



Untersuchung des Substrates Hygroret unter realen Betriebsbedingungen (BOFI-FLW)

-Abschlussbericht-

Auftraggeber:
Forschungsgemeinschaft
Landschaftsbau und Wasserwirtschaft FLW AG
Rhenusplatz 2
59439 Holzwickede

Februar 2008

Fachbereich Bauingenieurwesen
Prof. Dr.-Ing. M. Uhl
Corrensstraße 25
48149 Münster

WW
Labor für
Wasserbau und
Wasserwirtschaft

1 Zusammenfassung

1.1 Versuchskonzept

Das Ziel der Lysimeterversuche ist die Untersuchung der Reinigungsleistung des von der Firma FLW AG entwickelten Substrates Hygroret unter realen Betriebsbedingungen mit verringerter Filtermächtigkeit (60 cm). Bei den Untersuchungen wurde ein zweites Filterbeet mit einem Sandsubstrat mit normaler Filtermächtigkeit (75 cm) als Referenz betrieben und analysiert. Das Referenzsubstrat erfüllt in Bezug auf Korngrößenverteilung und Carbonatgehalt (25 %) die Vorgaben für das Mischsystem aus DWA-M 178 [2005]. Die Korngrößenverteilung und der Carbonatgehalt (23 %) des Substrates Hygroret weichen nur geringfügig davon ab. Beide Substrate verfügen über ein ausreichendes Carbonatdepot für das Mischsystem.

Bei den durchgeführten Untersuchungen handelt es sich um eine Kurzzeitstudie im halbertechnischen Maßstab. Die Untersuchungen wurden in zwei Versuchsphasen durchgeführt, wobei Versuchsphase 1 (VP 1) vom 12.10.2006 bis zum 18.01.2007 durchgeführt wurde. Die Versuchsphase 2 (VP 2) wurde nach mehrmonatiger Beschickungspause vom 06.09. 2007 bis zum 04.12. 2007 durchgeführt.

In der VP 1 wurden im Zeitraum von 16 Wochen 18 Normallastbeschickungen (NL) mit $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ und eine Hochlastbeschickung (HL) mit $2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ Beschickungshöhe durchgeführt. Die Beschickungen wurden als Batchversuche in Abständen von 2-3 Tagen durchgeführt. Das regelmäßige Beschicken sichert eine gute Etablierung der Filterbiozönose. Die Beschickungspausen waren lediglich vor und nach dem Hochlastversuch länger (4 bzw. 5 Tage). Um die Filterreaktionen auf eine längere Trockenphase hin zu untersuchen, wurde eine Trockenphase von 4 Wochen durchgeführt und mit einer Normallastbeschickung beendet.

In der VP 2 wurden innerhalb der 14 Wochen 7 Beschickungen mit $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (NL) und 4 Beschickungen mit $2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (HL) Beschickungshöhe durchgeführt.

Die Normallastbeschickungen beider Versuchsphasen (VP 1 und VP 2) dienten als Einfahrphase bzw. Wiedereinfahrphase. Die Hochlastversuche dienten folgenden Untersuchungszielen:

- Überprüfung des Substrates Hygroret im halbertechnischen Maßstab und natürlichen Witterungseinflüssen
- Bestimmung der Reinigungsleistung beider Filtersubstrate unter hohen stofflichen und hydraulischen Belastungen
- Überprüfung der Auswirkung einer reduzierten Substratschicht auf die Reinigungsleistung und das Durchbruchverhalten
- Erstuntersuchung der Eignung des Substrates für die Reinigungsleistung bei verkehrsspezifischen Stoffen

Die Lysimeter-Untersuchungen wurden an einer Außenversuchsanlage (RÜB Münster-Albachten) durchgeführt, daher unterlagen die Filter während der gesamten Versuchszeit den natürlichen Witterungseinflüssen. Die natürlichen Frost-Tau-Wechsel (Winter 2006/2007) hatten keine Setzungen des Substrates Hygroret zur Folge. Niederschläge und Trockenzeiten, die während der 7-monatigen Versuchspause (zwischen VP 1 und VP 2) auf die Filter einwirkten, hatten keine negativen Auswirkungen auf die Filtersubstrate. Dies zeigen auch die guten Rückhalteleistungen nach kurzer Reaktivierungsphase.

Um das Rückhaltevermögen der Substrate bei den Schwermetallen Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu) und Zink (Zn) beurteilen zu können, wurden dem Beschickungswasser von 3 Hochlastversuchen Schwermetalllösungen zugesetzt. Die Zulaufkonzentrationen lagen im Bereich der doppelten Medianwerte in Straßenabflüssen wie sie in Kasting [2003] angegeben werden. Im letzten Hochlastversuch wurde dem Beschickungswasser zusätzlich eine PAK-Lösung zugesetzt, um das Rückhaltevermögen an PAK zu bestimmen.

Im Gegensatz zur regenerativen CSB und $\text{NH}_4\text{-N}$ –Eliminierung handelt es sich beim Rückhalt von Schwermetallen um einen endlichen Prozess, der stark von den Sorptionseigenschaften der Materialien abhängt. Sind alle Sorptionsplätze belegt, so ist auch kein Rückhalt mehr möglich. Bei den PAK handelt es sich um einen teils regenerativen / nichtregenerativen Prozess, in Abhängigkeit von der Art der PAK-Belastung, einige der PAK sind abbaubar andere nicht.

1.2 Bewertung der Reinigungsleistung

Die Bewertung der Reinigungsleistung erfolgt anhand der Ergebnisse aus den Hochlastversuchen.

Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

Beim Parameter CSB weist das Substrat Hygroret hinsichtlich der Ablaufkonzentrationen (Bild 1.1) und der Wirkungsgrade (Bild 1.3) keine signifikanten Unterschiede zum Referenzsubstrat auf. Der mittlere Gesamtwirkungsgrad für CSB aus den Hochlastversuchen beträgt für den Sand 70,5 % und für Hygroret 76,6 % (siehe Tabelle 3.10). Hygroreth hat mit 20% geringerer Einbauhöhe einen dem Sandsubstrat äquivalenten CSB-Rückhalt (Bild 1.2).

Ammonium ($\text{NH}_4\text{-N}$)

Der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Wirkungsgrad des Substrats Hygroret liegt im Mittel der Hochlastversuche bei 99,2 % und variiert zwischen 97,9 und 99,7 % (Tabelle 1.4). Der Wirkungsgrad des Sandsubstrates liegt im Mittel bei 71,2 % und variiert zwischen 61,1 und 79,4 % (Tabelle 1.3 und Bild 1.6). Der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachtrückhalt von Hygroret ist somit erheblich höher als der des Referenzsubstrats (Bild 1.5). Der erheblich höhere Frachtrückhalt von $\text{NH}_4\text{-N}$ tritt bei den Normallastversuchen noch nicht so deutlich in Erscheinung, zeigt sich jedoch an den Ergebnissen der Hochlastversuche. Diese zeigen, dass das Referenzsubstrat im Stande ist, $\text{NH}_4\text{-N}$ bis zu einer gewissen Zulauffracht zurückzuhalten. Anschließend kommt es jedoch zum Konzentrationsdurchbruch und die Ablaufkonzentrationen entsprechen den Zulaufkonzentrationen (Bild

1.4). Beim Substrat Hygroret ist auch nach extremer Zulauffracht keine Minderung im Frachtrückhalt zu erkennen. Die Ablaufkonzentrationen lagen unabhängig von der Zulauffracht im Bereich der $\text{NH}_4\text{-N}$ Nachweisgrenze (0,02 mg/l).

Nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$)

Die $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentrationen im Filtrat zeigen zu Versuchsbeginn stets hohe Werte infolge der Nitrifikation des $\text{NH}_4\text{-N}$ in der Trockenphase. Die Höhe der Konzentration hängt von der vorherigen Belastung ab. Im Vorfeld des 1. und 2. HL wurden NL-Beschickungen durchgeführt. Daher liegt die Anfangskonzentration auch deutlich unter denen des 3. 4. und 5. Hochlastversuchs, denen jeweils ein Hochlastversuch voraus ging.

Gesamt-Phosphor (P_{ges})

Die P_{ges} -Wirkungsgrade sind beim Sandsubstrat mit 95,5 % deutlich höher als beim Hygroret mit 47,6 % (Bild 1.8 und Tabelle 1.5). Die Filtratkonzentrationen sind beim Hygroret konstant bei 0,5 mg/l, es handelt sich dabei um den geogenen P_{ges} -Anteil, einer der Zuschlagstoffe des Substrates. Dies dient den Schilfpflanzen großtechnischer Anlagen als pflanzenverfügbares Phosphor-Depot, um möglichen Mangelerscheinungen vorzubeugen. Dennoch findet eine Konzentrationspufferung statt, so dass die Zulaufkonzentrationen von im Mittel 1 mg/l im Ablauf des Filters nur noch mit 0,5 mg/l austreten.

Schwermetalle

Bei den Hochlastversuchen 3, 4 und 5 wurde das Beschickungswasser mit 4 künstlichen Schwermetalllösungen angereichert. Es wurde gelöstes Bleichlorid, Cadmiumchlorid, Kupferchlorid und Zinkchlorid zum Beschickungswasser gegeben. Die Ziel- und Zulaufkonzentrationen sind in Tabelle 1.6 aufgeführt.

Der mittlere Frachtwirkungsgrad für Blei (Pb) war mit 86,4 % bei Sand und mit 86,7 % bei Hygroret hoch. Die Ablaufkonzentrationen lagen beim 3. HL-Versuch unter der Bestimmungsgrenze von 0,01 mg/l. Beim 4. HL-Versuch wies der Sand Ablaufkonzentrationen im Bereich 0,01-0,02 mg/l auf. Beim Substrat Hygroret lagen die Ablaufkonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze. Vom 4. Hochlastversuch (> 96 %) auf den 5. Hochlastversuch (76 %) (Tabelle 1.7) wurde eine Abnahme des Wirkungsgrades festgestellt. Dies ist im Wesentlichen durch die geringen Zulaufkonzentrationen des 5. Hochlastversuches bedingt, wobei die Filtratkonzentrationen unter oder nahe der Bestimmungsgrenze waren (Bild 1.9).

Der Wirkungsgrad des Sandes für Cadmium (Cd) liegt bei den Hochlastversuchen im Mittel bei 93,2 % und beim Hygroret im Mittel bei 75 % (Tabelle 1.8). Die Filtratkonzentrationen lagen bei Sand und Hygroret stets unterhalb der Nachweisgrenze von 0,002 mg/l (Bild 1.10). Der niedrigere Wirkungsgrad von Hygroret resultiert aus zwei höheren Filtratkonzentrationen zu Beginn des 4. Hochlastversuches.

Für Kupfer (Cu) wurde bei Sand ein mittlerer Wirkungsgrad von 70,9 % festgestellt. Das Substrat Hygroret erzielte einen mittleren Wirkungsgrad von 79,9 % (Tabelle 1.9). Die Filtratkon-

zentrationen beider Substraten lagen im 4. Hochlastversuch ab der dritten Probe im Bereich der Nachweisgrenze. Im 5. Hochlastversuch lagen die Filtratkonzentrationen deutlich über diesen Werten (Bild 1.11).

Für Zink (Zn) verfügt Sand über einen mittleren Frachtwirkungsgrad von 91,7 % und Hygroret über 92,1 % (Tabelle 1.10). Die Ablaufkonzentrationen liegen im Bereich von 0,06 bis 0,11 mg/l (Bild 1.12).

Beide Filtersubstrate verfügen bei den ersten 3 Hochlastbeschickungen mit insgesamt 7,5 m³/m² Beschickungshöhe über einen guten bis sehr guten Frachtrückhalt für die untersuchten gelösten Schwermetalle. Die aufgebrauchten Schwermetallkonzentrationen lagen im oberen Bereich der bei Straßenabflüssen festgestellten Werte. Die in realen Regenabflüssen auftretenden Schwermetalle sind zu einem größeren Teil bereits partikulär gebunden. Sie werden durch Filtration an der Filteroberfläche zurückgehalten. Bei Bodenfiltern und Sickeranlagen kann zudem davon ausgegangen werden, dass durch den Partikeleintrag des Regenauflusses das Sorptionspotenzial zumeist über den Bedarf hin zunimmt. Daher dürfte tendenziell bei Filteranlagen mit den untersuchten Substraten Sand und Hygroret von einem langfristig wirksamen Rückhalt von Schwermetallen auszugehen sein. Grundsätzlich ist zu betonen, dass die durchgeführten Versuche den Anfangszustand des Sorptionsvermögens für gelöste Schwermetalle abbilden.

Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Die mehrere hundert Verbindungen umfassende Stoffgruppe PAK wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung anhand der 16 PAK nach EPA erfasst. Ein Teil (6) dieser 16 PAK wird standardmäßig im Rahmen der TVO untersucht, da die Bestimmung der PAK nach TVO ebenfalls häufig herangezogen wird, wurden im Rahmen dieser Untersuchungen sowohl die PAK-Summen nach EPA als auch die PAK-Summen nach TVO ausgewertet und in Form von Diagrammen dargestellt. Da die aufwendige PAK-Analytik lediglich im 5. Hochlastversuch in Zu- und Ablauf untersucht wurden, sind die Ergebnisse als erste, grobe Tendenz für den Anfangszustand zu werten.

Die Filtratkonzentrationen des Sandes steigen langsam an und erreichen in der letzten Probe annähernd die Zulaufkonzentration. Ein Konzentrationsdurchbruch zeichnet sich ab (siehe Bild 1.13 (rechts oben)). Bei dem Substrat Hygroret liegen die Konzentrationen auf einem konstant niedrigen Niveau, hier ist kein Konzentrationsdurchbruch erkennbar. Dies wird durch die Wirkungsgrade bestätigt. Der Sand hat einen mittleren Wirkungsgrad von 90,5 %, Hygroret hat einen mittleren Wirkungsgrad von 98,2 % (Tabelle 1.11).

Im Rahmen der Lysimeterversuche im halbtechnischen Maßstab wurden die untersuchten Filtersubstrate hohen hydraulischen und stofflichen Belastungen unterzogen. Die Beprobung von Zulauf und Infiltrat zeigte, dass im Überstauwasser vor der Filtration keine wesentlichen Stoffreduktionen der Standardparameter (CSB_{hom,s}, NH₄-N) stattfinden. Der erzielte Frachtrückhalt ist daher eine Folge spezieller Substrateigenschaften des jeweiligen Filtermaterials.

Das Substrat Hygroret wurde mit einer um 20% geringeren Schichthöhe des Filters untersucht. Es war zu untersuchen, ob die höhere Sorptionsfähigkeit von Hygroret eine Verringerung der Filtermächtigkeit ohne Leistungseinbußen ermöglicht. Die verringerte Schichthöhe des Substrates Hygroret ließ auch bei den Hochlastversuchen keine für den Frachtrückhalt nachteiligen Effekte erkennen. Die ab dem 3. Hochlastversuch von $q_d = 0,02 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ auf $q_d = 0,03 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ erhöhte Drosselabflussspende wirkte sich nur bei den CSB_{nom} -Konzentrationen durch eine leichte Erhöhung aus. Eine generelle Empfehlung für erhöhte Drosselabflüsse kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der halbtechnischen Versuche unter realitätsnahen Betriebsbedingungen lassen erwarten, dass vom Substrat Hygroret auch beim großtechnischen Einsatz in Retentionsbodenfiltern und anderen Filteranlagen mit vergleichbarer Abflusssrosselung hohe Reinigungsleistungen für CSB und $\text{NH}_4\text{-N}$ zu erwarten sind. Beide Reinigungsprozesse sind regenerativ. Bei Erstuntersuchungen zum Rückhalt gelöster Schwermetalle und von PAK zeigte das Substrat Hygroret ein hohes Rückhaltevermögen. Grundsätzlich sind die zugrundeliegenden Sorptionprozesse nicht regenerativ, so dass ein endliches Sorptionspotenzial im Filter vorliegt. Partikulär gebundene Stoffe und Stoffanteile werden in Retentionsbodenfiltern und ähnlichen Anlagen durch Filtration langfristig zurückgehalten. Infolge des Eintrages feinputikulärer Substanz ist bei Filteranlagen zudem generell eine Erhöhung des Sorptionspotenzials für gelöste Inhaltsstoffe festzustellen. Diese generellen Eigenschaften von Filteranlagen werden sich auch beim Einsatz des Substrates Hygroret einstellen können.

Münster, 03.04.2008

Prof. Dr.-Ing. M. Uhl

Dipl.-Geol. T. Perrefort

Tabelle 1.1: Mittlere CSB - Wirkungsgrade aus 4 HL-Versuchen (Sand)

Sand	CSB Wirkungsgrad (gesamt)				Gesamt
	1. HL	2. HL	4. HL	5. HL	
Median	75,2	74,7	67,8	66,4	71,0
Mittelwert	74,8	75,0	65,8	66,4	70,5
Minimalwert	72,6	73,5	52,7	62,6	52,7
Maximalwert	75,5	77,3	68,8	68,8	77,3

Tabelle 1.2: Mittlere CSB - Wirkungsgrade aus 4 HL-Versuchen (Hygroret)

Hygroret	CSB Wirkungsgrad (gesamt)				Gesamt
	1. HL	2. HL	4. HL	5. HL	
Median	79,5	80,1	74,2	73,2	76,7
Mittelwert	79,5	80,1	73,7	73,0	76,6
Minimalwert	76,5	77,3	70,9	67,4	67,4
Maximalwert	81,7	82,8	74,9	77,6	82,8

Tabelle 1.3: Mittlere NH₄-N - Wirkungsgrade aus 4 HL-Versuchen (Sand)

Sand	NH ₄ -N Wirkungsgrad (gesamt)				Gesamt
	1. HL	2. HL	4. HL	5. HL	
Median	79,8	73,8	60,7	73,0	71,8
Mittelwert	79,4	74,2	61,1	70,2	71,2
Minimalwert	58,1	52,1	46,0	60,8	46,0
Maximalwert	99,0	98,5	75,6	77,9	99,0

Tabelle 1.4: Mittlere NH₄-N - Wirkungsgrade aus 4 HL-Versuchen (Hygroret)

Hygroret	NH ₄ -N Wirkungsgrad (gesamt)				Gesamt
	1. HL	2. HL	4. HL	5. HL	
Median	99,7	99,6	99,7	97,6	99,1
Mittelwert	99,7	99,6	99,7	97,9	99,2
Minimalwert	99,7	99,6	99,6	97,5	97,5
Maximalwert	99,7	99,7	99,7	99,5	99,7

Tabelle 1.5: Mittlere P_{ges}-Wirkungsgrade aus 2 HL-Versuchen

	Wirkungsgrad Sand			Wirkungsgrad Hygroret		
	2. HL	4. HL	Gesamt	2. HL	4. HL	Gesamt
Median	97,8	93,5	95,6	39,5	57,0	48,3
Mittelwert	97,9	93,1	95,5	40,4	54,8	47,6
Minimalwert	97,7	91,7	91,7	31,8	39,0	31,8
Maximalwert	98,4	93,9	98,4	47,3	58,5	58,5

Tabelle 1.6: Mittlere Zulauf- und Zielkonzentrationen der Schwermetalle

Schmermetall	Zielkonzentration	Zulauf 3. HL	Zulauf 4. HL	Zulauf 5. HL
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Blei (Pb)	0,36	0,36	0,39	0,16
Cadmium (Cd)	0,0072	0,01	0,01	0,02
Kupfer (Cu)	0,22	0,25	0,21	0,30
Zink (Zn)	0,92	1,30	1,03	1,07

Tabelle 1.7: Mittlere Pb-Wirkungsgrade aus 2 HL-Versuchen

	Wirkungsgrad Sand			Wirkungsgrad Hygroret		
	4. HL	5. HL	Gesamt	4. HL	5. HL	Gesamt
Median	96,5	76,5	86,5	97,3	76,5	86,9
Mittelwert	96,4	76,3	86,4	97,2	76,3	86,7
Minimalwert	95,7	75,3	75,3	96,7	75,3	75,3
Maximalwert	96,8	77,1	96,8	97,4	77,1	97,4

Tabelle 1.8: Mittlere Cd-Wirkungsgrade aus 2 HL-Versuchen

	Wirkungsgrad Sand			Wirkungsgrad Hygroret		
	4. HL	5. HL	Gesamt	4. HL	5. HL	Gesamt
Median	96,5	90,0	93,3	63,0	90,0	76,5
Mittelwert	96,4	90,0	93,2	61,0	90,0	75,5
Minimalwert	95,7	90,0	90,0	44,4	90,0	44,4
Maximalwert	96,8	90,0	96,8	72,5	90,0	90,0

Tabelle 1.9: Mittlere Cu-Wirkungsgrade aus 2 HL-Versuchen

	Wirkungsgrad Sand			Wirkungsgrad Hygroret		
	4. HL	5. HL	Gesamt	4. HL	5. HL	Gesamt
Median	63,6	77,1	70,3	84,2	78,7	81,4
Mittelwert	64,4	77,4	70,9	81,5	78,3	79,9
Minimalwert	45,0	76,7	45,0	65,0	76,7	65,0
Maximalwert	90,0	78,7	90,0	88,2	79,2	88,2

Tabelle 1.10: Mittlere Zn-Wirkungsgrade aus 2 HL-Versuchen

	Wirkungsgrad Sand			Wirkungsgrad Hygroret		
	4. HL	5. HL	Gesamt	4. HL	5. HL	Gesamt
Median	93,7	90,3	92,0	93,7	90,9	92,3
Mittelwert	93,3	90,1	91,7	93,3	90,8	92,1
Minimalwert	91,0	89,0	89,0	91,0	90,0	90,0
Maximalwert	94,0	90,4	94,0	94,0	91,2	94,0

Tabelle 1.11: Mittlere PAK-Wirkungsgrade aus 1 HL-Versuch

	(PAK EPA)		(PAK TVO)	
	Sand	Hygroret	Sand	Hygroret
Median	91,8	98,7	92,8	93,2
Mittelwert	90,5	98,2	90,0	93,1
Minimalwert	76,1	97,3	76,3	91,7
Maximalwert	98,9	98,9	93,8	93,8

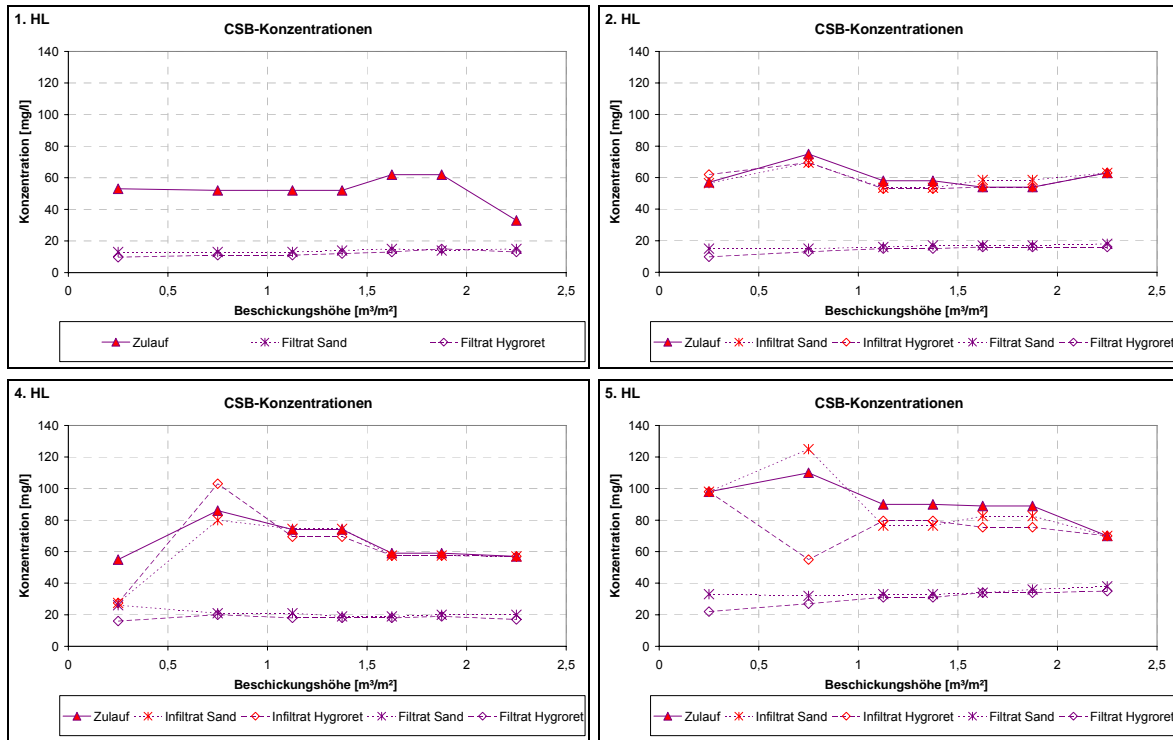
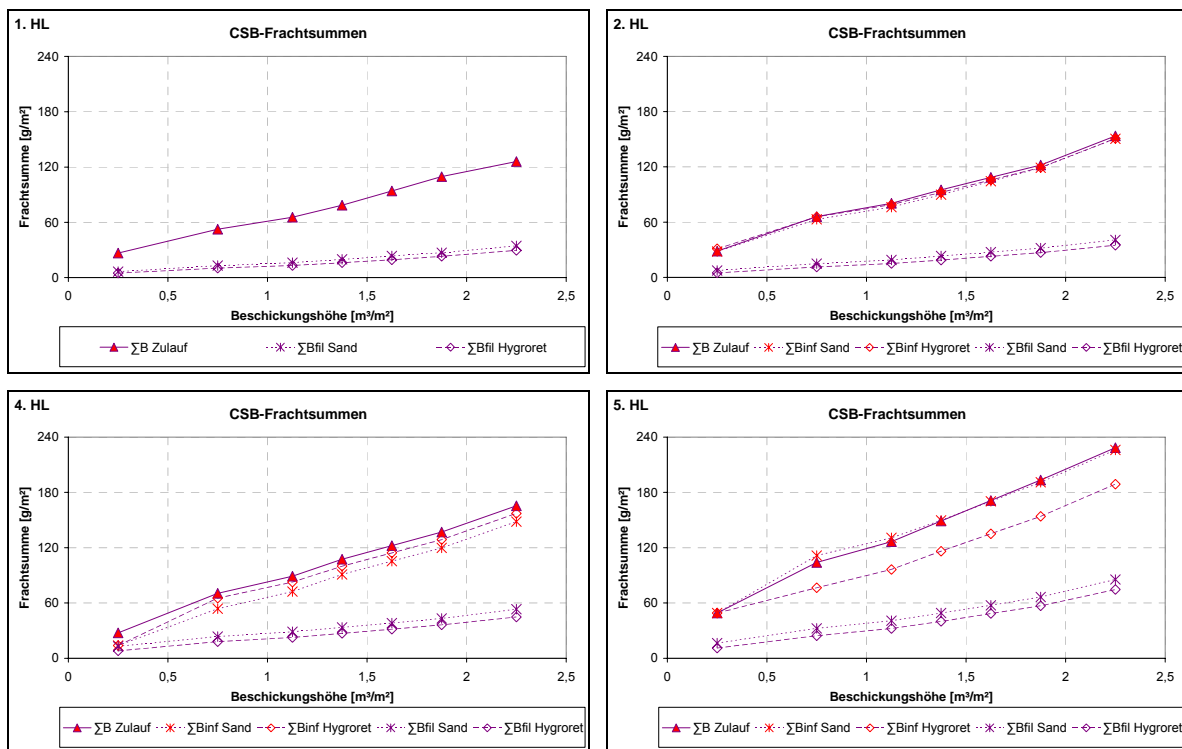
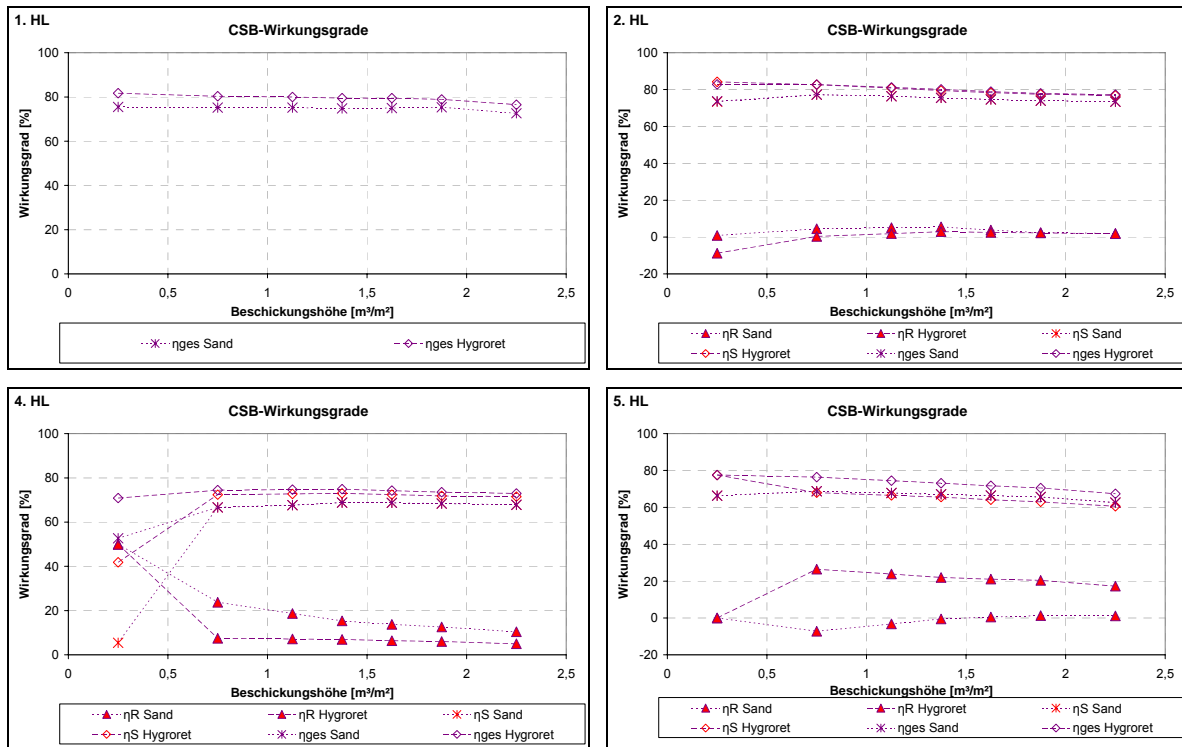


Bild 1.1: CSB_{hom}-Konzentrationsverläufe von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf) der Hochlastversuche



ΣB Zulauf = Zulauffracht; ΣBinf = Infiltratfracht; ΣBfil = Filtratfracht

Bild 1.2: Kumulierte CSB_{hom}-Frachten von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf) der Hochlastversuche



η_R = Wirkungsgrad des Retentionsraum; η_S = Wirkungsgrad des Substrats; η_{ges} = Gesamtwirkungsgrad

Bild 1.3: CSB_{hom}-Frachtwirkungsgrade von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf) der Hochlastversuche

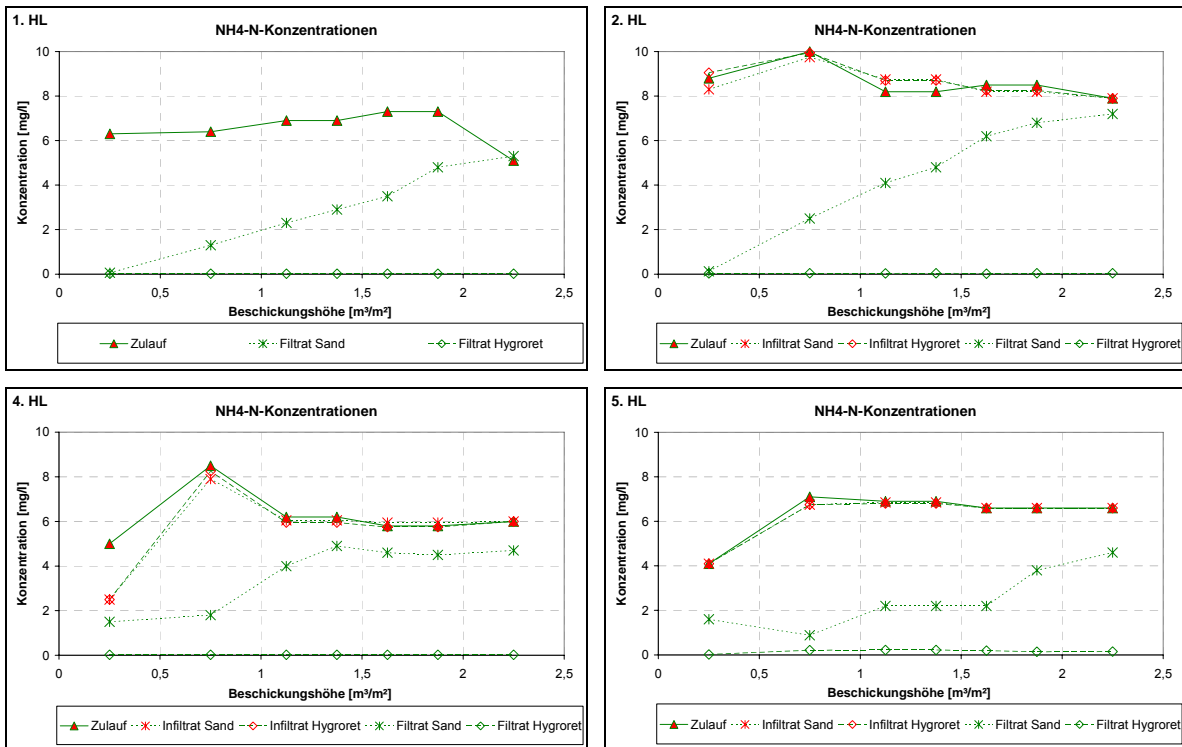
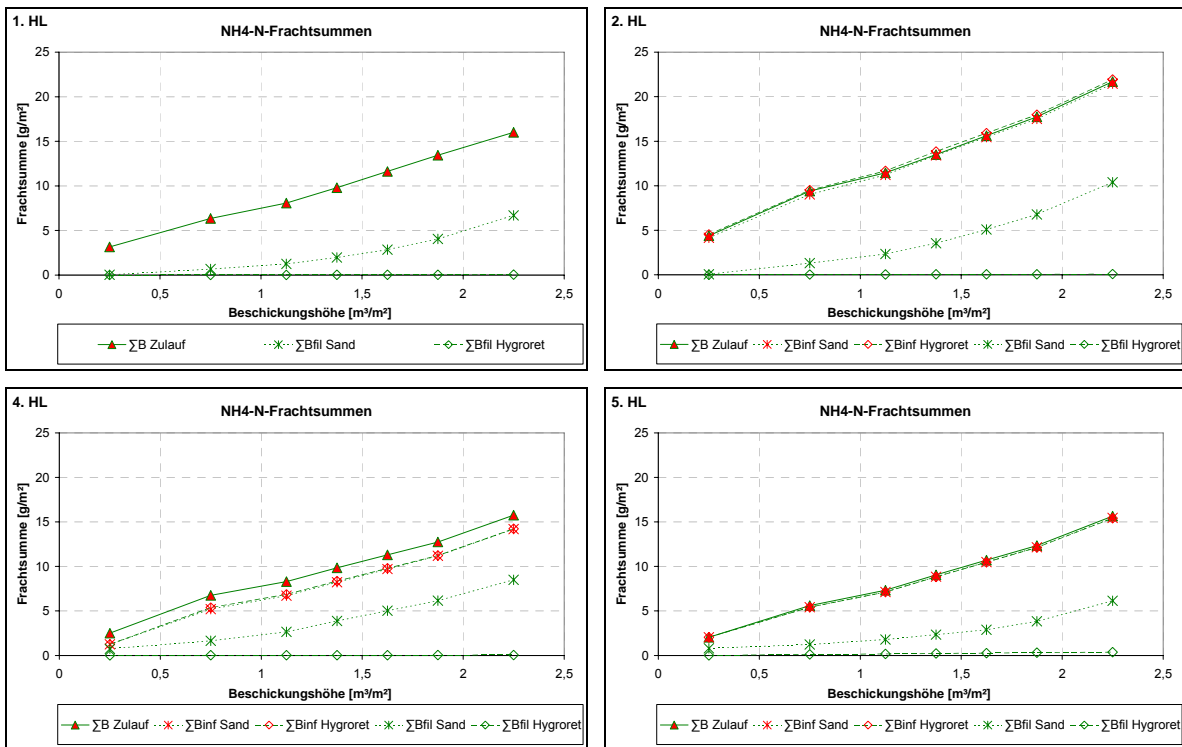
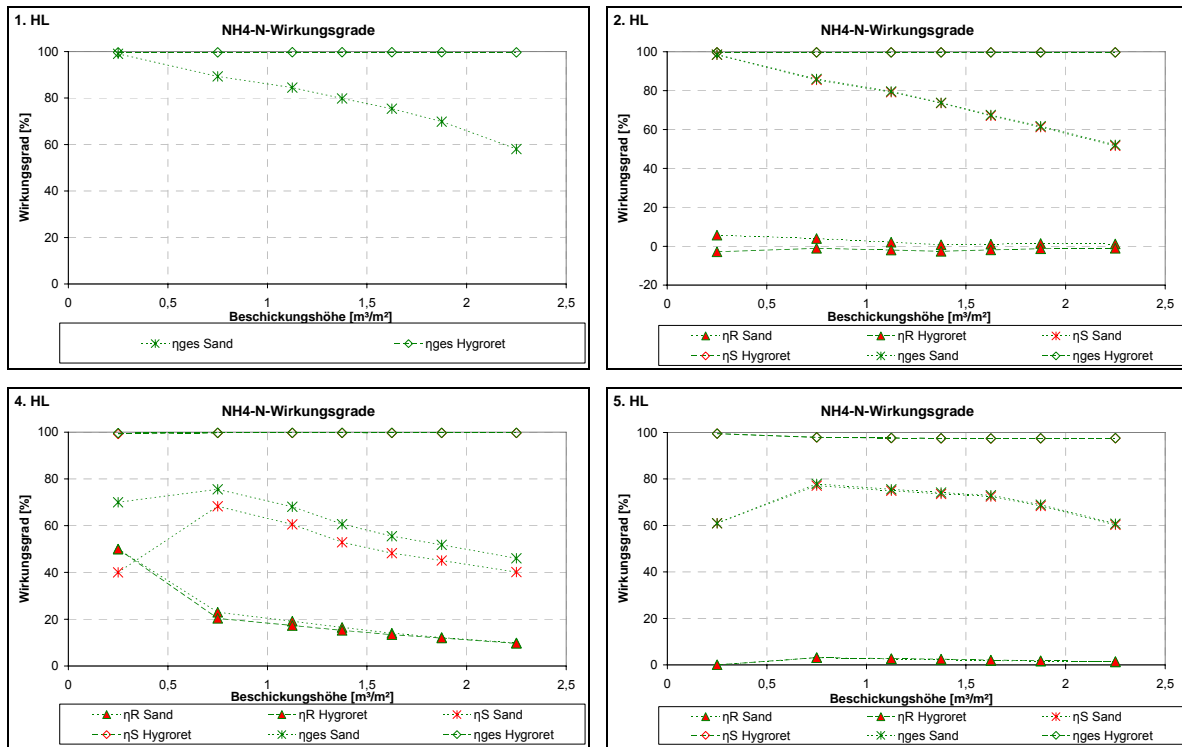


Bild 1.4: NH₄-N-Konzentrationsverläufe von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf) der Hochlastversuche



ΣB Zulauf = Zulauffracht; ΣBinf = Infiltratfracht; ΣBfil = Filtratfracht

Bild 1.5: Kumulierte NH₄-N-Frachten von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf) der Hochlastversuche



η_R = Wirkungsgrad des Retentionsraum; η_S = Wirkungsgrad des Substrats; η_{ges} = Gesamtwirkungsgrad

Bild 1.6: NH₄-N-Frachtwirkungsgrade von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf) der Hochlastversuche

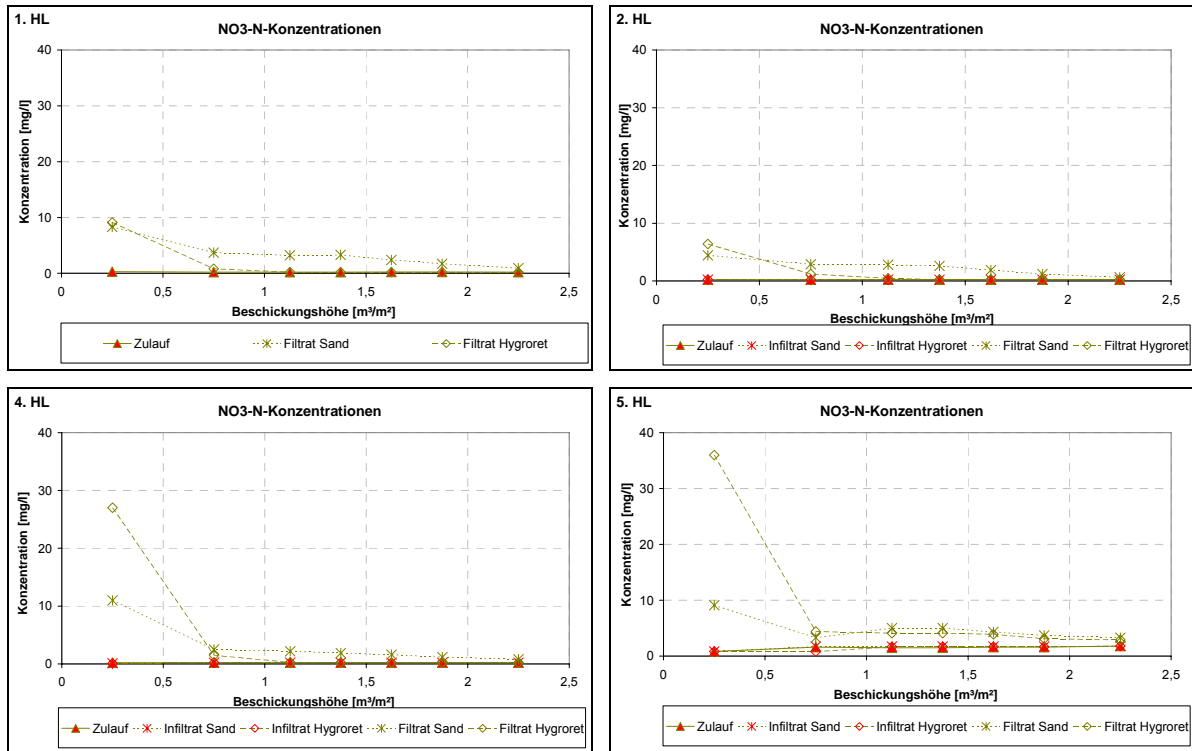
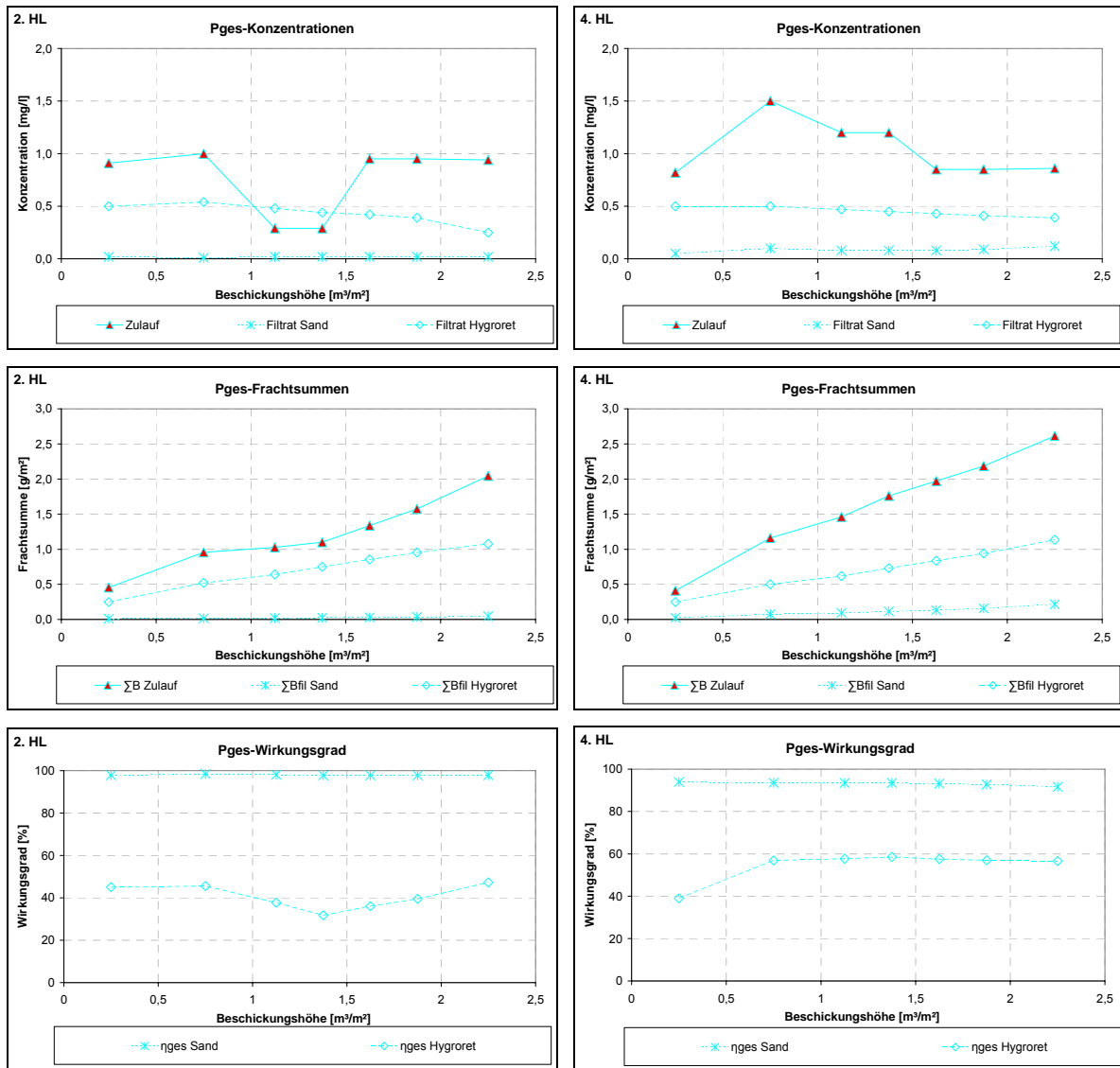
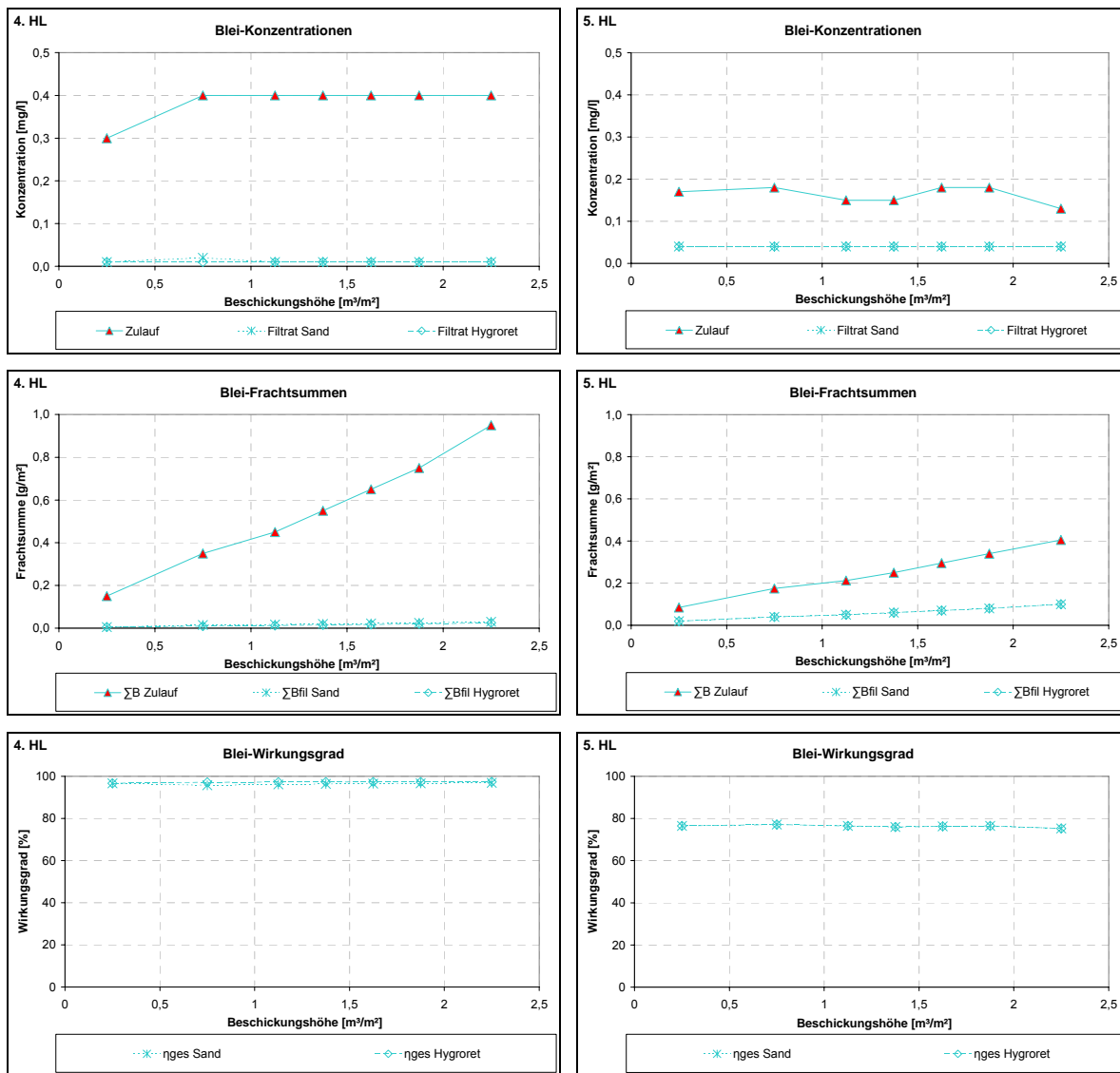


Bild 1.7: NO₃-N-Konzentrationsverläufe von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf) der Hochlastversuche



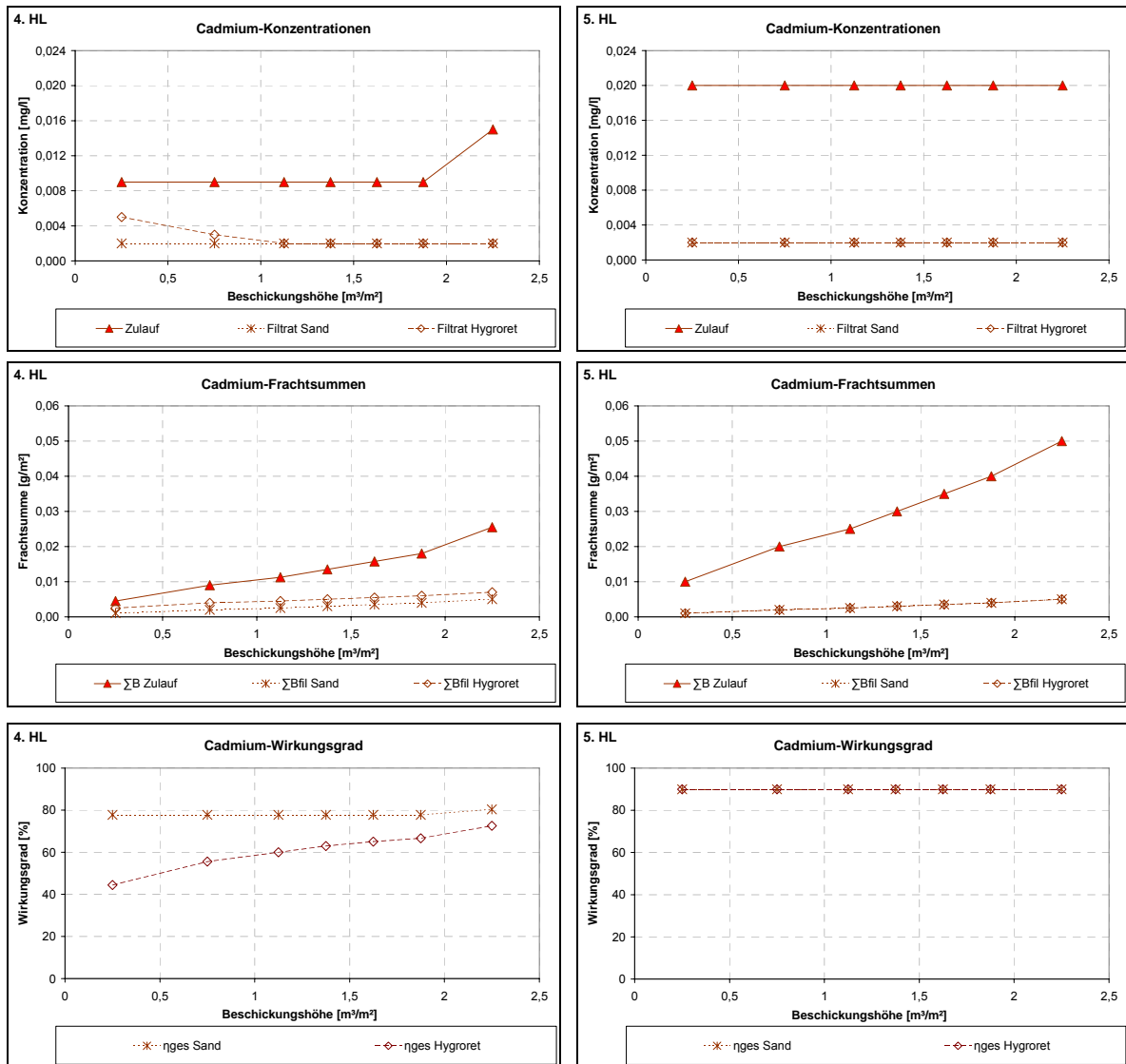
ΣB Zulauf = Zulauffracht; ΣBfil = Filtratfracht; ηges = Gesamtwirkungsgrad

Bild 1.8: P_{ges}- Konzentrationsverläufe von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf), Frachtsummen und Wirkungsgrade des 2. und 4. Hochlastversuche



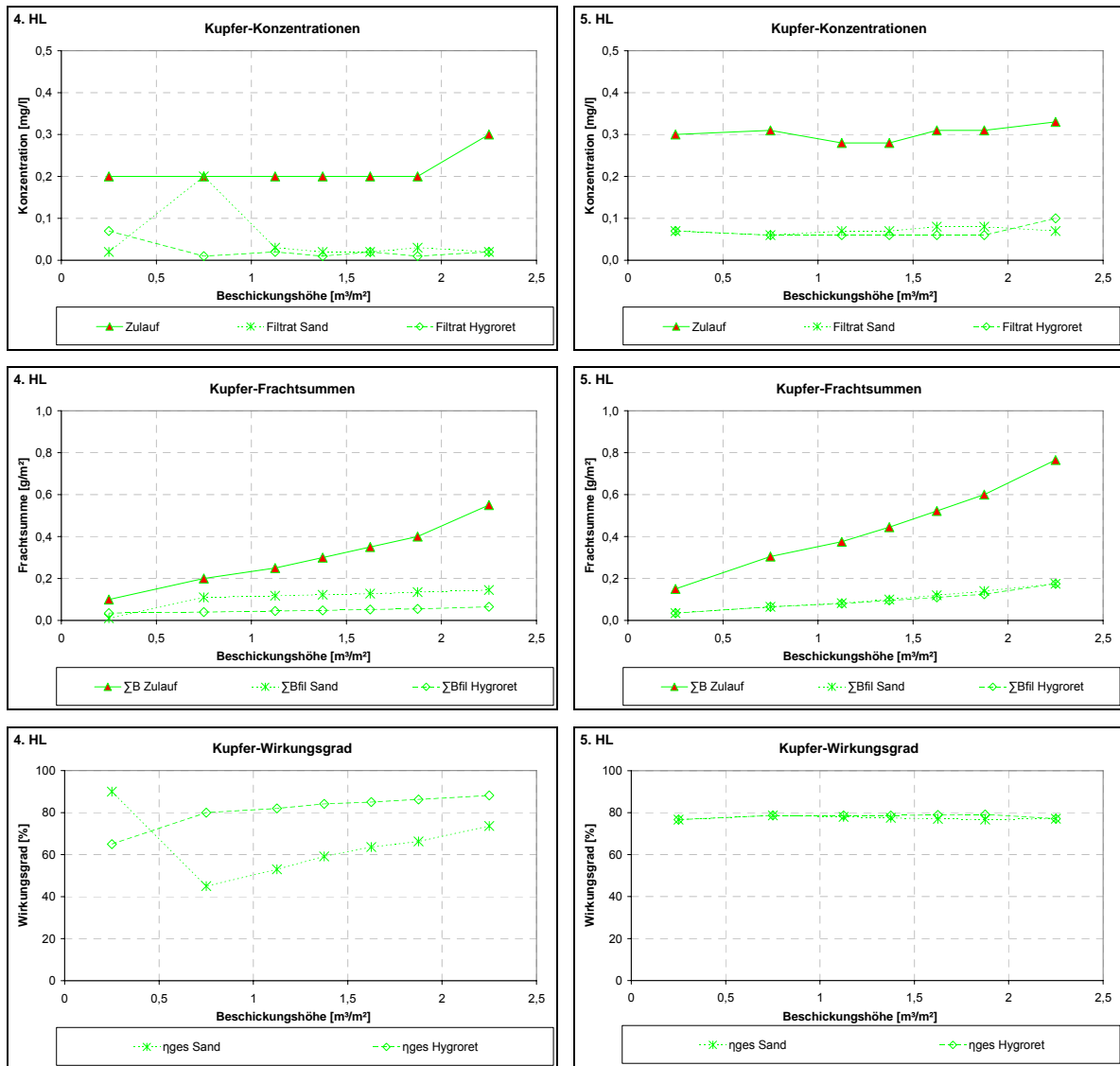
ΣB Zulauf = Zulauffracht; ΣBfil = Filtratfracht; ηges = Gesamtwirkungsgrad

Bild 1.9: Blei-Konzentrationsverläufe von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf), Frachtsummen und Wirkungsgrade des 4. und 5. Hochlastversuches



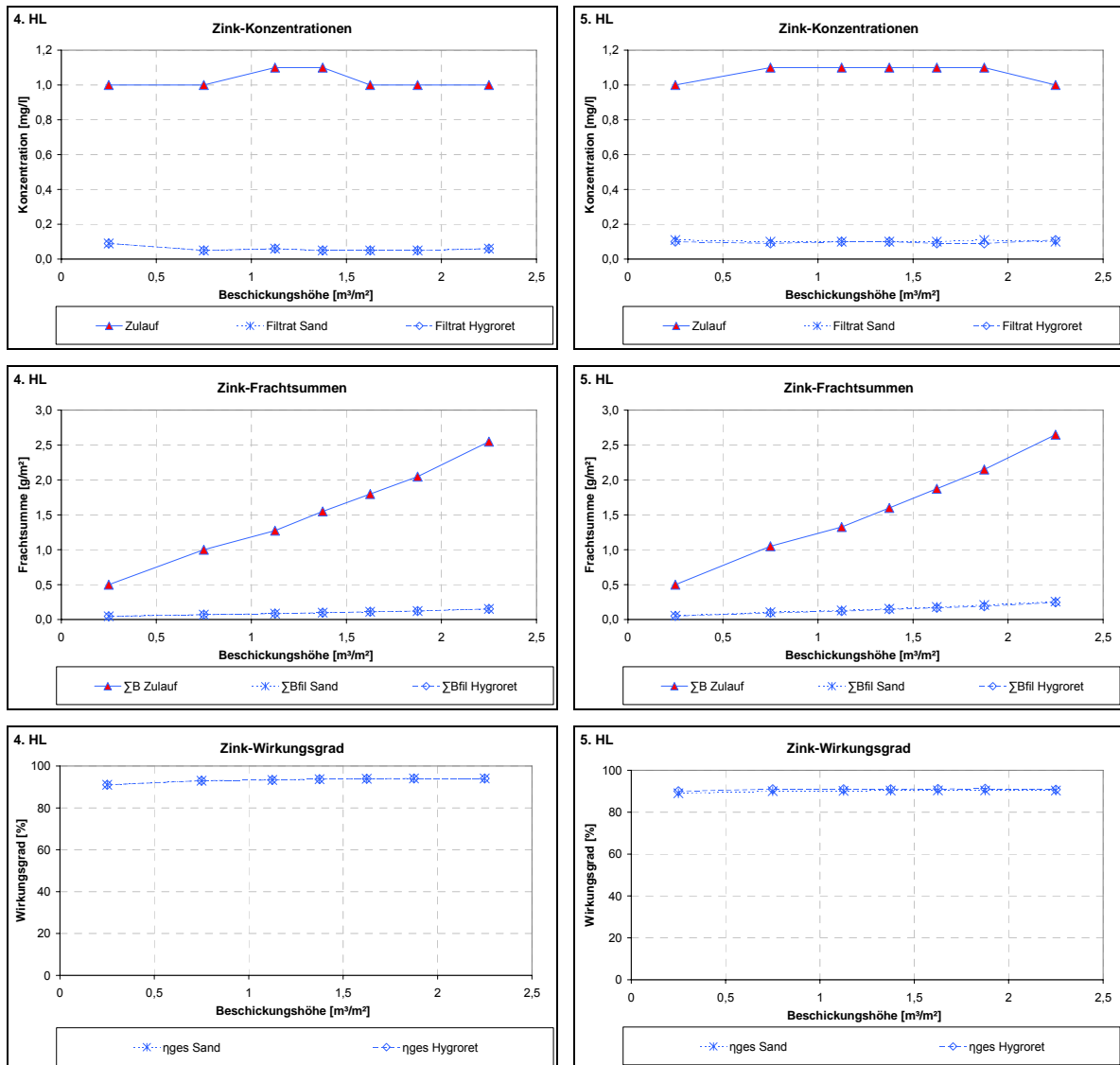
ΣB Zulauf = Zulauffracht; ΣBfil = Filtratfracht; ηges = Gesamtwirkungsgrad

Bild 1.10: Cadmium-Konzentrationsverläufe von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf), Frachtsummen und Wirkungsgrade des 4. und 5. Hochlastversuches



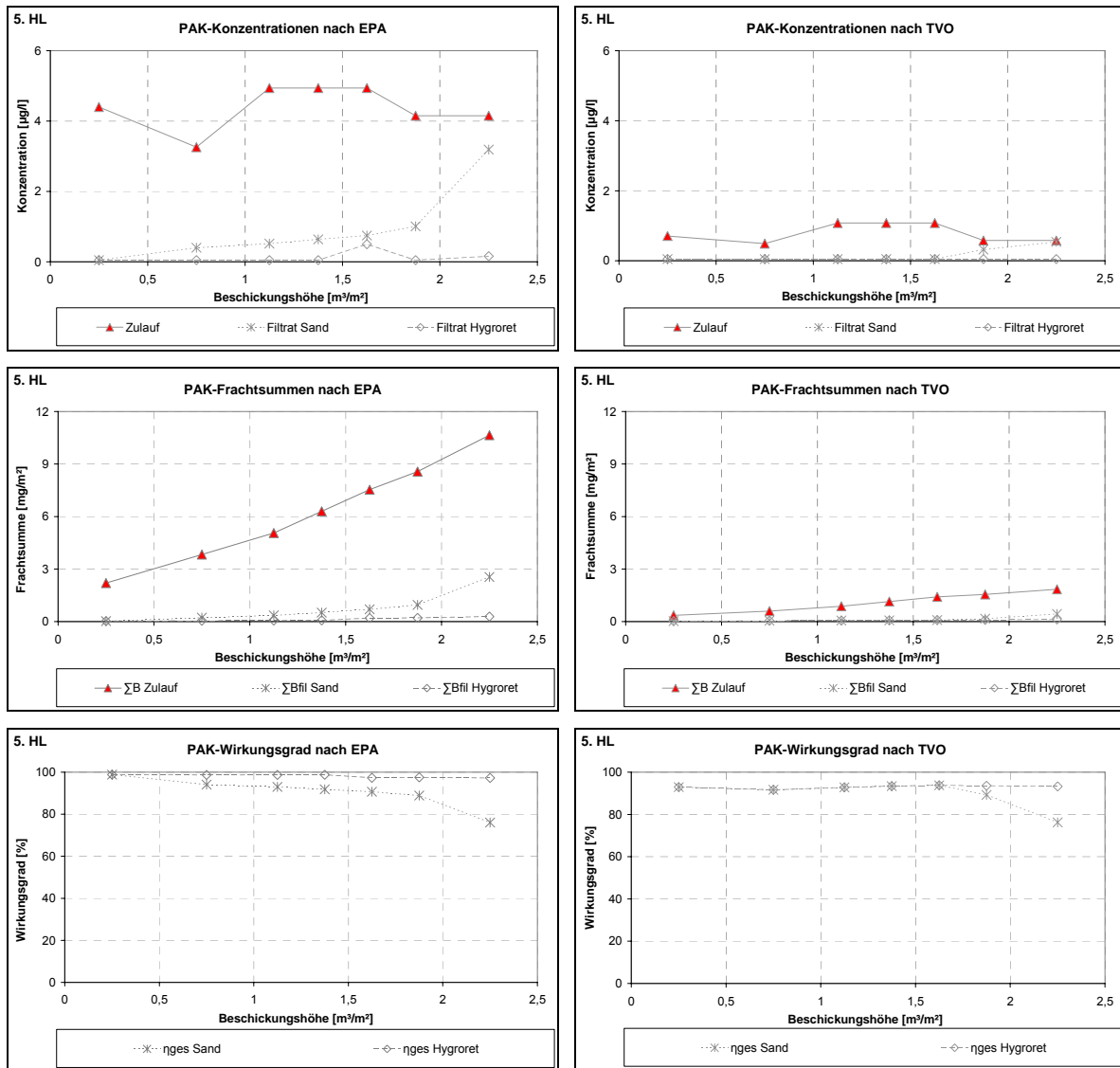
ΣB Zulauf = Zulauf fracht; ΣBfil = Filtrat fracht; ηges = Gesamtwirkungsgrad

Bild 1.11: Kupfer-Konzentrationsverläufe von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf), Frachtsummen und Wirkungsgrade des 4. und 5. Hochlastversuches



ΣB Zulauf = Zulauffracht; ΣBfil = Filtratfracht; ηges = Gesamtwirkungsgrad

Bild 1.12: Zink-Konzentrationsverläufe von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf), Frachtsummen und Wirkungsgrade des 4. und 5. Hochlastversuches



ΣB Zulauf = Zulauffracht; ΣBfil = Filtratfracht; ηges = Gesamtwirkungsgrad

Bild 1.13: PAK-Konzentrationsverläufe von Zulauf, Infiltrat und Filtrat (Ablauf), Frachtsummen und Wirkungsgrade des 5. Hochlastversuches

Literatur

- DWA-M 178 (2005): *Empfehlungen für Planung, Konstruktion und Betrieb von Retentionsbodenfilteranlagen zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem*. DWA-Merkblatt 178, Hennef: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., ISBN 3-937758-37-2.
- Kasting, U. (2003): *Reinigungsleistung von zentralen Anlagen zur Behandlung von Abflüssen stark befahrener Straßen*. Kaiserslautern, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft, Dissertation.
- MUNLV (2003): *Retentionsbodenfilter, Handbuch für Planung, Bau und Betrieb*. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen [Hrsg.], ISBN 3-9808617-1-6.

