagen Vanikum, Glehn und Kenten wurden Vliesscheiben ausgelegt und zwischen Mai 2011 und Dezember 2012 dreimal beprobt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-10 zusammengestellt und werden mit den Ergebnissen der Feinpartikelbelastung auf der Filterfläche verglichen.

Tabelle 5-10: Feinpartikelsedimentation (T+U) auf Vliesscheiben (Installation der Vliesscheiben 13.05.2011)

Nr	Probenahme	24.12.11	26.05.12	11.07.12	Vlies (05/2011 – 12/2012)	Filterfläche (2005 – 2011)
		kgTM/m ²			kgTM/m ² /a	
1	Vanikum	0,248	0,000	0,138	0,33	0,54
2	Glehn	0,148	0,228	0,020	0,34	0,84
3	Kenten	0,562	0,319	0,107	0,84	1,03

Bezogen auf die gesamte Filterfläche

Die 3 Einzelmessungen zeigen, dass es beim RBF Vanikum im Unterschied zu Glehn und Kenten vom Dezember 2011 bis Mai 2012 zu keiner Beschickung gekommen ist. Nach Auswertungen von Tondera et al. (2013) werden die Anlagen im Jahresmittel ($\bar{\varnothing}$ 2008 - 2010) wie folgt beschickt:

Vanikum	9 x pro a
Glehn	18 x pro a
Kenten	41 x pro a

Die Ergebnisse der Vliesuntersuchung zeigen eine geringere Abhängigkeit zur Beschickungshäufigkeit als die Gesamtflächenuntersuchung (Tabelle 5-10). Ob tatsächlich im Zeitraum von 05/2011 bis 12/2012 bei der Anlage Glehn eine geringere Feinpartikelbelastung stattgefunden hat, wie die Vliesuntersuchung anzeigt, kann nicht sicher beurteilt werden, da von Glehn keine unabhängige Vergleichsmessung für diesen Zeitraum vorliegt. Da der Betreuungsaufwand für die Vliesscheibenbeprobung sehr hoch ist und die zeitliche kurze Auflösung der Feinpartikelbelastung für Routineuntersuchungen nicht notwendig ist, sollte diese Untersuchung nur für Sonderzwecke angewendet werden. Die Ganzflächenbeprobung ist hingegen deutlich aufwandärmer und liefert durch hohe zeitliche und räumliche Integration zuverlässigere Ergebnisse.

5.2.4 Weitere Indikatoren der Filterbelastung

Neben der Abschätzung der Filterbelastung über die Feinpartikel kann die Filterbelastung bedingt auch über andere Indikatoren abgeleitet werden. Diese nachfolgend beschriebenen Indikatoren sind allerdings nicht so aussagekräftig und sollten deshalb nur als Zusatzinformation zur Feinpartikelbelastung genutzt werden:

Nitratgehalt des Filtermaterials

Am Beispiel der drei Bodenfilter Vanikum, Glehn und Kenten soll der Zusammenhang zwischen Filterbelastung und Nitratgehalt geschildert werden.

Das nach der Beschickung sich bildende Nitrat ist neben der NH_4 -Zulaufkonzentration auch vom organischen N-Gehalt der Feinpartikel der Sedimentschicht abhängig. In Tabelle 5-11 sind die Nitratgehalte der oberen 10 cm der Filterprofile aufgeführt.

Tabelle 5-11: NO₃-N-Gehalte als Indikator für die Filterbelastung

Tiefe	zulaufnah	zulauffern	Ø	Ø
in cm	in mg NO ₃ -N/100g			T+U in kg/(m ² A _F *a)
Vanikum, Probenahme 13.05.2011				
0 – 2	4,79	5,05	4,92	
5 – 10	0,49	0,41	0,45	
Ø	2,64	2,73	2,68	0,54
Glehn, Probenahme 13.05.2011				
0 – 5	15,0	1,91	8,45	
5 – 10	1,95	1,15	1,55	
Ø	8,47	1,53	5,00	0,84
Kenten, Probenahme 16.05.2011				
0 – 5	14,4	7,65	11,0	
5 – 10	2,91	1,77	2,34	
Ø	8,65	4,71	6,67	1,03

Aus der vertikalen Gehaltsverteilung ist zu erkennen, dass das Sediment wesentlichen Anteil an der Nitratbildung besitzt. In der obersten Schichten 0 - 2 bzw. 2 – 5 cm war der Nitratgehalt im Durchschnitt der 3 Anlagen mit 9,12 mg NO₃-N/100 g wesentlich höher als in der tieferen Schicht 5 - 10 cm. Zwischen den Anlagen kann eine Zunahme der Nitratgehalte (Vanikum < Glehn < Kenten) festgestellt werden. Die Differenzierung zwischen den Anlagen (Anlagendurchschnitt) ist weitgehend mit der der Feinpartikel vergleichbar.

Nach den vorliegenden Messungen kann der Nitratgehalt als Begleitinformation für die Anlagenbelastung verwendet werden. Im Nitratgehalt ist im Unterschied zur Feinpartikelbelastung auch die NH₄-N-Belastung mit enthalten. Die angeführten Messwerte deuten darauf hin, dass die Feinpartikel- und Ammoniumbelastung bei den 3 Anlagen weitgehend parallel verläuft.

P-Gehalt des Dränablaufes

Ein P-Rückhalt von Retentionsbodenfiltern ohne speziell für den P-Rückhalt melioriertes Filtermaterial findet nur in den ersten Betriebsjahren statt. Mit dem Betriebsalter einer Anlage steigt die P-Belegung des Filtersubstrates bis in tiefere Filterschichten und damit auch die Dränablaufkonzentration an. Der Anstieg der P-Dränablaufkonzentration ist von der der P-Zufuhr und damit von der Filterbelastung abhängig. Der Vergleich der Dränablaufkonzentrationen der Anlagen Vanikum, Glehn und Kenten zeigt (Tabelle 5-12), dass der P-Gehalt des Dränablaufes prinzipiell ein sensibler Indikator der Anlagenbelastung ist. Eine Anlagen-Differenzierung ist allerdings nur möglich, wenn noch keine P-Sättigung des Filtermaterials eingetreten ist. Bei P-Sättigung dürften alle Anlagen weitgehend gleiche P-Dränablaufkonzentration besitzen, die sich nur noch durch unterschiedliche Zulaufkonzentrationen voneinander unterscheiden.

Tabelle 5-12: Feinpartikeldepot und P_{ges} -Dränablaufgehalt

		Feinpartikeldepot	Dränablauf ¹
	Zeitraum	2005 – 2012	2011 – 2012
Nr.		in $kgT*U/m^2_{AF}$	in $mg P_{ges}/l$
1	Vanikum	3,24	0,018
2	Glehn	4,20	0,767
3	Kenten	6,18	1,560

1: 3 Stichproben je Anlage: 13.05.11, 26.05.12, 11.07.12

Aus der Tabelle 5-12 lässt sich erkennen, dass zwischen Feinpartikeldepot und P-Dränablaufkonzentration ein Zusammenhang besteht. Dieser Zusammenhang ist nicht linear, sondern mit zunehmendem Depot steigt die Dränablaufkonzentration stark an, bis die Zulaufkonzentration erreicht wird (P-Sättigung).

In Bild 5-18 sind 11 Anlagen angeführt, bei denen Dränablaufstichproben vorliegen. Obwohl nur 1 - 3 Stichproben pro Anlage gemessen wurden, ist ein Zusammenhang zwischen Feinpartikelbelastung und P-Gehalt des Dränablaufes erkennbar. Es kann nach bisherigem Kenntnisstand nicht beurteilt werden, ob die von den anderen Anlagen stark abweichende Beziehung der Anlage Geilenkirchen durch eine geringe P-Zulaufkonzentration erklärt werden kann.

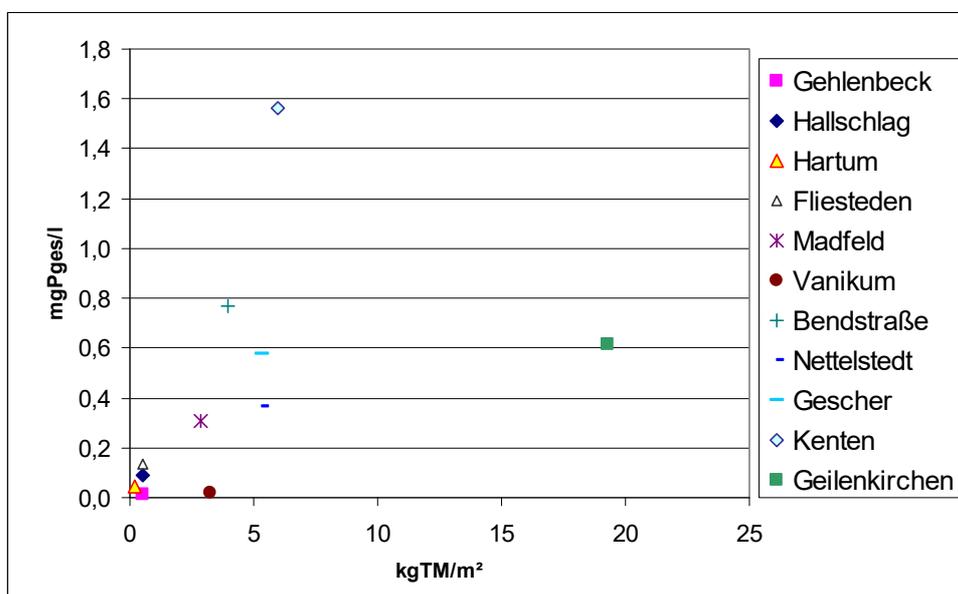


Bild 5-18: Feinpartikelbelastung und P-Gehalt des Dränablaufes von Mischwasserfiltern

Aufgrund des geringen Aufwandes für eine Stichprobenuntersuchung und der geringen zeitlichen Gehaltsschwankung kann der Dränablauf als Begleitinformation für die Anlagenbelastung genutzt werden.

5.2.5 Sekundärfilterbildung

Im Laufe der Betriebszeit entsteht auf der Filteroberfläche von Retentionsbodenfiltern durch den Eintrag von Feststoffen eine Sedimentschicht, die wie ein Sekundärfilter wirkt.

Dieser Sekundärfilter beeinflusst insbesondere bei höher belasteten und alten Anlagen die Filterleistung. Da die Belastung der untersuchten Anlagen gering war, können zum Einfluss der Sekundärfilterbildung nur in geringem Umfang Untersuchungen vorgestellt werden. Zu folgenden Themen werden Aussagen getroffen:

- Lagerungsdichte und hydraulische Leitfähigkeit
- Sedimentbildung und Bioturbation
- Mineralisierung der organischen Sedimentmasse
- Wasserspeicherefähigkeit des Sedimentes

Lagerungsdichte und hydraulische Leitfähigkeit

Durch den Eintrag von T+U-Partikeln mit dem Niederschlagsabfluss müsste im Laufe der Zeit eine deutliche Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit einhergehen. Nur bei einem der untersuchten Bodenfilter ist eine Kolmation aufgetreten, die zur zeitweiligen Außerbetriebnahme des Filters geführt hat (Grotehusmann/Kasting, 2011). Bedingt durch die Filterbetriebsweise (vgl. Kapitel 5.6) mit langanhaltenden Zuflüssen ohne ausreichende Trockenpausen hat sich auf der Filteroberfläche ein plattiges Sediment gebildet, das zur Kolmation geführt hat.

Von der großen Zahl der untersuchten und nicht kolmatierten Anlagen, liegen allerdings keine k_f -Messungen vor, anhand derer die hydraulische Filterleistung beurteilt werden kann. Es wird bisher davon ausgegangen, dass bei diesen trockenfallenden Anlagen kein negativer Zusammenhang zwischen Feinpartikelbelastung und k_f -Wert besteht. Durch die Feinpartikelstrukturierung können Sedimentschichten sogar höhere k_f -Werte besitzen als die hydraulische Ausgangsleitfähigkeit der sandigen Primärfilterschicht.

Unter den trockenfallenden Filterbedingungen kann der negative Zusammenhang zwischen dem Glühverlust der Feinpartikel und der Lagerungsdichte als Hilfsgröße für den k_f -Wert verwendet werden. Die in Tabelle 5-13 angeführten Messungen zeigen, dass mit zunehmendem Glühverlust die Lagerungsdichte abnimmt. Durch die Strukturierung der Feinpartikel kann davon ausgegangen werden, dass die Abnahme der Lagerungsdichte zur Zunahme großer, wasserleitender Poren führt, die für eine Zunahme des k_f -Wertes verantwortlich ist.

Tabelle 5-13: Glühverluste und Lagerungsdichten (LD) der obersten Filterschicht (0 – 10 cm) von RBF-Bodenfiltern in NRW

	RBF		GV in M-%		LD in kg TM/l	
			zulaufnah	zulauffern	zulaufnah	zulauffern
6	Wermelskirchen	MS	4,48	3,04	1,11	1,26
7	Geilenkirchen	MS	9,49	3,80	0,88	1,15
16	Tengern	MS	1,67	1,41	1,30	1,30
17	Extertal	MS	3,03	1,13	1,15	1,33
22	Altendorf	MS	7,34	1,35	0,97	1,32
27	Graf Zeppelin	S	2,17	0,98	1,29	1,46

MS: Mischsystem

S. Straße

Wermelskirchen: „zulaufnah“ Probe 1, 3, 5, 7

„zulauffern“ Probe 2, 4, 6, 8

Auch wenn bei mächtiger Sekundärfilterschicht, wie zulaufnah in Geilenkirchen, eine Teildurchmischung des sandigen Primärfilters durch Bodenwürmer stattfindet, dürften daraus keine hydraulischen Kurzschlüsse entstehen, die die stoffliche Filterleistung mindern. Die zoogene Bioturbation dürfte hingegen, wie die Schilfpflanze auch, dazu beitragen, dass das obere Filterprofil hydraulisch durchlässig bleibt.

Sedimentbildung und Bioturbation

Am Beispiel des Bodenfilters Geilenkirchen wird die Wirkung der Bioturbation durch Bodenwürmer deutlich. Diese trägt zur Aufrechterhaltung der hydraulischen Filterleistung bei. Die Sedimenteigenschaften des RBF Geilenkirchen sind in Tabelle 5-14 dargestellt. Das Bild 5-19 zeigt ein Foto des zulaufnahen Sedimentes.

Tabelle 5-14: RBF-Geilenkirchen, Eigenschaften des Sedimentes, Probenahme 22.05.2012

Entfernung Zulauf in m	0 – 10	20 – 50	60 – 70
Optische Sedimenthöhe in cm	21,6	12,6	8,8
T+U in M-%	37,3	19,8	6,3
GV in M-%	9,49	7,84	3,80
CaCO ₃ in M-%	0,39	0,2	
pH	5,4	5,2	
T+U-Eintrag in kg/m ²	71,9	23,5	5,6

Messwerte beziehen sich auf 0 – 10 cm Tiefe.

T+U-Eintrag bezieht sich auf optische Sedimenthöhe.

Der Ausgangsgehalt an T+U des Filtermaterials von 1 M-% wurde bei der Berechnung des Eintrages abgezogen



Bild 5-19:RBF Geilenkirchen, zulaufnahes Sediment, Bioturbation durch Bodenwürmer

An der zulaufnahen Filterfläche mit einer optisch erkennbaren Sedimenthöhe von ca. 22 cm muss eine Einmischung von Filtersand in die Sedimentschicht stattgefunden haben. Es ist mit hoher Sicherheit davon auszugehen, dass das eingetragene Sediment zu über 90 % aus Feinpartikeln (T+U) bestand. In der ca. 22 cm mächtigen Sedimentschicht beträgt der Feinpartikelgehalt hingegen nur 37,3 %. Der hohe Sandanteil von ca. 63 % lässt sich durch die zoogene Einmischung von Filtersand erklären. Vergleichbare Sandeinmischungen in die Sedimentschicht konnten auch bei den höher belasteten baden-württembergischen Mischwasserfiltern Diedesheim und Limbach festgestellt werden.

Es stellt sich die Frage, ob durch die Bioturbation nicht nur Sand in das Sediment, sondern auch Sediment in das Filtermaterial gelangt. Tabelle 5-15 zeigt die zulaufnahen Profilgehalte des Filtermaterials des RBF Geilenkirchen. Insbesondere die hohen Gehalte von T+U, GV, Fe, Al, P und Zn in der zulaufnahen Teilfläche der Filterschicht 30 - 45 cm deuten darauf hin, dass eine biogene Feinpartikeleinmischung in tiefere Filterschichten stattgefunden hat. Die zulaufferne Schicht 20 - 40 cm besitzt demgegenüber deutlich geringere Gehalte.

Tabelle 5-15: RBF Geilenkirchen, Gehalte des Filtermaterials

Tiefe		T+U	GV	Fe	Al	P	Zn
in cm		in M-%		in g/kg		in mg/kg	
0 – 15	zulaufnah	1,2	0,55	2,57	1,08	0,15	22,4
15 – 30	zulaufnah	3,6	0,45	2,32	1,12	0,11	21,0
30 – 45	zulaufnah	4,0	0,66	3,63	1,47	0,17	32,9
20 – 40	zulauffern	1,0	0,23	1,32	0,69	0,07	10,3

zulaufnah, Probenahme 06.07.2011

zulauffern, Probenahme 22.05.2012

Als weiteren Vergleich sind in Tabelle 5-16 die T+U-Gehalte von Anlagen aufgeführt, die aufgrund der geringen Sedimentmächtigkeit keine oder eine sehr geringe Bioturbation aufweisen. Das Filtermaterial dieser Anlagen zeigt keine T+U-Gehaltszunahme mit der Filtertiefe, wie sie zulaufnah beim RBF Geilenkirchen festgestellt wurde.

Tabelle 5-16: Profilagehalte des Feinkornanteiles nach mehreren Betriebsjahren, Mai 2011 (Ausgangsgehalte Filtersubstrat siehe Tabelle 5-1)

	zulaufnah	zulauffern	zulaufnah	zulauffern
in cm	T+U in %			
Tiefe	Benninghoferweg		Herongen	
0 – 5	80,8	15,4	25,2	2,3
5 – 10	1,8	1,2	4,7	2,1
10 – 15	0,8	1,0	6,9	2,6
15 – 30	0,8	0,8	5,8	2,2
Tiefe	Harwick		Madfeld	
0 – 5	7,6	1,3	2,7	3,0
5 – 10	0,8	1,1	3,4	4,5
10 – 15	0,5	1,3	3,2	4,9
15 – 30	0,4	1,0	3,5	5,3

Mineralisierung der organischen Sedimentmasse

Die Mineralisierung des organischen Anteils der Sedimente geht mit biogener Säureproduktion einher, wie anhand der CaCO_3 -Gehalte der Sedimente zu sehen ist. Während das RÜB Sediment der Anlage Geilenkirchen 2,11 % CaCO_3 aufweist und einen pH-Wert von 6,1 besitzt, sind es im zulaufnahen Sediment auf dem Filter nur noch 0,39 % CaCO_3 und der pH-Wert ist auf 5,4 abgesunken (vgl. Tabelle 5-14). Durch die Mineralisierung besteht daher die Notwendigkeit, die hohe Säureproduktion durch festes Carbonat zu puffern. Die Carbonatzugabe auf die Sedimentoberfläche dürfte für den Großteil der Anlagen in NRW notwendig sein, da nur in wenigen Fällen hohe CaCO_3 -Gehalte im Anlagenzulauf auftreten.

Wasserspeicherfähigkeit des Sedimentes

Durch den hohen Feinporenanteil des Sedimentes ist die Wasserspeicherfähigkeit gegenüber dem sandigen Filtersubstrat deutlich höher. Zum einen wird dadurch die Wasserversorgung des Schilfs verbessert und zum anderen kann dadurch auch mehr gelöstes Nitrat und auch mehr gelöstes Carbonat im Sediment gehalten werden. Das ist anhand der Nitratkonzentrationen im Sediment und den tieferen Filterschichten von drei Bodenfilteranlagen gut zu erkennen (Tabelle 5-17).

Tabelle 5-17: Verteilung der vertikalen NO₃-N-Gehalte in zulaufnahen Filterprofilen

Nettelstedt 05.07.2011		Harwick 21.05.2011		Benninghoferweg 17.05.2011	
Tiefe in cm	NO ₃ -N in mg/100g	Tiefe in cm	NO ₃ -N in mg/100g	Tiefe in cm	NO ₃ -N in mg/100g
0 – 3	52,8	0 – 5	7,48	0 – 5	5,69
3 – 15	0,72	5 – 10	0,70	5 – 10	0,14
15 – 30	0,54	10 – 15	0,59	10 – 15	0,09
30 – 60	0,23	15 – 30	0,52	15 – 30	0,06

Durch die höhere Speicherfähigkeit für gelöstes Zulaufcarbonat wird der Verbrauch an festem Carbonat verringert. Die hohe Wasserspeicherfähigkeit des Sedimentes bewirkt eine Abnahme des Neutralisationsbedarfes an festem Carbonat.

5.3 Carbonatdepot

Aus der Erhebungsuntersuchung 2000 (Bofitec, 2001) ist bekannt, dass die Sedimente, wie auch die Filtermaterialien in NRW, von wenigen Ausnahmen abgesehen, geringe oder keine Carbonatgehalte besitzen. Eine hohe partikuläre Carbonatzufuhr über den Zufluss ist in den RBF von NRW deshalb nicht zu erwarten. Die ersten Filteranlagen mit Sandsubstrat wurden ohne oder mit sehr geringen Carbonatgehalt errichtet. Anhand dieser alten Anlagen sollte geprüft werden, welche Auswirkungen das fehlende Carbonat im Filtermaterial hat. Das Filtermaterial der neueren Filteranlagen wurde mit Carbonatbrechsand versetzt. Bei diesen Anlagen sollte geprüft werden, welchen Umfang der Carbonatverbrauch einnimmt.

Die Filtersedimente können durch die höhere Wasserspeicherfähigkeit als das Filtermaterial nicht nur in höherem Umfang gelöstes Carbonat speichern, sie sind durch die hohe Mineralisation auch Orte starken Carbonatverbrauches. Zum Carbonatverbrauch von Filtersedimenten sollen deshalb Messergebnisse angeführt werden.

Carbonatzufuhr über den Zulauf

Die Carbonatzufuhr über das Sediment soll anhand der Carbonatgehalte der Sedimente erläutert werden.

Im Bereich der untersuchten Mischsystem-Anlagen besitzen die Sedimente der Anlagen Madfeld, Benninghoferweg und Harwick höhere Carbonatgehalte. Die restlichen Mischwassersedimente haben einen unbedeutenden Carbonatgehalt (Tabelle 5-18). Die hohen Carbonatgehalte sind durch das Einzugsgebiet, insbesondere die Carbonatgehalte der Straßendecken bedingt. Der hohe CaCO₃-Gehalt von 18,4 % der Anlage Vanikum (Tabelle 5-18) entspricht nicht dem originären Mischwassersediment, sondern ist durch den Carbonatschotter der Fläche vor dem Filterbeet bedingt. Dieser hohe Gehalt zeigt indirekt an, dass die Aufbringung einer Carbonatdecklage auf die Filterfläche eine relevante Carbonatzufuhr ins Sediment verursacht. Ohne den Carbonatschotter wäre das Vorsediment

der Anlage Vanikum weitgehend carbonatfrei. Bei allen bisherigen Sedimentuntersuchungen im Gebiet der niederrheinischen Bucht konnten keine relevanten Carbonatgehalte gemessen werden (Bofitec, 2001).

Tabelle 5-18: Carbonatgehalte von Anlagensedimenten

Nr.	Anlage	Lage	System	Probenahme	CaCO ₃	pH	GV
					in M-%		in M-%
1	Vanikum	Z	MS	13.05.2011	18,4	7,2	7,7
4	Erbach-Süd	Z	MS	17.05.2011	0,24	6,6	7,4
5	Benninghoferweg	F, n	MS	17.05.2011	11,1	7,0	20,6
7	Geilenkirchen	V	MS	06.07.2011	2,1	6,1	35,9
8	Frelenberg	F	MS	10.10.2012	0,39	5,1	28,8
11	Alsdorf	Z	MS	16.05.2011	1,7	6,4	21,3
12	Harwick	Z	MS	21.05.2011	7,1	6,5	30,8
13	Herongen	Z	MS	18.05.2011	0,89	6,3	18,3
14	Madfeld	Z	MS	20.05.2011	13,0	6,6	32,2
22	Altendorf	Z	MS	09.10.2012	0,86	6,0	21,4
22	A 3.4	V	S	06.07.2011	13,7	7,1	15,4
26	Glessen	V	TS	14.05.2011	0,79	6,1	28,7
30	A 3.1	Z	S	19.05.2011	3,6	7,0	24,2
36	A 1.1	V	S	04.07.2011	2,1	7,3	12,7
37	A 1.2	Z	S	04.07.2011	4,7	7,7	14,7

Lage: Z = Zulaufbereich, V = Vorstufe, F = Filtersediment, n = zulaufnah
System: MS = Mischsystem, TS = Trennsystem, S = Straße

Bei den Straßensedimenten konnten in der Erhebungsuntersuchung des Jahres 2000 (Bofitec, 2001) 3 - 10 M-% CaCO₃ gemessen werden. In der hier vorliegenden Erhebungsuntersuchung wurde eine Spannweite von 2 - 14 M-% CaCO₃ ermittelt. Der systematischen Nutzung des zulaufbürtigen CaCO₃ steht neben der unkalkulierbaren Konzentrationsspannweite die sehr starke Konzentrationsabnahme entlang des Fließweges entgegen. Die höhere Absetzbarkeit des Carbonates gegenüber den restlichen Feinpartikel gilt sowohl für Mischwasser- wie Straßensedimente (Lambert/Fuchs, 2014). Für die Sedimente der Straßenanlage A3.1 ist die Abnahme des Carbonatgehaltes mit zunehmendem Fließweg in Tabelle 5-19 beispielhaft illustriert.

Tabelle 5-19: Abnahme des CaCO₃-Gehaltes der Sedimente entlang des Fließweges, RBF Köln-Ost, Westseite, A 3.1, 19.05.2011

Ort	Zulaufkanal	Vorstufe, zulauffern	Zulaufrinne RBF, zulauffern
CaCO ₃ in M-%	3,65	2,75	0,36
pH	7,0	7,2	6,2
GV in M-%	24,2	18,0	35,3

Dieses Beispiel zeigt, dass im Filtersediment zwar ein hoher Anteil an organischer Substanz vorhanden ist (GV: 35,3 M-%), dass der Carbonatgehalt mit 0,36 M-% unbedeutend ist. Für die Carbonatversorgung von Filterflächen über das Sediment ist somit nicht nur die ungleiche Sedimentverteilung, sondern die selektive Sedimentation des CaCO_3 bedeutsam. Die Nutzung des Sediment- CaCO_3 für eine zentrale Filteranlage mit langen Absetzwegen ist deshalb nur in Einzelfällen möglich.

Hingegen kann aufgrund der kurzen Fließwege das Sedimentcarbonat bei der Bankett- und Muldenfiltration eine generelle Bedeutung besitzen. Der Vergleich an der Autobahn A 3.1 vom Sediment der zentralen Filteranlage mit dem Bankettsediment in dessen Einzugsgebiet bestätigt diese Aussage. Das Filtersediment der zentralen Anlage hatte 0,36 M-% CaCO_3 , hingegen betrug der Carbonatgehalt des Bankettsedimentes 3,99 M-%. Nach bisherigem Kenntnisstand sollte die eventuelle partikuläre Carbonatzufuhr bei zentralen Anlagen nicht berücksichtigt werden. Die Carbonatausstattung durch das Filtermaterial und die Decklage sollte unabhängig von dieser Zufuhr bemessen werden.

Basenstatus bei ursprünglich CaCO_3 -freiem Filtermaterial

Bei den 3 alten RBF Erbach-Süd, Geilenkirchen und Benninghoferweg war zu Betriebsbeginn keine CaCO_3 im eingebauten Filtermaterial. Es sollte deshalb geprüft werden, welche Auswirkungen das Fehlen von Carbonat im Filtermaterial hat.

Bei diesen 3 Anlagen wurden im Jahr 2000 (MUNLV, 2001) und in dieser Untersuchung die CaCO_3 -Gehalte der Mischwassersedimente vor der Filterfläche bestimmt:

Untersuchungstermin	2000	2011
	CaCO_3 in M-%	
Erbach-Süd	0,00	0,24
Geilenkirchen	0,00	2,11
Benninghoferweg	12,4	11,1 ¹

¹ zulaufnahe Filterfläche

Hieraus lässt sich ersehen, dass beim Benninghoferweg ein relevanter CaCO_3 -Eintrag über das Sediment stattfindet, bei Erbach-Süd und Geilenkirchen ist dieser Eintrag hingegen unbedeutend. Dieser CaCO_3 -Eintrag wirkt sich am Benninghoferweg auch zulauffern aus. Ein Absinken des oberflächennahen pH-Wertes wie bei Geilenkirchen (pH: 5,3) trat trotz der höheren Filterbelastung nicht auf (Tabelle 5-20). Beim Benninghoferweg wird die gesamte Filterfläche durch das Carbonat des Sedimentes auf einem hohen pH-Niveau gehalten (7,0 - 7,6). Die hohen CaCO_3 -Ausgangsgehalte des Sedimentes und die Carbonatzufuhr auch der zulauffernen Filterfläche dürften hierfür notwendige Voraussetzungen sein. Die hohen CaCO_3 -Gehalte des Mischwassersedimentes können für NRW als Ausnahme gewertet werden. Die möglichst gleichmäßige Filterbelastung und damit eine auch zulaufferne Carbonatzufuhr kann bei Neuanlagen zukünftig u.a. durch die Langseitenbeschickung erhöht werden. Die Benninghofer Bedingungen (Carbonatversorgung über das Sediment) können beim Bau eines Retentionsbodenfilters allerdings nur in Einzelfällen vorausgesetzt werden (hoher CaCO_3 -Gehalt).

Beim Filter Geilenkirchen fand durch die geringe Carbonatzufuhr via Sediment sowohl zulaufnah (hohe Belastung: 5,28 kg T+U/m²*a) wie auch zulauffern (geringe Belastung 0,48 kg T+U/m²*a) ein starker Abfall des pH in der Sedimentschicht statt (Tabelle 5-20). Hingegen blieb das pH des sandigen Filtermaterialies auf einem hohen Niveau:

	zulaufnah	zulauffern
	pH-Wert	
Sediment	5,4	5,3
Filtermaterial	7,4	6,6

Die angeführten Ergebnisse deuten darauf hin, dass keine belastungsabhängige pH-Absenkung erfolgte ist, und dass hauptsächlich die Sedimentschicht der Ort hoher biogener Säureproduktion ist. Der Carbonatversorgung des Sedimentes kommt hierdurch eine große Bedeutung zu.

Die vorgenommenen Messungen zeigen keine negative Abhängigkeit des Filtermaterial-pH von der Feinpartikelbelastung. Auch beim pH des Sedimentes scheint diese Abhängigkeit zu fehlen, wie der Vergleich „zulaufnah“ mit „zulauffern“ der 3 Anlagen vermuten lässt (Tabelle 5-20). Beim Filtermaterial scheint eher ein positiver Zusammenhang zwischen Belastung und pH zu existieren, wie der pH-Vergleich von zulaufnah (Geilenkirchen) mit zulauffern (Erbach-Süd) in Tabelle 5-21 zeigt. Es ist zu vermuten, dass die hohen pH-Werte des Filtermaterialies bei hoher Belastung durch die Speicherung von gelöstem Carbonat im mächtigen Filtersediment verursacht werden. Das Sediment bewirkt trotz tiefer pH-Werte eine pH-Stabilisierung des Filtermaterialies. Mischwasser-Säulenversuche ohne Sediment und ohne CaCO₃ im Filtermaterial (Quarzsand) zeigten hingegen einen starken pH-Abfall im Filtermaterial auf pH 4,7 (Lambert, 2004).

Die Sedimenträumung kann insbesondere unter den carbonatarmen Bedingungen in Geilenkirchen zu einer Versauerung des Filtermaterialies führen.

Tabelle 5-20: Basenstatus von alten Mischwasserfiltern ohne CaCO₃ im Filtermaterial bei Betriebsbeginn

Tiefe ¹ in cm	zulaufnah		zulauffern	
	CaCO ₃ in M-%	pH	CaCO ₃ in M-%	pH
Erbach-Süd: T+U in kg/m ² *a	0,96		0,00	
0 – 5, Sed+FiM	0,12	6,0	0,58	6,3
15 – 30	0,12	6,9	0,19	6,8
Geilenkirchen: T+U in kg/m ² *a	5,28		0,48	
0 – 10, Sed+FiM	0,39	5,4	0,17	5,3
Benninghoferweg: T+U in kg/m ² *a	3,63		0,92	
0 – 5, Sed+FiM	11,1	7,0	1,28	7,1
5 – 10, FiM	0,21	7,1	0,10	7,3
10 – 15, FiM	0,18	7,2	0,14	7,3
15 – 30, FiM	0,19	7,5	0,21	7,6

¹ Bezogen auf aktuelle Filteroberfläche

Erbach-Süd: Inbetriebnahme 1995, Probenahme 17.05.2011

Geilenkirchen: Inbetriebnahme 1998, Probenahme 22.05.2012

Benninghoferweg: Inbetriebnahme 2000, Probenahme 17.05.2011

Sed: Sediment

FiM: Filtermaterial

Tabelle 5-21: Profilgehalte von CaCO₃ und pH des Filtermaterials von Erbach-Süd und Geilenkirchen

Erbach-Süd			Geilenkirchen		
Tiefe in cm	CaCO ₃ in M-%	pH	Tiefe in cm	CaCO ₃ in M-%	pH
0 – 5	0,58	6,3	0 – 15	0,86	7,7
5 – 15	0,14	6,4	15 – 30	0,36	7,2
15 – 30	0,13	6,3	30 – 45	0,78	7,3
30 – 60	0,08	6,4			
60 – 90	0,11	6,3			

Erbach-Süd, zulauffern

Geilenkirchen, zulaufnah

Carbonatverbrauch bei carbonathaltigem Filtermaterial

Anhand der Anlagen Vanikum, Glehn, Kenten, die hohe CaCO₃-Gehalte zu Betriebsbeginn aufwiesen, soll abgeschätzt werden, in welchem Umfang Carbonatverbrauch auftritt. Durch den fehlenden Carbonateintrag über das Sediment ist diese Abschätzung sicherer möglich. Der ermittelte Carbonatverbrauch schwankt in Abhängigkeit der Filterbelastung in extremer Form (Tabelle 5-22).

Tabelle 5-22: Carbonatverbrauch (CaCO_3) von Mischwasser-RBF nach 6 Betriebsjahren

	Vorrat		Verbrauch	
	in M-%	in kg/m^2	in kg/m^2	
			zulaufnah	zulauffern
Vanikum	27	121,5	1,86	0,00
Glehn	24	108,0	7,65	1,80
Kenten	32	144,0	84,9	7,45

Vorrat bezogen auf die Filterschicht 0 – 30 cm

Vergleicht man die in dieser Untersuchung ermittelten Werte mit denen der badenwürttembergischen Erhebungsuntersuchung (Tabelle 5-23), so entspricht der Carbonatverbrauch im Mittelwert und in der Wertespanne den Anlagen mit oberrheinischen Filtermaterialien. Hingegen sind Mittelwert und Wertespanne der oberschwäbischen Filtermaterialien deutlich geringer. Die bisherige Erklärung hierfür wird in der größeren Körnung der oberschwäbischen Carbonate gesehen (Lambert/Fuchs, 2014).

Tabelle 5-23: Vergleich des Carbonatverbrauches im Filtermaterial

	zulaufnah			zulauffern		
	Ø	min	max	Ø	min	max
Diese Untersuchung, n = 3, Vanikum, Glehn, Kenten						
T+U in $\text{kg/m}^{2*\text{a}}$	1,23	0,56	1,60	0,33	0,00	0,54
CaCO_3 in $\text{kg/m}^{2*\text{a}}$	5,24	0,31	14,1	0,51	0,00	1,24
Nach (Lambert/Fuchs, 2014), Oberrheinisches FiM, n = 6						
T+U in $\text{kg/m}^{2*\text{a}}$	4,51	1,30	11,4	1,01	0,02	2,76
CaCO_3 in $\text{kg/m}^{2*\text{a}}$	4,10	0,13	12,3	3,09	0,13	7,75
Nach (Lambert/Fuchs, 2014) Oberschwäbisches FiM, n = 6						
T+U in $\text{kg/m}^{2*\text{a}}$	5,19	1,36	8,89	2,74	0,17	8,50
CaCO_3 in $\text{kg/m}^{2*\text{a}}$	0,83	0,28	1,42	0,38	0,13	0,67

Andererseits zeigt der Vergleich des Carbonatverbrauches von „zulaufnah“ mit „zulauffern“ (Tabelle 5-23), dass zulaufnah ein höherer Carbonatverbrauch vorliegt. Es ist davon auszugehen, dass mit Zunahme der Sedimentmächtigkeit und der CaCO_3 -Gehalte der Sedimente sich der Verbrauch zwischen den beiden Filterpositionen angleicht.

Der Carbonatreaktivität kommt aufgrund der angeführten Ergebnisse eine Schlüsselrolle bei der Bemessung des Carbonatvorrates des Filtermaterialies zu. Eine gleichmäßige Filterbelastung ist ebenfalls von Bedeutung. Die partikuläre Filterbelastung dürfte nach Tabelle 5-23 hingegen keinen relevanten Einfluss auf den Carbonatverbrauch ausüben. Die bisherigen Messungen zeigen nach Bild 5-20 keinen erkennbaren Zusammenhang von T+U-Belastungen und Carbonatverbrauch.

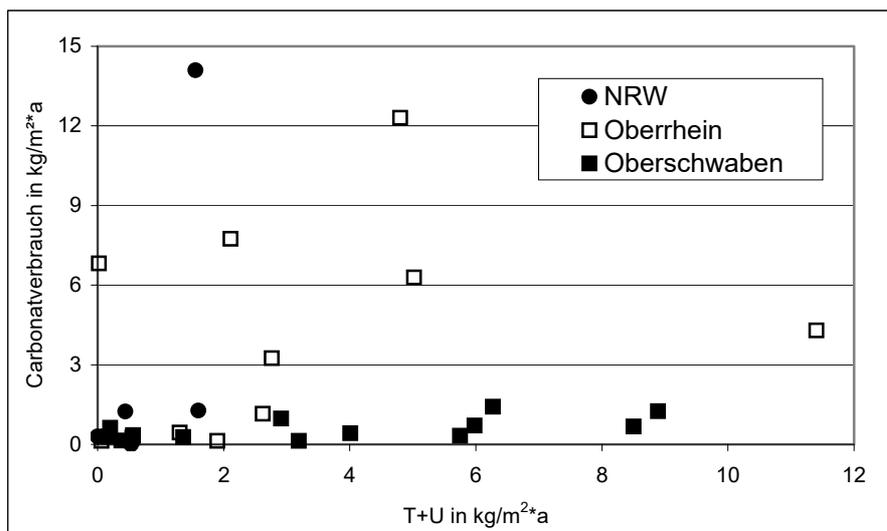


Bild 5-20: T+U-Belastung und Carbonatverbrauch

Carbonatverbrauch der Sedimente

Bei Filtern mit einer Sedimentschicht ist von Interesse, in welchem Umfang es zum Carbonatverbrauch in der stark durch Langzeitmineralisierung geprägten Sedimentschicht kommt und ob dieser Carbonatverbrauch durch externe Carbonatzufuhr (Carbonatdecklage, betriebliche Carbonatausbringung) kompensiert werden muss. Die pH-Abnahme im Sediment des RBF Geilenkirchen auf pH 5,3 zeigt an, dass es im Sediment zu einer hohen biogenen Säureproduktion kommt.

Anhand der hohen Sedimentschichten von 20 cm konnte beim RBF Fritz-Reuter Str. in Solingen eine getrennte Beprobung der jüngeren (0 - 10 cm) und der älteren (10 - 20 cm) Sedimentschicht vorgenommen werden (Tabelle 5-24). Durch das carbonatarmer Filtermaterial konnte ausgeschlossen werden, dass durch Bioturbation CaCO_3 von unten ins Sediment eingearbeitet wird. Der Vergleich der beiden Sedimentschichten (0 - 10, 10 - 20 cm) soll als Maß für den CaCO_3 -Verbrauch verwendet werden. Unterstellt man, dass die untere Schicht 5 Jahre älter ist als die obere, so kann der höhere Carbonatverbrauch in diesen 5 Jahren ermittelt werden. Es ergibt sich sowohl zulaufnah als auch zulauffern eine Differenz der Carbonatgehalte der beiden Schichten von 1,81 M-%. Auf 5 Jahre bezogen ergibt das einen CaCO_3 -Verbrauch von 0,36 M-% pro Jahr. Bei einer Sedimenttrockenmasse von 164 kg/m^2 ergibt sich ein Carbonatverbrauch von $5,90 \text{ kg/(m}^2\text{a)}$. Dieser Betrag liegt in der gleichen Größenordnung wie der mittlere zulaufnahe Carbonatverbrauch des Filtermaterials der 3 NRW-Anlagen ($5,24 \text{ kg CaCO}_3/\text{m}^2\text{a}$) und der oberrheinischen Anlagen ($4,10 \text{ kg CaCO}_3/\text{m}^2\text{a}$). Dieser Zahlenvergleich zeigt, dass das Sediment ein relevanter Ort nicht nur der gelösten und partikulären Carbonatspeicherung sein kann, sondern auch des Carbonatverbrauches ist. Die Zufuhr von Carbonat aus der Decklage ins Sediment ist deshalb anzustreben.

Tabelle 5-24: Carbonatverbrauch im Filtersediment des RBF Fritz-Reuter-Str. in Solingen durch Mineralisation, 21.05.2011

Tiefe	LD	GV	CaCO ₃	pH	NO ₃ -N
in cm	in kgTM/l	in M-%			in mg/100g
zulaufnahes Sediment					
0 – 10	0,81	15,3	6,69	6,4	6,83
10 – 20	0,95	12,0	4,88	6,5	2,15
zulauffernes Sediment					
0 – 10	0,67	21,2	5,51	6,5	4,88
10 – 20	0,85	16,4	3,70	6,6	2,92

Carbonatdecklage und CaCO₃-Zufuhr ins Sediment

Es ist von Interesse, ob bei älteren Anlagen mit mächtiger Sedimentschicht über Bioturbation tiefliegendes Carbonat der Carbonatdecklage in die höheren Sedimentschichten transportiert werden kann. Profilsprachen von alten Filtern mit mächtigem Sediment und Carbonatdecklage konnten zeigen, dass der Carbonatsplitt um 10 cm nach oben in die Sedimentschicht transportiert wurde. Um diesen aufsteigenden Carbonattransport analytisch zu erfassen, wurde von Lambert/Fuchs (2014) eine höhendifferenzierte Untersuchung vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 5-25 aufgeführt.

Tabelle 5-25: Filtermaterialbürtige Carbonatzufuhr ins Filtersediment von RBF für Mischwasser, zulaufnah (Lambert/Fuchs, 2014)

Tiefe	GV	CaCO ₃	pH
in cm	in M-%		
Schömberg, Obere Säge, 24.10.2011			
Sed 0 – 10	14,5	16,3	6,8
Sed 10 – 27	11,6	17,0	7,0
FiM 27 – 57	3,6	19,1	7,4
Schönach, 25.10.2011			
Sed 0 – 10	14,2	7,9	6,3
Sed 30 – 40	11,0	12,9	6,7
FiM 40 – 55	1,2	22,4	7,5
Frelenberg, rechtes Beet, 10.10.2012			
Sed 0 – 10	25,2	0,31	4,8
Sed 10 – 20	11,8	0,26	5,3
FiM 30 – 40	1,0	0,20	6,0

Die 5 cm mächtige Carbonatdecklage kann durch die Bioturbation (aufsteigender Carbonattransport) auch mächtigere Sedimentschichten mit partikulärem Carbonat versorgen. Im Unterschied zu den Anlagen Fritz-Reuter-Str. (Tabelle 5-24) und Frelenberg mit carbonatarmer Filtermaterialunterlage konnte bei den Anlagen Schömberg und Schönach (Tabelle 5-25) ein höherer Carbonatgehalt in der untersten Sedimentschicht festgestellt werden. Dies weist auf einen aufsteigenden Carbonattransport ins Sediment hin.

5.4 Schadstoffdepot

Das Schadstoffdepot soll insbesondere am Indikatorelement Zink erläutert werden. Grund hierfür sind die potenziell hohe Akkumulation und der starke pH-Einfluss von Zink.

Da nur wenige Anlagen eine gut differenzierbare Sedimentschicht aufwiesen, wurde auf eine getrennte Darstellung des Depots von Sediment und Filtermaterial verzichtet. Im Mittel von 16 carbonatreichen RBF in Baden-Württemberg wurde festgestellt, dass zulaufnah 87 % und zulauffern 72 % des Zinks im Sediment deponiert wurde (Lambert/Fuchs, 2014). Die in NRW untersuchten Anlagen hatten hingegen meist im Sediment nur sehr geringe Carbonatgehalte. Die älteren Filtermaterialien waren (z.B. Erbach-Süd, Geilenkirchen, Benninghoferweg, Wermelskirchen) schon zu Betriebsbeginn carbonatarm oder carbonatfrei. Hingegen hatten die neueren Filtermaterialien meist hohe Carbonatgehalte (z.B. Kenten). Es soll deshalb untersucht werden, welche Depots unter den verschiedenen genannten Bedingungen entstehen.

Zn-Depot bei fehlendem CaCO₃ im Filtermaterial

Die Filter Erbach-Süd, Geilenkirchen, Benninghoferweg und Wermelskirchen hatten zu Betriebsbeginn keine oder nur geringe CaCO₃-Mengen im Filtermaterial. Bei diesen Filtern kam es zu einer sehr stark unterschiedlichen Depotausbildung bzw. Zn-Bindung.

Eine sehr hohe Zn-Bindung trotz großer Zn-Fracht kann beim Filter Benninghoferweg festgestellt werden. Hauptursache hierfür dürfte das carbonathaltige Sediment sein. So wurde zulaufnah das ursprünglich CaCO₃-freie Filtermaterial in 0 - 15 cm Filtermächtigkeit auf 3,83 M-% CaCO₃ angereichert (Tabelle 5-26). Dies führte zu einer hohen Zinkakkumulation von 1.320 mg/kg. Durch die hohe carbonatbürtige Zn-Bindung fand in der Schicht 15 - 30 cm keine Zn-Anreicherung statt (Tabelle 5-26).

Tabelle 5-26: Anreicherung von Zink in den obersten Schichten des Filtermaterials von Mischwasserfilter

	CaCO ₃			Zn-Anreicherung		
	in M-%			in mg/kg		
Tiefe in cm	0 – 30	0 – 15	15 – 30	0 – 30	0 – 15	15 – 30
Zeitpunkt	A	2011		A	2011	
Erbach-Süd, n	0,00	0,12	0,12	18	94	5,0
Geilenkirchen, n	0,00	0,39	0,20	19	3,4	2,0
Benninghoferweg, n	0,00	3,83	0,19	15	1320	0,0
Wermelskirchen	0,35	2,47	1,98	16	54,6	30,0
Harwick, n	1,70	1,73	1,88	13	170	8,7
Harwick, f	1,70	1,39	1,74	13	51,1	0,0
Kenten, n	32,0	12,2	14,7	30	83,8	0,0
Kenten, f	32,0	28,2	32,2	30	39,3	0,0

A Ausgangsgehalt zu Betriebsbeginn

n zulaufnah, f zulauffern

Wermelskirchen Probenahme Anlagenmitte

Auch in der zulauffernen Filterposition findet ausschließlich in der oberen Filterschicht eine Zinkanreicherung statt. Allerdings steigt aufgrund der geringen T+U-Menge der rechnerische

Zn-Gehalt von zulaufnah nach zulauffern von 5,65 auf 7,22 g Zn/kg T+U an (Tabelle 5-27). Dieser Wert zeigt, dass zulauffern eine stärkere Anreicherung von gelöstem Zink bezogen auf die Feinpartikel stattfindet. Es kann von einer Mindestanreicherung von 100 % gegenüber dem partikulären Ausgangswert ausgegangen werden. Diese Anreicherung dürfte nahe der Obergrenze liegen, wie die Messungen des RBF-Wermelskirchen zeigen. Auch dort fand eine zulaufbürtige Carbonatanreicherung statt. Der hohe rechnerische Zinkgehalt von 11,2 g Zn/kg T+U (Tabelle 5-27) liegt aber schon oberhalb der maximalen Zinkbindefähigkeit, denn auch in der Schicht 15 - 30 cm fand eine Zinkanreicherung von 30 mg/kg statt (Tabelle 5-26).

Der hohe Zinkrückhalt des Filters Benninghoferweg ist auch aus dem scharfen Konzentrationsgradienten zu erkennen (Tabelle 5-28), hingegen ist der Gradient beim Filter Wermelskirchen geringer (Tabelle 5-29).

Tabelle 5-27: Mittlere rechnerische Zinkgehalte der Feinpartikel von Mischwasserfilter

	B	T+U		Zn		Zn/T+U
	in a	in kg/m	in kg/m*a	in g/m ²	in g/m ² *a	in g/kg
Erbach-Süd, n	16	16,5	1,03	42,3	2,64	2,56
Geilenkirchen, n	12	66,0	5,50	128	10,7	1,94
Benninghoferweg, n	11	51,9	4,72	293	26,7	5,65
Benninghoferweg, f	11	10,1	0,92	72,9	6,63	7,22
Wermelskirchen	11	7,04	0,64	78,9	7,17	11,2
Harwick, n	5	4,60	0,92	70,9	14,2	15,4
Harwick, f	5	0,20	0,04	25,7	5,14	25,7
Kenten, n	6	9,30	1,55	37,2	6,20	4,00
Kenten, f	4,	2,64	0,44	19,1	3,18	7,23

B Betriebszeit bis Probenahme 2011

n zulaufnah, f zulauffern

Wermelskirchen Probenahme Anlagenmitte

Tabelle 5-28: Profilverteilung von Carbonat und Schwermetallen beim RBF Benninghoferweg, Beprobung 17.05.11

Tiefe	CaCO ₃	pH _{CaCl2}	Zn	Cd	Cu	Pb
in cm	in %		in mg/kg			
zulaufnahe Filterfläche						
0 – 5	11,1	7,0	3872	1,26	162	140
5 – 10	0,21	7,1	61,3	<0,07	4,99	5,60
10 – 15	0,18	7,2	27,1	<0,07	4,49	5,05
15 – 30	0,19	7,5	13,9	<0,07	3,54	3,77
zulaufferne Filterfläche						
0 – 5	1,28	7,1	984	0,36	43,7	36,8
5 – 10	0,10	7,3	21,2	<0,07	4,02	3,90
10 – 15	0,14	7,3	17,8	<0,07	3,74	3,79
15 – 30	0,21	7,6	13,0	<0,07	3,59	3,59

Inbetriebnahme: Jahr 2000; Filtersubstrat = 0,00 % CaCO₃

Tabelle 5-29: Profilverteilung von Carbonat und Schwermetallen beim RBF Wermelskirchen, anlagenmittige Beprobung, 04.07.11

Tiefe	CaCO ₃	pH _{CaCl2}	Zn	Cd	Cu	Pb
in cm	in %		in mg/kg			
0 – 5	4,81	6,4	313	0,28	66,2	71,0
5 – 15	2,47	7,3	76,6	<0,07	12,0	12,0
15 – 30	1,98	7,4	46,9	<0,07	7,9	8,1
30 – 45	0,22	7,4	35,1	<0,07	7,3	5,5
45 – 60	0,42	7,3	33,8	<0,07	6,8	5,4
60 – 75	0,55	7,4	26,5	<0,07	6,2	5,1
75 – 90	0,64	7,4	32,2	<0,07	7,5	5,1

Inbetriebnahme: Jahr 2000; Filtersubstrat = 0,44 % CaCO₃

Die beiden Filter Erdbach-Süd und Geilenkirchen werden nur in geringem Umfang mit zuflussbürtigem Carbonat angereichert. Trotzdem unterscheiden sich diese hinsichtlich des Zinkdepots. Bei Geilenkirchen kommt es zu keiner relevanten Zinkanreicherung im Filtermaterial (Tabelle 5-26). Dieser Befund zeigt nicht eine hohe, sondern eine sehr geringe Zinkbindung der 20 cm mächtigen Sedimentschicht an, wie anhand des geringen rechnerischen Zinkgehalts von 1,94 g Zn/kg T+U zu ersehen ist (Tabelle 5-27). Vermutlich ist die geringe Zinkbindung des Sedimentes auf das tiefe pH von 5,4 zurückzuführen. Das gelöste Zink, das das Filtersediment passiert, kann im carbonat- und eisenarmen Filtermaterial nicht fixiert werden. Der geringe Zinkrückhalt des Filters Geilenkirchen kann auch durch eine Stichprobe im Einstauwasser des Dränablaufschachtes bestätigt werden. Diese betrug 190 µg Zn_{ges}/l. Bei leistungsfähigen Filtern werden hingegen 10 µg Zn_{ges}/l erzielt. Diese geringe Zn-Rückhalteleistung wird durch die Carbonatarmut von Sediment und Filtermaterial verursacht. Es kann sich allerdings auch noch der besonders geringe Fe-Gehalt im Ausgangszustand des Filtermaterials leistungsmindernd auswirken, wie folgender Fe-Vergleich andeutet:

Geilenkirchen: 0,13 M-% Fe
 Erbach-Süd: 0,43 M-% Fe

Der Eisengehalt des Filtermaterials hat im Laufe des Betriebes von 0,13 auf 0,26- 0,36 M-% zugenommen (Tabelle 5-30). Vermutlich ist diese Zunahme durch Zufuhr aus dem Filtersediment via Bioturbation entstanden. Der Zinkgehalt steigt mit dem Eisengehalt. Dieser Zusammenhang zeigt, dass das Filtermaterial keine weitere Zinkbindung besitzt.

Tabelle 5-30: RBF-Geilenkirchen, Profilgehalte des Filtermaterials, 06.07.2011, zulaufnah

Tiefe	in cm	0 – 15	15 – 30	30 – 45
T+U	in M-%	1,2	3,6	4,0
GV	in M-%	0,55	0,45	0,66
NO ₃ -N	in mg/100g	0,70	0,65	0,84
Fe	in M-%	0,26	0,23	0,36
Al	in g/kg	1,08	1,12	1,47
Zn	in mg/kg	22,4	21,0	32,9
Cu	in mg/kg	5,74	5,60	8,26
Pb	in mg/kg	4,85	3,76	6,61
Cr	in mg/kg	21,3	19,5	30,0

Beim RBF Erbach-Süd ist die Zinkbindung zwar höher als beim RBF Geilenkirchen, sie ist aber ebenfalls gering, trotz des höheren königswasserlöslichen Eisengehaltes von 0,43 M-% Fe. Der geringe CaCO₃-Gehalt und die pH-Werte von 6,3 - 6,4 (Tabelle 5-31) dürfte der Hauptgrund für Bindungsschwäche sein. Der flächenhaft gleiche Zinkgehalt von 23 mg/kg in 15 - 30 cm Filtertiefe (Tabelle 5-32) kann als Indiz für die schon vorhandene Ausschöpfung der Zink-Bindekapazität gewertet werden.

Tabelle 5-31: Profilverteilung von Carbonat und Schwermetallen beim RBF Erbach-Süd mit sehr geringer partikulärer Carbonatzufuhr - zulaufferne Beprobung -, 17.05.2011

Tiefe	CaCO ₃	pH _{CaCl2}	Zn	Cd	Cu	Pb
in cm	in %		in mg/kg			
0 – 5	0,58	6,3	84,7	0,13	8,67	16,7
5 – 15	0,14	6,4	24,5	0,06	3,18	6,93
15 – 30	0,13	6,3	19,2	0,06	2,86	6,11
30 – 60	0,08	6,4	18,9	0,06	2,75	6,30
60 – 90	0,11	6,3	19,7	0,08	2,80	5,96

Inbetriebnahme: 1995, Filtersubstrat = 0,00 CaCO₃

Tabelle 5-32: Zinkgehalte des oberflächennahen Filtermaterials beim RBF Erbach-Süd, 17.05.2011

Tiefe	zulaufnah	mittig	zulauffern
in cm			
Zink in mg/kg			
0 – 5	259	142	84,7
15 – 30	23,3	23,9	23,3
pH			
0 – 5	6,0	6,0	6,3
15 – 30	6,9	6,7	6,8
CaCO ₃ in M-%			
0 – 5	0,12	1,98	0,58
15 – 30	0,12	0,17	0,19

Die angeführten Ergebnisse zeigen, dass für eine hohe Zinkbindung carbonathaltiges Filtermaterial und eine Carbonatdecklage Voraussetzungen sind.

Zinkdepot bei CaCO_3 im Filtermaterial

Die Ergebnisse des ursprünglichen CaCO_3 -freien Filtermaterials des RBF Benninghoferweg, das durch den Zufluss carbonathaltig wurde, zeigen, dass das CaCO_3 die zentrale Rolle zur Bindung von Zink einnimmt. Da die partikuläre CaCO_3 -Zufuhr insbesondere in NRW eine Ausnahme ist, wurden die beiden Filter Harwick und Kenten, die während der bisherigen Betriebszeit CaCO_3 im Filtermaterial enthielten, mit in die Untersuchung einbezogen.

Die bisherige Zinkfracht des Filters Harwick wurde trotz der geringen Carbonatgehalte weitgehend gebunden, wie die geringe bzw. fehlende Zinkanreicherung in der Schicht 15 - 30 cm anzeigt (Tabelle 5-33). Die sehr hohen rechnerischen Zinkgehalte von 15,4 g/kg T+U (zulaufnah) und 25,7 g/kg T+U (zulauffern) (Tabelle 5-27) weisen aber darauf hin, dass zukünftig kein vollständiger Zinkrückhalt möglich ist. Die Profilgehalte (Tabelle 5-33) zeigen, dass zulaufnah auch derzeit schon ein Zinkeintrag bis in 30 cm Filtertiefe stattfindet. Bei den höheren CaCO_3 -Mengen des Filters Benninghoferweg findet hingegen nur ein Eintrag bis 15 cm Filtertiefe statt (Tabelle 5-28). Der Carbonatgehalt der zulaufnahen Filterfläche der Anlage Harwick ist mit 0,9 -1,8 % zu gering, um eine hohe Zn-Bindung zu erzielen. Hingegen dürfte ein hoher Zinkrückhalt bei dem Filter Kenten noch über eine lange Betriebszeit möglich sein. Auch die geringere rechnerische Zinkkonzentration bezogen auf die Feinpartikel gegenüber Harwick (Tabelle 5-27) trägt zur längeren Zinkbindung bei. Allerdings begrenzt der sehr hohe zulaufnah Carbonatverbrauch beim Filter Kenten die carbonatische Zinkbindung. Dieses Beispiel zeigt, dass nicht nur ein hoher Carbonatgehalt, sondern auch eine geringe Carbonatreaktivität für eine langfristig hohe Zinkbindung Voraussetzung ist.

Tabelle 5-33: Profilverteilung von Carbonat und Schwermetallen beim RBF Harwick, Beprobung 21.05.11

Tiefe	CaCO_3	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$	Zn	Cd	Cu	Pb
in cm	in %		in mg/kg			
zulaufnah Filterfläche						
0 – 5	0,93	6,3	425	0,34	101	60,5
5 – 10	1,82	7,3	51,4	<0,07	7,19	5,43
10 – 15	1,43	7,4	35,0	<0,07	4,29	4,03
15 – 30	1,74	7,4	21,6	<0,07	2,87	2,54
zulaufferne Filterfläche						
0 – 5	2,36	6,5	156	<0,07	26,4	16,7
5 – 10	1,20	7,0	37,6	<0,07	6,67	4,53
10 – 15	1,64	7,4	17,2	<0,07	3,13	2,30
15 – 30	1,88	7,5	12,9	<0,07	2,95	2,77

Inbetriebnahme: Jahr 2006; Filtersubstrat = 1,70 % CaCO_3

5.5 Wurzelmassenbestimmung

Bisherige Aufgrabungen bei RBF mit Wurzelschutzfolie über dem Dränrohr zeigen, dass die Schilfwurzeln nicht in die Dränschlitze einwachsen (Lambert, 2010). Der Großteil der bisherigen Filter ist allerdings noch ohne Wurzelschutzfolie erstellt. Durch eine Profilgrube mit Bestimmung der Wurzelmasse sollte am Beispiel der 5 Jahre alten Anlage Harwick die potenzielle Gefahr der hydraulischen Dränrohrblockierung durch Wurzeln abgeschätzt werden.

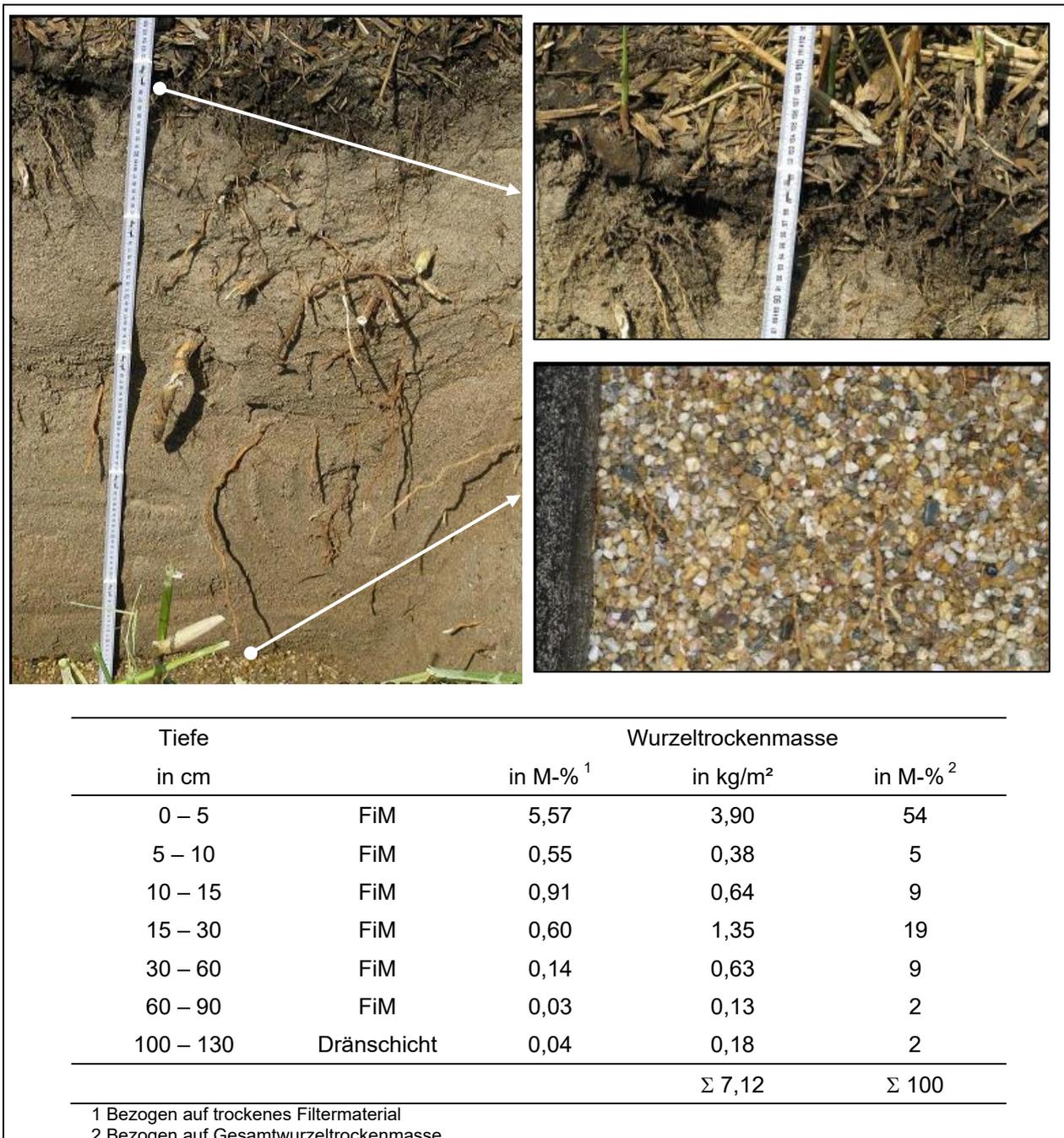


Bild 5-21:Zulaufnahme Wurzelmassen des Schilfes im rechten Beet des RBF Harwick

Die unterirdische Schilfmasse des 5-jährigen RBF Harwick ist weitgehend etabliert und konstant. Über den 1,3 m mächtigen Wurzelraum konnte eine vitale unterirdische Schilfmasse von 7,12 kg TM/m² ermittelt werden. Diese hohe Masse zeigt die weitgehende

Etablierung an. In der 30 cm mächtigen Dränschicht sind 2 % der unterirdischen Schilfmasse vorhanden. Dieser Wert entspricht den bisherigen Untersuchungen von alten schilfbestandenen RBF. Die Wurzelmasse in der Dränschicht mit 0,04 M-% bezogen auf den trockenen Dränkies entspricht einer Porenvolumenabnahme von 1,1 %. Für die Durchströmung des Dränkieses ist diese Porenvolumenabnahme von 40 % auf 39 % nicht relevant.

Allerdings kann das Durchwachsen der Schilfwurzeln der Dränschlitze damit nicht beurteilt werden. Da die Dränschlitze das hydraulische Nadelöhr sind, kann anhand der errechneten Volumenabnahme durch die Schilfwurzeln keine schlüssige Beurteilung erfolgen. Ohne explizite Prüfung kann bisher bei den über 10-jährigen Filteranlagen keine hydraulische Minderleistung beobachtet werden.

Um den Einwuchs von Schilfwurzeln in die Dränschlitze zu vermeiden, sollten bei allen neu zu errichtenden RBF Wurzelschutzfolien eingebaut werden.

5.6 Betrieb der Bodenfilter im Einstau oder Teileinstau

Die folgenden Ausführungen sollen anhand von Beispielen schildern, welche Wirkungen der Einstaubetrieb für die Schilfentwicklung, die Stofffreisetzungen von Sediment- und Filtermaterial und die NH_4 -Elimination verursacht.

Hydraulische Minderleistung zu Betriebsbeginn durch Dauereinstau und Schilfernte

Beim Filter Bentelerstraße traten gleich nach Betriebsbeginn sehr geringe k_f -Werte auf. Nach Messungen von Grotehusmann/Kasting (2011) betrug diese im 1. Betriebsjahr (2010) $0,1 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$. Hingegen konnten wir im 3. Betriebsjahr einen k_f -Wert von $5,2 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$ messen (25.05.2012). Folgende Randbedingungen führten bei der Anlage Bentelerstraße zur anfänglichen hydraulischen Depression:

1. Feinpartikelbelastung von $4 \text{ kg T+U/m}^2 \cdot \text{a}$
2. Fehlende Carbonatsplittauflage
3. Filterüberstau zur Schilfetaablierung
4. Schilfernte

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Bedingungen 1. und 2. ausreichen können, um eine Filterkolmation zu bewirken. So konnte bei den baden-württembergischen Mischwasserfiltern Langenalb ($3,55 \text{ kg T+U/m}^2 \cdot \text{a}$) und Diedesheim ($7,08 \text{ kg T+U/m}^2 \cdot \text{a}$) im 1. Betriebsjahr eine Filterkolmation beobachtet werden. Beide Anlagen hatten keine Carbonatdecklage, die eine anfängliche Feinpartikelkolmation hätte verhindern können. Hingegen traten bei den beiden Anlagen nach mehreren Betriebsjahren keine Filterkolmation mehr auf. Als Ursache für das spätere Ausbleiben der Kolmation ist die zwischenzeitliche Strukturierung der Filteroberfläche anzusehen, die eine plattige Sedimentation, wie in den ersten Betriebsjahren, verhindert.

Die anfängliche Kolmation des Filters Bentelerstraße ist neben den Punkten 1. und 2. maßgeblich durch den Filterüberstau und die Schilfernte verursacht. Dieser Bodenfilter wird mit dem Drosselabfluss eines Stauraumkanals beschickt, was zu langanhaltenden Zuflüssen führt und eine regelmäßige Abtrocknung der Filteroberfläche behindert. Das verhinderte die Sedimentstrukturierung und förderte eine wasserundurchlässige Algengallerte (Bild 5.22).



Bild 5-22: Kolmation zu Betriebsbeginn bei üblicher Feinpartikelbelastung ($4 \text{ kg TM}_{T+U}/\text{m}^2_{AF} \cdot \text{a}$), RBF Bentelerstraße, Trennsystem. Fehlende Althalme zeigen die Schilfernte an (links). Der Einstau des Sedimentes führt zu einer hydraulisch undurchlässigen Algengallerte (rechts)

Zusätzlich wurde das Schilf nach der Vegetationsperiode gemäht und entnommen, um im Frühjahr einen schnelleren Schifaustrieb zu erzielen. Es konnte sich so keine Schilfstreu bilden, die kolmationsmindernd wirkt. Die daraus folgende plattige Sedimentbildung, die u.a. an der scharfen Grenze zwischen Primärfilter und Sediment (Sekundärfilter) zu erkennen ist, wird in Bild 5-23 deutlich sichtbar.



Bild 5-23: Durch die Schilfernte besitzt nicht nur der 2-jährige RBF Bentelerstraße (links), sondern auch der 5-jährige RBF Humpert-Straße (rechts) eine scharfe Grenze zwischen Sediment und Filtersubstrat. Diese scharfe Grenze zeigt die geringe Strukturierung und geringe hydraulische Leitfähigkeit des Sedimentes an

Ein periodisches Trockenfallen der Filterfläche und eine Schilfstreuschicht, auf der sich Partikel ablagern, sind wesentlich für die Ausbildung einer Sekundärfilterschicht, deren Wasserleitfähigkeit höher als die des eigentlichen Filtermaterials sein kann.

Filtereinstau zur Schilfentwicklung

Der häufigste Grund für den permanenten oder zeitweiligen Filtereinstau ist, einen geschlossenen Schilfbestand zu erzielen. Wie die Erfahrungen mit dem Bodenfilter Benhausen zeigen, kann durch einen Teileinstau des Filtermaterials selbst bei extrem geringer Schwachlastigkeit ein geschlossener Schilfbestand entstehen. Der dort permanente Teileinstau lässt sich im Ablaufschacht an den Eisenüberzügen der Schachtwände erkennen (Bild 5-24). Durch die sehr geringe Filterbelastung ($< 0,05 \text{ kg T+U/m}^2\cdot\text{a}$) entsteht durch den Teileinstau nur eine geringe Eisenlösung aus dem Filtermaterial. Die sehr geringe stoffliche Belastung des Filters führt noch nicht zu Nährstoffmangel beim Schilf. Hingegen konnte bei Retentionsbodenfiltern für Straßenabflüsse bei geringer Belastung trotz Teileistau Minderwuchs des Schilfes durch Nährstoffmangel beobachtet werden (Lambert, 2011).

Durch den permanenten Teileinstau kann bei Mischwasserfiltern selbst bei sehr geringer stofflicher Belastung ein geschlossener Schilfbestand erzielt werden. Dies erklärt die bundesweit große Verbreitung dieser Betriebsweise.



Bild 5-24:RBF-Benhausen, 4. Betriebsjahr, 24.05.2012. Trotz der geringen Filterbelastung ist durch den Teileinstau (rechte Bildhälfte, Dränablaufschacht) der Schilfbestand geschlossen (linke Bildhälfte)

Neben dem ganzjährigen Teileinstau wird ein Filterüberstau während des Frühjahraustriebes des Schilfes praktiziert. Wie die Beobachtungen am RBF Wermelskirchen zeigen (Bild 5-25), bewirkt dort diese Maßnahme eine Förderung des Schilfbestandes. Durch die geringe Filterbelastung ($0,82 \text{ kg T+U}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) ist ein geschlossener Schilfbestand bei trockenfallendem Betrieb nicht gewährleistet. Die geringe Filterbelastung führt u.a. zu aufschwimmender Schilfstreu. Trotz der geringen Filterbelastung kann davon ausgegangen werden, dass während des frühjährlichen Filterüberstaues eine Hemmung der NH_4 -Elimination auftritt.



Bild 5-25:Der über Wochen anhaltende Filterüberstau im Frühjahr wird aus Gründen der Förderung des Schilfbestandes vorgenommen. RBF Wermelskirchen, 18.05.2011

Ein gezielter Einstau des Filters über die Filteroberkante hinaus und damit auch des Sedimentes auf der Filterfläche von mehr als einer Woche sollte generell nicht vorgenommen werden. Nur ein Teileinstau (Wasserspiegel unterhalb Oberkante Filtermaterial) kann über längere Zeit vorgenommen werden. Höhe und Dauer des Teileinstaus müssen von der anlagenspezifischen Belastung bzw. der Aufrechterhaltung des aeroben Filterbetriebes (u.a. Nitrifikationsleistung) abhängig gemacht werden.

Stofffreisetzung durch Sedimenteinstau

Der permanente Einstau von Sedimenten führt nicht nur bei Bodenfiltern im Mischsystem zu starker Stofffreisetzung und Sauerstoffzehrung. So unterliegen auch dauereingestaute Absetzanlagen von Trennsystemen und Straßen diesen Mechanismen. Am Beispiel der dauereingestauten Vorstufenrinne des Bodenfilters Glessen soll dies erläutert werden.

Das Überstauwasser des Sedimentes unterliegt einer extrem hohen Eisen- und Phosphoranreicherung aus dem Sediment (Bild 5-26). Bei vollständig abgesetztem und aerobem Zustand ist der Eisengehalt des Regenabflusses von Trennsystemen kleiner als 0,05 mg Fe/l und damit rd. 50 mal geringer als das Überstauwasser des Sedimentes der untersuchten Rinne. Die hohe Eisen- und Phosphorfreisetzung aus dem Sediment ist durch den hohen Sauerstoffbedarf des Sedimentes bedingt. Die fehlende Deckung des hohen Sauerstoffbedarfes durch Überstau führt auch zu hohen CSB-Gehalten im Überstauwasser. Erhöht wird der CSB zusätzlich noch durch Algenbildung, die durch den hohen P-Überschuss zu keiner Zeit durch P-Mangel limitiert ist. Durch C_{org} -Freisetzung aus dem Sediment und Algenbildung (besonnte Vorstufe) wurde das Überstauwasser gegenüber dem abgesetzten Originalregenabfluss um mindestens Faktor 5 mit sauerstoffzehrenden Stoffen angereichert.

Aus dem angeführten Beispiel ist zu folgern, dass permanenter Sedimenteinstau sowohl in Vorstufen wie auf Filtern zu einer hohen Rückbelastung des Wassers führt und somit generell vermieden werden muss.

	$K_{S4,3}$ in mmol/l	4,04
	CSB in mg/l	125
	NO_3 -N in mg/l	0,05
	P_{ges} in mg/l	3,17
	P_{gel} in mg/l	2,55
	Fe_{ges} in mg/l	2,67
	Zn_{ges} in mg/l	570

Bild 5-26: Einstau von Trennsystemsediment, RBF Glessen, Vorstufenrinne, 14.05.11 Der RBF Rollesbroich-Rosbach wird im Filterüberstau betrieben. Obwohl eine sehr geringe Filterbelastung vorliegt und eine sehr hohe, untypische, fremdwasserbedingte Nitratzulaufmenge vorhanden ist, führt diese Betriebsweise nicht zu einer vollständigen NH_4 -Elimination (Tabelle 5-34). Unter trockenfallenden Bedingungen könnte hingegen das NH_4 -N vollständig nitrifiziert werden. Dass trotz vollständigem Filtermaterialeinstau (WS über FOK) überhaupt eine NH_4 -Elimination bzw. eine Nitratbildung stattfindet, ist nur durch die sehr geringe Feinpartikelbelastung möglich. Bei höherer Filterbelastung würde der Filterüberstau einen vollständigen Zusammenbruch der NH_4 -Elimination bewirken. Weiterhin könnte auch eine Filterkolmation auftreten.

Neben der sehr geringen Feinpartikelbelastung besitzt die Anlage Rollesbroich-Rosbach noch eine weitere Besonderheit wie aus den NO_3 -N-Werten der Tabelle 5-34 ersehen werden kann. Durch die hohe Mischwasserverdünnung tritt im Sommerhalbjahr eine höhere NO_3 -N-Zulaufkonzentration als bei NH_4 -N auf. Im Winterhalbjahr nimmt die NO_3 -N-Konzentration nochmals fremdwasserbedingt markant zu (Tabelle 5-34). Diese untypisch hohe Nitratzufuhr wird trotz Filterüberstau nicht über Denitrifikation im RBF eliminiert. Dieser Umstand zeigt die sehr geringe organische Anlagenbelastung an. Nur unter solchen Sonderbedingungen hat der Filterüberstau geringe stoffliche Auswirkungen. Der Filterüberstau sollte generell vermieden werden.

Tabelle 5-34: RBF Rollesbroich-Rosbach, jahreszeitliche Konzentrationsverteilung - nach Daten des Landes NRW -

	Sommerhalbjahr		Winterhalbjahr	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$	148	139	385	376
NH_4 -N in mg/l	1,28	0,26	1,45	0,43
NO_3 -N in mg/l	1,62	1,95	4,40	6,02

Messzeitraum: 11/2004 – 10/2010, n = 27

Sommerhalbjahr: April – September, n = 6

Winterhalbjahr: Oktober – März, n = 21

Stofffreisetzung durch Filtermaterialeinstau

Am Beispiel des seit Betriebsbeginn teileingestauten RBF Frelenberg soll die Stofffreisetzung aus dem Filtermaterial geschildert werden.

Trotz der im Vergleich zum Filtersediment geringen Eisengehalte des Filtermaterialies (Tabelle 5-36) findet durch den Teileinstau des Mischwassers eine hohe Eisenfreisetzung mit 6,7 mg Fe/l im Dränablauf statt (Tabelle 5-35). Dieses Eisen fällt im Ablaufschacht oder später im Gewässer als Ocker aus. Im Unterschied zum Eisen war beim Zink der Dränablaufgehalt gering. Ursache hierfür ist die geringe eisengebundene Zinkmenge im sandigen Filtermaterial. Würde hingegen auch das Filtersediment eingestaut, wäre zu erwarten, dass aus dem Sediment eine hohe Zinkfreisetzung auftritt. Diese würde in relevantem Umfang den Zinkwirkungsgrad der Anlage senken.

Tabelle 5-35: Dränablauf des teileingestauten RBF Frelenberg, Probenahme 10.10.2012

Lf	in $\mu\text{S}/\text{cm}$	170	
pH		6,3	
$\text{K}_{\text{S}4.3}$	in mmol/l	0,88	
CSB	in mg/l	17,7	
$\text{NH}_4\text{-N}$	in mg/l	1,81	
$\text{NO}_3\text{-N}$	in mg/l	<0,10	
Fe_{ges}	in mg/l	6,74	
P_{ges}	in mg/l	1,59	
Zn_{ges}	in $\mu\text{g}/\text{l}$	30	
SO_4	in mg/l	7,3	

Die durch den Einstau des Filtermaterialies bedingte Senkung des Zn-Wirkungsgrades kann mit Hilfe des Zn/Fe-Verhältnisses des im Dränablaufschacht ausgefällten Ockersedimentes abgeschätzt werden. Im Ocker ist 0,17 % Zn bezogen auf Fe enthalten. Bei einem Fe-Gehalt im Dränablauf von 6,74 mg/l entspricht dies einem zugehörigen Zn-Gehalt von 11 $\mu\text{g}/\text{l}$. Unterstellt man einen gelösten Zinkgehalt im Filterzulauf von 50 - 100 $\mu\text{g}/\text{l}$ würde der Einstau des Filtermaterialies 10 - 20 % der gelösten Zinkmenge des Zulaufes über die Eisenlösung wieder austragen. Diese Abschätzung zeigt, dass der Einstau eisenarmem Filtermaterialies nur einen begrenzten Einfluss auf den Zinkwirkungsgrad besitzt. Hingegen dürfte der Filtersedimenteinstau im hohen Umfang den Zn-Wirkungsgrad senken.

Die durch den Teileinstau unterbundene Deckung des Sauerstoffbedarfes zeigt sich auch in dem sehr geringen SO_4 -Gehalt (7,3 mg/l) des Dränablaufes. Neben der Eisen- findet vermutlich auch eine Sulfatatumung statt. Die hohen Glühverluste des unteren sandigen Filtermaterialies (tiefer 10 cm) von 0,87 - 0,98 M-% (Tabelle 5-36) weisen darauf hin, dass ein unvollständiger Abbau der eingetragenen organischen Substanz durch die sauerstofffreien Abbauvorgänge stattfindet. Die nur bei eingestautem Filtermaterial auftretende Anreicherung von organischer Substanz von ca. 0,40 % GV (Ausgangsgehalt) auf ca. 0,90 % GV in den tieferen Filterschichten (Tabelle 5-36) kann neben der Wirkungsgradreduzierung für den gelösten CSB auch eine mikrobielle Tiefenkolmation verursachen. Trotz eines analytisch geringen CSB-Gehaltes im Dränablauf (außerhalb Filterbeschickung) konnte ein geschlossener Biofilm auf der Sohle des Ablaufschachtes festgestellt werden (Tabelle 5-35). Der auch bei Trockenwetter auftretende Dränablauf weist auf eine mikrobielle Kolmation im Filterkörper des teileingestauten RBF Frelenberg hin.

Tabelle 5-36: Stoffverteilung des dauereingestauten RBF-Frelenberg - Probenahme 10.10.2012 -

		zulaufnah				zulauffern	
		Sed	Sed	FiM	FiM	FiM	FiM
Tiefe	in cm	0 – 10	10 – 20	10 – 30	30 – 60	0 – 10	10 – 30
T+U	in M-%	80,0	56,6	4,1	2,5	6,9	2,8
GV	in M-%	25,2	11,8	0,98	0,90	3,33	0,87
CaCO ₃	in M-%	0,31	0,26	0,20	0,30	0,15	0,19
pH		4,8	5,3	6,0	6,0	5,3	5,6
Fe	in M-%	2,85	1,73	0,22	0,18	0,46	0,24
Mn	in mg/kg	557	265	8,0	5,5	42,4	10,4
Zn	in mg/kg	960	508	41,4	37,2	103	29,6

Hemmung der NH₄-Elimination durch Teileistau

Am Beispiel des RBF Kenten soll die Wirkung des Teileinstaus auf die NH₄-Elimination geschildert werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass bis ca. Mitte 2011 ein Teileinstau vorhanden war. Danach wurde dieser aufgehoben. Der ehemalige Teileinstau ist auch noch 3 Jahre nach dessen Aufhebung an dem Ockerschleier der ursprünglich grauen Betonwände zu erkennen (Bild 5-27).

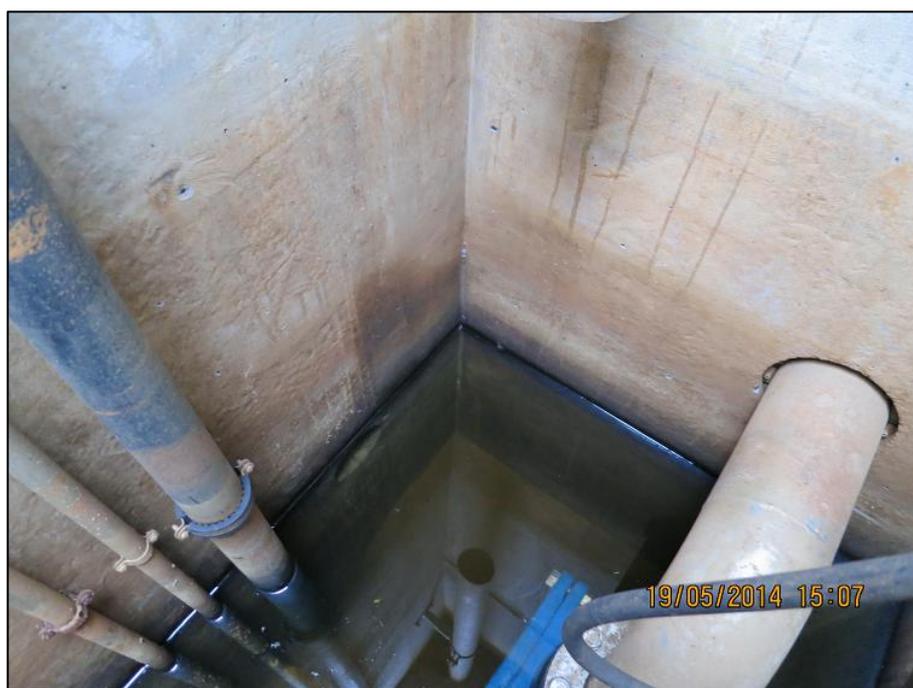


Bild 5-27: RBF-Kenten, Dränablaufschacht. Die auch 2014 noch erkennbaren Ockerschleier an den Dränablaufschachtwänden zeigt einen früheren hohen Teileinstau an (vermutlich vor 2011)

Durch die Beprobung des Erftverbandes bei Teileinstau (05/2006 - 06/2011) und von Tondera et al. (2013) ohne Teileinstau (07/2011 - 06/2012) ist ein Vergleich möglich (Tabelle 5-37)

Tabelle 5-37: NH₄-Elimination des RBF-Kenten mit und ohne [2] Teileinstau

	Teileinstau	
	mit	ohne
Zulauf in mg NH ₄ -N/l	7,55	8,00
Ablauf in mg NH ₄ -N/l	2,54	1,00
η in %	66	88

Mit Teileinstau nach Analysen des Erftverbandes, 05/2006 – 06/2011,
n = 54, Datenbestand Land NRW

[2] Nach Tondera u.a. (2013), 07/2011 – 06/2012, n = 9

Der NH₄-Wirkungsgrad steigt von 66 % (Teileinstau) auf 88 % (ohne Teileinstau). Die Wirkungsgraddifferenz zwischen den beiden Betriebsvarianten ist hier allerdings gering. Ursache hierfür ist der geringe Wirkungsgrad von 88 % bei dem trockenfallenden Betrieb. In früheren Säulenversuchen konnten bei 10 mg NH₄-N/l im Zulauf 0,20 mg NH₄-N/l im Ablauf festgestellt werden. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von 98 %. Die Beschickungsmenge betrug hierbei einheitlich 0,60 m³/m². Die mittlere hydraulische Belastung der Anlage Kenten betrug während des einjährigen trockenfallenden Betriebes hingegen 1,09 m³/m² (Tondera et al., 2013). Bei einer mittleren Zulaufkonzentration von 8,00 mg NH₄-N/l ergibt sich hieraus eine mittlere NH₄-N-Einzelbeschickungsfracht von 8,7 g NH₄-N/m². Dieser hohe Wert kann für die im Vergleich zu den angeführten Säulenversuchen geringen Wirkungsgrade verantwortlich sein. Nach bisherigem Kenntnisstand muss bei Einzelereignisfrachten von mehr als 6 g NH₄-N/m² mit einer sorptionslimitierten NH₄-Wirkungsgradabnahme gerechnet werden (Dittmer, 2002; Lambert/Fuchs, 2010). Bei geringerer Einzelereignisfracht, die als typisch für die Mehrzahl der Mischwasserzuflüsse angesehen werden kann, wäre die Wirkungsgraddifferenz zwischen den beiden Betriebsweisen deutlich größer gewesen. Der Teileinstaubetrieb mindert in relevantem Umfang die NH₄-Eliminationsleistung von Mischwasser-RBF.

Anhand der Analysedaten von 4 Mischwasser-RBF soll geklärt werden, ob, neben Rollesbroich mit Filterüberstau und Kenten mit Teileinstau, noch weitere einstaubedingte Minderleistungen bei der NH₄-Elimination aufgetreten sind. Als Maß für eine solche Minderleistung kann das Verhältnis der NH₄-N-Abnahme zur NO₃-N Zunahme verwendet werden. Auch wenn mehr NO₃-N gebildet wird als NH₄-N abnimmt, kann noch eine einstaubedingte Hemmung auftreten, wie das Beispiel Kenten zeigt (Tabelle 5-38). Auch beim RBF Kaster mit einem $\Delta \text{NO}_3\text{-N} / \Delta \text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis von 1,12 ist es vermutlich zu einer einstaubedingten Hemmung gekommen, da dieser Wert deutlich unter dem von Kenten (1,78) liegt.

Tabelle 5-38: Mineralstickstoffumsatz von Mischwasser-RBF in NRW, nach Daten des Landes NRW

		Kaster	Kenten	Altendorf	Rollebroich
Zu	NH ₄ -N in mg/l	4,25	7,55	2,00	1,41
Ab	NH ₄ -N in mg/l	1,39	2,54	0,22	0,40
Zu	NO ₃ -N in mg/l	-	-	1,00	3,78
Ab	NO ₃ -N in mg/l	3,21	8,91	1,05	5,40
Δ	NH ₄ -N in mg/l	-2,86	-5,01	-1,78	-1,01
Δ	NO ₃ -N in mg/l	3,21	8,91	0,05	1,62
Δ NO ₃ -N/Δ NH ₄ -N		1,12	1,78	0,03	1,60

Kaster: Zeitraum 2006 – 2012, n = 17

Kenten: Zeitraum 2006 – 2010, n = 44

Altendorf: Zeitraum 05/2006 – 07/2008, n = 12

Rollebroich: Zeitraum 11/2004 – 10/2010, n = 27

Beim RBF Altendorf wurde durch den Teileinstau das im Filter gebildete Nitrat weitgehend vollständig in den unteren, eingestauten Filterschichten veratmet (Tabelle 5-38). Der dort eingestellte Teileinstau hat aufgrund der geringen NH₄-N-Zulaufkonzentration von 2,00 mg/l sowohl eine vergleichsweise hohe NH₄-Elimination von 89 % wie eine hohe NO₄-N-Elimination ermöglicht. Bei Altendorf kam es nach optischer Beurteilung des Dränablaufschachtes nicht zu einer Eisen- sondern nur zu einer leichten Manganlösung aus dem Filtermaterial (Bild 5-28).



Bild 5-28: RBF-Altendorf. Blick in den Dränablaufschacht. Der dortige Teileinstau verursachte nur eine Manganfreisetzung aus dem sandigen Filtermaterial (schwarzer Wandbelag)

Das Reaktionsverhalten durch Einstau kann nach derzeitigem Kenntnisstand nicht prognostiziert werden, es kann z.B. die Spanne von fehlender bis hoher Eisenfreisetzung umfassen. Für Standardanwendungen sollte deshalb die Betriebsweise Teileinstau nicht verwendet werden.

5.7 Sonderanwendungen

In den folgenden Ausführungen soll eine Differenzierung zwischen Standard- und Sonderanwendung vorgenommen werden. Eine hohe Elimination der Feinpartikel und des partikulären CSB ist unstrittig mit Standard-RBF möglich. Bei der NH_4 -Elimination muss hingegen zwischen üblicher ($< 6 \text{ g NH}_4\text{-N/m}^2$) und besonders hoher ($> 6 \text{ g NH}_4\text{-N/m}^2$) Einzelereignisfracht differenziert werden. Sollen hohe Eliminationsraten bei hohen Einzelereignisfrachten erzielt werden, ist dies aufgrund der zu geringen Sorptionskapazität mit üblichem Filtermaterial nicht möglich.

Bei den Schwermetallen bzw. dem Leitparameter Zink wird bisher davon ausgegangen, dass unter carbonathaltigen Bedingungen im Sediment und Filtermaterial ein Standardfilter eine hohe Elimination gewährleistet. Hingegen sind eine hohe Keimelimination und eine dauerhaft hohe P-Elimination nicht mit Standardfiltern zu erzielen. Zu folgenden Parametern sollen im Folgenden Untersuchungsergebnisse angeführt werden:

- Ammonium
- Schwermetalle bzw. Indikatorelement Zink
- Keime
- Phosphor

Ammoniumelimination

Mit Hilfe des Datenbestandes des Landes NRW soll eine Abschätzung der NH_4 -Elimination bei Standard-RBF im Mischsystem vorgenommen werden (Tabelle 5-39). Wie schon in Kapitel 5.6 angeführt, ist vermutlich bei den Anlagen Kaster, Altendorf und Rollesbroich von einer einstaubedingten Hemmung der NH_4 -Elimination auszugehen. Bei Rohren hingegen trat keine einstaubedingte Hemmung der NH_4 -Elimination auf. Trotz der geringen Zulaufkonzentration von $2 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ konnte dort nur ein mittlerer NH_4 -Wirkungsgrad von 83% erzielt werden. Die auf das Betriebsjahr bezogene Belastung des Filters Rohren ist nach Daten von Petrowski/Grobe (2010) sowohl hydraulisch ($10,8 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{a}$) und stofflich ($0,24 \text{ kg T+U/m}^2\cdot\text{a}$) gering.

Tabelle 5-39: NH_4 -Elimination von RBF in NRW - nach Daten des Landes NRW -

Anlage	Zeitraum	n	Zu	Ab	η
			in mg/l		in %
Kaster	05/06 – 05/12	17	4,25	1,39	67,3
Kenten ¹	07/11 – 08/12	9	8,00	1,00	88,0
Altendorf	05/06 – 07/08	11	2,00	0,22	89,0
Rollesbroich ²	11/04 – 08/10	27	1,41	0,40	71,6
Rohren	01/07 – 02/10	7	2,01	0,34	83,1

¹ Nach Tondera, u.a.

² Vollständiger Einstau des Filtermaterials, RBF Rollesbroich-Rosbach

Trotz geringer Belastung über längere Zeiträume kann eine einzelereignisbezogene Überlastung der NH_4 -Sorptionskapazität auftreten. Im Februar 2010 wurde eine besonders geringe NH_4 -Elimination ermittelt (Tabelle 5-40). Die hohen Nitratgehalte im Zulauf deuten

auf ein stark fremdwasserbestimmtes Ereignis hin, das hohe hydraulische Einzelbeschickungsmengen verursachen kann (Lambert u.a., 2010). Unterstellt man für dieses Ereignis eine hydraulische Beschickung von $2,47 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Petrowski/Grobe, 2010), ergibt sich bei einer Zulaufkonzentration von $1,61 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ allerdings nur eine $\text{NH}_4\text{-N}$ -Einzelereignisfracht von $3,98 \text{ g NH}_4\text{-N/m}^2$. Eventuell ist die seltene Beschickung (fehlende Ausbildung des Biofilmes) für die Leistungsschwäche verantwortlich. Die letzte größere Beschickung lag ca. 10 Monate zurück.

Das Beispiel Rohren zeigt, dass bei sehr geringer mittlerer Feinpartikelbelastung des Filters, die u.a. durch geringe Beschickungshäufigkeit entsteht, bei Standardfiltermaterial eine abiotische und biogene NH_4 -Sorptionschwäche auftreten kann, die zur Abnahme der NH_4 -Elimination führt.

Tabelle 5-40: Konzentrationen des RBF-Rohren - nach Daten des Landes NRW -

Datum	AFS		NH ₄ -N		NO ₃ -N	
	Zu	Ab	Zu	Ab	Zu	Ab
	in mg/l					
18.01.2007	9,9	<1,0	0,19	0,05	1,50	1,40
22.08.2007	22,2	14,4	3,21	0,17	1,40	0,60
28.09.2007	48,7	<1,0	4,44	0,06	4,00	1,20
03.12.2007	52,6	<0,5	1,91	0,16	3,70	3,90
07.12.2007	7,2	-	0,65	0,20	1,40	3,10
14.03.2008	4,0	1,0	2,04	0,31	3,20	2,70
26.02.2010	11,4	6,8	1,61	1,42	4,30	4,10
∅	22,3	3,9	2,01	0,34	2,78	2,43

Stichprobenuntersuchung

Hydraulische Filterbelastung während des Messzeitraumes 01/07 – 01/10 nach [3]:

$37.226 \text{ m}^3/1.150 \text{ m}^2/3\text{a} = 10,8 \text{ m}^2/\text{m}^2\text{*a}$

Abgeschätzte T+U-Fracht: $0,24 \text{ kg/m}^2\text{*a}$

In Kapitel 5.6 wurde als mögliche Erklärung für die vergleichsweise geringe NH_4 -Elimination der Anlage Kenten die hohe mittlere $\text{NH}_4\text{-N}$ -Einzelereignisfracht von $8,0 \text{ g/m}^2$ angeführt. Tritt hierdurch eine Überlastung der NH_4 -Sorptions auf, ist davon auszugehen, dass zulaufnah höhere Dränablaufgehalte als zulauffern entstehen. Unter Teileinstaubedingungen wurden in den Messjahren 2006 - 2010 bei der Anlage Kenten getrennte Analysen des zulaufnahen und zulauffernen Dränablaufes vorgenommen (Tabelle 5-41). Diese Ergebnisse zeigen allerdings keine relevanten Unterschiede zwischen den beiden Filterhälften. Es ist allerdings möglich, dass der Teileinstau zu einer starken Vergleichmäßigung der Belastung der beiden Filterhälften geführt hat. Die Messergebnisse ohne Teileinstau (nach Tondera u.a., 2013, Tabelle 5-37) können deshalb trotzdem durch Überlastung der NH_4 -Sorptions beeinflusst sein.

Bei schwachlastigen RBF mit seltenen hohen Einzelereignisfrachten oder langen Beschickungspausen mit Rückentwicklung der biogenen NH_4 -Sorptions kann die Verwendung von sorptionsstarken Filtermaterialien sinnvoll sein. Wird eine große hydraulische Einzelbeschickungsmenge durch Fremdwasser verursacht, kann auch eine Beetalternierung die Überlastung der NH_4 -Sorptionskapazität vermeiden.

Tabelle 5-41: NH₄-Elimination des RBF-Kenten während des unbekannt hohen Teileinstaues - nach Analysen des Erftverbandes -

Jahr	n	Zulauf	Ø Ablauf	Ablauf 1	Ablauf 2
in mg NH ₄ -N/l					
2006	8	8,36	6,43	6,14	6,73
2007	4	6,22	2,50	2,45	3,19
2008	12	6,93	0,79	0,59	0,85
2009	12	7,56	1,46	1,04	0,93
2010	8	8,66	1,53	1,10	1,64
	Σ 44	Ø 7,55	Ø 2,54	Ø 2,26	Ø 2,67

Ablauf 1: zulaufnahe Dränage

Ablauf 2: zulaufferne Dränage

Schwermetallelimination

In Tabelle 5-42 sind Stichprobenuntersuchungen von Dränabläufen aufgelistet. Diese Auflistung bestätigt die bisherige Aussage, dass unter carbonathaltigen und trockenfallenden Bedingungen der Standardfilter in hohem Umfang Schwermetalle zurückhalten kann. Für Eisen ist dies zwangsläufig, da dieses Element unter aeroben Bedingungen ausschließlich in partikulärer Phase vorkommt. Beim Indikatorelement Zink hingegen ist von einem relevanten gelösten Anteil auszugehen. Dieser muss hauptsächlich an der carbonatischen Festphase des Filtermaterials gebunden werden.

Die höheren Zn-Dränablaufgehalte der Anlage Bentelerstraße dürften durch Filterüberstau und die von Geilenkirchen durch fehlende Carbonatversorgung von Sediment und Filtermaterial verursacht sein. Die restlichen Messwerte des Dränablaufes liegen bei 30 µg Zn_{ges}/l und kleiner. Diese Stichprobenuntersuchungen stützen die These einer hohen Zinkelimination durch carbonathaltige Standardfilter.

Die bauseitige Carbonatversorgung muss durch das carbonathaltige Filtermaterial und die Carbonatdecklage (Zufuhr via Bioturbation ins Sediment) sichergestellt werden. Zukünftig sollte durch Depotuntersuchungen und Dränablaufmessungen geklärt werden, bis zu welcher Betriebszeit diese hohe Schwermetallelimination möglich ist. Durch betriebliche Carbonatzufuhr (Carbonatbrechsand, Carbonatsplitt) kann vermutlich eine zeitliche Verlängerung der hohen Schwermetallelimination erzielt werden.

Tabelle 5-42: Eisen- und Zinkgehalte im Dränablauf von trockenfallenden RBF, Stichprobenuntersuchung

Anlage	Datum	Fe _{ges} in mg/l	Zn _{ges} in µg/l
Erbach-Süd	17.05.2011	0,01	10
Wermelskirchen	08.10.2012	0,01	20
Nettelstedt	05.07.2011	0,02	10
Harwick	21.05.2011	0,07	25
Madfeld	20.05.2011	0,01	15
Hille	05.07.2011	0,03	10
Hallschlag	15.05.2011	0,01	<10
Altendorf	09.10.2012	0,02	30
Graf Zeppelin	25.05.2012	0,04	10
Bentelerstraße	25.05.2012	0,07	47
Geilenkirchen	06.07.2011	0,03	190

Keimelimination

Nach bisherigem Kenntnisstand ist eine Keimelimination in Standardfiltern nur um eine Zehnerpotenz möglich. Höherer Keimeliminationen erfordern ein feineres Filtermaterial (Lambert u.a., 2010). Bei zwei untersuchten RBF in NRW stellte sich eine deutlich höhere Keimelimination ein (Tabelle 5-43). Die Untersuchung der Korngrößenverteilung dieser beider Anlagen ergab, dass es sich um übliches Filtermaterial handelt (Tabelle 5-43). Bisher konnte nicht geklärt werden, wodurch die hohe Keimelimination von bis zu 3-Zehnerpotenzen verursacht ist. Von den 4 untersuchten RBF Heilkuhlenbach, Konzen, Rohren und Witzerath zeigte nur die letztere hohe Keimeliminationen. Die Keimelimination der ersten 3 Anlagen lag im früher ermittelten Eliminationsbereich von einer Zehnerpotenz (Petrowski/Grobe, 2010).

Tabelle 5-43: Mittlere Keimkonzentration von zwei RBF zur Mischwasserbehandlung in NRW

Anlage	Zulauf	Ablauf	Rückhalt		
	E.Coli in n/100 ml		in %		
Witzerath (nach Petrowski/Grobe, 2010)	160.000	80	99,5		
Altendorf (nach Mertens u.a., 2012)	930.000	580	99,9		
Korngrößenverteilung	T+U	fS	mS	gS	fG
	in M-%				
Witzerath	1,7	16,6	51,0	25,3	5,4
Altendorf	2,2	20,6	62,5	13,4	1,3

Bestimmung der Korngrößenverteilung in dieser Studie

Die Anlage Altendorf wurde im Teileinstau betrieben. Sie wies hierdurch eine Besonderheit beim Stickstoffumsatz auf. Das eliminierte NH₄-N war nicht im Ablauf in Form von NO₃-N vorhanden (Tabelle 5-38). Dies weist u.a. darauf hin, dass durch den Teileinstau eine Vergleichmäßigung der Durchströmung und hierdurch eine höhere Keimelimination stattgefunden hat. Eine hohe Keimelimination lässt sich derzeit nur durch ein feineres

Filtermaterial erzielen. Ob der angesprochene Teileinstau der Anlage Altendorf zu reproduzierbar hoher Keimelimination führt, kann derzeit nicht beantwortet werden.

Bisher ist noch nicht bekannt, unter welchen Betriebsbedingungen mit Standardfiltermaterial eine hohe Keimelimination erzielt werden kann. Soll eine hohe Keimelimination durch einen RBF ohne UV-Sonde erzielt werden, muss nach derzeitigem Kenntnisstand ein feineres Filtermaterial verwendet werden (Sonderfiltermaterial).

Phosphorelimination

Bei der Mischwasserfiltration kann über mehrere Betriebsjahre nur eine geringe P-Elimination erzielt werden. Dies wurde z.B. anhand 3-jähriger Untersuchungen an der sehr carbonathaltigen Filteranlage Monheim festgestellt (Lambert u.a., 2010). Vergleichbare Ergebnisse konnten an der carbonathaltigen Anlage Kenten ermittelt werden (Tabelle 5-44).

Die P-Elimination von Mischwasserfiltern strebt in Abhängigkeit des Betriebsalters bzw. der akkumulierten P-Fracht einer P-Elimination unter 20 % zu. Die anfänglich hohe P-Elimination spiegelt hierbei sehr sensibel den P-Belastungszustand des Filters wieder. So konnte in dieser Untersuchung festgestellt werden, dass die schwächer belastete Anlage Vanikum trotz gleicher Betriebszeit (6 Jahre) eine markant geringere Dränablaufkonzentration (0,02 mg P_{ges}/l) als die stärker belastete Anlage Kenten aufweist (1,5 mg P_{ges}/l). Es ist davon auszugehen, dass sich diese großen Konzentrationsunterschiede mit zunehmendem P-Depot ausgleichen. Sollen hohe P-Wirkungsgrade bei Mischwasser-RBF erzielt werden, muss ein Sondersubstrat mit Zusatz von Eisenhydroxid verwendet werden.

Tabelle 5-44: Verlauf der P_{ges} -Konzentrationen beim RBF-Kenten

Jahr	n	P_{ges} in mg/l			η in %
		Zulauf	Ablauf	Δ	
2006	8	2,05	1,13	0,92	44,9
2007	4	2,27	0,81	1,46	64,3
2008	12	2,49	1,07	1,42	57,0
2009	12	1,99	1,31	0,68	34,2
2010	8	2,43	1,62	0,81	33,3
2011	3	2,68	1,43	1,25	46,6
2011/2012	9	1,90	1,50	0,40	21,0

2006 – 2011 nach Daten des Landes NRW

2011/2012 nach Tondera, u.a. [2]; P_{gel} : Zulauf = 1,20 mg/l, Ablauf = 1,20 mg/l

5.8 Reinigung von Straßenabflüssen

In diesem Kapitel soll die Wirkung der Muldenentwässerung und der offenen Absetzbecken auf die Qualität der Straßenabflüsse behandelt werden.

5.8.1 Muldenentwässerung

Außerörtliche Fahrbahnen, deren Neigung nach außen gerichtet ist, werden im Einschnittbereich häufig über Mulden entwässert. Am Beispiel des RBF Köln Ost, Westseite

(A 3.1) soll anhand der Stoffakkumulation der Mulden und der Filteroberfläche der zentralen Anlage die Bedeutung der Muldenentwässerung besprochen werden.

Stoffakkumulation am Bankett

Im Vergleich zur spezifischen Filterfläche des RBF (1,85 % von A_u) beträgt die potenziell wirksame Filterfläche der Muldenentwässerung 8,00 % von A_u (Bankett- und Muldenbreite: 2 m, Fahrbahnbreite: 25 m). Bei geringeren Fahrbahnbreiten ist die spezifische Muldenfläche sogar größer. Dies zeigt, dass bei der Muldenentwässerung potenziell eine sehr hohe Behandlungsfläche zur Verfügung steht.

Im Bankettbereich zwischen Straße und Mulde wurde ein kleiner Schürf angelegt und Proben vom Bankettsediment entnommen. Die anschließende Mulde von 0,90 - 2,00 m wurde nicht untersucht, da die Hauptbelastung im fahrbahnnahen Bankett auftritt.

Obwohl der Kornaufbau des im Bankett anstehenden Bodens einen hohen Kiesanteil von 50 % aufweist, kann eine hohe Schadstoffakkumulation an der Oberfläche (Bankettsediment) festgestellt werden. Innerhalb des 0,90 m breiten Bankettes findet schon eine starke Abnahme der Sedimentgehalte statt. So beträgt der Zinkgehalt in 0 - 10 cm Abstand zur Fahrbahn 1.922 mg/kg, in 80 - 90 cm sind es hingegen nur noch 112 mg Zn/kg. Dies zeigt, dass schon ein Großteil der Schadstoffe innerhalb des Bankettbereiches deponiert wird. Die noch hohen Zinkgehalte in 25 - 30 cm Bodentiefe (Bild 5-29) zeigen allerdings, dass der verwendete grobkörnige Boden keine ausreichend hohe mechanische Filtration besitzt.



Abstand in cm	0 - 10		80 - 90	
	0 - 5	25 - 30	0 - 5	25 - 30
GV in M-%	12,0	3,26	5,87	2,10
NO ₃ -N in M-%	3,80	0,56	0,72	0,12
Fe in M-%	3,63	2,55	2,19	0,99
Zn in mg/kg	1922	164	112	62,2
Cd in mg/kg	0,79	0,31	0,55	0,32
Cu in mg/kg	449	49,4	118	19,5
Pb in mg/kg	128	58,3	89,6	69,6

Bild 5-29: Muldenentwässerung im Einzugsgebiet des RBF A3, östlich Köln, Westseite, A 3.1

Wird die gesamte Breite (Bankett + Mulde) für eine optimale Filtration (feinkörniger Filterboden, ganzflächige Dränschicht) genutzt, kann davon ausgegangen werden, dass trotz der für die Muldenentwässerung kleinen Filterfläche (8,00 % von A_u) eine hohe und weitgehend vollständige Behandlung des Autobahnabflusses möglich ist. Der Überlauf in die Muldenschächte dürfte nur noch einen kleinen Abflussanteil ausmachen. Eine nochmalige Behandlung des Muldenabflusses in einer zentralen Filteranlage ist deshalb nicht notwendig.

Stoffakkumulation im RBF

Die geringe Filterbelastung des RBF A 3.1 (Bild 5-30) ist nur teilweise durch die Muldenentwässerung verursacht. Der Muldenentwässerungsanteil ist mit 25 % der A_u -Fläche gering (Grotehusmann/Kasting, 2008). Im vorliegenden Fall ist die geringe Filterflächenbelastung des RBF hauptsächlich auf das große Vorstufenvolumen von 170 m³/ha A_u zurückzuführen. Die mittlere Filterflächenbelastung des RBF – A 3.1 beträgt insgesamt 2,16 kg T+U/m². Bei einer unterstellten Betriebszeit von 10 Jahren ergibt sich hieraus eine langjährig mittlere Filterbelastung von 0,22 kg T+U/m²*a. Diese sehr geringe Belastung ist auch bei einem Filter zu erwarten, der zu 100 % über Mulden entwässert wird.

Die geringe Restbelastung wird primär für den Überlauf in die Muldenschächte entstehen. Beim Filter A 3.1 entsteht die geringe Filterbelastung aus der Kombination von Muldenentwässerung und großer Vorstufe (Grotehusmann/Kasting, 2008).

Die auch zulaufnah fehlende Sedimentschicht des RBF A 3.1 zeigt auch optisch die sehr geringe Schadstoffakkumulation an (Bild 5-30). Die wie bei der Bankettakkumulation hohen Gehalte von Zn, Cu und Pb in der unteren Filterschicht (Bild 5-29) sind wiederum auf die grobe Körnung des Filtermaterials zurückzuführen.

Zukünftig sollte die Muldenentwässerung gezielt für die Reinigung der Straßenabflüsse genutzt werden, damit auf eine nochmalige Behandlung in einer zentralen Anlage verzichtet werden kann.

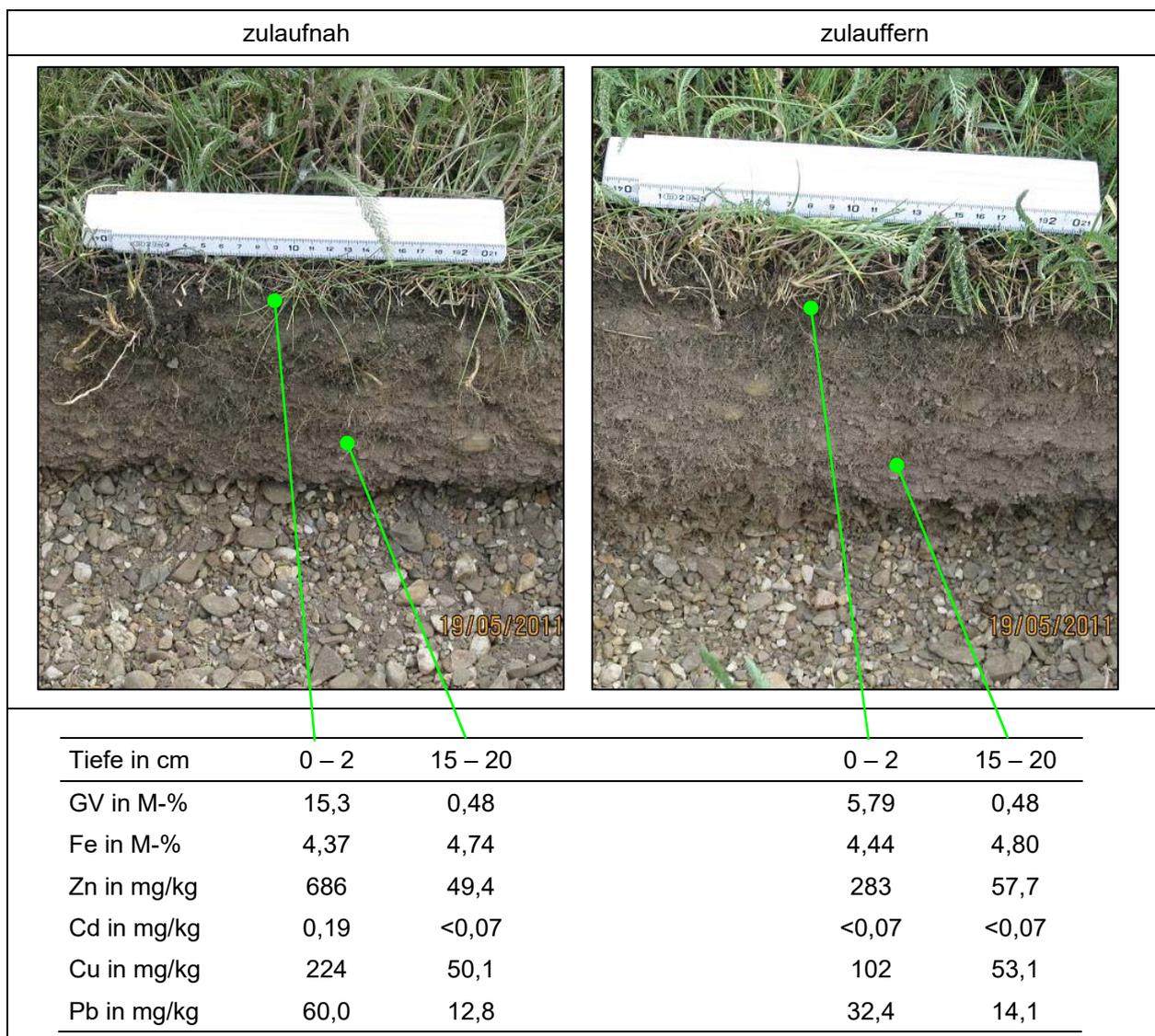


Bild 5-30:RBF A3, Köln-Ost, Westseite, A 3.1

5.8.2 Absetzbecken

Offene bzw. besonnte Absetzbecken von Straßenabflüssen können folgende Effekte auf die Qualität der Straßenabflüsse besitzen:

- Freisetzung von gelösten Stoffen aus dem Sediment durch Unterbindung der Windbelüftung
- Salzschichtungsbedingte Unterbindung der Einstauwasserbelüftung
- Salzschichtungsbedingte Minderung der Absetzleistung

Stofffreisetzung aus dem Sediment

Insbesondere bei offenen, flachen Absetzbecken in Erdbauweise kann es zur ganzflächigen Besiedlung mit Sumpfpflanzen kommen. So ist z.B. die Absetzanlage Halenreie in Hamburg innerhalb von mehreren Jahren vollständig mit Rohrkolben besiedelt worden. Der Rohrkolben bildet dort eine ca. 20 cm mächtige Schwimmdecke aus, die die Windbelüftung unterbindet. Das Absetzbecken Maarhäuserweg bei Köln wurde vollständig von Schilf und flutendem Schwaden besiedelt. Hierdurch wird die Windbelüftung unterbunden. Analysen des Einstauwassers zeigten, dass eine sehr hohe Freisetzung von Phosphor und Eisen aus dem Sediment stattfindet.

Die Sedimentfreisetzung dürfte das Einstauwasser bei Phosphor um Faktor 10 und beim Eisen um Faktor 250 angereichert haben (Bild 5-31). Der sehr hohe CSB-Gehalt des Einstauwassers von 74,8 mg/l dürfte durch die Freisetzung aus dem Sediment und der abgestorbenen Pflanzenmassen und der Planktonalgen entstanden sein. Absetzbecken mit Abschirmung der Windbelüftung können nach dem angeführten Beispiel gewässerbelastende Wirkung verursachen.



	CSB	NO ₃ -N	P _{ges}	Fe _{ges}
	in mg/l	in mg/l	in mg/l	in mg/l
Einstauwasser	74,8	0,02	0,300	5,01

Bild 5-31: Absetzbecken Maarhäuserweg, 03.07.2011

Salzbedingte Unterbindung der Windbelüftung

Eine Streusalzbelastung des Einstauwassers konnte an allen untersuchten Absetzbecken noch im Juli festgestellt werden. Die flachen Absetzbecken mit ca. 1 m Wassertiefe zeigten noch an der Wasseroberfläche hohe Salzgehalte. Bei diesen Becken ist davon auszugehen, dass der Wind den gesamten Wasserkörper durchmischen konnte und die verzögerte Ableitung des Salzes durch Entwässerungsmulden verursacht ist (Tabelle 5-45). Sauerstoffreiches Tiefenwasser ist hierdurch nicht entstanden. Dass unter diesen Bedingungen noch im Juli hohe Salzgehalte gemessen werden konnten, dürfte neben der Retentionswirkung der Mulden auch durch die geringe hydraulische Belastung der Anlagen bedingt sein.

Tabelle 5-45: Salzgehalte von flachen Absetzbecken an Autobahnen im Bereich Köln

Anlage	Probenahme	Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$	$K_{\text{S}4.3}$ in mmol/l	Na in mg/l
A1.3	18.05.2011	1.535	2,52	269
A4	18.05.2011	1.197	2,68	208
A1.1	04.07.2011	1.585	1,40	290
A3.4	06.07.2011	1.183	2,38	160
A3.5	06.07.2011	1.145	4,90	104

A1.3: Marscheider Bach

A4: A4 Richtung Aachen, westlich Kreuzung A61

A1.1: westlich Köln, Richtung Dortmund, südlich Kreuzung A57

A3.4: Bellinghausen, Richtung Köln

A3.5: Becken Nr. 5209.762

Absetzbecken ca. 1 m tief

Bei den 2 m tiefen Absetzbecken trat hingegen eine sehr starke Salzschiebung auf, die zu sauerstofffreiem Einstauwasser über dem Sediment geführt hat. Die O_2 -Verarmung kann durch biogene Belüftung der Planktonalgen teilweise überkompensiert werden, wie das Absetzbecken A 3.1 zeigt (Tabelle 5-46). Die übersättigten O_2 -Gehalte zeigen allerdings nur den ersten Teil der algenbürtigen Vorgänge an. Der spätere Zusammenbruch der Planktonalgen bewirkt durch den biogenen CSB eine Sauerstoffdepression.

Tabelle 5-46: Salz- und O_2 -Gehalte im Einstauwasser besonnener Regenklärbecken an der A3 östlich Köln

Westseite ¹ , 19.05.2011, A 3.1				
Tiefe in m	T_w in $^{\circ}\text{C}$	Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$	O_2 in mg/l	SSI in %
0,0	17,4	780	2,60	27,5
0,5	17,0	6.030	2,36	24,9
1,0	16,5	9.850	20,8	214
1,5	15,3	10.140	21,9	214
2,0	13,7	10.280	1,26	11,8
Ostseite ² , 03.07.2011, A 3.2				
Tiefe in m	T_w in $^{\circ}\text{C}$	Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$	O_2 in mg/l	SSI in %
0,0	21,5	584	11,3	128,4
0,5	19,8	589	11,1	134,1
1,0	19,1	589	11,9	130,1
1,5	18,3	3.590	805	91,0
2,0	16,6	8.400	0,48	4,9
2,2	16,5	10.060	0,00	0,0

1 Wassertiefe = 2,4 m

2 Wassertiefe = 2,35 m, Sichttiefe = 0,80 m

Salzbedingte Minderung der Absetzleistung

Im Jahr 2011 wurde im Juli beim Absetzbecken A 1.2 ein extremer vertikaler Salzgradient ermittelt. Mindestens die unteren 2/3 des Absetzvolumens waren dem salzärmeren Zulaufwasser nicht zugänglich. Dieser Umstand führt zu einer starken Abnahme der Absetzwirkung des Beckens.

Tabelle 5-47: Salz- und O₂-Gehalt im Einstauwasser eines besonnten RKB an der A1 Richtung Dortmund, nördlich Wermelskirchen, A1.2, 04.07.11

Tiefe in m	T _w in °C	Lf in µS/cm	O ₂ in mg/l	SSI in %
0,0	15,6	422	6,53	67,4
0,5	15,5	525	6,09	62,9
1,0	16,4	35.600	4,70	49,6
1,5	16,4	38.300	0,13	1,3
1,8	15,0	38.400	0,00	0,0

Wassertiefe = 2,0 m, Sichttiefe = 0,40 m

Ein Jahr später, im Juli 2012, konnte der Zu- und Ablauf des Absetzbeckens während eines Gewitterregens beprobt werden. Obwohl ein sehr großes potenzielles Absetzvolumen zur Verfügung stand, war die Absetzwirkung sehr gering. Wird das Eisen als Absetzindikator gewählt, betrug der Absetzgrad dieses Ereignisses 8 % (Tabelle 5-48). Anhand der Na-Gehalte des Zu- und Ablaufes kann geschlossen werden, dass der geringe Absetzgrad auf eine Salzschiebung zurückzuführen ist.

Tabelle 5-48: Wasserprobenahme während eines Gewitters am 10.07.12, RKB, A1 Richtung Dortmund, nördlich Wermelskirchen

	Zulauf	Ablauf
Lf in µS/cm	150	351
K _{S4.3} in mmol/l	0,51	0,68
CSB in mg/l	41,3	32,3
NH ₄ -N in mg/l	0,21	0,32
NO ₃ -N in mg/l	0,29	0,47
P _{ges} in mg/l	0,056	0,088
Fe _{ges} in mg/l	2,59	2,38
Zn _{ges} in µg/l	380	245
Na in mg/l	5,7	47,7

Jeweils 2 Stichproben (Zulauf, Ablauf), 20.20 Uhr, 20.35 Uhr

Es ist davon auszugehen, dass insbesondere bei spezifisch großen Absetzvolumen, wie den im Kölner Raum untersuchten Becken, die Salzschiebung in der ersten Jahreshälfte die Absetzwirkung stark mindert.

6 Schlussfolgerungen und Vorschläge

6.1 Filtermaterial

Durch die Verwendung von Filtermaterial mit geringen Feinkorn- (T+U), Grobkorn- (S+G) und Humusanteilen traten die filtermaterialbürtigen Effekte, wie zu geringe hydraulische Leitfähigkeit, geringer Feinpartikelrückhalt oder mineralisationsbedingte Eisenverlagerung nicht mehr auf.

Die Herstellung von carbonatreichem Filtermaterial (z.B. 20 M-% CaCO_3) ist ohne Zunahme der Grobsandfraktion möglich. Die Zumischung des grobsanddominierten Carbonatbrechsandes kann durch grobsandarme Filtersande kompensiert werden.

Durch die Verwendung von gewaschenen Carbonatbrechsanden kann auch ein geringer T+U-Gehalt von < 1 M-% im Filtermaterial eingehalten werden.

Bei der zukünftigen Fremdüberwachung des Filtermaterialies sollten folgende Ergänzungen vorgenommen werden:

- Der Carbonatbrechsand muss in einer Vorprobe auf königswasserlösliche Schwermetalle untersucht werden. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass ein unbekannter Teil der Carbonatgesteine hohe Blei- und Cadmiumgehalte aufweisen kann. Die Vorprobe dient der rechtzeitigen Auswahl schwermetallarmer Carbonate.
- Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass ein sehr hoher reaktivitätsbedingter Carbonatverbrauch auftreten kann. Um dies zu verhindern, sollte ein Carbonat der Korngröße 0,20 – 2,00 mm verwendet werden. Der geforderte Carbonatgehalt von z.B. 20 Mass-% sollte sich auf diese Korngröße beziehen. Die neue Festlegung zum CaCO_3 sollte an Großanlagenuntersuchungen auf ihre Wirksamkeit überprüft werden.

6.2 Filteraufbau

Wie die bisherigen Ergebnisse zeigen, hat die Carbonatdecklage 2/5 zwei Funktionen:

- Unterbindung der Kolmation in den ersten Betriebsjahren
- Carbonatversorgung, insbesondere des Filtersedimentes

Die Mächtigkeit der Decklage sollte 5 cm betragen.

Bei höherer Feinpartikelbelastung kann es bei fehlender Carbonatdecklage zur Filterkolmation in den ersten Betriebsjahren kommen. In späteren Betriebsjahren wird die hydraulische Wirkung der Decklage durch die Schilfstreu ersetzt. Es ist deshalb notwendig, dass die Schilfernte unterbleibt.

Nach den bisherigen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass auch bei hoher Filterbelastung zoogene Bioturbation stattfindet. Hierdurch kann u.a. auch ein von der Decklage nach oben in das Sediment gerichteter partikulärer Carbonattransport erfolgen. Die Carbonatdecklage trägt hierdurch bei älteren Filtern zur Carbonatversorgung der Sedimentschicht bei. Trotz des sehr groben Carbonatkornes der Decklage kann auch ohne

Bioturbation bei Einbettung des Sedimentes in die Decklage eine Carbonatversorgung stattfinden, wie Sedimentuntersuchungen am RBF Vanikum gezeigt haben.

Die eventuell auftretende Minderung der hydraulischen Leitfähigkeit durch Schilfwurzeleinwuchs kann durch einen Folienstreifen entlang des Dränrohres verhindert werden. Gleichzeitig kann durch den Folienstreifen die Dränschichtmächtigkeit auf den Dränrohrdurchmesser reduziert werden (Minderung Todvolumen). Hierdurch ist auch eine hohe Sicherheit gegenüber Filtermaterialeintrag ins Dränrohr gegeben, die ohne Folienstreifen auch bei höherer Dränschicht nicht erreicht wird.

6.3 Filterbelastung

In dieser Untersuchung wurde als Maß für die Filterbelastung die T+U-Menge in $\text{kg/m}^2\cdot\text{a}$ verwendet. Die Referenzbelastung wurde früher zu $4 \text{ kg T+U}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ festgelegt. Von den in NRW untersuchten Anlagen erreicht im Anlagenmittel keine diesen Wert, in Baden-Württemberg überschritten hingegen ca. $\frac{1}{4}$ der untersuchten Anlagen diesen Wert. Erst wenn dieser Referenzwert erreicht wird, können Schwachlastwirkungen wie mechanische Filterprofilzerstörung durch Tierhöhlen ausgeschlossen werden. Filterbelastungen zwischen $4 - 8 \text{ kg T+U}/\text{m}^2\cdot\text{a}$ zeigten bisher kein hydraulisches Filterversagen. Die zukünftige Filterbelastung sollte deshalb im Bereich von $4 - 8 \text{ kg T+U}/\text{m}^2\cdot\text{a}$ liegen.

Bei üblich bemessenen Mischwasserfiltern ist die Minderbelastung an Feinpartikeln primär durch die geringe Zulaufkonzentration verursacht. Eine höhere Feinpartikelbelastung setzt deshalb eine deutlich höhere hydraulische Filterbelastung voraus. Wo die hydraulische Belastungsgrenze der RBF liegt, sollte zukünftig ermittelt werden, da nur hierdurch die mögliche feinpartikuläre Belastungsgrenze erreicht werden kann. Da die planerische Prognose der Filterbelastung z.T. unsicher ist, könnten zukünftig RBF in 2 Stufen gebaut werden. Durch die hydraulische Betriebskontrolle (Q_{zu} , Beschickungshäufigkeit, Trockenzeiten, k_f) kann geklärt werden, ob die geringere Filterfläche ausreichend ist oder ob eine zweite Filterfläche notwendig ist. Die eventuelle Flächenerweiterung kann als Verlängerung der vorhandenen Langseitenbeschickung erfolgen. Hierdurch ist eine aufwandsarme modulare Erweiterung möglich.

Bei Anlagen, die schon aufgrund der Planungsgrößen als schwachlastig zu identifizieren sind, (z.B. Beschickungshäufigkeit $< 10/\text{a}$) sollte auf einen Schilfbewuchs verzichtet und Gras angesät werden. Der Grasbewuchs ist jedoch im Unterschied zum Schilf regelmäßig zu mähen und das gemähte Gras zu entnehmen.

Die homogene Filterflächenbelastung ist bei trockenfallendem Regelbetrieb u.a. für die Elimination von NH_4 , gelöstem CSB und gelösten Schwermetallen relevant. Weiterhin ist der möglichst gleichmäßige Carbonatverbrauch hiervon abhängig. Die enormen betrieblichen Auswirkungen selbst moderater Belastungsunterschiede konnten am Beispiel des RBF Kenten erkannt werden. Um eine gleichmäßige Filterbelastung zu erzielen, sollte der Filter daher über die lange Seite beschickt werden. Bei quadratischer Grundfläche sollte eine Beschickung über eine mittige Rinne vorgenommen werden. Bei entsprechender Ausgestaltung der Beschickungsrinne können die sich durch die Beschickungsrinnen ergebenden Filterbeete auch alternierend beschickt werden.

6.4 Sonderanwendungen

Eine hohe Elimination von Feinpartikeln, partikulärem CSB, NH_4 und der Gesamtgehalte an Schwermetallen können nach bisherigem Kenntnisstand durch carbonathaltige Standardfilter erzielt werden. Eine hohe NH_4 -Elimination ist mit Standardfiltern nur bei Einzelereignisfrachten kleiner $6 \text{ g NH}_4\text{-N/m}^2$ und häufiger Filterbeschickung ($>15/\text{a}$) erzielbar. Sollen Einzelereignisfrachten mit größer $6 \text{ g NH}_4\text{-N/m}^2$ hohen Wirkungsgrad erzielen, ist ein sorptionsstärkeres Filtermaterial notwendig. Bei fremdwasserbedingt hohen NH_4 -Einzelereignisfrachten (lange Einstauzeiten) kann auch eine Beetalternierung die sorptionsbedingte Leistungsdepression verhindern.

Hohe Keimeliminationen (2 - 4 Zehnerpotenzen) können nach bisherigem Kenntnisstand nicht mit einem Standardfiltermaterial und trockenfallendem Filterbetrieb realisiert werden. Ist eine hohe Keimelimination erforderlich, muss ein feinkörniges Filtermaterial verwendet werden. Ob mit herkömmlichem Filtermaterial in Kombination mit einem Teileinstau, der keine nachteiligen Auswirkungen auf die NH_4 -Elimination besitzt, ebenfalls eine hohe Keimelimination erzielt werden kann, ist bisher nicht bekannt.

Soll bei Mischwasserfiltern eine hohe P-Elimination erzielt werden, muss ein eisenhydroxidhaltiges Sonderfiltermaterial verwendet werden.

6.5 Filterbetrieb

Der Teileinstaubetrieb, der meist als Folge einer zu geringen Filterbelastung angewendet wird, führt im Mischsystem zu einer Hemmung der NH_4 -Elimination und zur Freisetzung von Mangan und Eisen aus dem Filtermaterial. Auch kurze Einstauperioden z.B. Frühjahrseinstau zur Schilfentwicklung führen zu den angeführten Effekten. Bei geringer nicht erhöhbarer Filterbelastung sollte deshalb generell der trockenfallende Filterbetrieb angewendet werden. Die Rückentwicklung des Schilfes durch Aufgabe des Teileinstaus sollte akzeptiert werden. Da die mechanische Zerstörung des Filterprofils durch grabende Tiere nur bei hohem Teileinstau unterbunden werden kann, muss eine andere Maßnahme zur mechanischen Sicherung des Filterprofils gefunden werden. Dies können in Abhängigkeit der Filterbelastung und Filterbelastungsverteilung die Umstellung auf einen Mähwiesenbetrieb oder die Langseitenbeschickung sein. Es wird vorgeschlagen, am Beispiel der Anlage Kenten, deren zulaufferne Filterhälfte zwischenzeitlich stark durch Schilfrückgang und Tierbauten geprägt ist, die Langseitenbeschickung zu erproben.

6.6 Hydraulische Betriebskontrolle

Bisher fehlen automatische Erhebungen zur hydraulischen Filterbelastung (Q_{zu} in $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{a}$), Beschickungshäufigkeit, Trockenzeit und Filterleistung (k_f). Durch dieses Defizit ist nicht bekannt, welche feinpartikuläre Filterbelastung nötig und möglich ist, um Unter- und Überlasterscheinungen zu verhindern. Es wird vorgeschlagen, zukünftig an jeder Filteranlage den k_f -Wert online ausschließlich über Wasserstands-/Volumenbeziehungen zu erfassen. Die automatische Auswertung der Daten sollte über ein einheitliches Erfassungs- und Auswerteprogramm erfolgen. Voraussetzung für diese Vorgehensweise sind zwei Wasserstandssonden und ein E-Schieber am Dränablauf. Die hydraulische sollte mit der

stofflichen Betriebskontrolle, insbesondere der Ermittlung der T+U-Belastung (via Sedimentuntersuchung) kombiniert werden. Hierdurch lässt sich zukünftig klären, welche Filterbelastung optimal ist und wie Unter- und Überlasterscheinungen vermieden werden könnten.

6.7 Visuelle und stoffliche Betriebskontrolle

Im Anhang 8.3 sind Beispiele für eine visuelle Betriebskontrolle angeführt.

Die stoffliche Betriebskontrolle von Standardfiltern sollte insbesondere die längerfristige Sicherung der Elimination von $\text{NH}_4\text{-N}$ und Schwermetallen, den Carbonatvorrat und die Immobilität des Schadstoffdepots umfassen. Es wird unabhängig von der Filterbelastung im Abstand von 10 Betriebsjahren eine Filtersediment- und Filtermaterialuntersuchung vorgeschlagen. Diese muss das räumliche Mosaik (vertikal, zulaufnah, zulauffern) erfassen. Um die Ergebnisse problemlos vergleichen zu können, sollte zukünftig eine standardisierte Tiefenbeprobung (0 - 10, 10 - 30, 30 - 60, 60 - 90 cm) mit Lagerungsdichtenbestimmung der Sedimentschicht vorgenommen werden.

6.8 Betriebliche Carbonatausbringung

Bisher wurde bei keiner versauerten Altanlage eine Carbonatzufuhr durch Carbonatbrechsand oder Carbonatsplitt vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Erhebungsuntersuchung zeigen, dass bei fehlendem Carbonat im Ausgangsfiltersubstrat und bei fehlender oder sehr geringer Carbonatzufuhr über den Zulauf, insbesondere eine Versauerung des Filtersedimentes mit starker Abnahme der SM-Bindekapazität eintritt. Das sehr geringe pH-gepufferte Filtermaterial kann hingegen noch pH-Werte über 7 besitzen, wenn eine mächtige Sekundärfilterschicht für eine Zwischenspeicherung von gelöster Zulaufbase sorgt. Da es mehrere versauerte Altanlagen gibt und andererseits aber keine Erfahrungen über die betriebliche Carbonatanreicherung besteht, wird vorgeschlagen an der Anlage Geilenkirchen einen Pilotversuch vorzunehmen. Dieser soll klären, welche Carbonate (Carbonatbrechsand, Carbonatsplitt) und welche Mengen zur Sicherung oder Wiederherstellung einer hohen $\text{NH}_4\text{-N}$ - und Schwermetallelimination und eines immobilen Schwermetalldepots notwendig sind.

6.9 Muldenentwässerung und Absetzbecken bei Straßen

Die Muldenentwässerung besitzt aufgrund des großen Verhältnisses von potenzieller Filterfläche zur A_v -Fläche ein großes Reinigungspotenzial. Dieses sollte zukünftig durch Optimierung des Straßenseitenbereiches als Filter (feineres Filtermaterial, ganzflächige Dränschicht) genutzt werden. Muldenentwässerungsflächen sollten zukünftig nicht mehr an zentrale Reinigungsanlagen angeschlossen werden. Hierdurch entfällt u.a. die Zufuhr von gereinigtem Trockenwetterabfluss, der insbesondere im RBF zur Kolmation führen kann.

Die Größe von Absetzbecken als Filtervorstufe sollte sich zukünftig ausschließlich am Grobkornrückhalt (Sand und Kies) und an der eventuell notwendigen Ölhaverie orientieren. Der Rückhalt von Feinpartikel (T+U) in Vorstufen sollte zukünftig kein Verfahrensziel mehr sein.

Dauereingestaute Absetzanlagen zum Rückhalt von Feinpartikeln sollten unabhängig von der konstruktiven Ausbildung (besonnte, unbesonnte, Erdbauweise, Betonbauweise) nicht mehr errichtet werden, da die Wirkungsgrade insbesondere unter Salzlast sehr gering und die gütebelastenden Sekundäreffekte (Sedimentfreisetzung, biogene CSB-Bildung) sehr hoch sind.

Als Alternative zu den genannten Absetzbecken werden bei sehr hohen Gewässeranforderungen RBF mit vollständiger Deponierung der Feinpartikel auf der Filteroberfläche oder bei geringeren Gewässeranforderungen großvolumige Absetzanlagen mit trockenfallenden Batchbetrieb vorgeschlagen.

7 Literatur

- Bodenfilteranlagen in NRW, Stand der Technik, Abschlussbericht 01/2001, Auftraggeber: MUNLV von NRW
- Dittmer, U. (2002): Prozesse des Rückhaltes und Umsatzes von Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen in Retentionsbodenfilteranlagen zur Mischwasserbehandlung, Dissertation TU Kaiserslautern
- Ehwald, R., Lambert, B. (2009): Schilf als unverzichtbares Verfahrenselement der RBF. Manuskript. Veranstaltung der DWA-Landesgruppe Bayern, 20 Jahre Retentionsbodenfilter am 01.10.2009
- Grotehusmann, D., Kasting, U. (2011): Messtechnische Begleitung des RKB Bentelerstraße mit nachgeschaltetem Bodenfilter. Bericht, Auftraggeber: Stadtentwässerungsbetrieb Paderborn
- Grotehusmann, D., Kasting, U. (2008): Vergleich der Reinigungsleistung von Retentionsbodenfiltern und Versickerungsanlagen an Bundesfernstraßen, Schlussbericht, Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- Lambert, B., Fuchs, S. (2014): Erhebungsuntersuchung zur Optimierung von Retentionsbodenfilteranlagen in Baden-Württemberg. Unveröffentlichter Bericht, Auftraggeber: Ministerium für Umwelt, Stuttgart
- Lambert, B. (2011): Leistungsüberprüfung des RBF Hopfensee. Bericht, Auftraggeber: Autobahndirektion Südbayern, Kempten
- Lambert, B.; Orb ,R.; Fuchs, S. (2010): Untersuchung RBF Monheim. Abschlussbericht, Auftraggeber: Landesamt für Umwelt, Augsburg
- Lambert, B. (2010): Wurzelmassenuntersuchung des RBF Mommenheim. Unveröffentlichte Ergebnisse, Probenahme 08.04.2010
- Lambert, B. (2007): Bodenkundliche Untersuchungen an der Straßenbankettlysimeteranlage in Augsburg. Veröffentlichter Abschlussbericht des Landesamtes für Umwelt in Augsburg
- Lambert, B. (2004): Mischwassersäulenversuche mit Quarzsand. Unveröffentlichte Ergebnisse

LFU (1998): Bodenfilter zur Regenwasserbehandlung in Misch- und Trennsystem, Handbuch Wasser 44, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

Mertens, F. M., Christoffels, E., Schreiber, C. Kistemann, T. (2012): Rückhalt von Arzneimitteln und Mikroorganismen am Beispiel des RBF Altendorf, Korrespondenz Abwasser, 59. Jg., H. 12, 1137 - 1143

Namuth, M. (2006): Retentionsbodenfilter Hille-Hartum. Abschlussbericht 10/2006. FH Minden, Auftraggeber: MUNLV von NRW

Petrowski, K., Grobe, S. (2010): Bewertung der Leistungsfähigkeit von vier RBF hinsichtlich der Rückhaltung hygienisch relevanter Mikroorganismen, Abschlussbericht IWW Mülheim, Auftraggeber: WAG Nordeifel

Tondera, K., Koenen, S., Dahmen, H. (2013): Betriebsoptimierung von Retentionsbodenfilter im Mischsystem. Abschlussbericht, Auftraggeber: MUNLV von NRW

Wasseranalysen von RBF, Datenbestand des Landes NRW

8 Anhang

8.1 Wasser

Labor-Nr.	Probenahme	Bezeichnung	Lf	pH-Wert	Ks 4,3	CSB	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P	PO ₄ -P	Fe	Zn	Mn	SO ₄	Ca	Na
									gesamt		gesamt	gesamt	gesamt	gesamt	gesamt	gesamt
									[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
RBF Vanikum																
1	13.05.2011	Dränablauf	512		4,40	6,72		5,00	0,019	<0,007	0,01	0,02		20,5	84,9	6,53
48	26.05.2012	Einstauwasser, Ablaufschacht	543	7,5	3,56	<5	0,07	3,07	0,032	0,014	0,04	0,18	<0,01	82,1	-	-
53	11.07.2012	Einstauwasser Dränablauf	327	7,5	2,84	7,26	0,04	0,23	<0,007	<0,007	0,03	0,08		23,9	55,9	6,33
RBF Glehn																
2	13.05.2011	Dränablauf	343		2,58	6,50		5,56	1,860	1,677	0,06	0,02		1,58	45,8	14,3
51	22.05.2012	Dränablauf, Einstauwasser	217	6,6	1,10	26,4	1,74	0,10	1,570	1,393	3,64	0,03	0,11	14,7	-	-
49	26.05.2012	Einstauwasser, Ablaufschacht	646	7,5	2,98	<5	0,02	24,8	0,229	0,210	<0,01	0,02	0,02	45,1	-	-
52	11.07.2012	Einstauwasser Dränablauf	761	7,7	3,06	13,0	0,08	41,7	0,213	0,223	0,02	0,01		51,2	102	17,2
RBF Kenten																
9	16.05.2011	Dränablauf, zulaufnah	609		1,74	19,8		23,8	1,496	1,393	0,05	0,17		40,6	62,4	41,4
10	16.05.2011	Dränablauf, zulauffern	610		1,62	9,58		34,9	0,976	0,888	0,02	0,01		37,1	72,6	30,1
47	26.05.2012	Einstauwasser, Ablaufschacht	506	7,1	2,58	12,6	5,69	14,0	2,281	1,968	0,44	0,04	0,09	24,2	-	-
54	11.07.2012	Einstauwasser Dränablauf, links	382	6,9	2,28	15,1	0,86	8,87	1,205	1,449	0,01	0,02		19,2	51,0	17,5
55	11.07.2012	Einstauwasser Dränablauf, rechts	283	6,9	1,34	20,1	2,34	4,45	1,595	1,612	0,05	0,03		17,1	32,3	14,6
67	19.05.2014	Dränablauf zulaufnah, Einstauwasser	330	7,4	1,84	17,8	6,15	0,09	1,335	1,576	0,15	0,04		20,9	26,4	25,9
68	19.05.2014	Dränablauf zulauffern, Einstauwasser	348	7,6	2,18	12,9	4,79	0,56	1,562	1,886	0,06	0,02		21,4	32,0	26,4
RBF Erbach-Süd																
11	17.05.2011	Dränablauf, Einstauwasser	611		3,80	<5		7,48	-	0,028	0,01	0,01		61,8	99,6	9,36
RBF Wermelskirchen																
60	08.10.2012	Dränablauf, 13:50 Uhr	187	6,7	0,70	<5	<0,01	3,56	0,509	0,512	0,01	0,02	<0,01	10,7	17,2	12,3
RBF Geilenkirchen																
36	06.07.2011	Einstauwasser Dränablauf	284	7,2	1,54	14,1		6,75	0,615	0,576	0,03	0,19		20,5	35,8	11,3
RBF Frelenberg																
37	06.07.2011	Einstauwasser Dränablauf	244	7,1	1,66	22,4		0,65	0,607	0,424	3,78	0,09		18,3	19,7	30,5
65a	10.10.2012	Dränablauf, 8:00 Uhr	170	6,3	0,88	18,7	1,79	0,03	1,566	1,589	6,45	0,04	0,16	7,64	14,7	11,6
65b	10.10.2012	Dränablauf, 8:00 Uhr, angesäuerte Probe							1,842*		7,63*	0,03*	0,22*		14,8*	
66	10.10.2012	Dränablauf, 15:30 Uhr	170	6,3	0,88	16,8	1,84	0,28	1,613	1,511	7,04	0,02	0,17	7,06	14,7	11,9
RBF Nettelstedt																
34	05.07.2011	Einstauwasser Dränablauf	304	7,8	2,16	9,37		2,90	0,363	0,364	0,02	0,01		17,8	47,1	10,2
RBF Gehlenbeck																
35	05.07.2011	Einstauwasser Dränablauf	1117	7,6	5,00	13,3		2,37	0,013	<0,007	0,02	<0,01		336	217	16,4
RBF Harwick, Gescher																
23	21.05.2011	Nachlauf aus Dränsammler, oberes Beet	957		5,20	21,3		1,51	0,337	0,289	0,08	0,02		87,4	119	65,1
24	21.05.2011	Nachlauf aus Dränsammler, unteres Beet	919		4,80	18,8		1,15	0,238	0,253	0,07	0,03		86,5	114	65,0
RBF Herongen																
12	18.05.2011	Restwasser Dränsystem	601		3,88	5,70		4,23	0,078	0,071	0,04	0,02		70,5	89,8	20,5

Labor-Nr.	Probenahme	Bezeichnung	Lf	pH-Wert	Ks 4,3	CSB	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P	PO ₄ -P	Fe	Zn	Mn	SO ₄	Ca	Na
RBF Madfeld																
19	20.05.2011	Gesamtablauf, Einstauwasser abgelassen	982		4,04	5,23		20,7	0,307	0,302	0,01	0,01		42,8	110	64,9
20	20.05.2011	Ablaufhahn hinter MID, linke Seite	942		3,98	7,01		17,9	0,302	0,266	0,01	0,02		50,4	100	65,3
21	20.05.2011	Ablaufhahn hinter MID, rechte Seite	961		4,02	<5		18,6	0,284	0,279	0,01	0,02		52,4	103	65,4
RBF Hille-Hartum																
32	05.07.2011	Brunnenwasser	1103	7,7	5,70	<5		<0,01	<0,007	<0,007	0,91	0,08		199	174	52,5
33	05.07.2011	Dränablauf, 14:20 Uhr	727	7,9	5,54	10,5		0,67	0,043	0,030	0,03	0,01		72,1	121	26,8
RBF Hallschlag																
8	15.05.2011	Restwasser Dränsystem	422		2,82	<5		0,92	0,090	0,063	0,01	<0,01		11,9	40,2	31,6
6	15.05.2011	Ablauf Kronenburgersee	217		1,52	<5		0,55	0,024	<0,007	0,24	0,01		9,36	21,7	9,87
7	15.05.2011	Zulauf Kronenburgersee, Höhe RBF Hallschlag	233		1,20	<5		1,41	0,152	0,085	0,16	0,01		11,0	17,0	14,6
RBF Altendorf																
63	09.10.2012	9:00 Uhr, Dränablauf, Einstauwasser	222	7,1	1,54	<5	0,37	2,66	0,538	0,561	0,02	0,03	0,00	5,26	33,7	5,55
RBF Glessen, Trennsystem																
3	14.05.2011	Restwasser Dränsystem	425		2,64	20,0		16,2	0,351	0,319	0,02	0,02		9,58	64,4	2,32
4	14.05.2011	Einstauwasser, Vorstufenrinne	533		4,04	125		0,05	3,168	2,552	2,67	0,57		31,0	45,3	20,4
RBF Graf Zeppelin, Autobahnkreuz Wünneburg-Haaren																
50	25.05.2012	Dränablauf, Einstauwasser	255	7,5	2,24	15,0	0,32	0,10	0,018	<0,007	0,04	0,01	0,03	4,10		
RBF Bentelerstraße, Paderborn																
25	02.07.2011	Zulauf Einstauwasser	183,1	7,1	1,12	33,6		1,80	0,065	0,017	0,27	0,17		9,92	27,5	8,06
26	02.07.2011	Ablauf Einstauwasser	323	7,9	2,62	9,00		1,58	0,011	<0,007	0,01	0,01		15,3	60,7	6,77
43	25.05.2012	Einstauwasser Retentionsraum	315	7,5	2,54	31,4	0,28	<0,01	0,100	<0,007	0,51	0,03	0,19	8,30		
44	25.05.2012	Dränablaufschacht Einstauwasser	259	7,9	1,94	24,6	0,17	0,06	0,046	<0,007	0,09	0,04	0,04	13,3		
45	25.05.2012	Dränablauf nach 21 min	587	7,7	4,54	8,39	0,07	<0,01	0,014	0,022	0,04	0,03	0,06	19,3		
46	25.05.2012	Dränablauf nach 43 min	626	7,4	6,04	23,6	0,08	<0,01	0,022	<0,007	0,08	0,07	0,18	11,8		
A3 Köln-Ost, Westseite, A3.1																
18	19.05.2011	Vorstufe, oberflächennah	767		1,90	35,3		0,33	0,030	0,007	1,31	0,07		12,4	25,2	121
A3 Köln-Ost, Ostseite, A 3.2																
27	03.07.2011	Einstauwasser Vorstufe	583	7,5	0,68	18,4		1,13	0,033	<0,007	0,17	0,04		10,9	16,4	99,7
A3, Osten, südliche AS Köln-Mühlheim, A 3.3																
17	19.05.2011	Vorstufe, oberflächennah	1776		1,40	10,8		0,31	0,053	0,012	0,18	0,02		18,8	28,1	327
A3, Ostseite, km 32.65, Bellinghausen, A 3.4																
38	06.07.2011	Einstauwasser zulaufnah	1183	7,9	2,38	19,6		0,42	0,045	0,016	0,20	0,01		32,2	58,7	160
39	06.07.2011	Einstauwasser zulauffern	577	8,0	1,94	30,2		0,03	0,043	0,010	1,01	0,06		14,0	23,7	93,8
A3, Becken Nr. 5209.762, Ostseite, A 3.5																
40	06.07.2011	Wasserprobe Zulauf	1245	8,0	4,90	17,8		4,66	0,047	0,017	0,46	0,02		59,6	128	104
41	06.07.2011	Wasserprobe Ablauf	913	8,0	3,72	11,2		0,17	0,021	0,013	0,02	<0,01		38,8	55,3	130
RRB Maarhäuserweg, A 3.6																
28	03.07.2011	zulaufseitig Bereich ohne Schilf	571	7,1	2,26	74,8		0,02	0,300	0,152	5,01	0,02		5,16	22,7	101
A1, westlich Köln, Versickerungsanlage, Ri Norden, 400m vor Abzweig A57, A1.1																
30	04.07.2011	Vorstufe zulaufnah	290	7,9	1,58	39,0		0,26	0,051	0,019	0,56	0,02		9,69	20,8	39,1
31	04.07.2011	Vorstufe zulauffern	1585	9,1	1,40	31,8		0,02	0,022	<0,007	0,20	0,01		8,85	23,7	290
A1 500m nördlich Ausfahrt Wermelskirchen, Ostseite, A1.2																
29	04.07.2011	Vorstufe, ablaufseitig	407	7,2	0,56	17,4		1,22	0,018	<0,007	0,30	0,32		61,6	25,1	45,5
56	11.07.2012	Zu, 20:20 Uhr	106	7,0	0,36	48,4	0,20	0,25	<0,007	<0,007	2,93	0,37		25,0	11,8	3,15
57	11.07.2012	Ab, 20:20 Uhr	395	7,3	0,78	26,5	0,30	0,46	0,092	<0,007	2,60	0,27		20,8	17,2	55,8
58	11.07.2012	Zu, 20:35 Uhr	195	7,2	0,66	34,2	0,22	0,33	0,109	0,008	2,25	0,39		49,5	21,0	8,21
59	11.07.2012	Ab, 20:35 Uhr	307	7,3	0,58	38,2	0,34	0,49	0,084	<0,007	2,17	0,22		24,7	16,0	39,6
RBF Marscheider Bach, A1.3																
13	18.05.2011	Vorstufe, zulaufnah	566		1,56	36,4		3,86	0,089	0,014	0,73	0,09		32,0	31,6	76,3
14	18.05.2011	Vorstufe, zulauffern	1535		2,52	14,0		0,14	0,023	<0,007	0,39	0,04		17,6	37,3	269
15	18.05.2011	Dränablauf	1421		4,20	11,2		0,08	0,087	0,051	1,17	0,01		11,3	33,1	261

8.2 Feststoffe

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	TS	Korngrößenverteilung						Wurzelmasse	Glühverlust	CaCO ₃	pH _{CaCl2}
				[mm]									
				<0,063	0,06-0,20	0,20-0,63	0,63-2,0	2,0-6,3	>6,3				
			T+U	fS	mS	gS	fG	mG					
			[%FS]	[%]						[% TM]	[%]	[%]	
1 RBF Vanikum													
1	13.05.2011	Zulaufsed in Schotter (Analyse ohne Schotter)	97,7								7,7	18,4	7,2
2	13.05.2011	zulaufnah 0-2 cm	71,9	14,0	19,5	53,3	11,6	1,0	0,6		5,20	20,8	7,1
3	13.05.2011	zulaufnah 5-10 cm	86,8	1,9	17,9	61,5	17,1	1,6	0,0		0,51	27,0	7,5
4	13.05.2011	zulauffern 0-2 cm	70,5	13,3	20,0	55,0	10,6	1,1	0,0		5,05	21,7	7,0
5	13.05.2011	zulauffern 5-10 cm	84,3	2,2	19,6	60,7	15,3	1,4	0,8		0,48	27,3	7,6
6	13.05.2011	Manganniederschlag Ablaufschacht	9,4								16,2	6,82	
2 RBF Glehn													
7	13.05.2011	zulaufnah 0-5 cm	70,5	14,0	11,8	49,7	20,3	4,2	0,0		8,60	13,4	6,8
8	13.05.2011	zulaufnah 5-10 cm	93,8	2,4	6,5	54,0	28,2	7,3	1,6		0,68	23,6	7,6
9	13.05.2011	zulauffern 0-5 cm	94,5	2,1	7,9	62,7	22,6	4,7	0,0		0,78	21,6	7,5
10	13.05.2011	zulauffern 5-10 cm	94,7	2,9	9,0	63,1	20,5	3,9	0,6		0,40	24,0	7,8
3 RBF Kenten													
zulaufnah													
20	16.05.2011	Streu	62,6								31,3	3,73	5,7
21	16.05.2011	0-5 cm	75,6	15,6	11,0	58,8	13,3	1,3	0,0		6,78	8,14	6,6
22	16.05.2011	5-10 cm	95,0	2,2	11,1	66,4	18,3	2,0	0,0		0,51	13,1	7,4
23	16.05.2011	20-30 cm	94,7	2,1	13,3	67,3	15,9	1,4	0,0		0,50	14,7	7,5
zulauffern													
24	16.05.2011	Streu	87,4								75,3	3,25	5,6
25	16.05.2011	0-5 cm	85,4	6,1	17,2	60,9	14,9	0,9	0,0		3,52	25,3	6,9
26	16.05.2011	5-10 cm	94,6	2,4	17,7	61,6	17,3	1,0	0,0		0,57	28,7	7,5
27	16.05.2011	20-30 cm	95,0	2,3	18,7	60,9	16,3	1,8	0,0		0,47	32,2	7,6
4 RBF Erbach-Süd													
36	17.05.2011	Sed zulaufinnensteine	75,2	66,3	4,2	21,7	6,6	1,2	0,0		7,42	0,24	6,6
zulaufnah													
37	17.05.2011	0-5 cm	78,9	31,6	12,0	45,3	9,4	1,7	0,0		9,88	0,12	6,0
38	17.05.2011	15-30 cm	93,2	8,0	16,0	72,5	3,0	0,5	0,0		0,64	0,12	6,9
mittig													
39	17.05.2011	0-5 cm	81,2	11,2	16,8	61,7	9,1	1,2	0,0		9,16	1,98	6,0
40	17.05.2011	15-30 cm	94,5	6,3	14,6	71,9	6,3	0,9	0,0		0,74	0,17	6,7
zulauffern													
41	17.05.2011	0-5 cm	85,0	6,3	9,2	57,9	22,2	4,4	0,0		5,57	0,58	6,3
41a	17.05.2011	15-30 cm	94,1	8,3	17,5	70,6	3,2	0,4	0,0		0,66	0,19	6,8
Profilgrube													
42	17.05.2011	5-15 cm	97,3	5,7	14,4	70,0	8,5	1,4	0,0				
		5-15 cm, <2mm									0,65	0,14	6,4
43	17.05.2011	15-30 cm	95,4	7,7	14,4	72,7	4,8	0,4	0,0		0,51	0,13	6,3
44	17.05.2011	30-60 cm	93,2	9,1	15,8	71,6	3,3	0,2	0,0		0,50	0,08	6,4
45	17.05.2011	60-90 cm	89,7	9,6	16,2	70,4	3,4	0,4	0,0		0,53	0,11	6,3
46	17.05.2011	90-110 cm, Grobsand	85,3	1,0	4,1	65,3	22,3	7,3	0,0				
		90-110 cm, Grobsand, <2mm									0,35	0,14	6,8

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	TS	Korngrößenverteilung						Wurzelmasse	Glühverlust	CaCO ₃	pH _{CaCl2}
				[mm]									
				<0,063	0,06-0,20	0,20-0,63	0,63-2,0	2,0-6,3	>6,3				
			T+U	fS	mS	gS	fG	mG					
			[%FS]	[%]						[% TM]	[%]	[%]	
5 RBF Benninghoferweg													
zulaufnah													
47	17.05.2011	0-5 cm Sed	72,3	80,8	12,6	5,4	0,9	0,3	0,0		20,6	11,1	7,0
48	17.05.2011	5-10 cm	98,0	1,8	3,8	56,8	30,6	7,0	0,0				
		5-10 cm, <2mm									0,55	0,21	7,1
49	17.05.2011	10-15 cm	98,0	0,8	4,0	57,0	31,8	6,4	0,0				
		10-15 cm, <2mm									0,40	0,18	7,2
50	17.05.2011	15-30 cm	97,2	0,8	3,9	57,1	32,2	6,0	0,0				
		15-30 cm, <2mm									0,28	0,19	7,5
zulauffern													
51	17.05.2011	0-5 cm	89,7	15,4	3,5	43,5	29,0	8,6	0,0				
		0-5 cm, <2mm									5,15	1,28	7,1
52	17.05.2011	5-10 cm	98,4	1,2	4,5	57,5	30,2	6,6	0,0				
		5-10 cm, <2mm									0,35	0,10	7,3
53	17.05.2011	10-15 cm	98,0	1,0	3,6	57,6	31,7	6,1	0,0				
		10-15 cm, <2mm									0,39	0,14	7,3
54	17.05.2011	15-30 cm	97,7	0,8	3,5	54,4	33,4	7,9	0,0				
		15-30 cm, <2mm									0,30	0,21	7,6
6 RBF Wermelskirchen													
112	04.07.2011	Sediment + FiS, 0-5 cm, mittig	67,4	5,3	10,3	51,9	24,1	8,4	0,0		8,72	4,81	6,4
113	04.07.2011	0-15 cm, mittig zwischen Zulauftrinne und zulauftrinnenfern	90,8	4,9	8,8	48,9	31,2	6,2	0,0		1,09	2,47	7,3
114	04.07.2011	15-30 cm, mittig zwischen Zulauftrinne und zulauftrinnenfern	93,0	3,9	7,8	50,8	32,0	5,5	0,0		0,64	1,98	7,4
115	04.07.2011	30-45 cm, mittig zwischen Zulauftrinne und zulauftrinnenfern	94,3	2,5	7,5	50,6	34,3	5,1	0,0		0,42	0,22	7,4
116	04.07.2011	45-60 cm, mittig zwischen Zulauftrinne und zulauftrinnenfern	94,4	3,4	8,8	50,8	33,8	3,2	0,0		0,45	0,42	7,3
117	04.07.2011	60-75 cm, mittig zwischen Zulauftrinne und zulauftrinnenfern	94,6	3,8	9,1	50,5	33,2	3,4	0,0		0,41	0,55	7,4
118	04.07.2011	75-90 cm, mittig zwischen Zulauftrinne und zulauftrinnenfern	94,7	3,2	9,1	50,6	33,1	4,0	0,0		0,51	0,64	7,4
5 Stechzylinder, Höhe 0-10 cm													
173	08.10.2012	Sed 1, P1, zulaufnah	73,6	13,5	7,7	45,2	25,8	7,4	0,4				
		Sed 1, P1, zulaufnah, <2mm									4,92	1,24	6,6
174	08.10.2012	Sed 2, P1, zulauffern	83,4	8,4	8,6	50,1	26,3	5,0	1,6				
		Sed 2, P1, zulauffern, <2mm									2,97	0,74	6,5
175	08.10.2012	Sed 3, P2, zulaufnah	73,6	12,9	7,9	46,9	26,8	4,8	0,7				
		Sed 3, P2, zulaufnah, <2mm									5,46	0,37	6,2
176	08.10.2012	Sed 4, P2, zulauffern	80,6	10,8	7,8	47,9	26,7	5,4	1,4				
		Sed 4, P2, zulauffern, <2mm									3,33	0,65	6,1
177	08.10.2012	Sed 5, P3, zulaufnah	72,3	15,2	8,2	43,4	27,0	5,3	0,9				
		Sed 5, P3, zulaufnah, <2mm									4,77	0,23	6,0
178	08.10.2012	Sed 6, P3, zulauffern	80,9	8,5	8,3	51,4	26,1	5,3	0,4				
		Sed 6, P3, zulauffern, <2mm									3,24	0,46	5,9
179	08.10.2012	Sed 7, P4, zulaufnah	79,0	7,5	8,4	50,7	28,4	5,0	0,0				
		Sed 7, P4, zulaufnah, <2mm									2,77	0,29	6,0
180	08.10.2012	Sed 8, P4, zulauffern	82,3	8,6	7,6	48,6	28,7	5,4	1,1				
		Sed 8, P4, zulauffern, <2mm									2,62	0,50	5,9

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	TS	Korngrößenverteilung						Wurzelmasse	Glühverlust	CaCO ₃	pH _{CaCl2}
				[mm]									
				<0,063	0,06-0,20	0,20-0,63	0,63-2,0	2,0-6,3	>6,3				
	T+U	fS	mS	gS	fG	mG							
			[%FS]	[%]						[% TM]	[%]	[%]	
7 RBF Geilenkirchen													
145	22.05.2012	Sed, SZ, 6x, P1, 0-10 m	67,7	37,3	7,5	42,0	11,8	1,4	0,0		9,49	0,39	5,4
147	22.05.2012	Sed, SZ, 6x, P1, 20-50 m	73,0	19,8	8,9	52,7	16,5	2,1	0,0		7,84	0,20	5,2
146	22.05.2012	Sed, SZ, 6x, P1, 70 m	81,6	6,3	8,7	54,8	23,6	4,7	1,9				
		Sed, SZ, 6x, P1, 70 m, <2mm									3,80	0,17	5,3
148	22.05.2012	FiS, ablaufseitig, 20-40 cm	92,6	1,0	7,5	59,0	25,1	6,3	1,1				
		FiS, ablaufseitig, 20-40 cm, <2mm									0,23	0,09	6,6
		Profilgrube zulaufnah											
132	06.07.2011	Sediment 0-20 cm	68,6	19,9	10,5	43,1	23,6	2,9	0,0		9,74	0,27	5,3
133	06.07.2011	Sediment+FiS 20-40 cm	93,0	0,9	8,3	58,6	26,2	6,0	0,0		0,54	0,15	6,7
134	06.07.2011	FiS 40-55 cm	94,8	0,5	7,6	56,1	27,6	7,4	0,8		0,25	0,14	7,0
135	06.07.2011	FiS 55-65 cm	92,4	3,2	7,8	38,9	18,4	21,0	10,7		0,35	0,19	7,0
136	06.07.2011	Dränkies 50-70 cm	97,9	0,7	0,3	0,4	0,8	69,6	28,2		0,30	0,19	6,9
137	06.07.2011	Sediment, vorgeschaltetes RüB	70,2	65,0	6,3	9,1	17,0	2,6	0,0		35,9	2,11	6,1
126	06.07.2011	FiS 0-15 cm, zulaufnah, Bohrstock	95,6	1,2	6,7	59,1	27,1	5,9	0,0		0,55	0,86	7,7
127	06.07.2011	FiS 15-30 cm, zulaufnah, Bohrstock	94,9	3,6	9,4	54,2	24,2	8,6	0,0		0,45	0,36	7,2
128	06.07.2011	FiS 30-45 cm, zulaufnah, Bohrstock	95,3	4,0	9,0	50,0	23,4	13,6	0,0		0,66	0,78	7,3
8 RBF Frelenberg, rechtes Beet, 5 SZ, Höhe 10 cm													
185	10.10.2012	Position 1, Sed 0-10 cm	36,9	66,1	8,3	7,8	9,0	8,8	0,0		28,8	0,39	5,1
186	10.10.2012	Position 2a, Sed 0-10 cm	38,8	80,4	5,8	5,5	5,4	2,9	0,0		25,2	0,31	4,8
187	10.10.2012	Position 2b, Sed 10-20 cm	53,1	56,6	7,5	26,8	6,5	2,6	0,0		11,8	0,26	5,3
188	10.10.2012	Position 3, Sed 0-10 cm	74,7	10,2	6,8	56,3	22,5	4,2	0,0				
		Position 3, Sed 0-10 cm, <2mm									4,67	0,27	5,3
189	10.10.2012	Position 4, Sed 0-10 cm	78,6	6,9	6,5	54,0	26,6	6,0	0,0				
		Position 4, Sed 0-10 cm, <2mm									3,33	0,15	5,3
190	10.10.2012	Position 2, FiS 10-30 cm	84,3	4,1	5,9	56,8	27,2	6,0	0,0				
		Position 2, FiS 10-30 cm, <2mm									0,98	0,20	6,0
191	10.10.2012	Position 2, FiS 30-60 cm	83,0	2,5	8,8	57,8	24,3	5,5	1,1				
		Position 2, FiS 30-60 cm, <2mm									0,90	0,30	6,0
192	10.10.2012	Position 4, FiS 10-30 cm	87,9	2,8	6,5	59,1	26,3	4,8	0,5				
		Position 4, FiS 10-30 cm, <2mm									0,87	0,19	5,6
193	10.10.2012	Ocker, Dränablaufschacht	28,4	98,6	0,6	0,6	0,2	0,0	0,0		20,8	0,80	5,2
9 RBF Nettelstedt													
122	05.07.2011	FiS, zulaufnah 0-3 cm	53,0								27,7	2,75	7,4
123	05.07.2011	FiS, zulaufnah 3-15 cm	96,4	3,1	8,1	66,2	20,7	1,9	0,0		0,58	9,85	6,3
124	05.07.2011	FiS, zulaufnah 15-30 cm	96,8	3,3	7,2	67,1	20,5	1,9	0,0		0,48	10,4	7,6
125	05.07.2011	FiS, zulaufnah 30-60 cm	96,2	2,4	5,6	69,6	19,7	2,7	0,0		0,36	8,59	7,6
10 RBF Gehlenbeck, Bohrstockbeprobung weil Torfzumischung													
139	05.07.2011	0-15 cm	97,4								0,84	9,59	7,6
140	05.07.2011	15-30 cm	96,8								0,46	9,52	7,6
141	05.07.2011	30-45 cm	96,7								0,37	9,02	7,6
142	05.07.2011	45-60 cm	96,1								0,35	8,60	7,6
143	05.07.2011	60-75 cm	95,4								0,50	9,14	7,7
144	05.07.2011	75-90 cm	94,2								0,45	8,69	7,6

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	TS	Korngrößenverteilung						Wurzelmasse	Glühverlust	CaCO ₃	pH _{CaCl2}
				[mm]									
				<0,063	0,06-0,20	0,20-0,63	0,63-2,0	2,0-6,3	>6,3				
				T+U	fS	mS	gS	fG	mG				
			[%FS]	[%]						[% TM]	[%]	[%]	
11 RBF Aisdorf													
zulaufnah													
28	16.05.2011	0-15 cm	95,8	35,2	28,3	29,2	5,6	1,7	0,0		4,71	0,56	6,5
29	16.05.2011	15-30 cm	98,0	2,4	50,4	44,7	2,1	0,4	0,0		0,41	0,17	6,9
30	16.05.2011	30-45 cm	96,1	4,4	9,9	58,7	21,2	5,8	0,0		0,45	6,56	7,8
zulauffern													
31	16.05.2011	0-15 cm	97,6	15,7	35,4	39,0	7,7	2,2	0,0		1,38	2,45	7,2
32	16.05.2011	15-30 cm	98,7	5,4	26,6	46,6	16,2	5,2	0,0		0,54	8,62	7,7
33	16.05.2011	30-45 cm	97,9	6,9	9,4	49,2	26,8	7,7	0,0		0,59	14,8	7,8
34	16.05.2011	45-60 cm	96,0	2,1	8,3	60,9	22,8	5,9	0,0		0,31	0,97	7,8
35	16.05.2011	Sed Zulaufrinne	76,6								21,3	1,66	6,4
12 RBF Harwick													
unteres Beet													
86	21.05.2011	Sediment Zulaufrinne	77,7	15,0	21,8	31,6	23,0	8,6	0,0		30,8	7,14	6,5
87	21.05.2011	zulauffern, 0-5 cm	91,1	1,3	5,1	42,3	18,5	32,8	0,0		2,67	2,36	7,0
88	21.05.2011	zulauffern, 5-10 cm	95,9	1,1	7,0	58,9	22,0	11,0	0,0				
		zulauffern, 5-10 cm, <2mm									0,53	1,20	7,4
89	21.05.2011	zulauffern, 10-15 cm	97,7	1,3	4,7	57,0	22,6	14,4	0,0				
		zulauffern, 10-15 cm, <2mm									0,29	1,64	7,5
90	21.05.2011	zulauffern, 15-30 cm	97,7	1,0	5,1	59,5	20,5	13,9	0,0				
		zulauffern, 15-30 cm, <2mm									0,24	1,88	7,6
Profilgrube													
91	21.05.2011	0-5 cm	64,9	7,6	13,3	42,4	24,0	12,7	0,0	5,6*	10,2		
		<2mm								* hoher Streuanteil	8,84	0,93	6,3
92	21.05.2011	5-10 cm	95,6	0,8	5,7	58,9	26,7	7,9	0,0	0,5	0,62		
		<2mm									0,57	1,82	7,3
93	21.05.2011	10-15 cm	94,6	0,5	5,6	62,2	26,1	5,6	0,0	0,9	0,40		
		<2mm									0,41	1,43	7,4
94	21.05.2011	15-30 cm	95,5	0,4	5,9	61,5	26,4	5,8	0,0	0,6	0,32		
		<2mm									0,33	1,74	7,4
95	21.05.2011	30-60 cm	96,4	0,2	5,5	62,2	25,7	6,4	0,0	0,1	0,31		
		<2mm									0,28	2,21	7,6
96	21.05.2011	60-90 cm	92,3	0,3	5,8	58,7	27,3	7,9	0,0	0,0	0,29		
		<2mm									0,25	2,36	7,6
97	21.05.2011	100-130 cm, sind nur Steine	97,3	0,3	0,2	0,5	0,7	90,9	7,4	0,0			

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	TS	Korngrößenverteilung						Wurzelmasse	Glühverlust	CaCO ₃	pH _{CaCl2}
				[mm]									
				<0,063	0,06-0,20	0,20-0,63	0,63-2,0	2,0-6,3	>6,3				
				T+U	fS	mS	gS	fG	mG				
			[%FS]	[%]						[% TM]	[%]	[%]	
13 RBF Herongen													
55	18.05.2011	Ablaufschacht, Boden, Mangan	68,5								1,94	1,96	7,6
56	18.05.2011	Ablaufschacht, Wand, Mangan	96,0								4,57	2,79	
57	18.05.2011	Sed Zulaufpflaster	95,5	59,9	25,0	11,5	2,7	0,9	0,0		18,3	0,89	6,3
zulaufnah													
58	18.05.2011	0-5 cm	76,5	25,2	9,4	30,0	14,5	20,9	0,0				
		0-5 cm, <2mm									7,38	9,32	6,7
59	18.05.2011	5-10 cm	94,9	4,7	7,9	43,7	21,7	22,0	0,0		0,66	13,5	7,7
60	18.05.2011	10-15 cm	94,2	6,9	9,4	38,2	16,4	29,1	0,0				
		10-15 cm, <2mm									0,61	14,6	7,7
61	18.05.2011	15-30 cm	94,0	5,8	8,7	36,2	15,9	7,8	25,6				
		15-30 cm, <2mm									0,46	12,9	7,8
zulaufnah													
62	18.05.2011	0-5 cm	93,5	2,3	4,5	37,2	19,5	36,5	0,0				
		0-5 cm, <2mm									1,25	9,48	7,3
63	18.05.2011	5-10 cm	94,5	2,1	5,0	33,4	15,1	10,4	34,0				
		5-10 cm, <2mm									0,51	7,13	7,7
64	18.05.2011	10-15 cm	94,7	2,6	6,8	40,1	17,2	10,1	23,2				
		10-15 cm, <2mm									0,48	10,6	7,8
65	18.05.2011	15-30 cm	94,9	2,2	5,9	38,1	15,3	8,8	29,7				
		15-30 cm, <2mm									0,48	9,77	7,8
14 RBF Madfeld													
rechtes Beet, zulaufnah													
76	20.05.2011	0-5 cm	72,3	2,7	16,7	61,3	13,2	6,1	0,0		6,19	9,01	6,6
77	20.05.2011	5-10 cm	87,1	3,4	20,9	67,6	6,0	2,1	0,0				
		5-10 cm, <2mm									1,94	9,51	7,1
78	20.05.2011	10-15 cm	91,6	3,2	25,6	68,7	2,0	0,5	0,0		0,30	9,64	7,5
79	20.05.2011	15-30 cm	92,2	3,5	26,4	65,7	2,9	1,5	0,0		0,27	13,0	7,7
rechtes Beet, zulauffern													
80	20.05.2011	0-5 cm	85,6	3,0	21,7	61,2	11,1	3,0	0,0		2,75	28,6	7,0
81	20.05.2011	5-10 cm	92,2	4,5	21,9	57,2	12,8	3,6	0,0		0,90	36,8	7,7
82	20.05.2011	10-15 cm	92,7	4,9	21,2	56,0	14,8	3,1	0,0		0,90	37,0	7,8
83	20.05.2011	15-30 cm	92,8	5,3	19,7	50,7	18,9	5,4	0,0		1,79	48,5	7,9
linkes Beet, 10-30 cm													
84	20.05.2011	linkes Beet, 10-30 cm	94,9	1,4	6,6	77,3	11,1	3,6	0,0		0,37		
		linkes Beet, 10-30 cm, <2mm									33,3	10,9	7,7
85	20.05.2011	Sed Zulaufrinne	94,0	20,9	14,9	35,4	23,5	5,3	0,0		32,2	13,0	6,6
15 RBF Hille, Hartum													
120	05.07.2011	FiS, zulaufnah 0-5 cm	96,2	0,9	7,1	73,1	16,6	2,3	0,0		0,75	0,79	7,2
121	05.07.2011	FiS, zulauffern 0-5 cm	96,4	0,9	6,6	73,2	16,6	2,7	0,0		0,50	0,72	7,4

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	TS	Korngrößenverteilung						Wurzelmasse	Glühverlust	CaCO ₃	pH _{CaCl2}	
				[mm]										
				<0,063 T+U	0,06-0,20 fS	0,20-0,63 mS	0,63-2,0 gS	2,0-6,3 fG	>6,3 mG					
			[%FS]	[%]						[% TM]	[%]	[%]		
16 RBF Tengern														
149	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 1	91,7	5,2	9,0	62,9	18,7	3,7	0,5					
		Sed, SZ, 6x, 1, <2mm									1,37	10,8	7,1	
150	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 2	85,9	7,2	9,3	61,4	17,0	3,9	1,2					
		Sed, SZ, 6x, 2, <2mm									2,36	10,9	6,8	
151	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 3	92,4	4,9	10,1	64,5	18,3	2,2	0,0					
		Sed, SZ, 6x, 3, <2mm									1,27	11,2	7,3	
152	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 4	90,1	4,8	10,1	62,4	17,2	3,8	1,7					
		Sed, SZ, 6x, 4, <2mm									1,74	11,3	7,1	
153	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 5	91,9	5,0	8,6	61,2	18,9	4,1	2,2					
		Sed, SZ, 6x, 5, <2mm									1,29	12,4	7,3	
154	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 6	92,9	4,9	9,8	64,6	17,6	2,7	0,4					
		Sed, SZ, 6x, 6, <2mm									1,20	10,8	7,3	
155	24.05.2012	bei 2, 15-25 cm	94,5	3,4	6,3	50,8	15,8	14,6	9,1					
		bei 2, 15-25 cm, <2mm									0,62	9,83	7,6	
156	24.05.2012	bei 5, 15-25 cm	94,1	4,7	9,9	65,0	17,5	2,5	0,4					
		bei 5, 15-25 cm, <2mm									0,61	11,6	7,7	
17 RBF Extertal														
157	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 1	79,6	19,3	14,2	43,8	18,3	4,4	0,0			4,13	19,2	6,8
158	24.05.2012	bei 1, 15-25 cm	93,0	7,1	13,5	46,3	25,9	6,5	0,7					
		bei 1, 15-25 cm, <2mm									0,89	24,5	7,7	
159	24.05.2012	bei 1, 30-60 cm	94,0	4,1	17,8	58,7	14,8	4,4	0,2					
		bei 1, 30-60 cm, <2mm									0,57	9,37	7,8	
160	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 2	93,6	6,5	14,0	55,4	18,6	5,2	0,3					
		Sed, SZ, 6x, 2, <2mm									1,94	13,5	7,1	
161	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 3	90,6	5,4	16,5	57,0	16,8	4,3	0,0					
		Sed, SZ, 6x, 3, <2mm									1,87	9,27	7,1	
162	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 4	91,2	5,5	15,4	55,0	19,5	4,6	0,0					
		Sed, SZ, 6x, 4, <2mm									1,48	13,4	7,3	
163	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 5	92,4	5,7	18,6	54,7	16,3	3,9	0,8					
		Sed, SZ, 6x, 5, <2mm									1,10	13,7	7,4	
164	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 6	91,4	5,1	19,1	54,8	16,7	3,9	0,4					
		Sed, SZ, 6x, 6, <2mm									1,17	9,37	7,4	
165	24.05.2012	bei 6, 15-25 cm	94,2	5,5	20,6	56,0	14,5	3,4	0,0					
		bei 6, 15-25 cm, <2mm									0,63	13,1	7,8	

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	TS	Korngrößenverteilung						Wurzelmasse	Glühverlust	CaCO ₃	pH _{CaCl2}
				[mm]									
				<0,063	0,06-0,20	0,20-0,63	0,63-2,0	2,0-6,3	>6,3				
				T+U	fS	mS	gS	fG	mG				
			[%FS]	[%]						[% TM]	[%]	[%]	
18 RBF Benhausen													
166	24.05.2012	FiS, 20-40 cm	87,0	1,6	15,0	67,3	12,9	1,9	1,3			11,1	
		FiS, 20-40 cm, <2mm									0,22		8,0
19 RBF Benhauserstraße (nicht Benhausen)													
169	25.05.2012	FiS, 10-20 cm	85,8	1,3	17,1	65,2	13,6	2,8	0,0				
		FiS, 10-20 cm, <2mm									0,25	15,1	7,9
20 RBF Hans Humpert, rechte Kammer													
167	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, zulaufnah	74,5	11,0	24,7	49,9	10,8	3,6	0,0		3,91	14,7	7,1
168	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, mittig	84,7	6,1	19,2	62,6	9,1	3,0	0,0		2,30	9,82	7,1
21 RBF Hallschlag													
19	15.05.2011	FiS, unter Invasionssschicht	98,5	2,0	14,7	64,6	16,6	2,1	0,0		0,40	15,6	7,7
22 RBF Altendorf, 5 Stechzylinder, Höhe 10 cm													
181	09.10.2012	Sed, zulaufnah	70,0	36,7	15,8	36,0	10,4	1,1	0,0				
		Sed, zulaufnah, <2mm									7,34	18,1	6,6
182	09.10.2012	Sed, zulauffern	89,8	4,2	18,0	62,6	14,1	1,1	0,0				
		Sed, zulauffern, <2mm									1,35	27,7	7,1
183	09.10.2012	FiS, zulaufnah, zulauffern, 20-30 cm	94,3	2,2	20,6	62,5	13,4	1,3	0,0		0,37	29,9	7,5
184	09.10.2012	Sed vor Zulaufgabione, H = 12 cm	53,4	70,4	15,3	9,3	3,8	1,2	0,0		21,4	0,86	6,0
23 RBF Witzerath													
194	10.10.2012	FiS, 10-30 cm, zulauffern	95,6	1,7	16,6	51,0	25,3	5,4	0,0				
		FiS, 10-30 cm, zulauffern									0,32	19,0	7,3
24 RBF Solingen Fritz-Reuter, Sedimentproben													
98	21.05.2011	zulaufnah, 0-10 cm	82,1	18,9	18,2	35,1	24,2	3,6	0,0		15,3	6,69	6,4
99	21.05.2011	zulaufnah, 10-20 cm	82,5	15,8	19,9	36,9	21,0	6,4	0,0		12,0	4,88	6,5
100	21.05.2011	zulauffern, 0-10 cm	80,4	34,7	13,7	21,1	26,7	3,8	0,0		21,2	5,51	6,5
101	21.05.2011	zulauffern, 10-20 cm	82,4	34,8	20,6	22,6	19,7	2,3	0,0		16,4	3,70	6,6
25 RBF Lübeckerstraße, Sediment													
102	21.05.2011	zulaufnah, 0-10 cm	73,8	20,4	14,1	29,3	31,7	4,5	0,0		24,1	4,56	6,0
103	21.05.2011	zulauffern, 0-3 cm	70,6	17,3	10,3	34,8	33,3	4,3	0,0		24,3	3,35	6,2
26 RBF Glessen, Trennsystem													
11	14.05.2011	Sed Vorstufe, trockenfallend	96,0								28,7	0,79	6,1
12	14.05.2011	zulaufnah 0-10 cm	96,1	13,4	9,0	35,4	30,3	11,5	0,4		4,99	1,70	6,9
13	14.05.2011	zulaufnah 10-30 cm	96,3	6,7	8,9	43,2	30,5	10,7	0,0		2,00	0,44	7,1
14	14.05.2011	zulaufnah 30-60 cm	89,5	6,9	6,4	44,8	34,3	7,6	0,0		1,75	0,23	7,1
15	14.05.2011	zulaufnah 60-90 cm	91,3	5,1	6,0	47,3	33,1	8,5	0,0		0,90	0,17	7,4
16	14.05.2011	zulaufnah, Fe-Kruste Grenze FiS/Dränkies	92,2	4,5		95,5					1,12	0,19	
17	14.05.2011	zulaufnah, Dränkies 90-120 cm	96,7	2,1	0,8	1,9	7,3	71,1	16,8		0,78	0,24	
27 RBF Graf Zeppelin, Autobahnkreuz Wünneburg-Haaren													
170	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, zulaufnah	80,1	17,8	8,7	55,4	14,2	3,9	0,0				
		Sed, SZ, 6x, zulaufnah, <2mm									2,17	19,5	7,6
171	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, mittig	85,4	5,9	9,9	64,7	16,0	3,5	0,0				
		Sed, SZ, 6x, mittig, <2mm									1,09	18,5	7,8
172	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, zulauffern	88,2	4,9	8,8	64,2	17,8	4,3	0,0				
		Sed, SZ, 6x, zulauffern, <2mm									0,98	22,7	7,9

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	TS	Korngrößenverteilung						Wurzelmasse	Glühverlust	CaCO ₃	pH _{CaCl2}
				[mm]									
				<0,063	0,06-0,20	0,20-0,63	0,63-2,0	2,0-6,3	>6,3				
			T+U	fS	mS	gS	fG	mG					
			[%FS]	[%]						[% TM]	[%]	[%]	
28 RBF Bentelerstraße Paderborn													
104	02.07.2011	FiS, 10-20 cm, ablaufseitig	95,7	0,8	13,6	66,5	18,9	0,2	0,0		0,29	23,7	7,6
29 RBF Weilerswist Nr.1													
18	15.05.2011	FiS, ohne Beschickung	86,4	5,0	7,8	50,3	29,7	7,2	0,0		0,55	3,29	7,8
30 RBF A3 Köln, Westseite, A3.1													
69	19.05.2011	Sed Ende eingestauter Zulaufkanal	30,6	44,1	11,8	0,0	33,5	10,6	0,0		24,2	3,65	7,0
70	19.05.2011	Sed Vorstufe, ablaufseitig	23,8	97,2	1,9	0,0	0,8	0,1	0,0		18,0	2,75	7,2
71	19.05.2011	Sed Zulaufrinne, ablaufseitig	85,6	40,8	15,3	0,0	42,2	1,7	0,0		35,3	0,36	6,2
72	19.05.2011	zulaufnah, 0-2 cm	90,2								15,3	0,21	6,1
73	19.05.2011	zulaufnah, 15-20 cm	98,5	11,0	10,0	19,8	29,3	29,9	0,0				
		zulaufnah, 15-20 cm, <2mm									0,48	0,35	7,5
74	19.05.2011	zulauffern, 0-2 cm	97,9								5,79	0,32	6,6
75	19.05.2011	zulauffern, 15-20 cm	99,0	12,0	8,8	16,5	21,8	22,4	18,5				
		zulauffern, 15-20 cm, <2mm									0,48	0,19	7,3
Entwässerungsmulden, A3.1													
106	03.07.2011	an Fahrbahn, oben	83,8	15,4	23,0	40,6	14,4	3,4	3,2		12,0	3,99	8,3
107	03.07.2011	an Fahrbahn, unten	90,8	17,6	6,4	14,5	11,4	12,7	37,4		3,26	6,80	9,7
108	03.07.2011	an Böschung, oben	93,9									6,99	
		an Böschung, oben, <2mm		24,5	13,6	32,7	29,2		0,0		5,87		7,8
109	03.07.2011	an Böschung, unten	96,1									51,8	
		an Böschung, unten, <2mm		7,6	8,8	32,3	51,3		0,0		2,10		8,4
31 A3 Köln-Ost, Ostseite, A 3.2													
105	03.07.2011	Vorstufe, Sediment, ablaufseitig	27,7	99,0	0,6	0,3	0,1				15,2	3,06	7,4
129	03.07.2011	zulaufnah	90,1	10,8	10,8	23,0	32,4	22,4	0,6		2,79	0,30	7,3
130	03.07.2011	zulauffern, an Verteilerrinne	91,9	9,4	9,5	20,6	32,6	27,0	0,9		2,59	0,22	7,1
131	03.07.2011	zulauffern, verteilerrinnenfern	92,4	10,8	9,8	21,5	33,9	23,0	1,0		1,68	0,24	7,2
32 RBF A3 Köln Ostseite, AS Köln-Mühlheim, A3.3													
67	19.05.2011	Decklage RBF, noch nicht in Betrieb	99,9	0,3	0,0	0,0	0,8	94,5	4,4		3,84	70,0	7,9
68	19.05.2011	FiS RBF, noch nicht in Betrieb	87,4	10,8	7,7	17,2	33,4	30,9	0,0		0,54		
		FiS RBF, noch nicht in Betrieb, <2mm									7,26		7,8
33 A3, Ostseite, km 32.65, Bellinghausen, A3.4													
138	06.07.2011	Sediment	25,9	86,1	5,8	3,3	3,1	1,7	0,0		15,4	13,7	7,1
34 Versickerungsanlage A1, westlich Köln, 400 m südlich Anzweig A57, A 1.1													
119	04.07.2011	Vorstufe, Sediment, 1.Becken	43,0	85,1	7,7	3,9	2,8	0,5	0,0		12,7	2,12	7,3
35 A1, Richtung Dortmund, nördlich Wermelskirchen, A 1.2													
110	04.07.2011	Vorstufe, Sediment, ablaufseitig	22,1	98,8	0,8	0,1	0,2	0,1	0,0		14,7	4,68	7,7
111	04.07.2011	FiS, 5-20 cm	90,6	13,0	11,9	25,0	29,8	20,3	0,0		1,11	1,94	7,7
36 RBF Marscheiderbach, A1.3													
66	18.05.2011	Ablaufschacht Ocker	30,7								21,2	1,03	

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	Königswasserlösliche Gehalte														NO3-N	
			[mg/g]								[mg/kg]							
			Fe	Al	P	S	Ca	Mg	K	Na	Zn	Cd	Cu	Pb	Cr	Ni	Mn	[mg/100g]
1 RBF Vanikum																		
1	13.05.2011	Zulaufsed in Schotter (Analyse ohne Schotter)	12,3	8,29	0,82	0,83	84,9	3,23	1,46	0,24	271	0,39	33,3	45,6	22,3	17,4	375	0,14
2	13.05.2011	zulaufnah 0-2 cm	4,71	3,15	0,52	0,51	93,0	1,86	0,57	0,14	181	0,37	16,8	318	11,7	8,11	237	4,79
3	13.05.2011	zulaufnah 5-10 cm	1,52	0,74	0,06	0,10	125	1,46	0,14	0,07	50,0	0,21	1,44	234	6,06	3,66	109	0,49
4	13.05.2011	zulauffern 0-2 cm	3,46	2,06	0,57	0,47	98,9	1,49	0,40	0,09	112	0,24	12,9	274	9,16	6,23	146	5,05
5	13.05.2011	zulauffern 5-10 cm	1,36	0,60	0,05	0,11	122	1,17	0,12	0,07	43,7	0,19	1,11	231	6,73	4,06	107	0,41
6	13.05.2011	Manganniederschlag Ablaufschacht	65,0	18,0	2,24	1,46	65,0	3,68	1,39	0,52	10317	4,29	55,9	148	34,9	361	245124	
2 RBF Glehn																		
7	13.05.2011	zulaufnah 0-5 cm	8,26	7,50	1,73	0,90	57,3	3,15	0,99	0,20	448	0,31	76,1	81,3	27,6	14,5	273	15,0
8	13.05.2011	zulaufnah 5-10 cm	1,70	1,00	0,10	0,18	115	3,00	0,14	0,07	34,6	<0,07	4,55	3,55	10,9	5,05	123	1,95
9	13.05.2011	zulauffern 0-5 cm	1,25	0,89	0,13	0,18	110	1,80	0,13	0,07	36,7	0,07	3,09	3,40	9,33	3,93	95,4	1,91
10	13.05.2011	zulauffern 5-10 cm	1,13	0,70	0,05	0,14	102	1,80	0,10	0,06	20,4	<0,07	1,48	1,48	11,0	4,80	94,2	1,15
3 RBF Kenten																		
zulaufnah																		
20	16.05.2011	Streu	11,8	10,9	4,83	2,61	24,9	3,63	1,58	0,60	882	0,52	129	168	32,2	29,6	334	81,3
21	16.05.2011	0-5 cm	6,42	5,76	2,27	0,89	40,8	1,61	0,60	0,18	363	0,23	42,5	210	18,7	12,3	159	14,4
22	16.05.2011	5-10 cm	1,14	0,75	0,12	0,15	48,7	0,95	0,14	0,04	32,9	<0,07	2,11	121	9,93	4,77	57,1	2,91
23	16.05.2011	20-30 cm	1,21	0,80	0,09	0,14	55,3	0,93	0,15	0,04	27,4	<0,07	1,56	154	9,43	4,72	67,8	1,85
zulauffern																		
24	16.05.2011	Streu	4,30	4,21	2,37	3,66	29,4	6,27	1,08	0,38	513	<0,07	65,5	59,1	11,4	14,8	453	37,7
25	16.05.2011	0-5 cm	2,89	2,43	0,84	0,55	121	1,71	0,31	0,08	170	0,11	11,9	242	10,1	6,27	123	7,65
26	16.05.2011	5-10 cm	1,09	0,68	0,13	0,20	141	1,38	0,12	0,04	47,5	0,12	1,67	340	6,40	3,45	91,5	1,77
27	16.05.2011	20-30 cm	1,03	0,62	0,09	0,17	144	1,35	0,12	0,04	36,4	0,09	1,04	334	5,69	3,14	90,7	1,22
4 RBF Erbach-Süd																		
Sed zulaufinnensteine																		
36	17.05.2011	zulaufnah	17,0	16,3	1,89	0,63	5,20	3,11	1,55	0,10	272	0,60	31,5	74,8	31,5	19,2	322	1,69
37	17.05.2011	0-5 cm	15,5	14,6	2,08	0,70	4,48	2,69	1,52	0,09	259	0,37	26,0	51,0	27,9	17,9	260	4,04
38	17.05.2011	15-30 cm	4,23	3,58	0,20	0,03	0,72	0,78	0,39	0,04	23,3	<0,07	2,84	7,51	8,12	6,38	50,5	0,16
mittig																		
39	17.05.2011	0-5 cm	9,82	8,89	1,09	0,56	3,72	1,78	1,03	0,07	142	0,19	13,9	29,0	20,3	13,1	185	4,63
40	17.05.2011	15-30 cm	4,82	3,43	0,19	0,04	1,02	0,88	0,37	0,04	23,9	0,08	3,00	6,84	11,5	7,83	58,0	0,22
zulauffern																		
41	17.05.2011	0-5 cm	7,25	5,38	0,52	0,35	3,20	1,29	0,63	0,05	84,7	0,13	8,67	16,7	20,9	12,7	116	2,58
41a	17.05.2011	15-30 cm	4,37	3,46	0,19	0,04	0,89	0,83	0,38	0,08	23,3	0,09	3,07	6,42	10,9	8,00	61,6	0,21
Profilgrube																		
42	17.05.2011	5-15 cm																
		5-15 cm, <2mm	5,37	3,41	0,19	0,04	0,69	0,98	0,37	0,07	24,5	<0,07	3,18	6,93	14,1	10,2	104	0,12
43	17.05.2011	15-30 cm	4,73	3,29	0,16	0,03	0,60	0,77	0,35	0,07	19,2	0,06	2,86	6,11	10,7	10,7	71,0	0,12
44	17.05.2011	30-60 cm	4,36	3,49	0,15	0,03	0,59	0,80	0,33	0,07	18,9	0,06	2,75	6,30	9,22	7,46	87,3	0,07
45	17.05.2011	60-90 cm	4,33	3,72	0,14	0,03	0,64	0,81	0,37	0,07	19,7	0,08	2,80	5,96	10,6	7,92	81,1	0,05
46	17.05.2011	90-110 cm, Grobsand																
		90-110 cm, Grobsand, <2mm	5,10	2,64	0,13	0,03	0,55	1,15	0,33	0,08	13,3	<0,07	2,91	4,09	18,9	13,4	54,8	<0,05

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	Königswasserlösliche Gehalte														NO3-N	TM	
			[mg/g]							[mg/kg]									gesamt
			Fe	Al	P	S	Ca	Mg	K	Na	Zn	Cd	Cu	Pb	Cr	Ni	Mn	[mg/100g]	
5 RBF Benninghoferweg																			
zulaufnah																			
47	17.05.2011	0-5 cm Sed	42,9	16,5	1,19	1,25	52,4	7,21	1,26	1,04	3872	1,26	162	140	84,5	58,0	965	5,69	
48	17.05.2011	5-10 cm																	
		5-10 cm, <2mm	6,60	2,83	0,20	0,03	1,06	0,97	0,33	0,07	61,3	<0,07	4,99	5,60	22,1	14,3	103	0,14	
49	17.05.2011	10-15 cm																	
		10-15 cm, <2mm	6,53	2,53	0,12	0,02	0,78	0,95	0,29	0,07	27,1	<0,07	4,49	5,05	25,8	16,2	102	0,09	
50	17.05.2011	15-30 cm																	
		15-30 cm, <2mm	5,95	2,31	0,10	0,01	1,10	0,85	0,26	0,06	13,9	<0,07	3,54	3,77	23,9	14,6	86,8	0,06	
zulauffern																			
51	17.05.2011	0-5 cm																	
		0-5 cm, <2mm	14,6	5,60	0,38	0,39	8,36	2,21	0,49	0,27	984	0,36	43,7	36,8	37,9	23,8	244	3,94	
52	17.05.2011	5-10 cm																	
		5-10 cm, <2mm	6,34	2,41	0,13	0,02	0,75	0,92	0,26	0,07	21,2	<0,07	4,02	3,90	22,4	14,1	88,0	0,13	
53	17.05.2011	10-15 cm																	
		10-15 cm, <2mm	6,89	2,41	0,11	0,02	0,77	0,95	0,26	0,07	17,8	<0,07	3,74	3,79	22,4	14,6	104	0,08	
54	17.05.2011	15-30 cm																	
		15-30 cm, <2mm	5,92	2,35	0,10	0,01	1,07	0,84	0,27	0,06	13,0	<0,07	3,59	3,59	20,1	13,2	89,8	<0,05	
6 RBF Wermelskirchen																			
112	04.07.2011	Sediment + FIS, 0-5 cm, mittig	13,4	8,58	1,80	0,82	14,6	9,11	1,18	0,54	313	0,28	66,2	71,0	30,7	24,1	264	5,96	
113	04.07.2011	0-15 cm, mittig zwischen Zulaufrinne und zulaufriinnenfern	7,50	3,30	0,30	0,10	8,40	5,43	0,53	0,24	71,6	<0,07	12,0	12,0	28,0	17,1	125	1,06	
114	04.07.2011	15-30 cm, mittig zwischen Zulaufrinne und zulaufriinnenfern	7,58	2,56	0,20	0,05	6,05	3,93	0,40	0,14	46,9	<0,07	7,93	8,15	24,0	14,3	160	0,58	
115	04.07.2011	30-45 cm, mittig zwischen Zulaufrinne und zulaufriinnenfern	7,51	2,41	0,17	0,04	1,71	1,44	0,38	0,13	35,1	<0,07	7,33	5,54	26,0	16,2	114	0,31	
116	04.07.2011	45-60 cm, mittig zwischen Zulaufrinne und zulaufriinnenfern	8,08	2,29	0,16	0,03	1,91	1,60	0,32	0,08	33,8	<0,07	6,84	5,43	28,3	17,6	319	0,30	
117	04.07.2011	60-75 cm, mittig zwischen Zulaufrinne und zulaufriinnenfern	6,26	2,03	0,13	0,03	1,48	1,29	0,30	0,08	26,5	<0,07	6,26	5,14	25,5	14,8	110	0,18	
118	04.07.2011	75-90 cm, mittig zwischen Zulaufrinne und zulaufriinnenfern	6,35	2,31	0,13	0,05	2,67	1,36	0,35	0,15	32,2	<0,07	7,49	5,06	17,5	11,8	113	0,23	
5 Stechzylinder, Höhe 0-10 cm																			
173	08.10.2012	Sed 1, P1, zulaufnah																	1403
		Sed 1, P1, zulaufnah, <2mm	12,4	6,64	1,41	0,46	5,79	3,53	0,63	0,10	243	0,18	43,7	61,0	21,0	18,3	255		
174	08.10.2012	Sed 2, P1, zulauffern																	1708
		Sed 2, P1, zulauffern, <2mm	9,36	4,90	0,81	0,27	3,58	2,61	0,49	0,07	141	0,09	23,9	33,7	17,3	14,2	148		
175	08.10.2012	Sed 3, P2, zulaufnah																	1535
		Sed 3, P2, zulaufnah, <2mm	12,0	7,49	1,54	0,48	3,21	2,53	0,67	0,11	230	0,15	43,0	62,5	25,1	19,8	268		
176	08.10.2012	Sed 4, P2, zulauffern																	1676
		Sed 4, P2, zulauffern, <2mm	9,86	5,53	0,97	0,30	2,74	2,20	0,52	0,07	153	0,10	26,4	38,0	18,3	15,3	218		
177	08.10.2012	Sed 5, P3, zulaufnah																	1421
		Sed 5, P3, zulaufnah, <2mm	12,1	6,31	1,35	0,43	2,78	2,45	0,55	0,09	215	0,16	40,3	54,7	22,3	17,8	213		
178	08.10.2012	Sed 6, P3, zulauffern																	1774
		Sed 6, P3, zulauffern, <2mm	9,83	5,07	0,92	0,30	2,69	2,23	0,50	0,07	152	0,09	25,9	36,6	17,9	15,3	204		
179	08.10.2012	Sed 7, P4, zulaufnah																	1719
		Sed 7, P4, zulaufnah, <2mm	8,63	4,54	0,77	0,24	2,38	2,00	0,45	0,06	126	<0,07	22,1	31,5	17,7	14,0	161		
180	08.10.2012	Sed 8, P4, zulauffern																	1741
		Sed 8, P4, zulauffern, <2mm	8,79	4,61	0,71	0,23	2,34	2,00	0,45	0,06	126	0,09	20,3	28,8	17,6	14,7	157		

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	Königswasserlösliche Gehalte														NO3-N	TM
			[mg/g]									[mg/kg]						
			Fe	Al	P	S	Ca	Mg	K	Na	Zn	Cd	Cu	Pb	Cr	Ni	Mn	[mg/100g]
7 RBF Geilenkirchen																		
145	22.05.2012	Sed, SZ, 6x, P1, 0-10 m	14,0	12,1	2,82	0,85	3,38	2,24	1,44	0,22	442	0,50	76,2	113	38,5	20,0	413	1449
147	22.05.2012	Sed, SZ, 6x, P1, 20-50 m	10,1	9,17	2,14	0,71	2,42	1,52	1,16	0,16	281	0,23	47,3	73,5	30,4	14,8	321	1590
146	22.05.2012	Sed, SZ, 6x, P1, 70 m																1883
		Sed, SZ, 6x, P1, 70 m, <2mm	5,04	4,17	0,84	0,30	1,13	0,67	0,58	0,07	116	<0,07	18,5	29,9	18,1	8,20	135	
148	22.05.2012	FiS, ablaufseitig, 20-40 cm																
		FiS, ablaufseitig, 20-40 cm, <2mm	1,32	0,69	0,07	0,02	0,18	0,11	0,12	0,02	10,3	<0,07	2,61	2,62	13,5	4,35	9,01	
		Profigrube zulaufnah																
132	06.07.2011	Sediment 0-20 cm	13,5	11,7	2,47	0,70	2,97	2,09	1,55	0,44	431	0,49	67,3	88,2	36,4	19,1	368	8,48
133	06.07.2011	Sediment+FiS 20-40 cm	1,61	0,79	0,12	0,05	0,26	0,16	0,17	0,10	22,2	<0,07	5,00	3,97	14,9	6,23	15,8	1,12
134	06.07.2011	FiS 40-55 cm	1,44	0,53	0,06	0,03	0,14	0,11	0,10	0,05	11,3	<0,07	3,43	2,60	16,3	6,41	10,3	0,54
135	06.07.2011	FiS 55-65 cm	3,36	1,03	0,12	0,03	0,24	0,18	0,16	0,07	19,5	0,07	5,09	3,53	37,0	14,8	18,8	0,40
136	06.07.2011	Dränkies 50-70 cm	6,12	1,08	0,14	0,03	0,27	0,27	0,17	0,08	19,9	<0,07	6,49	3,91	86,2	32,4	40,4	0,18
137	06.07.2011	Sediment, vorgeschaltetes RüB	16,3	11,9	4,98	3,17	20,1	4,97	2,30	0,69	1240	1,51	169	188	50,6	35,0	304	0,20
126	06.07.2011	FiS 0-15 cm, zulaufnah, Bohrstock	2,57	1,08	0,15	0,07	2,98	0,43	0,17	0,05	22,4	<0,07	5,74	4,85	21,3	8,98	27,9	0,70
127	06.07.2011	FiS 15-30 cm, zulaufnah, Bohrstock	2,32	1,12	0,11	0,04	0,64	0,20	0,17	0,04	21,0	<0,07	5,60	3,76	19,5	8,16	18,1	0,65
128	06.07.2011	FiS 30-45 cm, zulaufnah, Bohrstock	3,63	1,47	0,17	0,08	2,91	0,43	0,22	0,05	32,9	<0,07	8,26	6,61	30,0	12,6	37,0	0,84
8 RBF Frelenberg, rechtes Beet, 5 SZ, Höhe 10 cm																		
185	10.10.2012	Position 1, Sed 0-10 cm	29,7	23,1	7,33	2,78	8,18	4,77	2,86	0,48	1148	1,35	196	200	86,0	47,0	583	565
186	10.10.2012	Position 2a, Sed 0-10 cm	28,5	23,2	7,73	2,19	6,96	4,35	2,65	0,39	960	1,15	179	211	80,8	42,9	557	572
187	10.10.2012	Position 2b, Sed 10-20 cm	17,3	15,5	4,75	1,03	3,73	2,66	1,63	0,23	508	0,63	81,5	137	52,9	24,7	265	826
188	10.10.2012	Position 3, Sed 0-10 cm																1296
		Position 3, Sed 0-10 cm, <2mm	6,84	5,33	1,35	0,43	1,43	0,83	0,66	0,07	186	0,14	23,3	36,8	20,6	10,2	76,2	
189	10.10.2012	Position 4, Sed 0-10 cm																1469
		Position 4, Sed 0-10 cm, <2mm	4,56	3,29	0,69	0,30	0,90	0,51	0,44	0,05	103	0,14	14,1	19,1	15,8	7,17	42,4	
190	10.10.2012	Position 2, FiS 10-30 cm																
		Position 2, FiS 10-30 cm, <2mm	2,21	1,03	0,15	0,07	0,41	0,19	0,16	0,02	41,4	0,09	5,29	4,01	10,4	4,42	7,99	
191	10.10.2012	Position 2, FiS 30-60 cm																
		Position 2, FiS 30-60 cm, <2mm	1,76	0,83	0,09	0,06	0,31	0,15	0,15	0,02	37,2	0,09	3,65	4,05	8,66	3,47	5,55	
192	10.10.2012	Position 4, FiS 10-30 cm																
		Position 4, FiS 10-30 cm, <2mm	2,42	1,16	0,15	0,08	0,33	0,18	0,17	0,02	29,6	0,06	4,62	4,53	9,63	3,81	10,4	
193	10.10.2012	Ocker, Dränablaufschacht	394	1,21	77,5	1,78	15,1	0,46	0,71	0,30	676	<0,07	18,0	2,28	5,90	20,8	585	314
9 RBF Nettelstedt																		
122	05.07.2011	FiS, zulaufnah 0-3 cm	2,16	15,2	5,28	2,90	22,3	5,11	1,85	0,20	1063	0,41	198	97,0	39,9	28,0	212	52,8
123	05.07.2011	FiS, zulaufnah 3-15 cm	9,00	2,87	0,24	0,27	38,7	2,85	0,49	0,26	41,2	<0,07	5,89	3,38	12,7	8,46	71,6	0,72
124	05.07.2011	FiS, zulaufnah 15-30 cm	8,82	2,82	0,28	0,25	42,2	3,06	0,47	0,05	23,0	<0,07	4,78	2,69	11,8	8,32	79,9	0,54
125	05.07.2011	FiS, zulaufnah 30-60 cm	8,94	2,81	0,25	0,21	35,4	3,22	0,55	0,06	14,3	<0,07	4,35	2,41	11,8	8,49	85,9	0,23
10 RBF Gehlenbeck, Bohrstockbeprobung weil Torfzumischung																		
139	05.07.2011	0-15 cm	13,7	3,17	0,29	0,50	38,5	3,11	0,38	0,09	39,5	<0,07	7,07	4,07	17,4	11,7	120	0,52
140	05.07.2011	15-30 cm	12,4	2,67	0,23	0,39	33,6	2,69	0,32	0,06	16,0	<0,07	3,73	2,65	15,1	10,1	113	0,23
141	05.07.2011	30-45 cm	12,8	2,69	0,19	0,44	35,5	2,78	0,32	0,06	13,7	<0,07	3,48	2,86	16,3	10,3	112	0,16
142	05.07.2011	45-60 cm	13,3	2,69	0,20	0,49	39,3	3,04	0,29	0,06	13,1	<0,07	3,59	2,75	15,4	10,4	117	0,13
143	05.07.2011	60-75 cm	11,2	2,32	0,17	0,38	32,2	2,43	0,30	0,05	12,8	<0,07	3,06	1,66	13,3	8,98	96,7	0,15
144	05.07.2011	75-90 cm	12,2	2,58	0,25	0,37	33,4	2,67	0,31	0,05	12,6	<0,07	3,89	2,04	16,3	10,7	130	0,17

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	Königswasserlösliche Gehalte														NO3-N	
			[mg/g]								[mg/kg]							
			Fe	Al	P	S	Ca	Mg	K	Na	Zn	Cd	Cu	Pb	Cr	Ni	Mn	[mg/100g]
11 RBF Alsdorf																		
zulaufnah																		
28	16.05.2011	0-15 cm	10,2	6,37	0,59	0,35	4,62	1,74	0,97	0,13	311	0,34	25,4	60,7	21,2	13,3	258	1,32
29	16.05.2011	15-30 cm	3,01	1,19	0,10	0,03	0,72	0,27	0,19	0,02	26,6	0,08	2,33	6,70	8,74	4,95	98,7	0,53
30	16.05.2011	30-45 cm	5,06	1,45	0,14	0,06	20,2	7,12	0,21	0,16	69,1	1,11	4,40	38,4	17,2	10,0	143	0,42
zulauffern																		
31	16.05.2011	0-15 cm	6,22	3,08	0,19	0,08	12,0	3,04	0,55	0,05	89,7	0,74	4,98	37,1	14,5	7,87	223	0,70
32	16.05.2011	15-30 cm	4,74	1,22	0,10	0,07	35,6	5,52	0,23	0,04	94,2	1,83	2,56	68,3	12,9	6,62	226	0,20
33	16.05.2011	30-45 cm	5,93	1,43	0,11	0,09	63,0	9,08	0,31	0,07	157	3,37	3,23	144	15,5	8,16	279	0,24
34	16.05.2011	45-60 cm	4,65	1,00	0,09	0,02	4,08	0,64	0,17	0,02	21,1	0,33	2,16	11,2	19,2	8,31	193	0,14
35	16.05.2011	Sed Zulaufrinne	21,7	14,4	2,28	1,91	15,9	6,54	1,99	0,56	1425	1,71	139	226	54,5	34,9	374	2,13
12 RBF Harwick																		
unteres Beet																		
86	21.05.2011	Sediment Zulaufrinne	20,1	12,0	5,70	4,70	41,3	11,7	1,46	0,55	1400	1,28	310	140	57,1	38,3	1104	40,7
87	21.05.2011	zulauffern, 0-5 cm	5,87	3,43	0,72	0,45	12,0	1,44	0,51	0,19	156	<0,07	26,4	16,7	18,4	12,4	137	2,92
88	21.05.2011	zulauffern, 5-10 cm																
		zulauffern, 5-10 cm, <2mm	4,19	2,08	0,21	0,09	5,95	1,03	0,32	0,12	37,2	<0,07	6,67	4,53	16,1	10,5	72,9	0,50
89	21.05.2011	zulauffern, 10-15 cm																
		zulauffern, 10-15 cm, <2mm	3,83	1,71	0,13	0,02	7,86	1,00	0,27	0,05	17,2	<0,07	3,13	2,30	17,2	10,4	84,7	0,19
90	21.05.2011	zulauffern, 15-30 cm																
		zulauffern, 15-30 cm, <2mm	4,20	1,73	0,12	0,03	8,88	1,05	0,26	0,05	12,9	<0,07	2,95	2,77	16,7	11,1	97,5	0,18
Profilgrube																		
91	21.05.2011	0-5 cm																
		<2mm	9,53	5,84	1,98	1,01	8,69	2,05	0,58	0,13	425	0,34	101	60,5	29,9	20,2	243	7,48
92	21.05.2011	5-10 cm																
		<2mm	5,88	2,19	0,22	0,09	7,41	1,31	0,30	0,04	51,4	<0,07	7,19	5,43	26,3	15,0	84,1	0,70
93	21.05.2011	10-15 cm																
		<2mm	5,01	1,91	0,16	0,06	6,34	1,09	0,26	0,03	35,0	<0,07	4,29	4,03	19,0	11,9	71,7	0,59
94	21.05.2011	15-30 cm																
		<2mm	4,30	1,73	0,14	0,04	6,66	1,03	0,26	0,03	21,6	<0,07	2,87	2,54	17,3	10,8	91,9	0,52
95	21.05.2011	30-60 cm																
		<2mm	4,42	1,79	0,12	0,03	8,89	1,13	0,25	0,03	11,6	<0,07	2,84	2,47	14,8	10,4	114	0,33
96	21.05.2011	60-90 cm																
		<2mm	4,81	1,96	0,12	0,03	11,62	1,38	0,28	0,03	10,9	<0,07	2,93	2,73	15,6	10,8	136	0,19
97	21.05.2011	100-130 cm, sind nur Steine	da Probe nur aus Steinen besteht keine SM untersucht															

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	Königswasserlösliche Gehalte														NO3-N	
			[mg/g]							[mg/kg]								
			Fe	Al	P	S	Ca	Mg	K	Na	Zn	Cd	Cu	Pb	Cr	Ni	Mn	[mg/100g]
13 RBF Herongen																		
55	18.05.2011	Ablaufschacht, Boden, Mangan	16,1	5,79	0,46	0,19	9,62	1,44	0,66	0,09	80,4	0,29	17,4	10,8	31,2	25,2	521	0,07
56	18.05.2011	Ablaufschacht, Wand, Mangan	20,2	11,0	2,06	0,46	22,7	2,27	1,10	0,21	422	1,15	19,7	30,1	57,7	72,3	32849	
57	18.05.2011	Sed Zulaufpflaster zulaufnah	19,3	14,6	2,81	1,81	17,3	4,01	1,56	0,35	805	0,98	94,3	133	94,4	31,2	922	4,07
58	18.05.2011	0-5 cm																
		0-5 cm, <2mm	10,9	7,46	1,16	0,74	44,9	3,29	0,91	0,19	282	0,34	34,0	45,9	41,2	18,0	437	16,9
59	18.05.2011	5-10 cm	5,80	2,56	0,15	0,08	69,9	2,73	0,33	0,10	21,1	<0,07	4,14	5,03	15,6	10,7	145	1,19
60	18.05.2011	10-15 cm																
		10-15 cm, <2mm	5,86	2,36	0,11	0,05	61,8	2,35	0,28	0,08	16,3	0,07	3,98	263	12,8	9,33	136	0,91
61	18.05.2011	15-30 cm																
		15-30 cm, <2mm	5,35	2,19	0,09	0,05	57,8	2,09	0,25	0,09	14,1	0,06	3,06	4,89	12,8	8,90	142	0,42
zulaufnah																		
62	18.05.2011	0-5 cm																
		0-5 cm, <2mm	6,09	2,80	0,25	0,14	46,5	2,33	0,34	0,11	50,1	0,09	5,65	7,06	18,0	11,7	159	2,08
63	18.05.2011	5-10 cm																
		5-10 cm, <2mm	5,61	2,38	0,13	0,05	35,3	1,69	0,31	0,07	179	<0,07	3,66	3,48	15,3	10,7	120	1,03
64	18.05.2011	10-15 cm																
		10-15 cm, <2mm	5,85	2,27	0,14	0,06	50,5	2,21	0,27	0,08	15,5	0,06	3,54	3,36	16,7	11,4	128	0,72
65	18.05.2011	15-30 cm																
		15-30 cm, <2mm	5,75	2,32	0,15	0,05	47,8	2,17	0,30	0,04	13,8	0,06	3,23	3,15	15,6	10,8	132	0,95
14 RBF Madfeld																		
rechtes Beet, zulaufnah																		
76	20.05.2011	0-5 cm	12,2	6,47	1,24	0,74	37,9	7,42	1,04	0,46	229	0,54	41,0	48,6	15,4	14,4	270	7,62
77	20.05.2011	5-10 cm																
		5-10 cm, <2mm	8,32	3,15	0,52	0,24	39,2	6,30	0,45	0,12	109	0,29	13,8	19,6	9,32	8,84	162	1,58
78	20.05.2011	10-15 cm	6,70	1,99	0,24	0,08	40,3	4,51	0,35	0,08	43,5	0,20	5,45	7,25	6,54	6,55	119	0,51
79	20.05.2011	15-30 cm	6,38	1,90	0,20	0,08	48,9	7,80	0,32	0,11	29,3	0,13	5,89	7,32	6,86	6,35	160	0,35
rechtes Beet, zulauffern																		
80	20.05.2011	0-5 cm	7,39	2,76	0,49	0,36	78,7	34,0	0,39	0,14	103	0,28	13,5	15,5	8,33	7,21	282	2,95
81	20.05.2011	5-10 cm	5,92	1,63	0,19	0,14	109	50,8	0,26	0,16	41,4	0,15	4,95	4,38	5,77	5,42	382	0,79
82	20.05.2011	10-15 cm	5,68	1,52	0,15	0,11	111	50,8	0,25	0,15	25,4	0,13	4,27	4,28	5,18	5,18	386	0,57
83	20.05.2011	15-30 cm	5,28	1,38	0,12	0,11	127	61,9	0,22	0,16	18,1	0,13	3,54	2,75	4,50	4,60	482	0,45
84	20.05.2011	linkes Beet, 10-30 cm																
		linkes Beet, 10-30 cm, <2mm	2,62	1,04	0,09	0,08	36,2	13,5	0,18	0,06	19,6	<0,07	1,96	3,43	5,43	3,92	107	0,99
85	20.05.2011	Sed Zulaufrinne	24,8	19,5	5,40	3,80	65,1	7,42	3,99	0,39	739	2,48	178	181	46,6	36,1	480	0,83
15 RBF Hille, Hartum																		
120	05.07.2011	FIS, zulaufnah 0-5 cm	8,04	2,96	0,23	0,14	3,66	1,65	0,59	0,07	44,5	<0,07	13,0	7,15	15,5	10,1	76	0,25
121	05.07.2011	FIS, zulauffern 0-5 cm	7,20	2,47	0,20	0,05	2,74	1,51	0,52	0,04	18,5	<0,07	5,89	4,06	13,1	9,11	64	0,22

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	Königswasserlösliche Gehalte														NO3-N	TM
			[mg/g]								[mg/kg]							gesamt
			Fe	Al	P	S	Ca	Mg	K	Na	Zn	Cd	Cu	Pb	Cr	Ni	Mn	[mg/100g]
16 RBF Tengern																		
149	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 1																
		Sed, SZ, 6x, 1, <2mm	11,7	3,74	0,54	0,61	47,4	3,58	0,57	0,07	69,8	<0,07	9,90	5,13	11,6	9,83	147	2134
150	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 2																2052
		Sed, SZ, 6x, 2, <2mm	14,4	4,69	0,94	0,85	47,9	3,69	0,69	0,08	117	<0,07	16,7	9,04	13,4	12,1	187	
151	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 3																2211
		Sed, SZ, 6x, 3, <2mm	13,4	3,76	0,45	0,68	47,4	3,61	0,60	0,07	53,6	<0,07	7,46	5,13	11,1	10,0	159	
152	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 4																2092
		Sed, SZ, 6x, 4, <2mm	13,2	3,62	0,45	0,74	49,6	3,46	0,55	0,07	62,6	<0,07	8,76	5,74	11,6	10,2	162	
153	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 5																2183
		Sed, SZ, 6x, 5, <2mm	14,5	3,80	0,48	0,68	52,5	3,70	0,57	0,09	64,0	<0,07	8,62	6,04	12,2	10,8	180	
154	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 6																2102
		Sed, SZ, 6x, 6, <2mm	15,3	4,00	0,46	0,84	52,6	3,68	0,61	0,08	54,3	<0,07	7,19	5,09	13,7	11,6	195	
155	24.05.2012	bei 2, 15-25 cm																
		bei 2, 15-25 cm, <2mm	9,58	2,86	0,29	0,54	42,2	2,95	0,49	0,05	34,6	<0,07	5,29	3,41	10,2	8,22	117	
156	24.05.2012	bei 5, 15-25 cm																
		bei 5, 15-25 cm, <2mm	13,4	3,29	0,36	0,63	56,4	3,65	0,55	0,08	38,6	<0,07	4,90	1,83	10,6	9,22	139	
17 RBF Extertal																		
157	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 1	14,1	5,71	1,36	1,21	92,2	4,13	0,86	0,09	237	0,15	28,8	16,2	15,5	12,5	183	1772
158	24.05.2012	bei 1, 15-25 cm																
		bei 1, 15-25 cm, <2mm	10,8	2,67	0,42	0,89	120	3,00	0,51	0,08	44,7	0,08	4,12	1,62	8,49	8,03	109	
159	24.05.2012	bei 1, 30-60 cm																
		bei 1, 30-60 cm, <2mm	10,4	2,57	0,33	0,28	41,7	2,86	0,50	0,06	26,7	<0,07	4,49	2,22	8,75	8,51	85,5	
160	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 2																2015
		Sed, SZ, 6x, 2, <2mm	10,8	3,40	0,66	0,66	63,6	2,39	0,58	0,07	98,6	<0,07	11,1	6,03	10,8	9,30	106	
161	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 3																2100
		Sed, SZ, 6x, 3, <2mm	12,1	3,76	0,72	0,53	45,1	3,20	0,69	0,08	101	<0,07	11,4	6,16	11,2	9,66	101	
162	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 4																2145
		Sed, SZ, 6x, 4, <2mm	10,5	3,41	0,59	0,76	70,5	2,79	0,60	0,07	85,5	<0,07	8,48	4,96	11,2	9,82	115	
163	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 5																2169
		Sed, SZ, 6x, 5, <2mm	11,4	3,22	0,48	0,65	69,8	3,46	0,59	0,07	71,8	<0,07	8,47	4,30	9,50	8,82	105	
164	24.05.2012	Sed, SZ, 6x, 6																2213
		Sed, SZ, 6x, 6, <2mm	12,7	3,57	0,56	0,63	55,1	2,73	0,65	0,07	75,1	<0,07	7,23	4,27	11,2	9,33	96,3	
165	24.05.2012	bei 6, 15-25 cm																
		bei 6, 15-25 cm, <2mm	12,1	3,24	0,49	0,57	60,9	2,45	0,61	0,07	33,1	<0,07	4,54	2,77	9,68	8,92	96,0	

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	Königswasserlösliche Gehalte														NO3-N	TM	
			[mg/g]							[mg/kg]									
			Fe	Al	P	S	Ca	Mg	K	Na	Zn	Cd	Cu	Pb	Cr	Ni	Mn	[mg/100g]	[g]
18 RBF Benhausen																			
166	24.05.2012	FiS, 20-40 cm																	
		FiS, 20-40 cm, <2mm	1,20	0,79	0,07	0,03	54,9	1,01	0,17	0,04	6,94	<0,07	1,08	1,34	2,77	1,74	29,6	2891	
19 RBF Benhauserstraße (nicht Benhausen)																			
169	25.05.2012	FiS, 10-20 cm																	
		FiS, 10-20 cm, <2mm	1,30	1,01	0,08	0,02	68,4	0,78	0,20	0,03	10,2	<0,07	1,16	<0,1	3,08	2,85	46,6		
20 RBF Hans Humpert, rechte Kammer																			
167	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, zulaufnah	10,7	4,15	1,32	0,40	78,1	1,80	0,52	0,11	326	0,25	36,4	31,3	17,1	12,5	115	1896	
168	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, mittig	7,10	2,72	0,69	0,22	47,2	1,01	0,39	0,07	172	0,15	20,2	17,7	10,1	8,29	89,0	2080	
21 RBF Hallschlag																			
19	15.05.2011	FiS, unter Invasionssschicht	2,09	1,07	0,06	0,08	69,2	0,99	0,25	0,10	19,8	0,07	1,40	180	9,05	5,00	96,8	0,10	
22 RBF Altendorf, 5 Stechzylinder, Höhe 10 cm																			
181	09.10.2012	Sed, zulaufnah																1330	
		Sed, zulaufnah, <2mm	10,3	7,67	1,02	0,71	73,96	3,36	1,34	0,87	409	0,39	65,2	362	19,2	18,2	379		
182	09.10.2012	Sed, zulauffern																1798	
		Sed, zulauffern, <2mm	2,28	1,43	0,26	0,23	120	1,62	0,25	0,10	80,2	0,16	8,87	504	4,19	3,53	156		
183	09.10.2012	FiS, zulaufnah, zulauffern, 20-30 cm	1,17	0,63	0,06	0,17	145	1,53	0,12	0,03	42,0	0,27	1,15	368	2,79	2,07	123	1924	
184	09.10.2012	Sed vor Zulaufgabione, H = 12 cm	26,9	20,4	3,29	1,70	15,4	7,26	3,79	2,45	1153	1,01	202	222	57,5	54,4	830	811	
23 RBF Witzerath																			
194	10.10.2012	FiS, 10-30 cm, zulauffern																	
		FiS, 10-30 cm, zulauffern	2,13	0,92	0,06	0,05	99,5	2,38	0,18	0,06	7,38	<0,07	0,81	0,84	5,41	3,31	118		
24 RBF Solingen Fritz-Reuter, Sedimentproben																			
98	21.05.2011	zulaufnah, 0-10 cm	25,2	11,0	1,79	1,86	32,5	9,55	1,28	0,55	887	0,97	227	239	288	159	679	6,83	2209
99	21.05.2011	zulaufnah, 10-20 cm	24,5	10,7	1,67	1,56	24,8	8,72	1,28	0,53	905	0,97	258	274	264	127	659	2,15	2607
100	21.05.2011	zulauffern, 0-10 cm	30,3	15,2	2,67	2,81	27,7	10,5	1,83	0,60	1349	1,53	353	320	643	414	771	4,88	1829
101	21.05.2011	zulauffern, 10-20 cm	31,3	15,3	2,29	2,23	19,5	9,71	1,72	0,60	1343	1,75	342	366	428	178	741	2,92	2316
25 RBF Lübeckerstraße, Sediment																			
102	21.05.2011	zulaufnah, 0-10 cm	23,2	13,2	3,20	2,01	26,9	7,95	1,51	0,51	1170	1,14	456	219	154	94,5	580	12,6	
103	21.05.2011	zulauffern, 0-3 cm	20,6	12,3	3,17	1,95	21,6	6,72	1,42	0,48	1082	1,08	337	182	119	83,3	528	15,4	
26 RBF Glessen, Trennsystem																			
11	14.05.2011	Sed Vorstufe, trockenfallend	26,1	15,1	2,09	2,73	12,8	8,01	2,69	1,52	2613	1,43	232	142	87,4	67,7	472	3,36	
12	14.05.2011	zulaufnah 0-10 cm	11,2	4,76	0,45	0,34	7,98	1,23	0,86	0,08	73,3	0,15	10,2	20,9	29,4	17,8	456	0,88	
13	14.05.2011	zulaufnah 10-30 cm	11,1	3,30	0,33	0,15	2,97	0,70	0,47	0,08	33,7	0,07	6,87	8,97	31,4	18,8	429	0,30	
14	14.05.2011	zulaufnah 30-60 cm	12,0	3,37	0,26	0,10	1,76	0,65	0,43	0,07	24,4	0,06	5,73	7,28	30,1	18,6	431	0,32	
15	14.05.2011	zulaufnah 60-90 cm	15,3	4,10	0,22	0,04	0,90	0,65	0,46	0,06	18,7	<0,07	4,86	6,62	29,5	19,8	715	0,11	
16	14.05.2011	zulaufnah, Fe-Kruste Grenze FiS/Dränkies	12,8	3,10	0,18	0,05	1,51	0,70	0,45	0,07	18,2	0,09	7,14	6,25	28,9	38,0	11890		
17	14.05.2011	zulaufnah, Dränkies 90-120 cm	11,3	3,17	0,16	0,06	0,97	0,89	0,37	0,09	20,8	<0,07	5,51	5,59	36,1	23,0	440		
27 RBF Graf Zeppelin, Autobahnkreuz Wünneburg-Haaren																			
170	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, zulaufnah																2109	
		Sed, SZ, 6x, zulaufnah, <2mm	6,58	3,07	0,27	0,21	90,9	3,22	0,56	0,07	257	0,24	21,3	22,4	12,5	10,7	152		
171	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, mittig																2349	
		Sed, SZ, 6x, mittig, <2mm	4,24	2,53	0,17	0,11	83,9	2,64	0,64	0,06	103	0,12	8,94	8,18	10,2	7,93	99,2		
172	25.05.2012	Sed, SZ, 6x, zulauffern																2387	
		Sed, SZ, 6x, zulauffern, <2mm	3,98	2,11	0,18	0,11	102	2,16	0,42	0,07	98,1	0,14	7,56	7,79	7,94	6,90	110		

Labor-Nr.	Probenahme	Probenbezeichnung	Königswasserlösliche Gehalte														NO3-N	
			[mg/g]								[mg/kg]							
			Fe	Al	P	S	Ca	Mg	K	Na	Zn	Cd	Cu	Pb	Cr	Ni		Mn
		28 RBF Bentelerstraße Paderborn																
104	02.07.2011	FIS, 10-20 cm, ablaufseitig	1,38	1,05	0,13	0,09	116	2,33	0,22	0,05	19,8	0,07	2,31	0,34	5,22	3,60	92,1	0,24
		29 RBF Weilerswist Nr.1																
18	15.05.2011	FIS, ohne Beschickung	3,60	1,66	0,06	0,08	32,9	13,8	0,27	0,06	16,5	<0,07	2,92	6,32	20,4	10,6	149	0,11
		30 RBF A3 Köln, Westseite, A3.1																
69	19.05.2011	Sed Ende eingestauter Zulaufkanal	38,8	19,6	1,38	5,86	22,9	11,0	2,48	4,51	3064	1,66	966	254	181	80,8	444	0,14
70	19.05.2011	Sed Vorstufe, ablaufseitig	56,5	32,0	1,52	7,00	19,6	11,8	3,80	9,23	2638	1,64	773	311	167	81,1	618	0,04
71	19.05.2011	Sed Zulaufrinne, ablaufseitig	53,7	22,8	2,33	2,79	15,3	10,1	4,83	3,30	2591	0,99	883	223	145	77,4	1391	16,6
72	19.05.2011	zulaufnah, 0-2 cm	43,7	32,6	1,72	0,98	20,2	21,1	15,0	10,8	686	0,19	224	60,0	58,4	71,0	736	0,32
73	19.05.2011	zulaufnah, 15-20 cm																
		zulaufnah, 15-20 cm, <2mm	47,4	40,4	1,79	0,11	22,0	27,3	20,2	15,9	49,4	<0,07	50,1	12,8	40,6	74,2	699	0,10
74	19.05.2011	zulauffern, 0-2 cm	44,4	36,8	1,87	0,44	20,6	23,6	19,0	13,4	283	<0,07	102	32,4	49,5	75,0	774	0,43
75	19.05.2011	zulauffern, 15-20 cm																
		zulauffern, 15-20 cm, <2mm	48,0	40,4	1,91	0,12	22,0	28,2	22,3	15,9	57,7	<0,07	53,1	14,1	46,7	83,8	743	0,07
		Entwässerungsmulden, A3.1																
106	03.07.2011	an Fahrbahn, oben	36,3	11,8	0,71	1,29	27,8	9,27	1,74	1,75	1228	0,79	449	128	158	71,5	784	3,80
107	03.07.2011	an Fahrbahn, unten	25,5	14,4	0,49	0,83	35,6	10,6	1,22	1,36	259	0,31	49,4	58,3	85,4	67,5	602	0,56
108	03.07.2011	an Böschung, oben																
		an Böschung, oben, <2mm	21,9	11,4	0,51	0,61	35,1	6,34	1,51	0,98	537	0,55	118	89,6	53,9	40,0	577	0,72
109	03.07.2011	an Böschung, unten																
		an Böschung, unten, <2mm	9,91	5,53	0,27	0,82	220	6,18	0,58	0,94	139	0,32	19,5	69,6	22,9	22,0	291	0,12
		31 A3 Köln-Ost, Ostseite, A 3.2																
105	03.07.2011	Vorstufe, Sediment, ablaufseitig	42,2	29,6	0,96	4,78	16,5	8,73	3,57	6,89	1922	1,99	419	178	97,2	67,9	393	0,02
129	03.07.2011	zulaufnah	42,1	43,7	1,72	0,23	18,9	21,3	22,2	16,4	164	<0,07	50,2	18,7	43,5	55,0	739	1,29
130	03.07.2011	zulauffern, an Verteilerrinne	41,1	43,2	1,77	0,18	18,2	21,6	22,6	16,4	112	<0,07	46,2	18,3	41,1	58,0	762	0,93
131	03.07.2011	zulauffern, verteilerrinnenfern	41,6	44,7	1,79	0,14	18,9	21,8	23,5	16,7	62,2	<0,07	39,3	17,2	41,2	57,6	758	0,35
		32 RBF A3 Köln Ostseite, AS Köln-Mühlheim, A3.3																
67	19.05.2011	Decklage RBF, noch nicht in Betrieb	3,36	1,39	0,06	0,11	261	102	0,61	0,47	21,6	<0,07	5,36	<0,7	12,7	7,29	277	0,34
68	19.05.2011	FIS RBF, noch nicht in Betrieb																
		FIS RBF, noch nicht in Betrieb, <2mm	33,8	41,5	1,62	0,20	39,2	29,4	23,9	15,8	44,1	<0,07	31,7	12,3	27,5	54,1	640	0,17
		33 A3, Ostseite, km 32.65, Bellinghausen, A3.4																
138	06.07.2011	Sediment	30,3	17,9	0,99	3,08	66,5	9,63	2,56	2,10	1089	1,16	258	83,5	70,4	62,9	491	0,12
		34 Versickerungsanlage A1, westlich Köln, 400 m südlich Anzweig A57, A 1.1																
119	04.07.2011	Vorstufe, Sediment, 1.Becken	36,1	20,2	0,95	2,99	11,5	6,56	2,57	1,17	1348	1,48	466	156	95,6	52,0	441	0,09
		35 A1, Richtung Dortmund, nördlich Wermelskirchen, A 1.2																
110	04.07.2011	Vorstufe, Sediment, ablaufseitig	39,5	21,8	1,35	5,81	20,6	8,99	1,96	26,8	1762	1,36	439	115	76,1	99,1	756	<0,05
111	04.07.2011	FIS, 5-20 cm	38,5	41,4	1,62	0,30	22,6	23,3	22,8	16,5	95,6	<0,07	49,0	20,1	52,3	68,5	759	<0,05
		36 RBF Marscheiderbach, A1.3																
66	18.05.2011	Ablaufschacht Ocker	420	2,04	14,2	1,11	16,1	0,79	0,29	2,03	1491	1,61	121	23,6	55,3	23,9	42662	

Gemessene Lagerungsdichten von ausgewählten RBF in 0 – 10 cm Tiefe

Anlage		TM in kg	V in l	LD in kgTM/l
Wermelskirchen ¹		1,57	1,32	1,23
Geilenkirchen	zulaufnah	1,45	1,58	0,92
	mittig	1,59	1,58	0,92
	zulauffern	1,88	1,58	1,19
Frelenberg	zulaufnah	0,65	1,32	0,49
	zulauffern	1,47	1,32	1,11
Tengen	zulaufnah	2,13	1,58	1,35
	zulauffern	2,13	1,58	1,35
Extertal	zulaufnah	1,89	1,58	1,20
	mittig	2,12	1,58	1,34
	zulauffern	2,19	1,58	1,39
Humpert	zulaufnah	1,90	1,58	1,20
	mittig	2,08	1,58	1,32
Altendorf	zulaufnah	1,33	1,32	1,01
	zulauffern	1,80	1,32	1,36

1: 8 Mischproben mit je 5 Stechzylindern über gesamte Filterfläche verteilt

Berechnung der Feinpartikelfilterbelastung

	h	v	LD	TM	T+U		Δ T+U	T+U	t	T+U
	dm	l/m ²	kg/l	kg/m ²	%			kg/m ²	a	kg/m ² *a
zulaufnah										
1 Varnikum	0,2	20	1,4	28	14,0	2,0	12,0	3,36	6	0,56
2 Glehn	0,5	50	1,4	70	14,0	2,0	12,0	8,40	5	1,68
3 Kenten	0,5	50	1,4	70	15,6	2,0	13,6	9,52	6	1,59
4 Erbach	0,5	50	1,3	65	31,6	8,0	23,6	15,3	16	0,96
5 Benninghoferweg	0,5	50	1,0	50	80,8	1,0	79,8	39,9	11	3,63
6 Wermelskirchen	1,0	100	1,16	116	11,4	3,0	8,4	9,74	11	0,88
7 Geilenkirchen	2,0	200	0,92	184	37,3	0,0	37,3	68,6	13	5,28
8 Frelenberg	2,0	200	0,49	98	61,3	0,0	61,3	60,1	12	5,00
10 Harwick	0,5	50	1,4	70	7,6	0,5	7,1	4,97	5	0,99
11 Herongen	0,5	50	1,4	70	25,2	6,3	18,9	13,2	5	2,64
12 Madfeld ¹	1,0	100	1,4	140	8,13	0,60	7,53	10,5	7	1,51
13 Hille ¹	0,5	50	1,4	70	1,50	0,80	0,70	0,49	7	0,07
14 Tengern ¹	1,0	100	1,35	135	3,33	1,20	2,13	2,87	5	0,57
15 Extertäl ¹	1,0	100	1,20	120	6,06	0,80	5,26	6,31	5	1,26
16 Humpert	1,0	100	1,20	120	11,0	2,0	9,0	10,8	5	2,16
17 Altendorf	1,0	100	1,01	101	36,7	2,2	34,5	34,8	6	5,81
mittig										
4 Erbach	0,5	50	1,4	70	11,2	8,0	3,2	2,24	16	0,14
7 Geilenkirchen	1,0	100	1,01	101	19,8	1,0	18,8	19,0	13	1,46
15 Extertäl	1,0	100	1,34	134	3,35	0,80	2,55	3,42	5	0,68
16 Humpert	1,0	100	1,32	132	6,10	2,00	4,10	5,41	5	1,08
zulauffern										
1 Varnikum	0,2	20	1,4	28	13,3	2,0	11,3	3,16	6	0,53
2 Glehn	0,5	50	1,4	70	2,0	2,0	0,0	0,00	5	0,00
3 Kenten	0,5	50	1,4	70	6,1	2,0	4,1	2,87	6	0,48
4 Erbach	0,5	50	1,4	70	8,0	8,0	0,0	0,00	16	0,00
5 Benninghoferweg	0,5	50	1,4	70	15,4	1,0	14,4	10,1	11	0,92
6 Wermelskirchen	1,0	100	1,22	122	9,95	3,0	6,95	8,48	11	0,77
7 Geilenkirchen	1,0	100	1,19	119	6,30	1,0	5,30	6,31	13	0,48
8 Frelenberg	1,0	100	1,11	111	6,9	2,8	4,10	4,55	12	0,38
10 Harwick	0,5	50	1,4	70	1,3	1,0	0,3	0,21	5	0,04
11 Herongen	0,5	50	1,4	70	2,3	2,3	0,0	0,00	5	0,00
12 Madfeld	0,5	50	1,4	70	5,50	1,80	3,70	2,59	7	0,37
13 Hille	0,5	50	1,4	70	1,00	0,80	0,20	0,14	7	0,02
14 Tengern	1,0	100	1,35	135	2,82	1,20	1,62	2,19	5	0,43
15 Extertäl	1,0	100	1,39	139	2,27	0,80	1,47	2,04	5	0,41
16 Humpert	errechnet aus zulaufnah und mittig								5	0,54
17 Altendorf	1,0	100	1,36	136	4,2	2,2	2,0	2,72	6	0,45

1 Annahme: T+U = GV x 2,0

8.3 Visuelle Betriebsindikatoren für RBF

Beschickungshäufigkeit	
Vitalität Schilfbestand	Bild 8-1
Ersatz Schilf durch Brennessel	Bild 8-2
Tierhöhlungen	Bild 8-3
Länge der alten Schilfhalme	Bild 8-4
Bodenwürmer	Bild 8-5
Durchmischung Sediment/Filtersubstrat	Bild 8-6
Grenzzone Sediment/Filtersubstrat	Bild 8-7
Trockenheitsanzeiger (Sedum)	Bild 8-8
Feinpartikelbelastung	
Sedimentmächtigkeit	Bild 8-9
Mächtigkeit der Schilfstreu	Bild 8-10
Aufschwimmen der Schilfstreu	Bild 8-11
Moosbesiedlung der Filteroberfläche	Bild 8-12
Filtereinstauzeit	
Schilfhalmwurzeln	Bild 8-13
Algenfladen auf Filteroberfläche	Bild 8-14
Unstrukturiertes Sediment	Bild 8-15
Stoffliche Filterbelastung	
Feinpartikel im Dränablauf	Bild 8-16
Biofilm im Dränablauf	Bild 8-17
Carbonatausfällungen im Dränablauf	Bild 8-18
Manganausfällungen im Dränablauf	Bild 8-19
Eisenausfällungen im Dränablauf	Bild 8-20
Schwefelsäurekorrosion im Dränablauf	Bild 8-21



Bild 8-1: Obwohl der Schilfbestand des RBF Frelenberg (Beet rechts) sehr mächtig ist, kommt es zulauffern zu großen Lücken im Schilfbestand, die auf die geringe Beschickungshäufigkeit zurückgeführt werden können.



Bild 8-2: Die geringe Beschickungshäufigkeit führte beim RBF Wylen dazu, dass der ursprüngliche Schilfbestand weitgehend durch Brennnessel ersetzt wurde. Blick vom Zulauf Richtung Filterüberlauf.



Bild 8-3: Große Tierhöhlungen sind ein Zeichen sehr geringer Beschickungshäufigkeit. Bei den meisten Anlagen mit Tierhöhlungen sind diese zulauffern anzutreffen, was nicht nur auf eine geringe feinpartikuläre, sondern auch auf eine hydraulische Belastung dieses Filterteiles hinweist. RBF Kenten.



Bild 8-4: Durch die geringe Beschickungshäufigkeit der zulauffernen Fläche des RBF Kenten kommt es u.a. zur Ansiedlung von Mäusen, die von den Böschungen einwandern. Die Mäuse zerlegen die Schilfhalm in kleine Stücke, wodurch ihre Verfrachtung bei den seltenen Überstaus auf die Böschung erleichtert wird.



Bild 8-5: Bei geringer Beschickungshäufigkeit können sich Bodenwürmer ansiedeln. Diese wurden nicht nur in dem mächtigen Sediment, sondern auch im sandigen Filterssubstrat angetroffen. RBF Schömberg.



Bild 8-6: Von den Bodenwürmern wird sandiges Filterssubstrat in das feinpartikuläre Sediment eingemischt. Das zulaufnahe, 20 cm mächtige Sediment des RBF Geilenkirchen wurde aufgrund der Existenzmöglichkeit der Bodenwürmer (geringe Beschickungshäufigkeit) zu 60 % mit sandigem Filterssubstrat vermischt.



Bild 8-7: Durch die starke Durchmischung von Sediment und Filtersubstrat wird die ursprüngliche scharfe und gerade Grenzlinie sehr diffus und wellig. Zulaufnaher Filterteil des RBF Geilenkirchen.



Bild 8-8: Sehr geringe Beschickungshäufigkeit und fehlende Sedimentbildung kann zur Ansiedlung von trockenheitsanzeigenden Pflanzen (Sedumarten) führen. Ablaufseitiger Teil der RBF-Anlage Köln Ost-Westseite.



Bild 8-9: Aufgrund der vergleichsweise hohen ablaufseitigen Feinpartikelbelastung von $0,92 \text{ kgTM/m}^2 \cdot \text{a}$ ($\Sigma 10,2 \text{ kgTM/m}^2$ in 11 Jahren) kann auch ablaufseitig das Sediment optisch sicher erkannt werden. RBF Benninghoferweg.



Bild 8-10: Bei geringer Feinpartikelbelastung und hohem Dauereinstau, der einen üppigen Schilfbestand ermöglicht, bildet sich eine mächtige Schilfstreu aus, die nicht durch Feinpartikelbelastung kompaktiert und mineralisiert wird. RBF Marscheiderbach.



Bild 8-11:Die fehlende Feinpartikelbeladung der Schilfstreu führt zu deren Aufschwimmen bei Filtereinstau. Bei Filterüberlauf ohne Tauchwand kann die Schilfstreu ausgetragen werden.



Bild 8-12:Die auch nach mehreren Jahren Betrieb nicht messbare Feinpartikelbelastung wird durch die flächendeckende Moosbesiedlung der Filteroberfläche angezeigt.



Bild 8-13: Ein mehrwöchiger Filterüberstau lässt sich an den oberirdischen Wurzeln der Schilfhalm erkennen. Frühjahrseinstau des RBF Hunpert zur Förderung des Schilfbestandes.



Bild 8-14: Die Algenfladen auf der Filteroberfläche sind durch Filterüberstau im Frühjahr (Förderung der Schilfentwicklung) entstanden, RBF Bentelerstraße. Die ganzflächige Fladenentwicklung setzt eine geringe Feinpartikelbelastung während der Entwicklungszeit voraus.



Bild 8-15: Filter die lange eingestaut sind, zeigen auch bei hohem Grobkornanteil des Sedimentes keine Poren auf der Filter- bzw. Sedimentoberfläche. Oberfläche von stark mit Straßenfeststoffen belastetem, unbepflanztem Rinnenfilter.



Bild 8-16: Bei Filtern, die ein sehr grobes Filtersubstrat besitzen (hoher Kiesanteil) oder Kurzschlüssigkeit durch Höhlungen bis zur Dränschicht, kann es zum Feinpartikeldurchbruch kommen.



Bild 8-17: Der unvollständige Abbau der gelösten, organischen Substanz ist an der Überlaufschwelle des Dränablaufes (hoher Teileinstau) durch den grauen Biofilm erkennbar.



Bild 8-18: Carbonatausfällung im Dränablaufschacht (RBF Buchen) ist im Vergleich zu Mangan- und Eisenausfällung selten. Die Ausfällung kann hohe Schwermetallgehalte u.a. Zink enthalten. Der Überschuss an CO₂ bzw. die Carbonatausfällung im Dränablauf kann u.a. durch Filtereinstau und sehr geringe hydraulische Belastung verursacht sein.



Bild 8-19: Die tief schwarze Ausfällung am Dränablauf des RBF Fellenweg zeigt an, dass Mangan gegenüber Eisenausfällung dominiert. Die Dominanz der Manganausfällung zeigt gegenüber der des Eisens ein geringeres Sauerstoffdefizit im Filter an.



Bild 8-20: Der hohe permanente Einstau des Filters bis in die Sedimentschicht führt zur Eisenrücklösung, die teilweise im Ablaufschacht als Ockererz wieder ausfällt.



Bild 8-21: Bei sehr hohem Sauerstoffdefizit im Filter, z.B. verursacht durch permanenten Teileinstau, kommt es im Filter zur Sulfatatmung. Das gebildete H_2S gas am Ablaufschacht aus und oxidiert zu Schwefelsäure, die die Abdeckung des Ablaufschachtes korrodiert.