

---

# Anhangsband zum

## Abschlussbericht zum Eignungsnachweis für Filtersubstrate für Retentionsbodenfilter mittels Säulenversuche

Bericht zu den Bewilligungen vom 01.09.2005  
und 17.05.2006 (Aktz. IV-9-042261) des  
Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft  
und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Januar 2008



---

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Mathias Uhl (FH Münster, LWW)  
Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt (TU Kaiserslautern, SIWAWI)

Projektbearbeitung: M.Sc. Malte Henrichs,  
Dipl.-Ing. Christian Maus  
Dipl.-Ing. Daniel Meyer  
Dipl.-Geol. Thomas Perrefort  
PD Dr.-Ing. habil. Antje Welker  
Dipl.-Ing. Renata Wozniak



## Anhangsverzeichnis

<b>Anhang 1</b>	<b>Allgemeine Anlagen zur Darstellung und Durchführung der Untersuchungen</b> .....	<b>1</b>
Anhang 1.1	Analyseverfahren .....	1
Anhang 1.2	Darstellungsmatrix .....	1
Anhang 1.3	Darstellung der im Rahmen des Projektes durchgeführten Säulenversuche.....	2
<b>Anhang 4</b>	<b>Anhang zu Kapitel 4 Entwicklung und Standardisierung</b> .....	<b>8</b>
Anhang 4.1	Substratuntersuchungen .....	8
Anhang 4.2	Einfahrphase Entwicklung (Kapitel 4.2.2) .....	9
Anhang 4.3	Ganglinien Abschluss Einfahrphase Entwicklung (Kapitel 4.2.3).....	12
Anhang 4.4	Hochlastversuche Entwicklung (Kapitel 4.2.4).....	13
Anhang 4.5	Wiedereinfahrphase Standardisierung (Kapitel 4.2.5) .....	14
Anhang 4.6	Hochlastversuche Standardisierung (Kapitel 4.2.5).....	15
<b>Anhang 5</b>	<b>Ergebnisse zu Kapitel 5 (Verifikation)</b> .....	<b>16</b>
Anhang 5.1	Substratuntersuchungen .....	16
Anhang 5.2	Einfahrphase Verifikation (Kapitel 5.2.1).....	17
Anhang 5.3	Hochlastversuche Verifikation (Kapitel 5.2.1) Standortvergleich und Reproduzierbarkeit anhand der CSB-Ganglinien .....	19
Anhang 5.4	Ablaufganglinien zu Kapitel 5.2.2.....	21
Anhang 5.5	Darstellung aller in der Verifikation untersuchten Substrate (nach Parametern) .....	23
Anhang 5.6	Ergebnisse des 1. und 2. HL der Verifikation.....	28
Anhang 5.7	Ergebnisse zum Frachtrückhalt.....	32
<b>Anhang 6</b>	<b>Ergebnisse zu Kapitel 6 (Einflüsse der Abflussdrosselung)</b> .....	<b>35</b>
Anhang 6.1	Drosselvergleich am Substrat DWA I.....	35
Anhang 6.2	Drosselvergleich am Substrat DWA II.....	37
Anhang 6.3	Daten der Nicht-DWA-Substrate für den Parameter NH4-N .....	39
<b>Anhang 7</b>	<b>Ergebnisse zu Kapitel 7 (Überprüfung der Handlungsanleitung)</b> .....	<b>40</b>
Anhang 7.1	Einfahrphase Überprüfung der Handlungsanleitung (Kapitel 7.2.1).....	40
Anhang 7.2	1. Hochlastversuch.....	43
Anhang 7.3	2. Hochlastversuch.....	52
Anhang 7.4	3. Hochlastversuch.....	60
Anhang 7.5	4. Hochlastversuch.....	68
<b>Anhang 9</b>	<b>Ergebnisse zu Kapitel 9 (Nutschenversuche)</b> .....	<b>76</b>

Anhang 9.1	Auswertung der Ergebnisse .....	78
<b>Anhang 12</b>	<b>Ergebnisse zu Kapitel 12 (Online-Analytik) .....</b>	<b>86</b>
<b>Anhang 13</b>	<b>Ergebnisse zu Kapitel 13 (Lysimeterversuche).....</b>	<b>88</b>
Anhang 13.1	Diagramme Einfahrphase Lysimeter .....	88
Anhang 13.2	Diagramme HL Lysimeter .....	89
Anhang 13.3	Sauerstoffprofil Lysimeter HL-Versuch .....	93
<b>Anhang 14</b>	<b>Daten und Ergebnisse zu Kapitel 14 (Simualtionen) .....</b>	<b>96</b>
Anhang 14.1	Analysemethoden für hydrogeologische Substrateigenschaften .....	96
Anhang 14.2	Bestimmung des effektiven Porenvolumens .....	97
Anhang 14.3	Prozessmodell Constructed Wetlands 2D (CW2D).....	97
Anhang 14.4	Modelleingangsdaten .....	106

Anmerkung: Die erste Ziffer der Anlagenbezeichnung entspricht der Nummer des zugehörigen Kapitels im Textband.

## Verzeichnis der Anhang-Tabellen

Tabelle-Anhang 1.1:	Verwendete Analysemethoden .....	1
Tabelle-Anhang 1.2:	Darstellungsmatrix zur Visualisierung der Ergebnisse der Säulenversuche .....	1
Tabelle-Anhang 1.3:	Zusammenstellung der Säulenversuche an der TU KL zur Entwicklung des Eignungsnachweis .....	3
Tabelle-Anhang 1.4:	Zusammenstellung durchgeführter Säulenversuche an der FHM zur Entwicklung des Eignungsnachweis .....	4
Tabelle-Anhang 1.5:	Zusammenstellung durchgeführter Säulenversuche der TU KL an mehreren Substraten (Verifikation) mit Angaben zum verwendeten Substrat, Beprobungsstrategie u.a. ....	5
Tabelle-Anhang 1.6:	Zusammenstellung durchgeführter Säulenversuche an der FH MS an mehreren Substraten (Verifikation) mit Angaben zum verwendeten Substrat, Beprobungsstrategie u.a. ....	6
Tabelle-Anhang 1.7:	Zusammenstellung durchgeführter Säulenversuche an der FHM am Substrat DWA II (Überprüfung) mit Angaben zum verwendeten Substrat, Beprobungsstrategie u.a. ....	7
Tabelle-Anhang 4.8:	Ergebnisse der Kornverteilung des Säulensubstrats DWA I.....	8
Tabelle-Anhang 4.9:	Ergebnisse der Bestimmung des Kalkgehaltes im Säulensubstrat DWA I	8
Tabelle-Anhang 5.10:	Mittelwerte der Kornverteilungen der untersuchten Substrate .....	16
Tabelle-Anhang 5.11:	Carbonatgehalte der untersuchten Substrate (Mittelwerte) .....	16
Tabelle-Anhang 6.12:	Übersicht der Frachten, Frachtrückhalte und Wirkungsgrade (Säulen TU KL)	39
Tabelle-Anhang 6.13:	Übersicht der Frachten, Frachtrückhalte und Wirkungsgrade (Säulen FH MS)	39
Tabelle-Anhang 13.14:	Analytik der Zu- und Abläufe der Hochlastversuche .....	92
Tabelle-Anhang 14.15:	Übersicht der verwendeten Bestimmungsmethoden. ....	96
Tabelle-Anhang 14.16:	Stoffe in CW2D .....	101
Tabelle-Anhang 14.17:	CW2D - Hauptstrukturen und stöchiometrische Matrix .....	103
Tabelle-Anhang 14.18:	Prozessraten in CW2D .....	104
Tabelle-Anhang 14.19:	Stöchiometrische Faktoren für Ammonium Stickstoff .....	105
Tabelle-Anhang 14.20:	Stöchiometrische Faktoren für Phosphor.....	105
Tabelle-Anhang 14.21:	Konzentrationsganglinien der Säule 9 (mit $q_d = 0,02 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ betrieben)	106

Tabelle-Anhang 14.22: Konzentrationsganglinien der Säule 12 (mit  $q_d = 0,02 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$  betrieben) 106

Tabelle-Anhang 14.23: Konzentrationsganglinien der Säule 5 (mit  $q_d = 0,03 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$  betrieben) 107

Tabelle-Anhang 14.24: Konzentrationsganglinien der Säule 10 (mit  $q_d = 0,05 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$  betrieben) 107

Tabelle-Anhang 14.25: Konzentrationsganglinien der Säule 11 (mit  $q_d = 0,05 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$  betrieben) 107



## Verzeichnis der Anhang-Bilder

Bild-Anhang 1.1: Säulenversuche zur Entwicklung und Standardisierung der Handlungsanleitung in Münster (links) und Kaiserslautern (rechts).....	2
Bild-Anhang 1.2: Säulenversuche zur Verifikation der Handlungsanleitung in Münster (links) und Kaiserslautern (rechts) .....	2
Bild-Anhang 1.3: Säulenversuche zur Überprüfung der Handlungsanleitung der FH Münster (links: mit Vorbelastung; rechts: ohne Vorbelastung).....	2
Bild-Anhang 4.4: CSB-Konzentrationen Einfahrphase.....	9
Bild-Anhang 4.5: NH <sub>4</sub> -N-Konzentrationen Einfahrphase .....	9
Bild-Anhang 4.6: NO <sub>3</sub> -N-Konzentrationen Einfahrphase.....	9
Bild-Anhang 4.7: NO <sub>2</sub> -N-Konzentrationen Einfahrphase.....	10
Bild-Anhang 4.8: pH-Werte Einfahrphase .....	10
Bild-Anhang 4.9: Elektrische Leitfähigkeit Einfahrphase.....	10
Bild-Anhang 4.10: Temperatur Einfahrphase .....	11
Bild-Anhang 4.11: Ablaufganglinien Hochlastversuch (Abschluss Einfahrphase 0,5 m) für C_CSB, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, LF, pH und Temperatur (TU KL schwarz; FH MS rot) .....	13
Bild-Anhang 4.12: Ablaufganglinien Hochlastversuch (2,5 m mit konditioniertem Beschickungswasser) für S_CSB, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, LF, pH, Temperatur und Sauerstoff (TU KL schwarz; FH MS rot).....	14
Bild-Anhang 4.13: Ablaufkonzentrationen der Wiedereinfahrphase (5 Beschickungen a 0,5 m) für S_CSB (TU KL und FH MS) .....	14
Bild-Anhang 4.14: Ablaufkonzentrationen der Wiedereinfahrphase (5 Beschickungen a 0,5 m) für NH <sub>4</sub> -N (TU KL und FH MS).....	14
Bild-Anhang 4.15: Ablaufganglinien Hochlastversuch 1 + 2 (2,5 m mit künstlichem Beschickungswasser) für S_CSB, NO <sub>2</sub> -N, LF, pH, und Temperatur (TU KL schwarz; FH MS rot) .....	15
Bild-Anhang 5.16: S_CSB Ablaufkonzentrationen aus GMP während der Einfahrphase ...	17
Bild-Anhang 5.17: NH <sub>4</sub> -N Ablaufkonzentrationen aus GMP während der Einfahrphase ....	17
Bild-Anhang 5.18: NO <sub>2</sub> -N Ablaufkonzentration aus GMP während der Einfahrphase.....	17
Bild-Anhang 5.19: NO <sub>3</sub> -N Ablaufkonzentration aus GMP während der Einfahrphase.....	18
Bild-Anhang 5.20: pH-Werte aus GMP während der Einfahrphase .....	18
Bild-Anhang 5.21: Elektrische Leitfähigkeit aus GMP während der Einfahrphase .....	19
Bild-Anhang 5.22: Vergleich S_CSB-Ablaufganglinien Substrat DWAll 1. + 2. HL TU KL + FH MS .....	19

---

Bild-Anhang 5.23: Vergleich S_CSB-Ablaufganglinien Substrat DWAll 1. + 2. HL TU KL + FH MS .....	20
Bild-Anhang 5.24: Vergleich S_CSB-Ablaufganglinien Substrat SUBII 1. + 2. HL TU KL + FH MS .....	20
Bild-Anhang 5.25: Vergleich S_CSB-Ablaufganglinien Substrat LS 1. + 2. HL TU KL + FH MS	20
Bild-Anhang 5.26: Ablaufganglinien Substrat DWAll 1. HL TUKL.....	21
Bild-Anhang 5.27: Ablaufganglinien Substrat LS 1. HL TUKL.....	21
Bild-Anhang 5.28: Ablaufganglinien Substrat DWAll 2. HL TUKL.....	22
Bild-Anhang 5.29: Ablaufganglinien Substrat LS 2. HL TUKL.....	22
Bild-Anhang 5.30: S_CSB Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL	23
Bild-Anhang 5.31: NH <sub>4</sub> -N Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL	24
Bild-Anhang 5.32: NO <sub>2</sub> -N Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL	25
Bild-Anhang 5.33: NO <sub>3</sub> -N Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL	25
Bild-Anhang 5.34: Elektrische Leitfähigkeit Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL.....	26
Bild-Anhang 5.35: pH-Wert Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL	27
Bild-Anhang 5.36: Temperatur Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL	27
Bild-Anhang 5.37: Ablaufganglinien des 1. Hochlastversuchs für alle Substrate an beiden Standorten für die Parameter S_CSB, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, LF, pH und Temperatur.....	29
Bild-Anhang 5.38: Ablaufganglinien des 2. Hochlastversuchs für alle Substrate an beiden Standorten für die Parameter S_CSB, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, LF, pH und Temperatur.....	31
Bild-Anhang 5.39: Verläufe der NH <sub>4</sub> -N-Konzentrationen von Zulauf, Infiltrat (Überstau) und Filtrat (Ablauf) des Substrates DWAll (1.+2. HL-Versuch).....	32
Bild-Anhang 5.40: Verläufe der NH <sub>4</sub> -N-Konzentrationen in Zulauf, Infiltrat und Filtrat des Substrates SUBII im 2. HL-Versuch.....	33
Bild-Anhang 5.41: Verläufe der NH <sub>4</sub> -N-Konzentrationen in Zulauf, Überstau und Ablauf des Substrates LS im 1. bzw. 2. HL-Versuch.....	33
Bild-Anhang 5.42: Frachtrückhalt für NH <sub>4</sub> -N im Filtersubstrat DWAll und SUBII.....	33

---

Bild-Anhang 5.43: Frachtrückhalt für NH <sub>4</sub> -N im Filtersubstrat DWAll und LS.....	33
Bild-Anhang 5.44: Frachtrückhalt für NH <sub>4</sub> -N in der Gesamtsäule und im Filtersubstrat DWAll.....	34
Bild-Anhang 5.45: Frachtrückhalt für NH <sub>4</sub> -N in der Gesamtsäule und im Filtersubstrat SUBII.....	34
Bild-Anhang 5.46: Frachtrückhalt für NH <sub>4</sub> -N in der Gesamtsäule und im Filtersubstrat DWAll bei unterschiedlicher Abflussdrosselung .....	34
Bild-Anhang 6.47: Ablaufganglinien des Substrats DWAI für 2 Drosseleinstellungen (TU KL und FH MS) über Versuchsdauer (links) und über die Beschickungshöhe en für die Parameter S_CSB, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, LF, pH und Temperatur. ....	36
Bild-Anhang 6.48: Ablaufganglinien des Substrats DWAll für 2 Drosseleinstellungen (TU KL + FH MS) über Versuchsdauer (links) und über die Beschickungshöhe (rechts) für die Parameter S_CSB, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, LF, pH und Temperatur.....	38
Bild-Anhang 7.49: Konzentrationen (oben) und Frachten (unten) für CSB (links) und S_CSB (rechts) .....	40
Bild-Anhang 7.50: Wirkungsgrade des Retentionsraums (oben), des Substrats (mitte) und der gesamten Säule (unten) für CSB (links) und S_CSB (rechts) .....	41
Bild-Anhang 7.51: NH <sub>4</sub> -N Konzentrationen aller Proben der Einfahrphase (links) und der Filtratproben im Detail (rechts).....	42
Bild-Anhang 7.52 Wirkungsgrade des Retentionsraums (oben), des Substrats (mitte) und der gesamten Säule (unten) für CSB (links) und S_CSB (rechts) .....	42
Bild-Anhang 9.53: Ablaufganglinien S_CSB Nutschen mit Substrat DWAll.....	76
Bild-Anhang 9.54: Substratvergleich NH <sub>4</sub> -N Nutschen mit Nullproben.....	76
Bild-Anhang 9.55: Substratvergleich NH <sub>4</sub> -N Nutschen aus Tiefe 0-5 cm .....	77
Bild-Anhang 9.56: Substratvergleich NH <sub>4</sub> -N Nutschen aus Tiefe 7,5-12,5 cm .....	77
Bild-Anhang 9.57: Substratvergleich NH <sub>4</sub> -N Nutschen aus Tiefe 15-20 cm .....	77
Bild-Anhang 9.58: Substratvergleich NH <sub>4</sub> -N Nutschen aus Tiefe 25-30 cm .....	78
Bild-Anhang 9.59: Substratvergleich NH <sub>4</sub> -N Nutschen aus Tiefe 45-50 cm .....	78
Bild-Anhang 9.60: Summe absoluter Frachtrückhalt NH <sub>4</sub> -N Nutschen mit Substrat DWAll Frachtrückhalt B = Frachtrückhalt * 75 cm/5 cm .....	78
Bild-Anhang 9.61: Summe absoluter Frachtrückhalt NH <sub>4</sub> -N Nutschen mit Substrat SUBII Frachtrückhalt B = Frachtrückhalt * 75 cm/5 cm .....	79
Bild-Anhang 9.62: Summe absoluter Frachtrückhalt NH <sub>4</sub> -N Nutschen mit Substrat LS Frachtrückhalt B = Frachtrückhalt * 75 cm/5 cm .....	79
Bild-Anhang 9.63: Substratvergleich NO <sub>3</sub> -N Nutschen mit Nullproben.....	80
Bild-Anhang 9.64: Substratvergleich NO <sub>3</sub> -N Nutschen aus Tiefe 0-5 cm.....	80

---

Bild-Anhang 9.65:	Substratvergleich NO <sub>3</sub> -N Nutschen aus Tiefe 7,5-12,5 cm.....	80
Bild-Anhang 9.66:	Substratvergleich NO <sub>3</sub> -N Nutschen aus Tiefe 15-20 cm.....	81
Bild-Anhang 9.67:	Substratvergleich NO <sub>3</sub> -N Nutschen aus Tiefe 25-30 cm.....	81
Bild-Anhang 9.68:	Substratvergleich NO <sub>3</sub> -N Nutschen aus Tiefe 45-50 cm.....	81
Bild-Anhang 9.69:	Ablaufganglinien Substrat DWAll Tiefe 0-5 cm.....	82
Bild-Anhang 9.70:	Ablaufganglinien Substrat SUBII Tiefe 0-5 cm.....	82
Bild-Anhang 9.71:	Ablaufganglinien Substrat LS Tiefe 0-5 cm.....	82
Bild-Anhang 9.72:	Ablaufganglinien NO <sub>2</sub> -N Nutschen mit Substrat DWAll .....	83
Bild-Anhang 9.73:	Ablaufganglinien NO <sub>2</sub> -N Nutschen mit Substrat SUBII .....	83
Bild-Anhang 9.74:	Ablaufganglinien NO <sub>2</sub> -N Nutschen mit Substrat LS .....	83
Bild-Anhang 9.75:	Ablaufganglinien elektrische Leitfähigkeit Nutschen mit Substrat DWAll 84	
Bild-Anhang 9.76:	Ablaufganglinien elektrische Leitfähigkeit Nutschen mit Substrat SUBII	84
Bild-Anhang 9.77:	Ablaufganglinien elektrische Leitfähigkeit Nutschen mit Substrat LS ....	84
Bild-Anhang 9.78:	Ablaufganglinien pH-Wert Nutschen mit Substrat DWAll .....	85
Bild-Anhang 9.79:	Ablaufganglinien pH-Wert Nutschen mit Substrat SUBII .....	85
Bild-Anhang 9.80:	Ablaufganglinien pH-Wert Nutschen mit Substrat LS .....	85

## Anhang 1 Allgemeine Anlagen zur Darstellung und Durchführung der Untersuchungen

### Anhang 1.1 Analyseverfahren

Tabelle-Anhang 1.1: Verwendete Analysemethoden

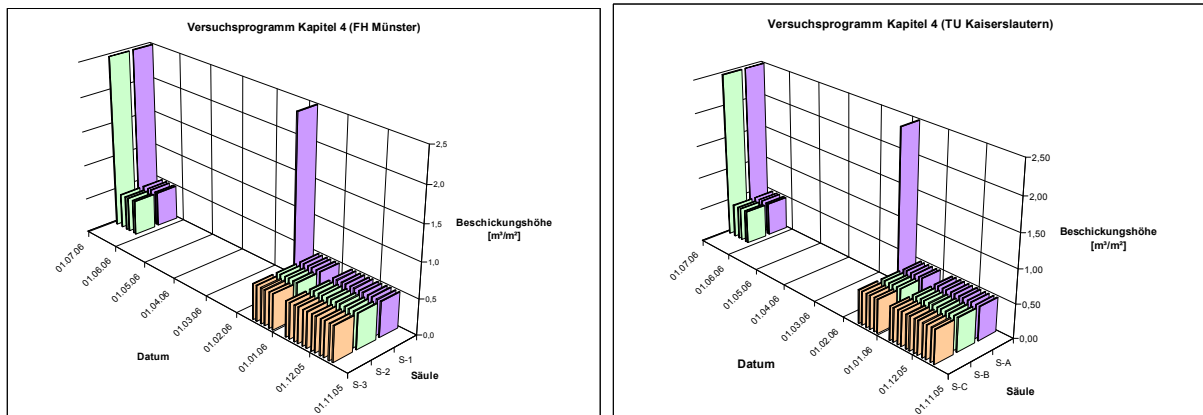
Parameter	Einheit	Methode
C_CSB	[mg/l]	DIN 38409 H 41 oder Dr. Lange Küvetten-Test
S_CSB	[mg/l]	DIN 38409 H 41 oder Dr. Lange Küvetten-Test nach Filtration
NH <sub>4</sub> -N	[mg/l]	DIN 38 406 T 5 oder Dr. Lange Küvetten-Test
NO <sub>3</sub> -N	[mg/l]	Dr. Lange Küvetten-Test
NO <sub>2</sub> -N	[mg/l]	EN 26 777
pH-Wert	[-]	DIN 38404 C5 (WTW-Sonden)
Elektrische Leitfähigkeit (LF)	[µS/cm]	DIN EN 27888 (WTW-Sonden)
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	[mg/l]	DIN EN 25814 (WTW-Sonden) oder optisches Verfahren (LDO Hach/Lange bzw. PreSens)
Temperatur	[°C]	DIN 38404 C4 (WTW-Sonden)

### Anhang 1.2 Darstellungsmatrix

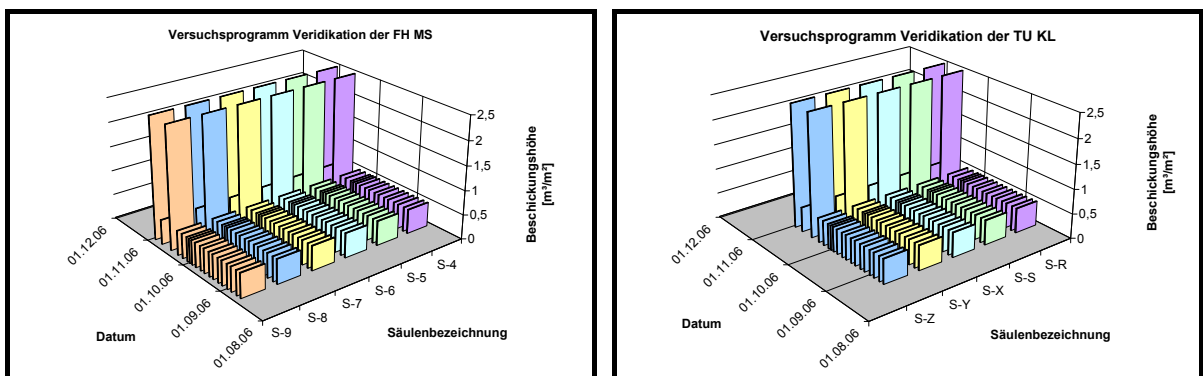
Tabelle-Anhang 1.2: Darstellungsmatrix zur Visualisierung der Ergebnisse der Säulenversuche

Versuchslabor				LWW FH Münster								FG SIWAWI TU Kaiserslautern											
				Linienart: gestrichelt								Linienart: gepunktet											
Substrat				DWA I	DWA II	Sub I	Sub II	LS	DWA II	DWA I	DWA II	Sub I	Sub II	LS									
Parameter	Farbcode	Zulauf	Infiltrat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	A	B	C	R	S	X	Y	Z
C_CSB	13	▲	▲	○	○	○	□	□	×	+	◇	□	□	□	□	○	○	○	□	□	×	+	◇
S_CSB	39	▲	▲	○	○	○	□	□	×	+	◇	□	□	□	□	○	○	○	□	□	×	+	◇
NH <sub>4</sub> -N	10	▲	▲	○	○	○	□	□	×	+	◇	□	□	□	□	○	○	○	□	□	×	+	◇
NO <sub>3</sub> -N	12	▲	▲	○	○	○	□	□	×	+	◇	□	□	□	□	○	○	○	□	□	×	+	◇
NO <sub>2</sub> -N	43	▲	▲	○	○	○	□	□	×	+	◇	□	□	□	□	○	○	○	□	□	×	+	◇
O <sub>2</sub>	5	▲	▲	○	○	○	□	□	×	+	◇	□	□	□	□	○	○	○	□	□	×	+	◇
T	46	▲	▲	○	○	○	□	□	×	+	◇	□	□	□	□	○	○	○	□	□	×	+	◇
pH	45	▲	▲	○	○	○	□	□	×	+	◇	□	□	□	□	○	○	○	□	□	×	+	◇
LF	44	▲	▲	○	○	○	□	□	×	+	◇	□	□	□	□	○	○	○	□	□	×	+	◇

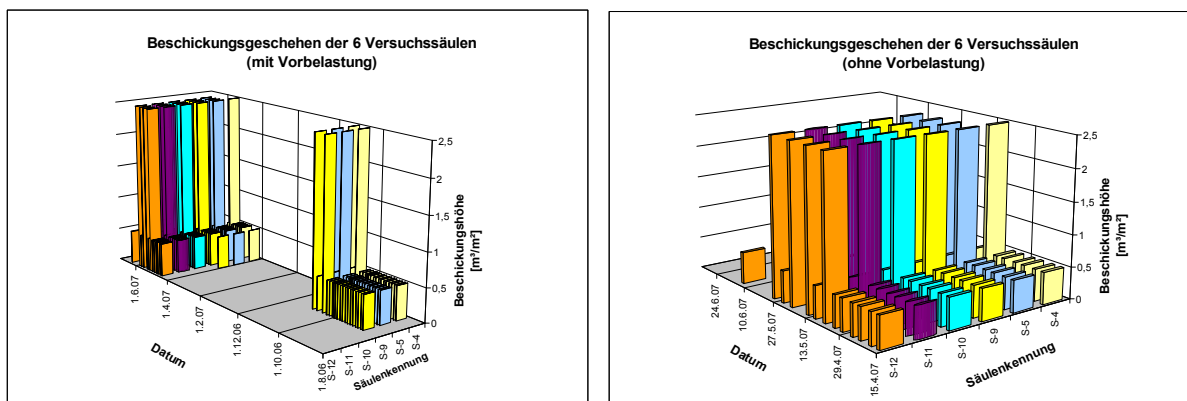
### Anhang 1.3 Darstellung der im Rahmen des Projektes durchgeführten Säulenversuche



**Bild-Anhang 1.1: Säulenversuche zur Entwicklung und Standarisierung der Handlungsanleitung in Münster (links) und Kaiserslautern (rechts)**



**Bild-Anhang 1.2: Säulenversuche zur Verifikation der Handlungsanleitung in Münster (links) und Kaiserslautern (rechts)**



**Bild-Anhang 1.3: Säulenversuche zur Überprüfung der Handlungsanleitung der FH Münster (links: mit Vorbelastung; rechts: ohne Vorbelastung)**

**Tabelle-Anhang 1.3: Zusammenstellung der Säulenversuche an der TU KL zur Entwicklung des Eignungsnachweis**

Projekt/ Kapitel	Untersuchungsphase	Substrate	Drosselung qd [l/s·m <sup>2</sup> ]	Säulen- konzeption	Filtratbeprobung		Bearbeitungs- zeitraum	vorwiegendes Untersuchungsziel
					MP	GL		
<b>Entwicklung</b> Kap. 4.2.1	<b>I. Einfahrphase (0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWAI	0,01	3 Säulen (A, B, C)	X		12/05	Vergleichbarkeit zwischen Standorten
Kap. 4.2.2	<b>II. Normallastbeschickung (0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWAI	0,01	2 Säulen (A, B)			01/06	Vergleichbarkeit an einem Standort
Kap. 4.2.3	<b>III. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWAI	0,01	1 Säule (A)			01/06	Testung Betriebsbedingungen
	<b>IV. Wiedereinfahrphase (0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWAI	0,01	2 Säulen (B, C)	X		06/06	
<b>Standardisierung</b> Kap. 4.2.4	<b>V. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWAI	B: 0,02 C: 0,01	2 Säulen (B, C)			07/06	Änderung Beschickungswasser
und Kap. 6	Zwischenbeschickung (0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) (künstliches Beschickungswasser)	DWAI	0,01	2 Säulen (B, C)	X		07/06	
	<b>VI. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWAI	B: 0,02 C: 0,01	2 Säulen (B, C)			08/06	Reproduzierbarkeit

DWAI: Sandsubstrat DWA-konform I; A, B, C: Bezeichnung der 3 verwendeten Säulen an der TU KL; konditioniertes Beschickungswasser: Beschickungswasser mit Abwasseranteil; künstliches Beschickungswasser: Beschickungswasser ohne Abwasseranteil

Tabelle-Anhang 1.4: Zusammenstellung durchgeführter Säulenversuche an der FHM zur Entwicklung des Eignungsnachweis

Projekt/ Kapitel	Untersuchungsphase	Substrate	Drosselung qd [l/s·m <sup>2</sup> ]	Säulen- konzeption	Filtratbeprobung		Bearbeitungs- zeitraum	vorwiegendes Untersuchungsziel
					MP	GL		
<b>BOFIEIG</b>								
Entwicklung Kap. 4.2.1	<b>I. Einfahrphase (0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWAI	0,01	3 Säulen (1, 2, 3)	X		12/05	Vergleichbarkeit zwischen Standorten
Kap. 4.2.2	<b>II. Normallastbeschickung (0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWAI	0,01	3 Säulen (1, 2)		X	01/06	Vergleichbarkeit an einem Standort
Kap. 4.2.3	<b>III. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWAI	0,01	1 Säule (2)		X	01/06	Testung Betriebsbe- dingungen
	<b>T.I Tracerversuch an Säule</b>	DWAI	0,01	1 Säule (3)			03-04/06	Methodenentwicklung
<b>BIOFIEIG 2</b>	<b>IV. Wiedereinfahrphase (0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWAI	0,01	2 Säulen (1, 2)	X		06/06	
<b>Standardi- sierung</b> Kap. 4.2.4	<b>V. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWAI	1: 0,02 2: 0,01	2 Säulen (1, 2)		X	07/06	Änderung Beschickungswasser
und Kap. 6	Zwischenbeschickung (0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) (künstliches Beschickungswasser)	DWAI	0,01	2 Säulen (1, 2)	X		07/06	
	<b>VI. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWAI	1: 0,02 2: 0,01	2 Säulen (1, 2)		X	08/06	Reproduzierbarkeit

DWAI: Sandsubstrat DWA-konform I, ; 1, 2, 3: Bezeichnung der 3 verwendeten Säulen an der FH MS; konditioniertes Beschickungswasser: Beschickungswasser mit Abwasseranteil; künstliches Beschickungswasser: Beschickungswasser ohne Abwasseranteil



**Tabelle-Anhang 1.5: Zusammenstellung durchgeführter Säulenversuche der TU KL an mehreren Substraten (Verifikation) mit Angaben zum verwendeten Substrat, Beprobungsstrategie u.a.**

Projekt/ Kapitel	Untersuchungsphase	Substrate	Drosselung qd [l/s·m <sup>2</sup> ]	Säulen- konzeption	Filtratbeprobung MP GL	Bearbeitungs- zeitraum	vorwiegendes Untersuchungsziel
Kap. 5.2.1	<b>VII. Einfahrphase (0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWA II SUB I SUB II LS	R: 0,02 S, X, Y, Z: 0,01	5 Säulen DWA II (R,S) SUB I (X) SUB II (Y) LS (Z)	(X)	8-9/06	Testung mehrerer Substrate
<b>Verifikation</b> Kap. 5.2.2	<b>VIII. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWA II SUB I SUB II LS	R: 0,02 S, X, Y, Z: 0,01	5 Säulen DWA II (R,S) SUB I (X) SUB II (Y) LS (Z)	X	10/06	Ermittlung Grenzkriterium Eignungsnachweis
und Kap. 6	Zwischenbeschickung (0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) (künstliches Beschickungswasser)				X	11/06	
Kap. 6.1.1	<b>IX. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWA II SUB I SUB II LS	R: 0,02 S, X, Y, Z: 0,01	5 Säulen DWA II (R,S) SUB I (X) SUB II (Y) LS (Z)	X	11/06	Reproduzierbarkeit HL-Versuche

DWAII :Sandsubstrat DWA-konform II; SUBI : Sandsubstrat suboptimal I (Grobkorn hoch); SUBII: Sandsubstrat suboptimal II (Grobkorn und Feinkorn hoch); LS: Lavasand; R, S, X, Y, Z: Bezeichnung der 5 verwendeten Säulen an der TU KL

**Tabelle-Anhang 1.6: Zusammenstellung durchgeführter Säulenversuche an der FH MS an mehreren Substraten (Verifikation) mit Angaben zum verwendeten Substrat, Beprobungsstrategie u.a.**

Projekt/ Kapitel	Untersuchungsphase	Substrate	Drosselung qd [l/s·m <sup>2</sup> ]	Säulen- konzeption	Filtratbeprobung		Bearbeitungs- zeitraum	vorwiegendes Untersuchungsziel
					MP	GL		
<b>BOFIEIG 2</b>								
Kap. 5.2.1	<b>VII. Einfahrphase (0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWA II SUB I SUB II LS	4: 0,02 5, 6, 7, 8, 9: 0,01	6 Säulen DWA II (4,5,9) SUB I (6) SUB II (7) LS (8)	(X)		8-9/06	Testung mehrerer Substrate
<b>Verifikation</b> Kap. 5.2.2	<b>VIII. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWA II SUB I SUB II LS	4: 0,02 5, 6, 7, 8, 9: 0,01	6 Säulen DWA II (4,5,9) SUB I (6) SUB II (7) LS (8)		X	10/06	Ermittlung Grenzkriterium Eignungsnachweis
und Kap. 6	Zwischenbeschickung (0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) (künstliches Beschickungswasser)				X		11/06	
Kap. 6.1.1	<b>IX. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWA II SUB I SUB II LS	4: 0,02 5, 6, 7, 8, 9: 0,01	6 Säulen DWA II (4,5,9) SUB I (6) SUB II (7) LS (8)		X	11/06	Reproduzierbarkeit HL-Versuche

DWAII Sandsubstrat DWA-konform II; SUBI : Sandsubstrat suboptimal I (Grobkorn hoch); SUBII: Sandsubstrat suboptimal II (Grobkorn und Feinkorn hoch); LS: Lavasand

**Tabelle-Anhang 1.7: Zusammenstellung durchgeführter Säulenversuche an der FHM am Substrat DWA II (Überprüfung) mit Angaben zum verwendeten Substrat, Beprobungsstrategie u.a.**

Projekt/ Kapitel	Untersuchungsphase	Substrate	Drosselung qd [l/s·m <sup>2</sup> ]	Säulen- konzeption	Filtratbeprobung		Bearbeitungs- zeitraum	vorwiegendes Untersuchungsziel	
					MP	GL			
<b>BOFIEIG 2</b>									
Kap. 7.1.2	<b>X. Einfahrphase (0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (konditioniertes Beschickungswasser)	DWA II	4,12,9: 0,02 5: 0,03 10: 0,04 11: 0,05	5, (6) Säulen DWA II (4,5,9,10, 11, 12)		X	04-05/07	Testung Drosselab- flussspende Beprobungsstrategie Beschickungsstrategie	
<b>Überprüfung</b> Kap. 7.2.2	<b>XI. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWA II	4,12,9: 0,02 5: 0,03 10: 0,04 11: 0,05	6 Säulen DWA II (4,5,9,10, 11, 12)			X	05-06/07	Testung Drosselab- flussspende Beprobungsstrategie Beschickungsstrategie
	Zwischenbeschickung (0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) (künstliches Beschickungswasser)					X		05-06/07	
Kap. 7.2.2	<b>XI. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWA II	12,9: 0,02 5: 0,03 10: 0,04 11: 0,05	5 Säulen DWA II (5,9,10, 11, 12)			X	05-06/07	Testung Drosselab- flussspende Beprobungsstrategie Beschickungsstrategie
Kap. 7.2.2	<b>XII. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWA II	12,9: 0,02 5: 0,03 10: 0,04 11: 0,05	5 Säulen DWA II (5,9,10, 11, 12)			X	05-06/07	Testung Drosselab- flussspende Beprobungsstrategie Beschickungsstrategie
	Zwischenbeschickung (0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) (künstliches Beschickungswasser)					X		05-06/07	
Kap. 7.2.2	<b>XII. Hochlastbeschickung (2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b> (künstliches Beschickungswasser)	DWA II	12,9: 0,02 5: 0,03 10: 0,04 11: 0,05	5 Säulen DWA II (5,9,10, 11, 12)			X	05-06/07	Testung Drosselab- flussspende Beprobungsstrategie Beschickungsstrategie

## Anhang 4 Anhang zu Kapitel 4 Entwicklung und Standardisierung

### Anhang 4.1 Substratuntersuchungen

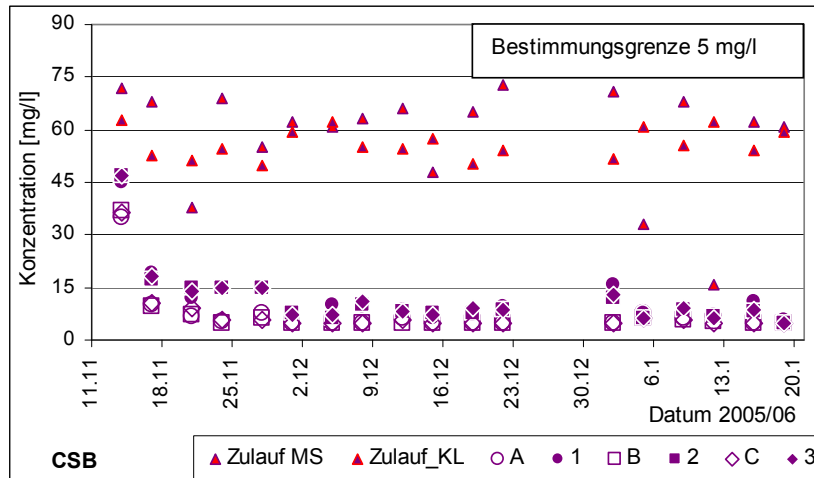
Tabelle-Anhang 4.8: Ergebnisse der Kornverteilung des Säulensubstrats DWA I

Kornfraktion	Ton Schluff	/				
		Feinsand	Mittelsand	Grobsand	Feinkies	
	(T / U)	(fS)	(mS)	(gS)	(fG)	
	[mm]	< 0,06	0,06 – 0,20	0,20 – 0,60	0,60 – 2,00	> 2,0
Probe 1	[M- %]	0,8	21,7	62,5	14,4	0,6
Probe 2	[M- %]	0,5	22,5	62,0	14,7	0,3
Probe 3	[M- %]	0,7	21,8	62,5	14,7	0,3
Probe 4	[M- %]	0,5	21,5	62,8	14,6	0,6
Probe 5	[M- %]	0,6	21,9	62,7	14,6	0,2
Probe 6	[M- %]	0,5	22,5	62,1	14,6	0,3
<b>Mittelwert</b>	<b>[M- %]</b>	<b>0,6</b>	<b>22,0</b>	<b>62,4</b>	<b>14,6</b>	<b>0,4</b>
Standardabw.	[M- %]	0,12	0,43	0,32	0,11	0,16
Variationskoeff.	[-]	0,204	0,019	0,005	0,008	0,420
MUNLV [2003]	[M- %]	< 1	10 - 25	60 - 80	10 - 25	< 1
DWA-M 178 [2005]	[M- %]	< 1	10 - 25	60 - 80	10 - 25	< 1

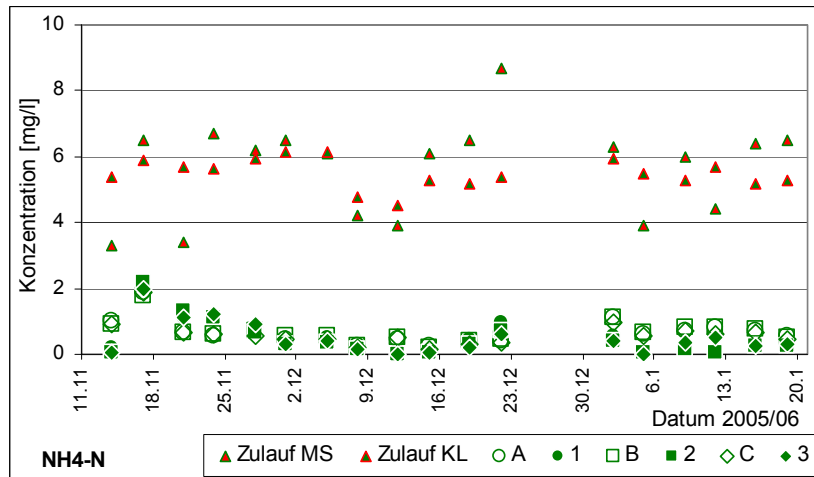
Tabelle-Anhang 4.9: Ergebnisse der Bestimmung des Kalkgehaltes im Säulensubstrat DWA I

	Kalkgehalt	Calcitanteil	Dolomiteil
	[ %]	[ %]	[ %]
Probe 1	12,5	10,6	1,9
Probe 2	10,7	10,3	0,4
Probe 3	12,5	10,5	2,0
Probe 4	14,2	12,1	2,1
Probe 5	14,1	10,9	3,2
Probe 6	12,5	10,1	2,4
<b>Mittelwert</b>	<b>12,7</b>	<b>10,8</b>	<b>2,0</b>
Standardabweichung	1,3	0,7	0,9
Variationskoeffizient	0,1	0,1	0,5
Sollwert nach MUNLV [2003]	10 – 15	-	-

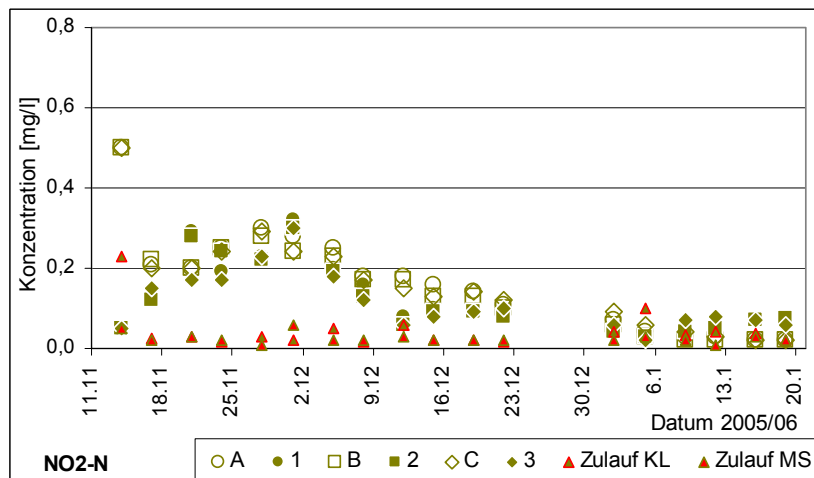
### Anhang 4.2 Einfahrphase Entwicklung (Kapitel 4.2.2)



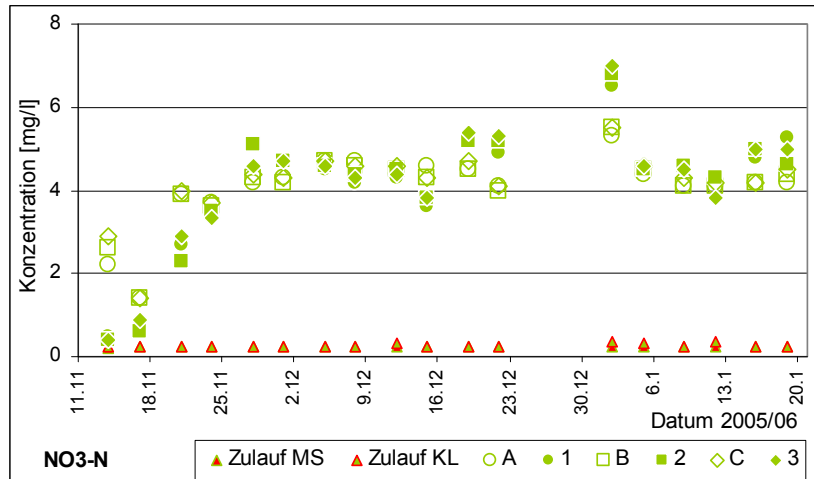
**Bild-Anhang 4.4: CSB-Konzentrationen Einfahrphase**



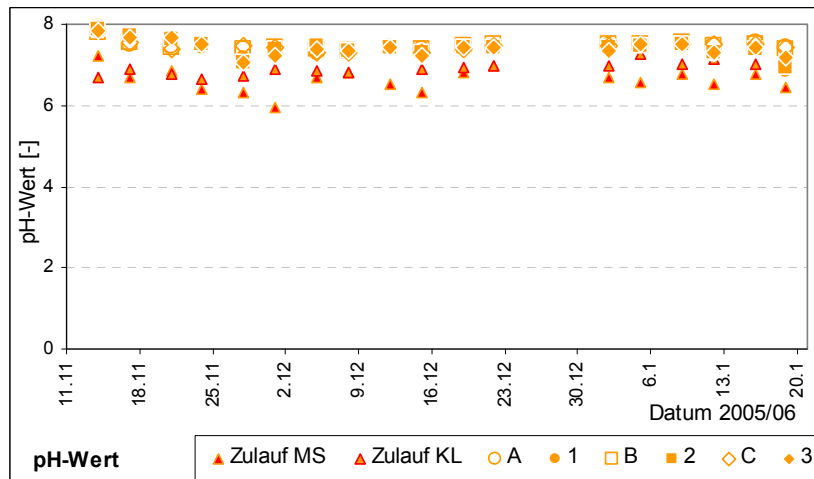
**Bild-Anhang 4.5: NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen Einfahrphase**



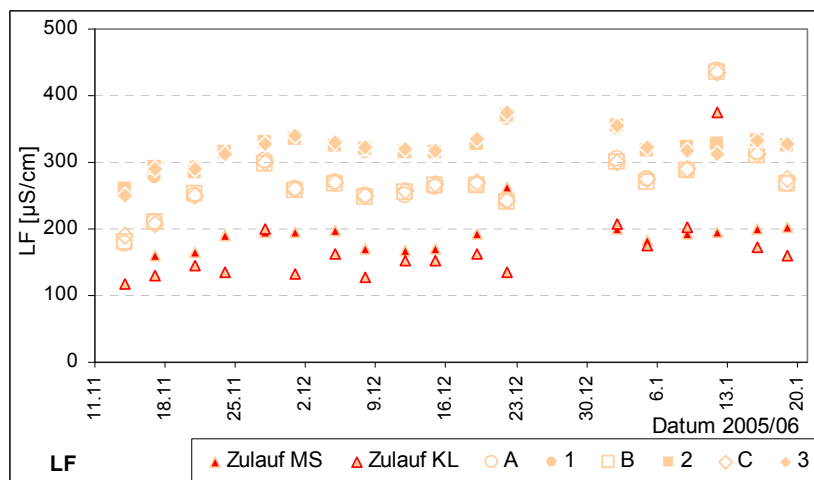
**Bild-Anhang 4.6: NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen Einfahrphase**



**Bild-Anhang 4.7: NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen Einfahrphase**



**Bild-Anhang 4.8: pH-Werte Einfahrphase**



**Bild-Anhang 4.9: Elektrische Leitfähigkeit Einfahrphase**

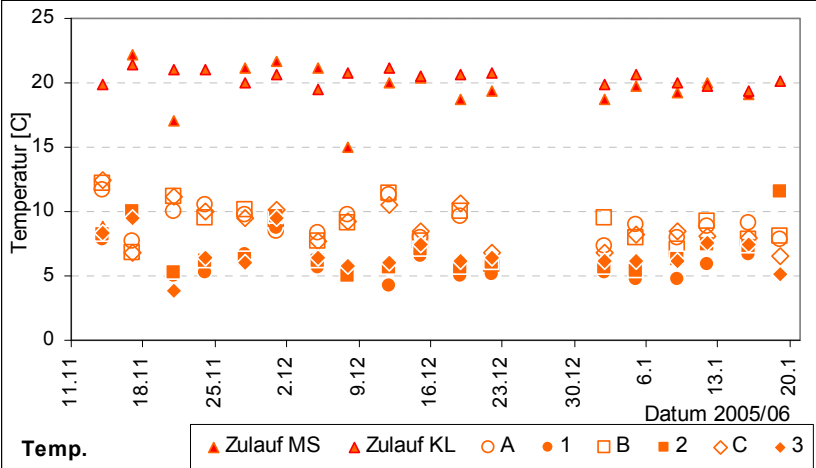
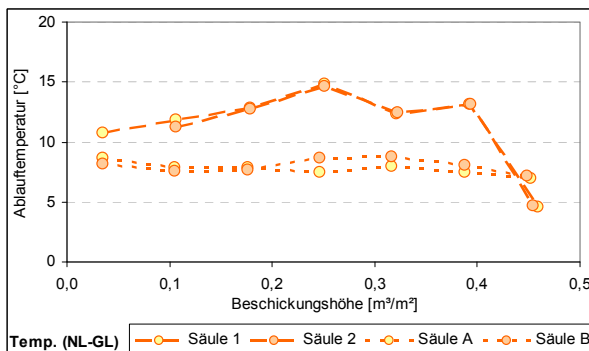
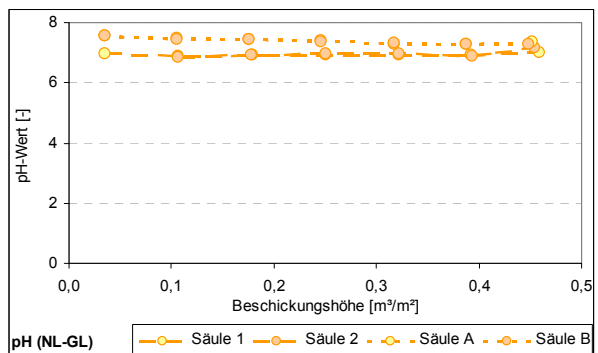
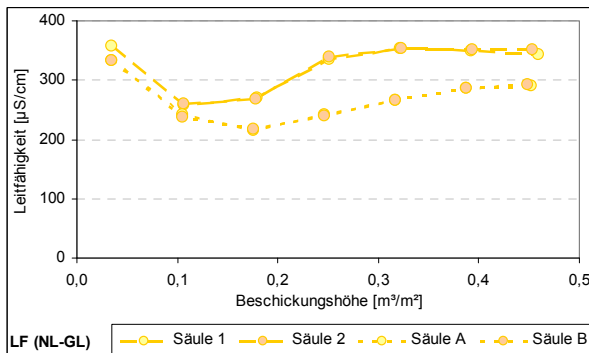
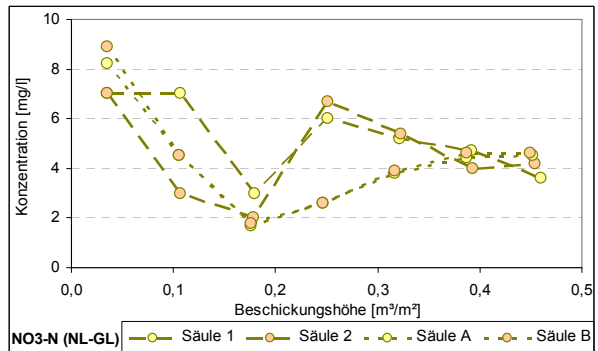
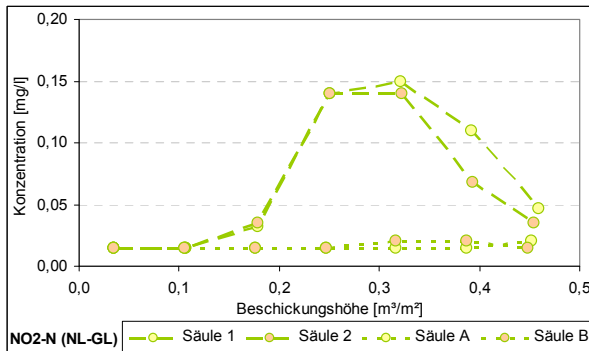
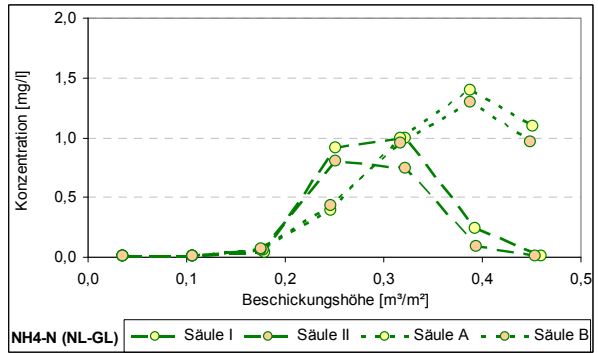
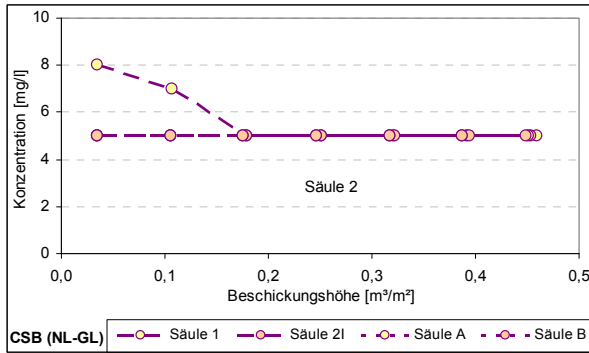


Bild-Anhang 4.10: Temperatur Einfahrphase

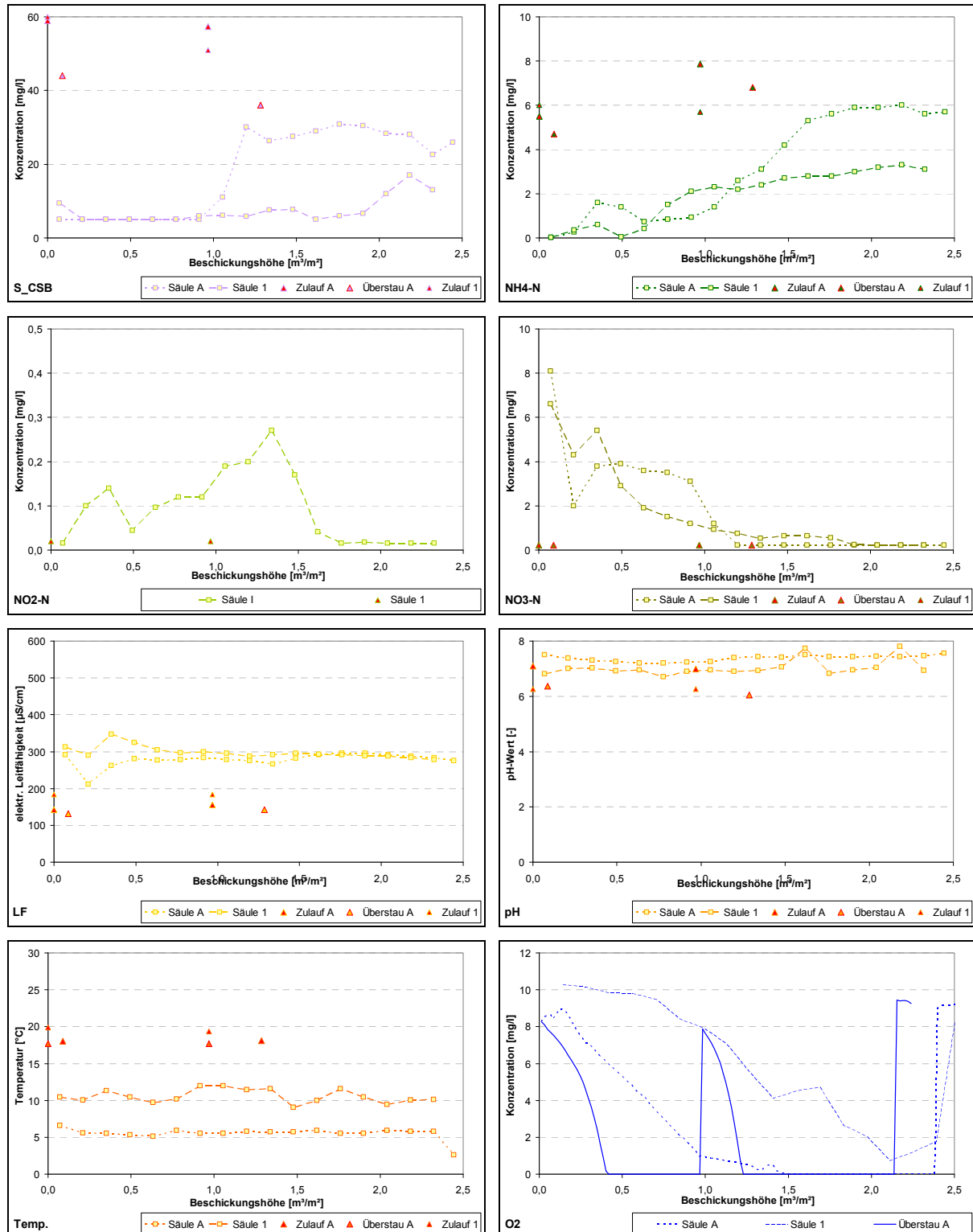
### Anhang 4.3 Ganglinien Abschluss Einfahrphase Entwicklung (Kapitel 4.2.3)





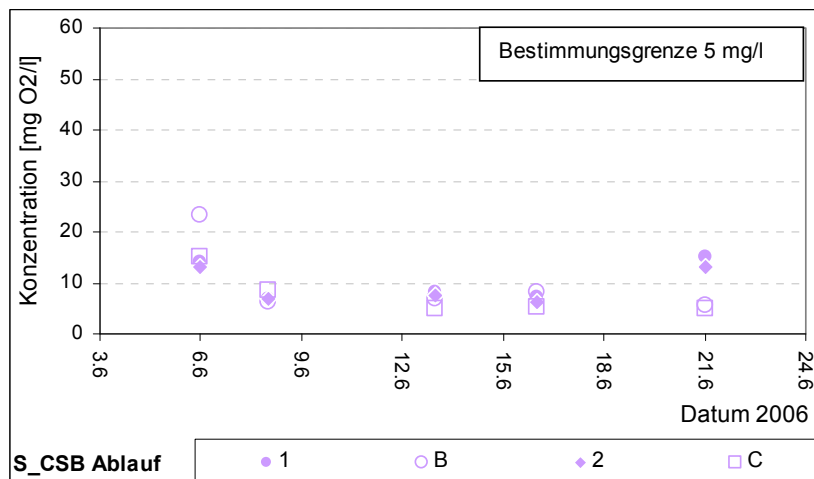
**Bild-Anhang 4.11: Ablaufganglinien Hochlastversuch (Abschluss Einfahrphase 0,5 m) für C\_CSB, NH4-N, NO2-N, NO3-N, LF, pH und Temperatur (TU KL schwarz; FH MS rot)**

**Anhang 4.4 Hochlastversuche Entwicklung (Kapitel 4.2.4)**

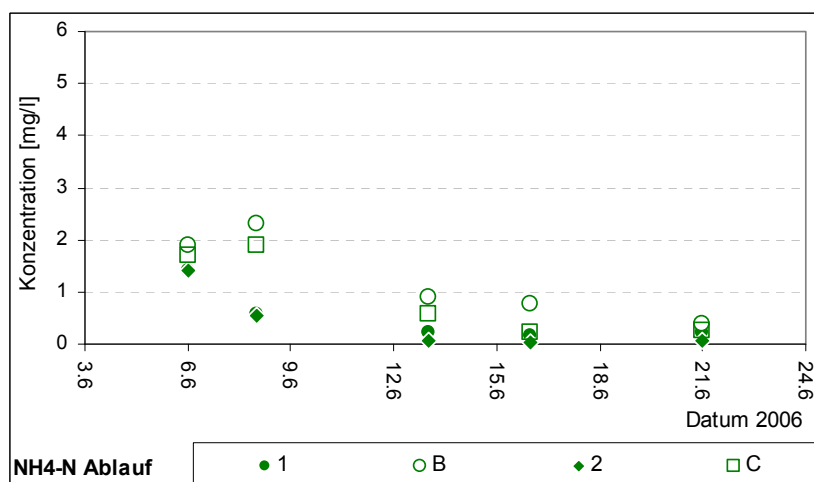


**Bild-Anhang 4.12:** Ablaufganglinien Hochlastversuch (2,5 m mit konditioniertem Beschickungswasser) für S<sub>CSB</sub>, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, LF, pH, Temperatur und Sauerstoff (TU KL schwarz; FH MS rot)

## Anhang 4.5 Wiedereinfahrphase Standardisierung (Kapitel 4.2.5)

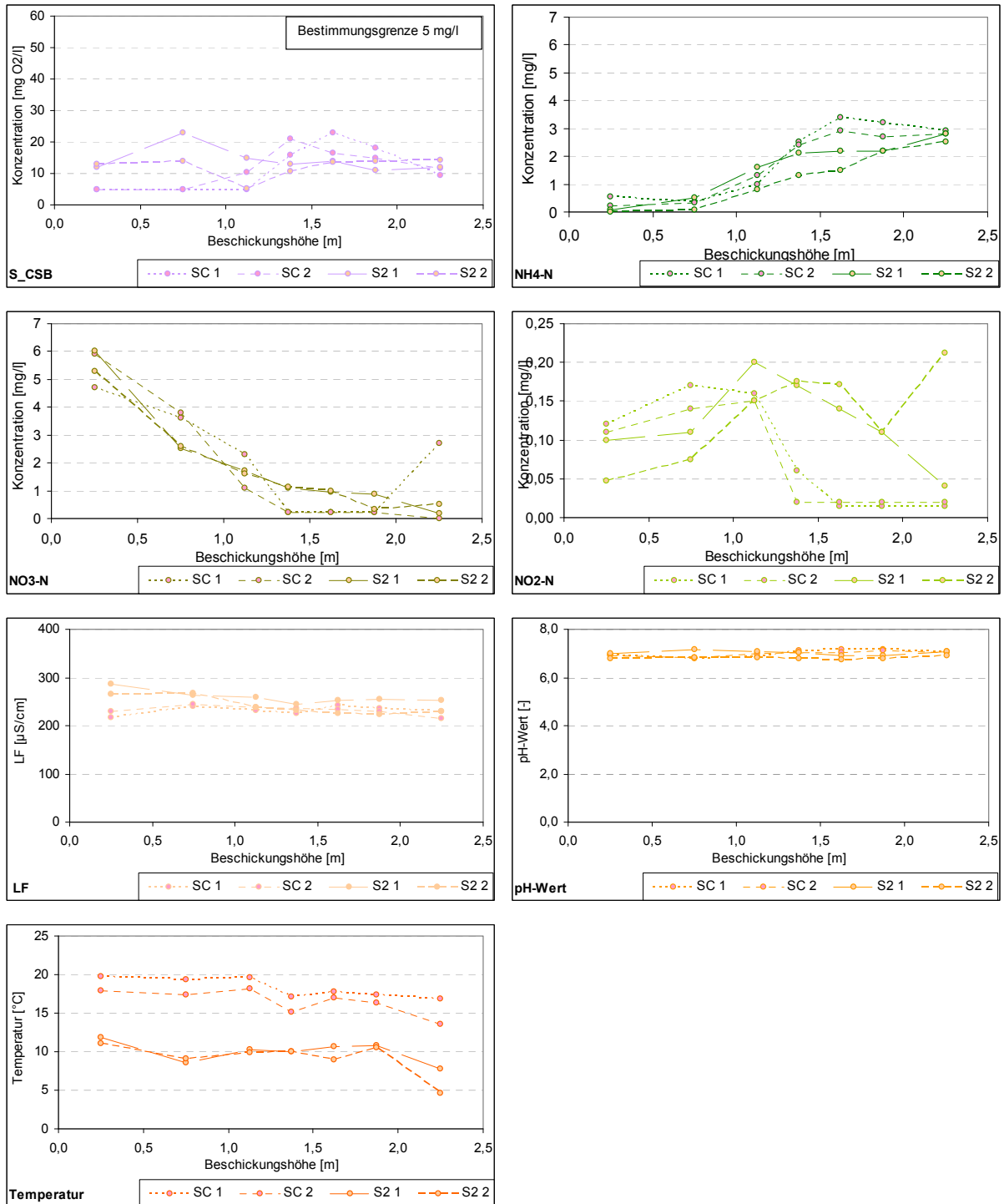


**Bild-Anhang 4.13:** Ablaufkonzentrationen der Wiedereinfahrphase (5 Beschickungen a 0,5 m) für S<sub>CSB</sub> (TU KL und FH MS)



**Bild-Anhang 4.14:** Ablaufkonzentrationen der Wiedereinfahrphase (5 Beschickungen a 0,5 m) für NH<sub>4</sub>-N (TU KL und FH MS)

### Anhang 4.6 Hochlastversuche Standardisierung (Kapitel 4.2.5)



**Bild-Anhang 4.15:** Ablaufganglinien Hochlastversuch 1 + 2 (2,5 m mit künstlichem Beschickungswasser) für S<sub>C</sub>SB, NO<sub>2</sub>-N, LF, pH, und Temperatur (TU KL schwarz; FH MS rot)

## Anhang 5 Ergebnisse zu Kapitel 5 (Verifikation)

### Anhang 5.1 Substratuntersuchungen

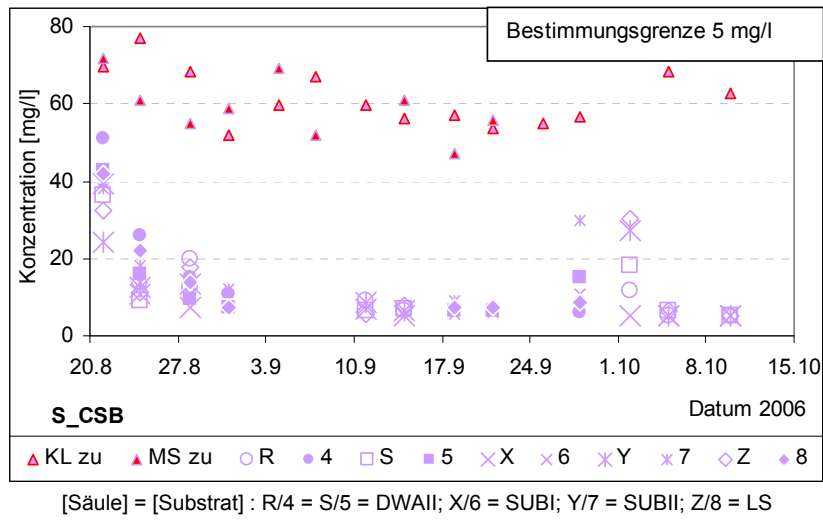
Tabelle-Anhang 5.10: Mittelwerte der Kornverteilungen der untersuchten Substrate

Kornfraktion	Ton / Schluff	Feinsand	Mittelsand	Grobsand	Kies
Kurzbezeichnung	(T+U)	(fS)	(mS)	(gS)	(fG)
Anteil	[ %]	[ %]	[ %]	[ %]	[ %]
Korngrößenbereiche	< 0,06	0,06 – 0,20	0,20 – 0,60	0,60 – 2,00	> 2,0
DWAI	1,0	22,4	56,7	18,9	1,0
SUBI	0,9	20,7	53,0	12,1	<u>13,3</u>
SUBII	<u>3,3</u>	<u>7,1</u>	52,6	36,1	0,9
LS	<u>2,3</u>	19,2	57,8	19,6	<u>1,1</u>
MUNLV	< 1	10 - 25	60 - 80	10 - 25	< 1
DWA-M 178	< 1	10 - 25	60 - 80	10 - 25	< 1
<b>MUNLV /DWA-M 178</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>70</b>	<b>15</b>	<b>0</b>

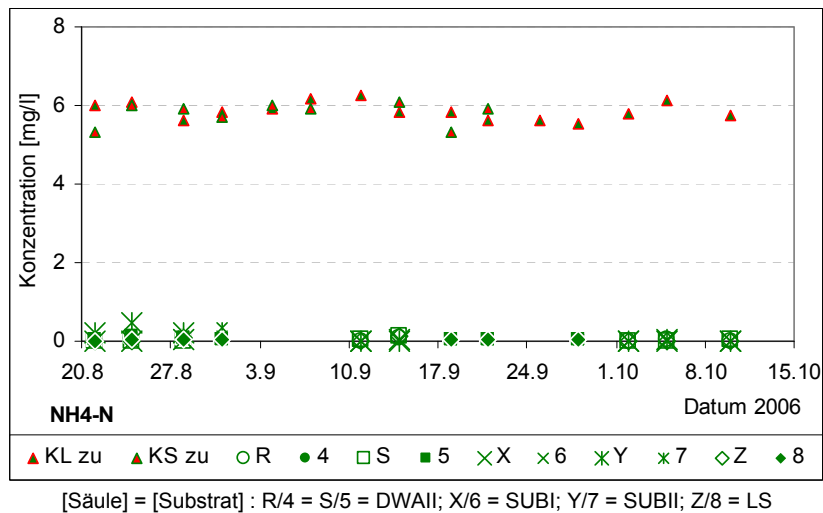
Tabelle-Anhang 5.11: Carbonatgehalte der untersuchten Substrate (Mittelwerte)

Substrat	Carbonatgehalt	Calcit (gesamt)	Calcit (Carbonat)	Dolomit (gesamt)
	[M- %]	[M- %]	[M- %]	[M- %]
DWA II	33,9	30,8	90,9	3,07
SUB I	10,0	9,7	97,0	0,30
SUB II	11,8	11,2	94,3	0,67
LAVA	22,4	20,9	93,3	1,50
<b>DWA-M 178</b>	<b>25,0</b>	-	<b>80-90</b>	-
<b>MUNLV</b>	<b>10-15</b>	-	-	-

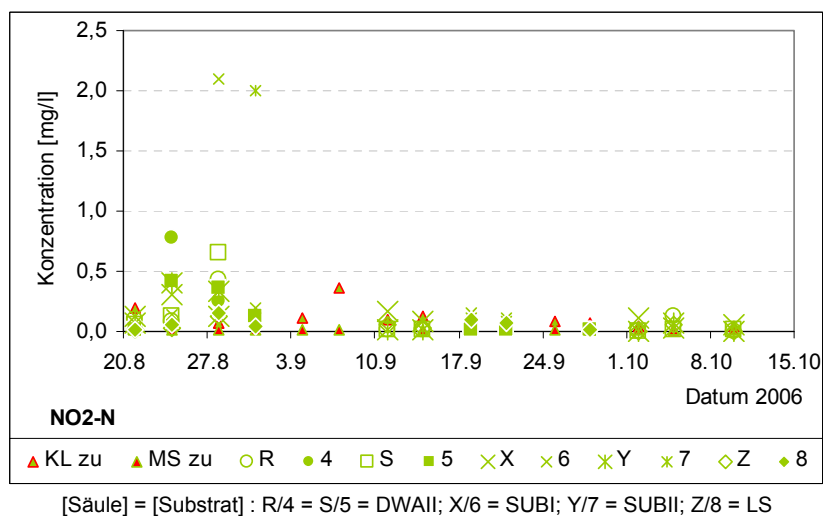
### Anhang 5.2 Einfahrphase Verifikation (Kapitel 5.2.1)



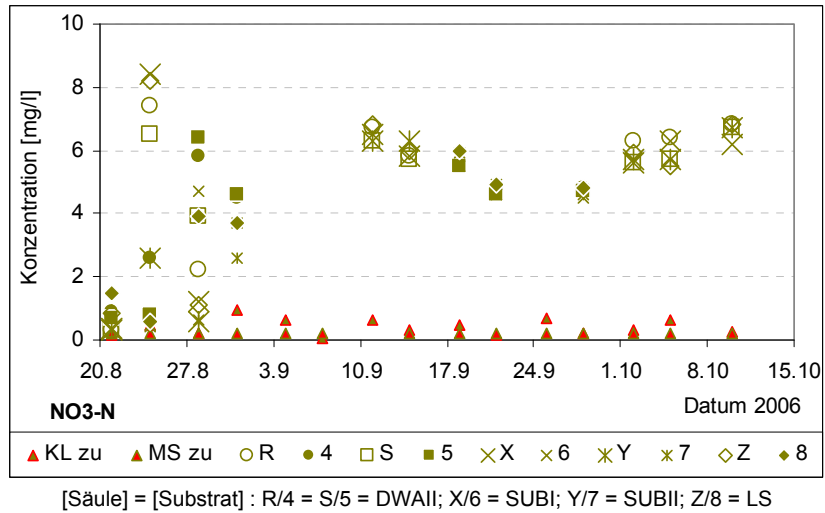
**Bild-Anhang 5.16: S-CSB Ablaufkonzentrationen aus GMP während der Einfahrphase**



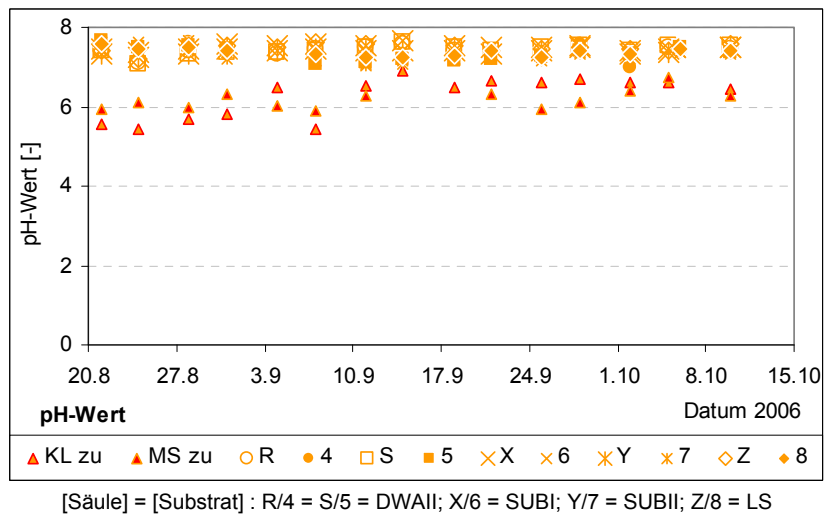
**Bild-Anhang 5.17: NH4-N Ablaufkonzentrationen aus GMP während der Einfahrphase**



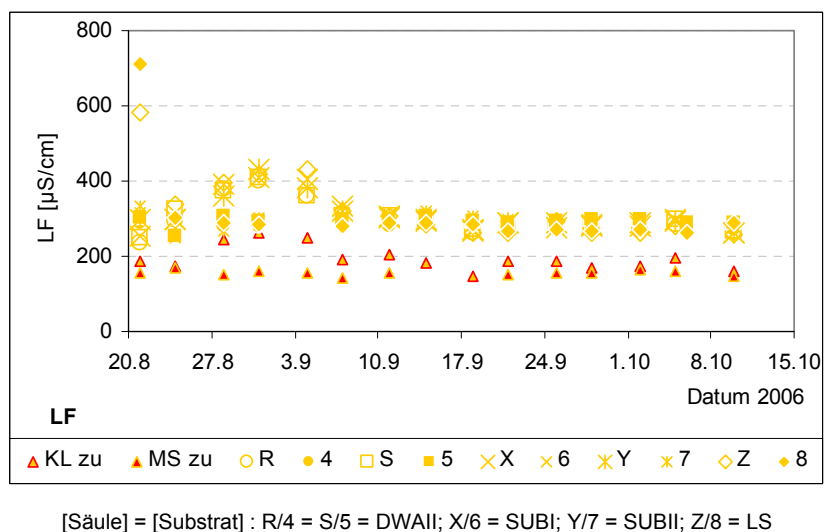
**Bild-Anhang 5.18: NO2-N Ablaufkonzentration aus GMP während der Einfahrphase**



**Bild-Anhang 5.19: NO3-N Ablaufkonzentration aus GMP während der Einfahrphase**

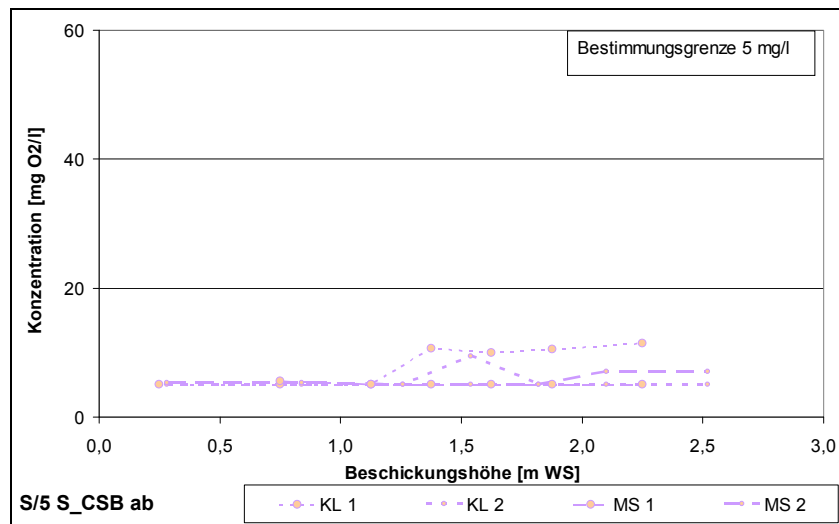


**Bild-Anhang 5.20: pH-Werte aus GMP während der Einfahrphase**

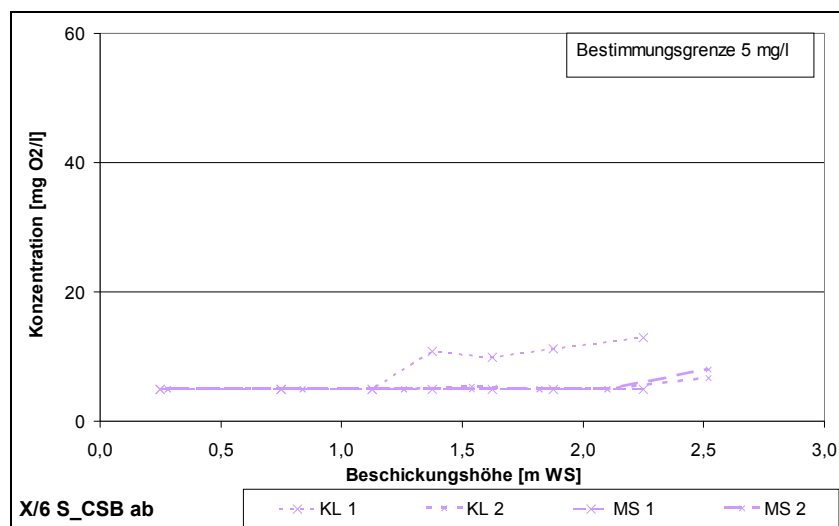


**Bild-Anhang 5.21: Elektrische Leitfähigkeit aus GMP während der Einfahrphase**

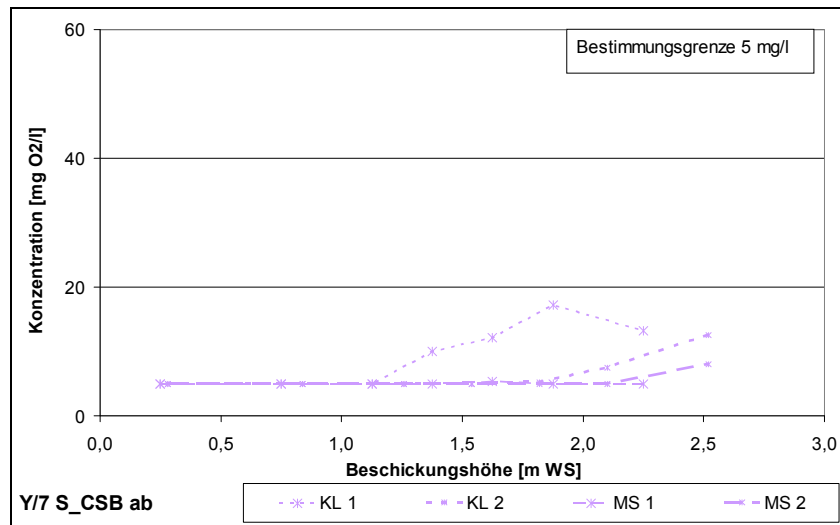
**Anhang 5.3 Hochlastversuche Verifikation (Kapitel 5.2.1) Standortvergleich und Reproduzierbarkeit anhand der CSB-Ganglinien**



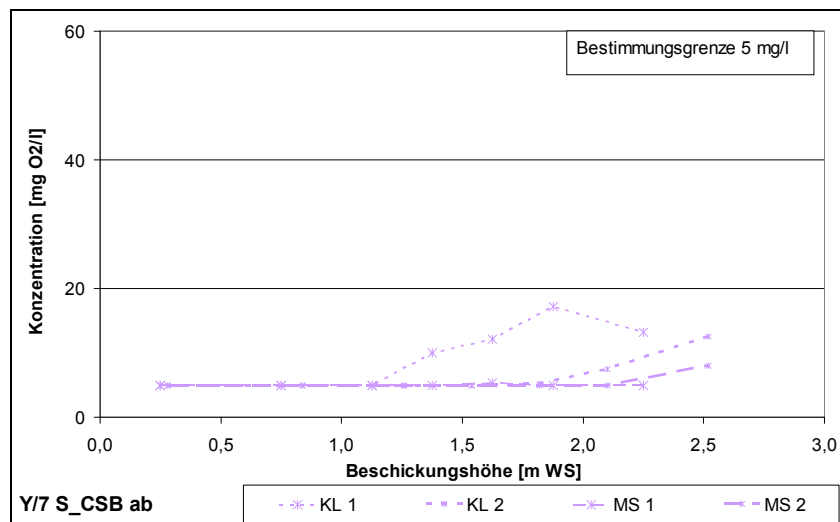
**Bild-Anhang 5.22: Vergleich S\_CSB-Ablaufganglinien Substrat DWAll 1. + 2. HL TU KL + FH MS**



**Bild-Anhang 5.23: Vergleich S\_CSB-Ablaufganglinien Substrat DWAll 1. + 2. HL TU KL + FH MS**



**Bild-Anhang 5.24: Vergleich S\_CSB-Ablaufganglinien Substrat SUBII 1. + 2. HL TU KL + FH MS**

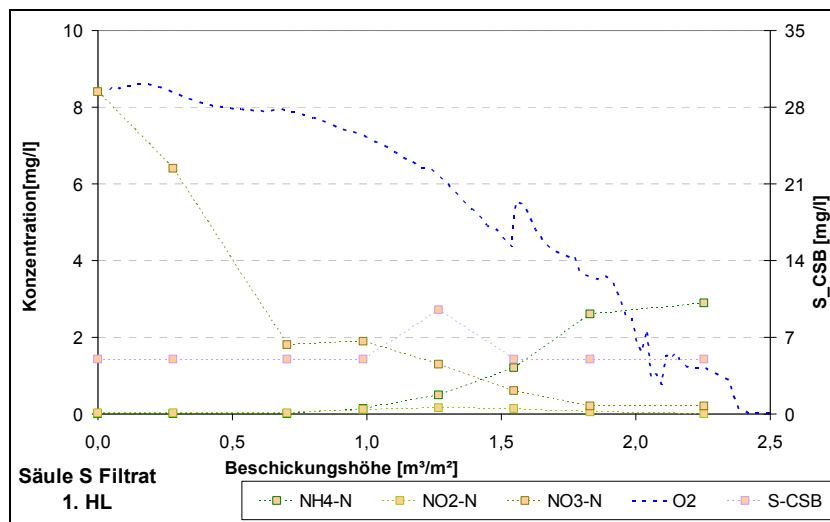


**Bild-Anhang 5.25: Vergleich S\_CSB-Ablaufganglinien Substrat LS 1. + 2. HL TU KL + FH MS**

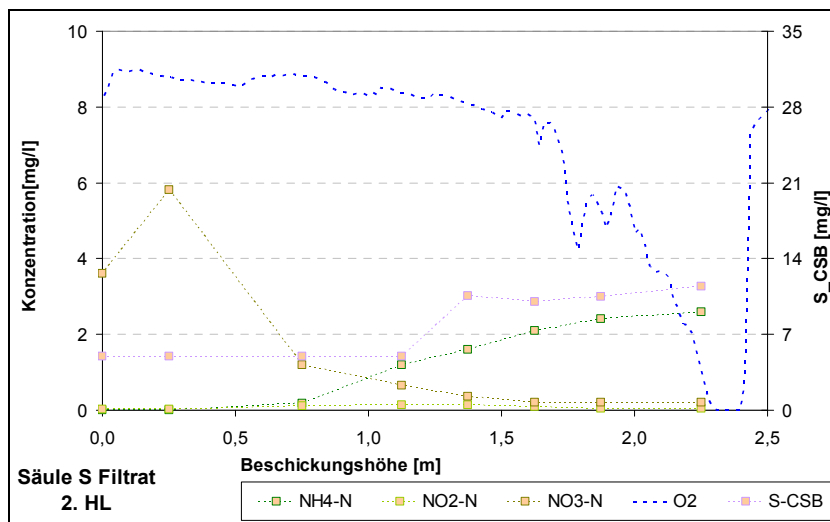


### Anhang 5.4 Ablaufganglinien zu Kapitel 5.2.2

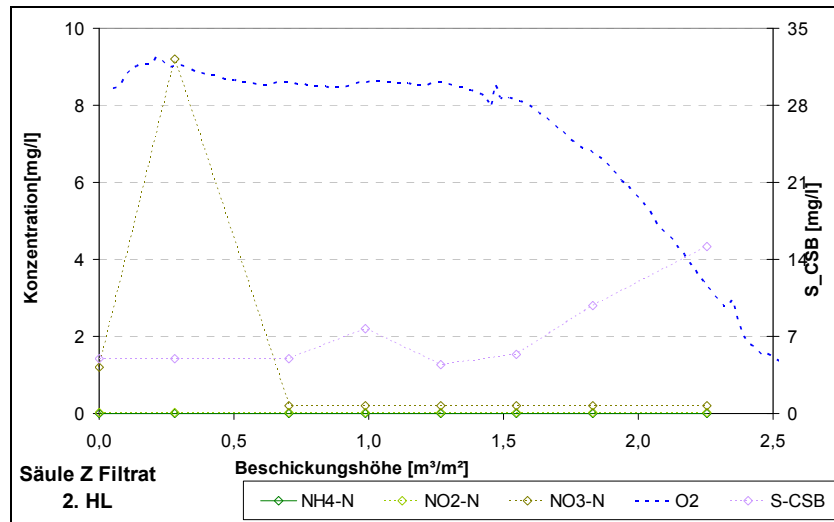
Zusammenfassende Ablaufganglinien der Versuche mit Messung der Sauerstoffkonzentration im Ablauf



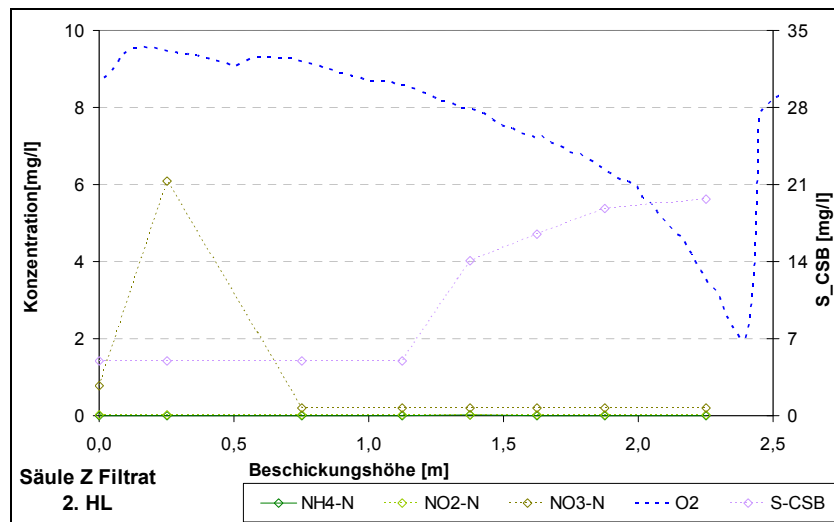
**Bild-Anhang 5.26: Ablaufganglinien Substrat DWAll 1. HL TUKL**



**Bild-Anhang 5.27: Ablaufganglinien Substrat LS 1. HL TUKL**

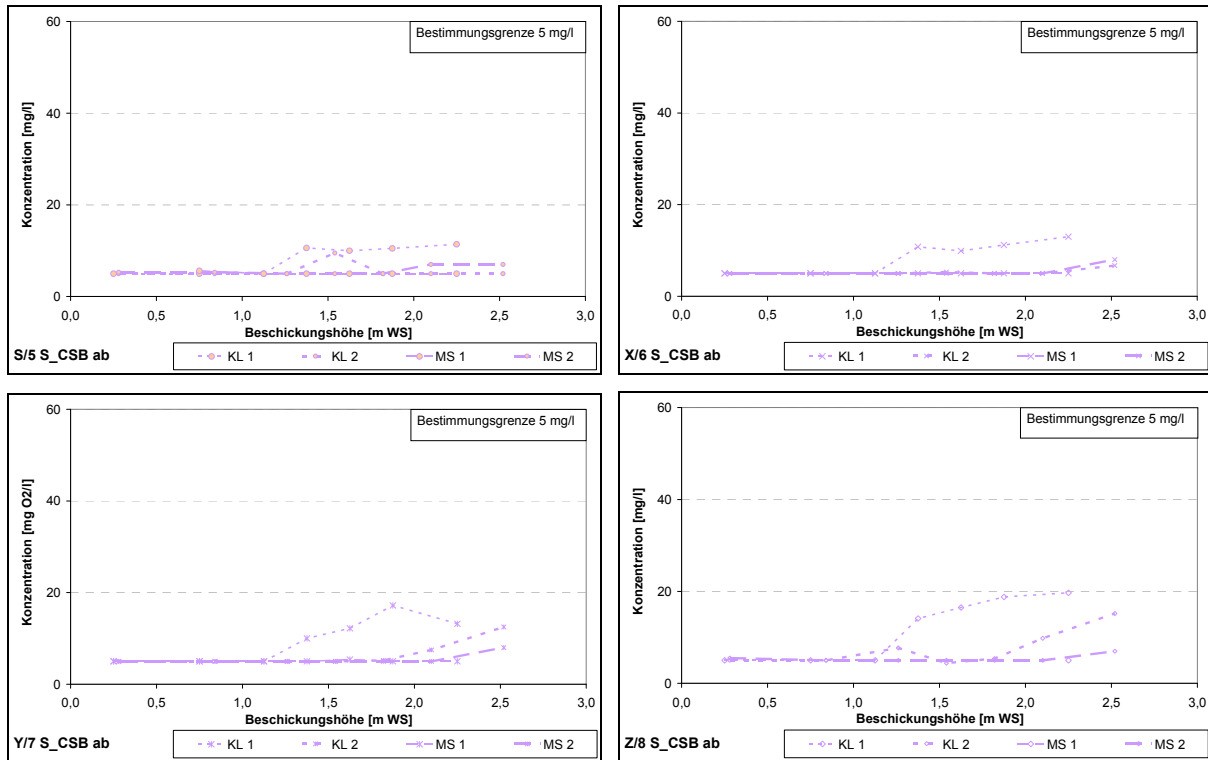


**Bild-Anhang 5.28: Ablaufganglinien Substrat DWaII 2. HL TUKL**



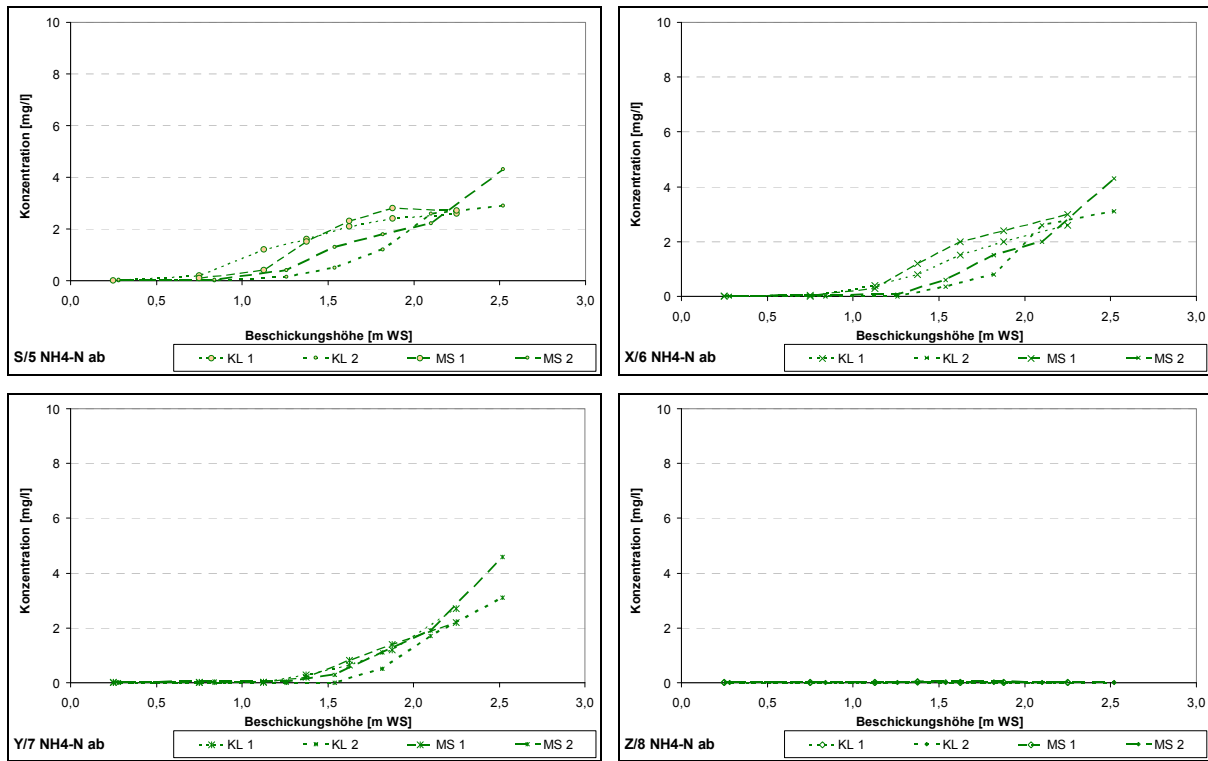
**Bild-Anhang 5.29: Ablaufganglinien Substrat LS 2. HL TUKL**

### Anhang 5.5 Darstellung aller in der Verifikation untersuchten Substrate (nach Parametern)



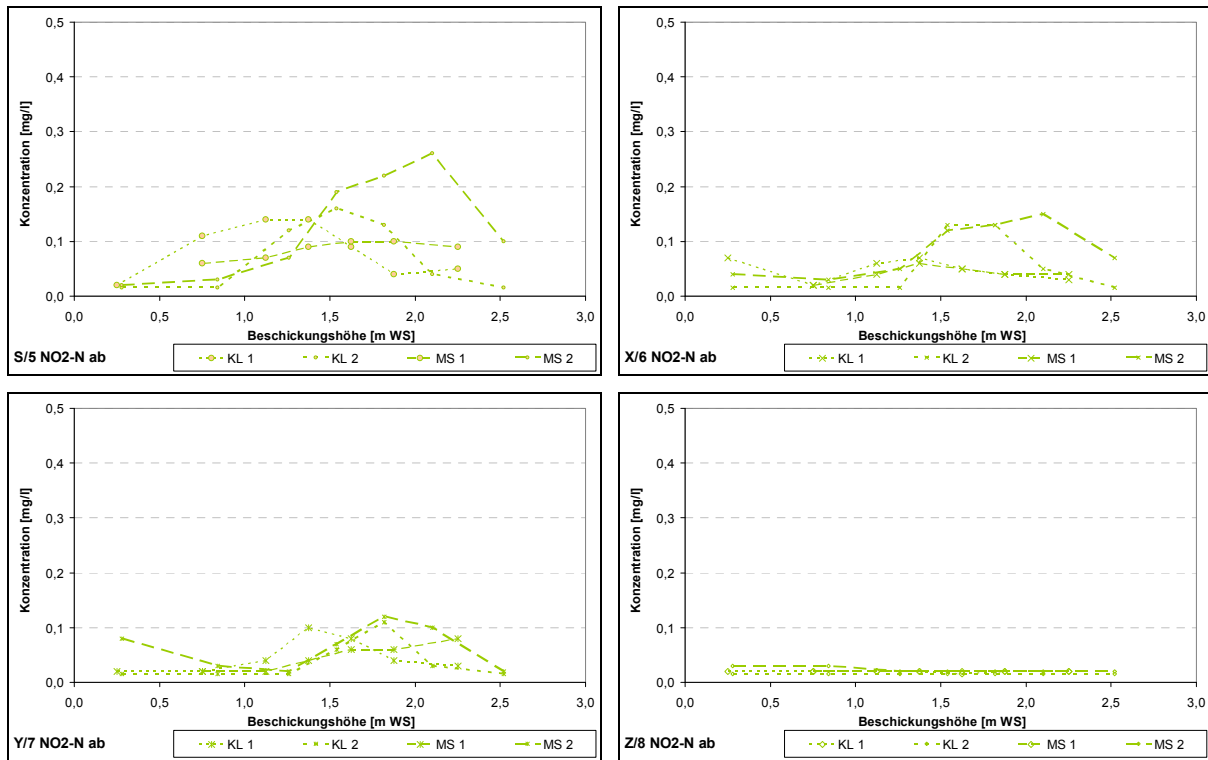
[Säule] = [Substrat] : S/5 = DWaII; X/6 = SUBI; Y/7 = SUBII; Z/8 = LS KL1 / KL2 bzw. MS1 / MS2 = 1. HL / 2. HL

**Bild-Anhang 5.30: S<sub>CSB</sub> Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL**



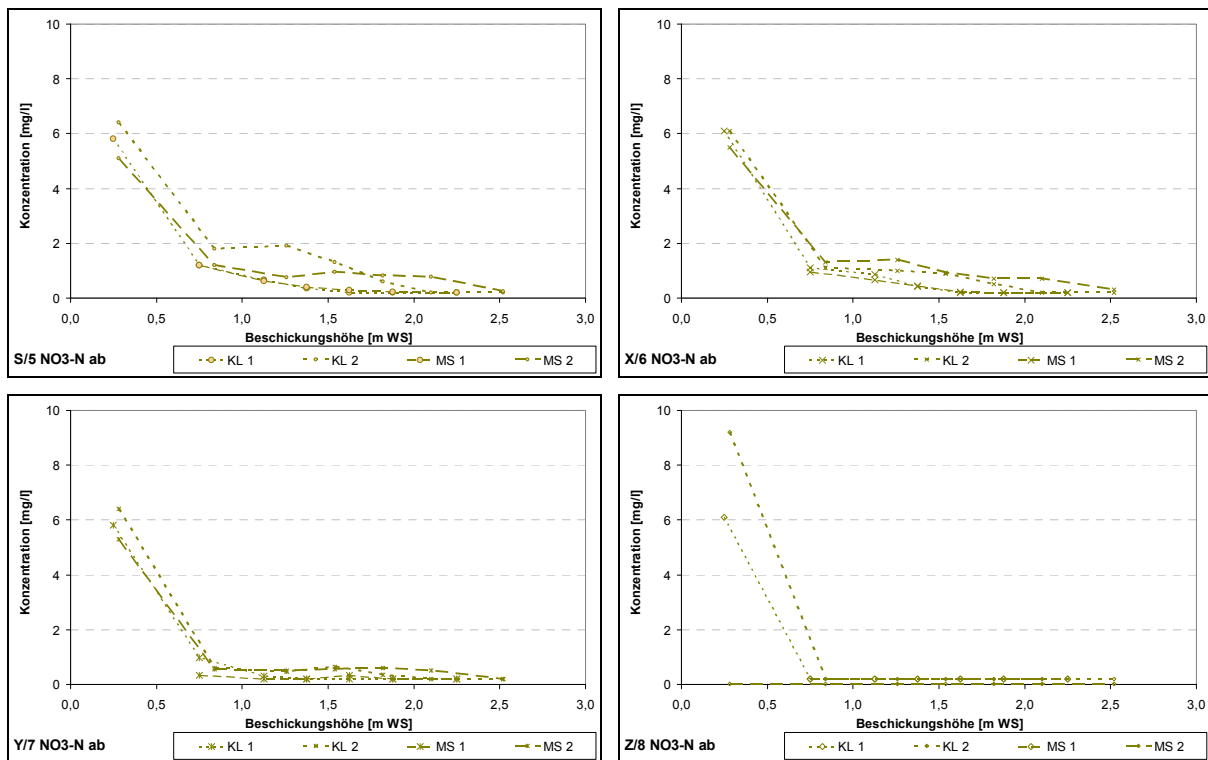
[Säule] = [Substrat] : S/5 = DWaII; X/6 = SUBI; Y/7 = SUBII; Z/8 = LS KL1 / KL2 bzw. MS1 / MS2 = 1. HL / 2. HL

**Bild-Anhang 5.31: NH4-N Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL**



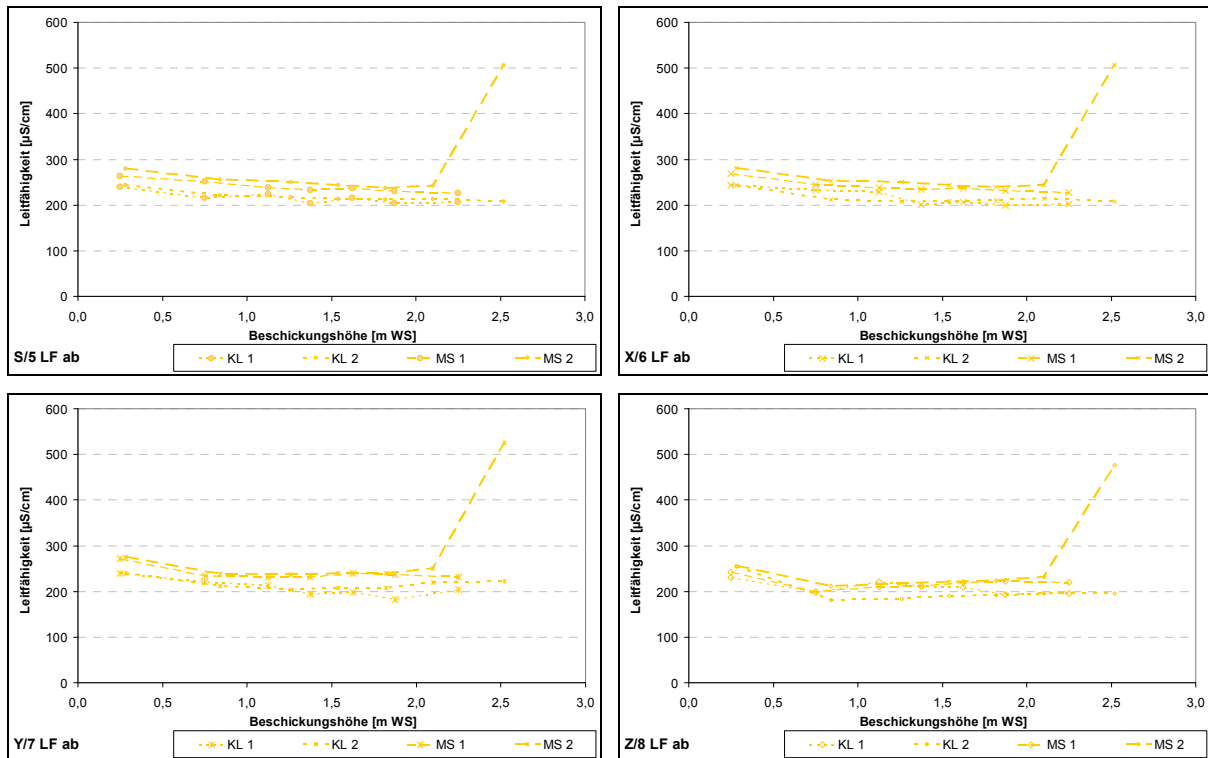
[Säule] = [Substrat] : S/5 = DWAll; X/6 = SUBI; Y/7 = SUBII; Z/8 = LS KL1 / KL2 bzw. MS1 / MS2 = 1. HL / 2. HL

**Bild-Anhang 5.32: NO<sub>2</sub>-N Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL**



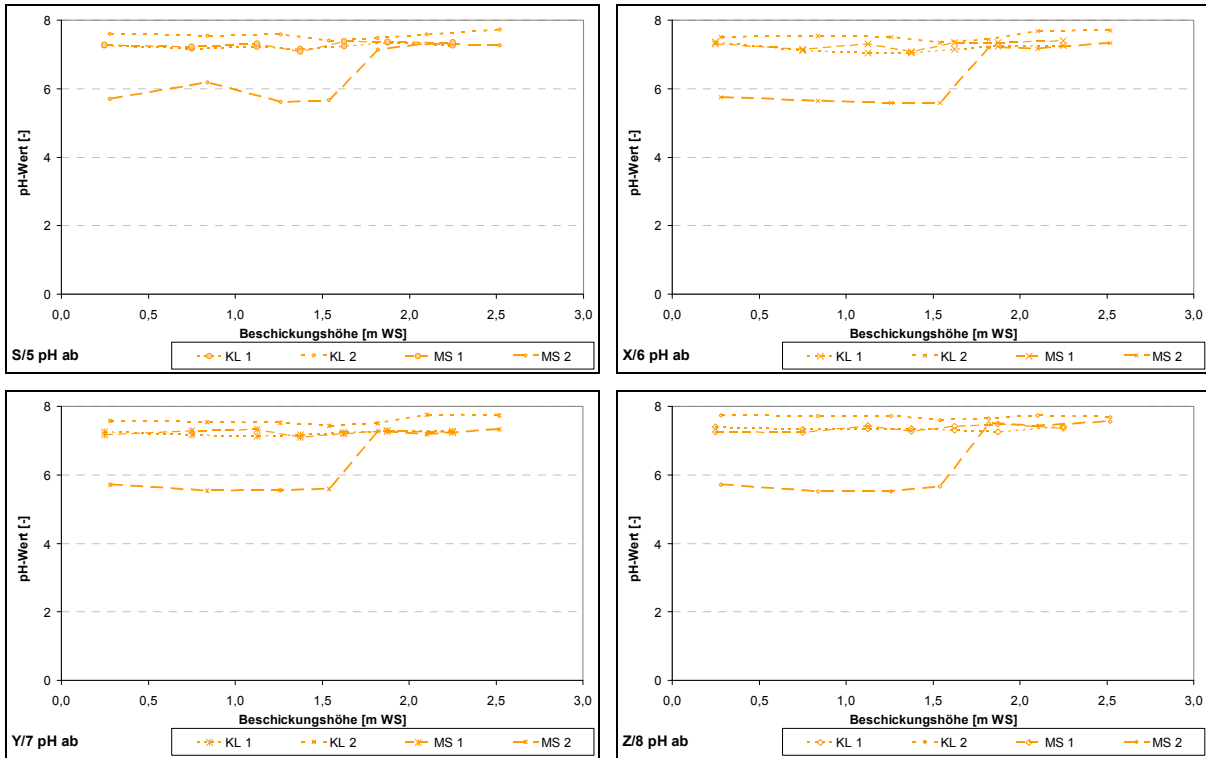
[Säule] = [Substrat] : S/5 = DWAll; X/6 = SUBI; Y/7 = SUBII; Z/8 = LS KL1 / KL2 bzw. MS1 / MS2 = 1. HL / 2. HL

**Bild-Anhang 5.33: NO<sub>3</sub>-N Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL**



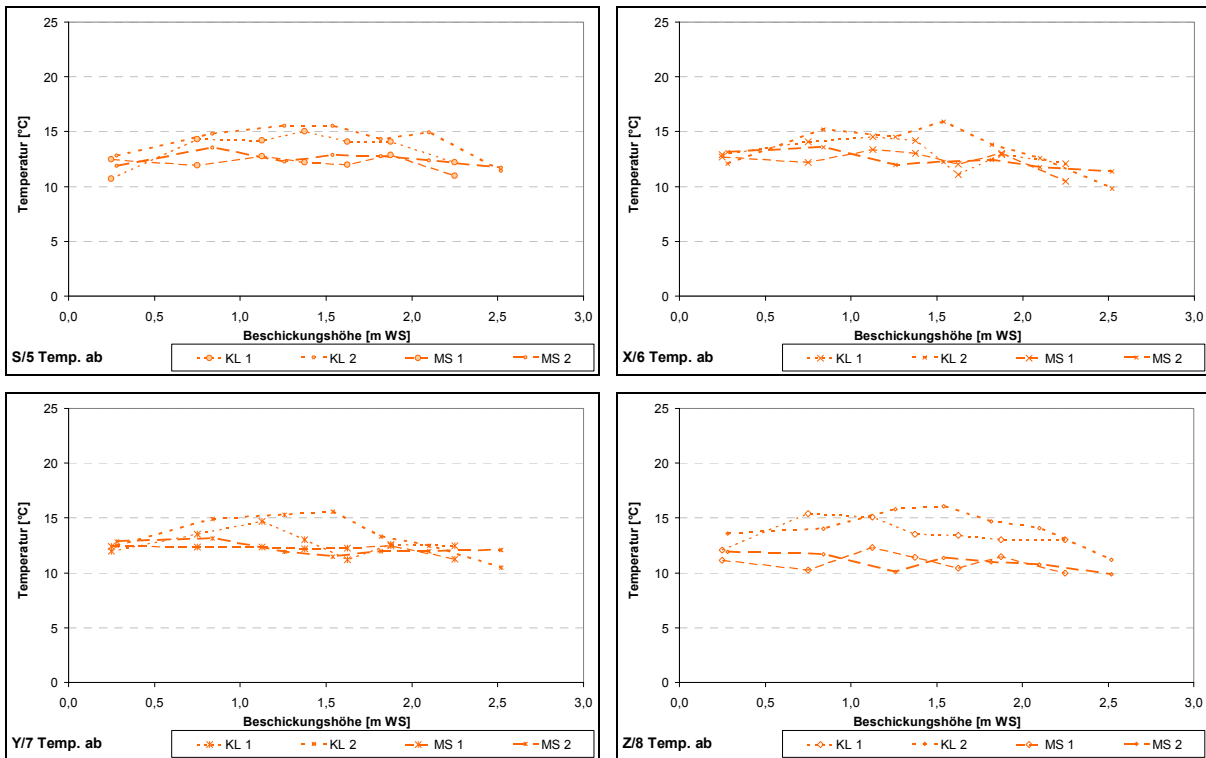
[Säule] = [Substrat] : S/5 = DWaII; X/6 = SUBI; Y/7 = SUBII; Z/8 = LS KL1 / KL2 bzw. MS1 / MS2 = 1. HL / 2. HL

**Bild-Anhang 5.34: Elektrische Leitfähigkeit Ablaufanglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL**



[Säule] = [Substrat] : S/5 = DWAll; X/6 = SUBI; Y/7 = SUBII; Z/8 = LS KL1 / KL2 bzw. MS1 / MS2 = 1. HL / 2. HL

**Bild-Anhang 5.35:** pH-Wert Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL



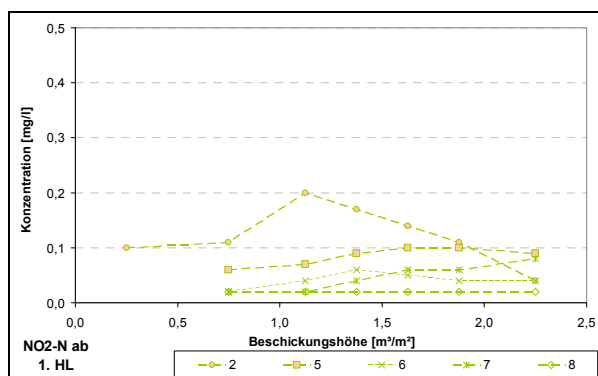
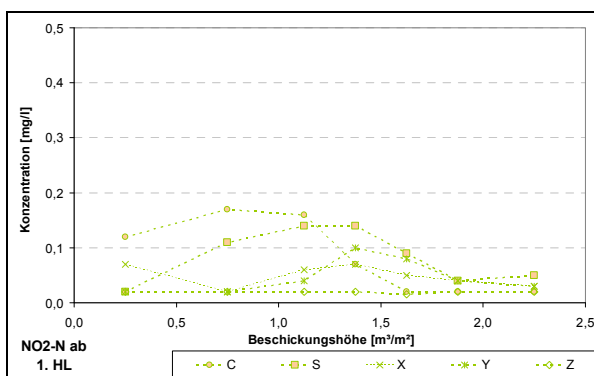
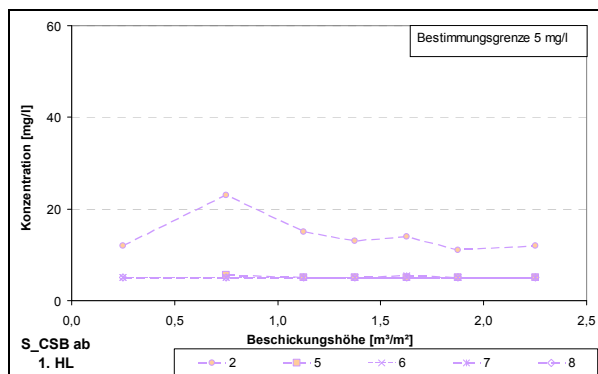
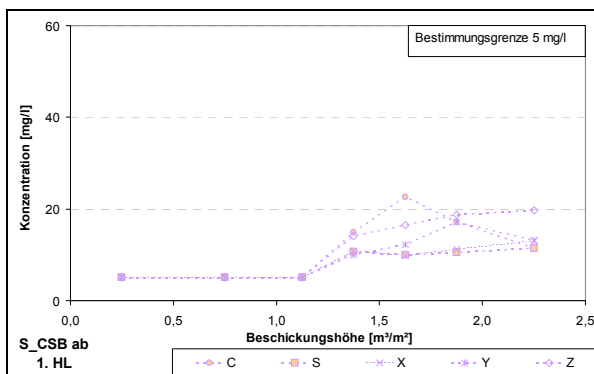
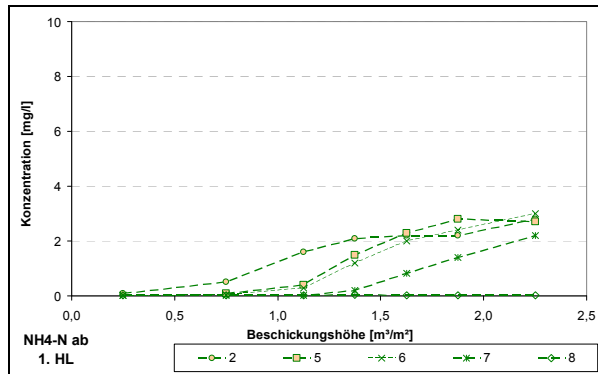
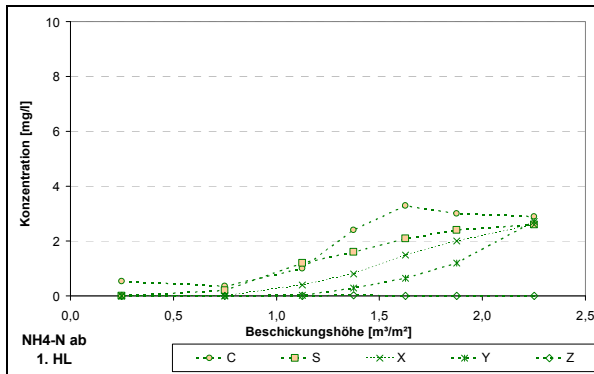
[Säule] = [Substrat] : S/5 = DWAll; X/6 = SUBI; Y/7 = SUBII; Z/8 = LS KL1 / KL2 bzw. MS1 / MS2 = 1. HL / 2. HL

**Bild-Anhang 5.36:** Temperatur Ablaufganglinien für die untersuchten Substrate des 1. und 2. HL

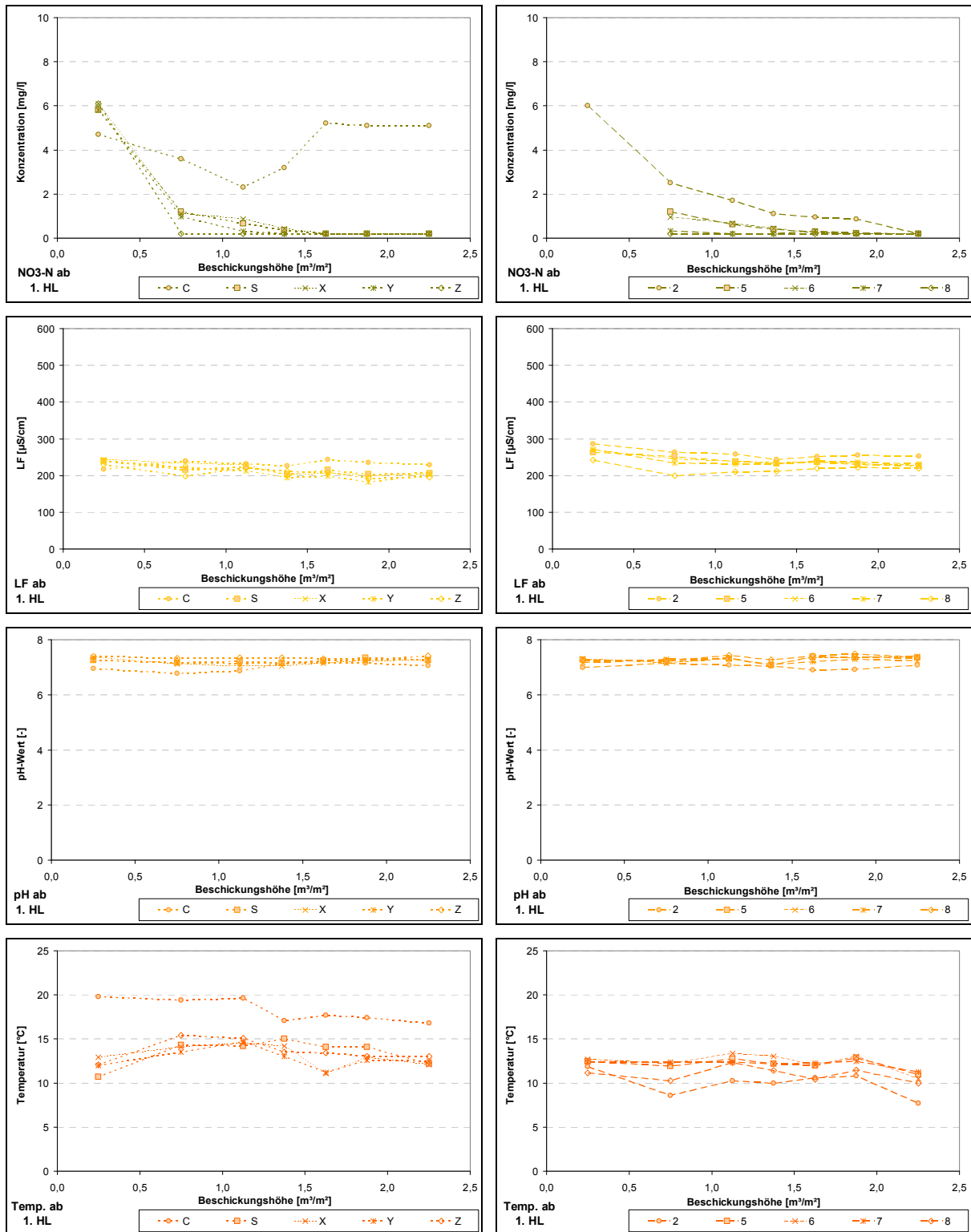
## Anhang 5.6 Ergebnisse des 1. und 2. HL der Verifikation

Darstellung sämtlicher Parameter des 1. und 2. Hochlastversuchs der Verifikation (Kapitel 5), nach Standorten gruppiert (TU KL: links FH MS: rechts)

### 1. Hochlastversuch:

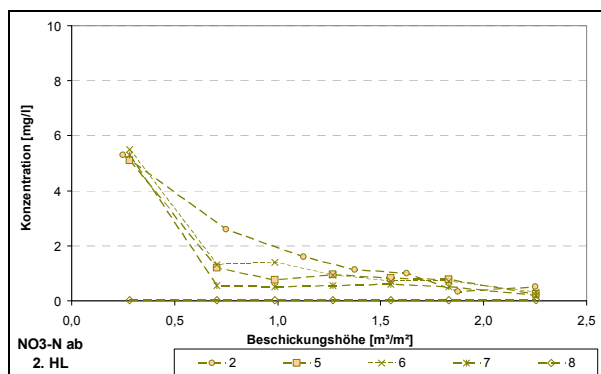
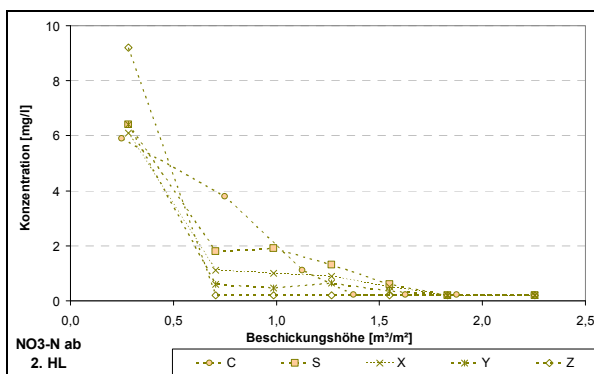
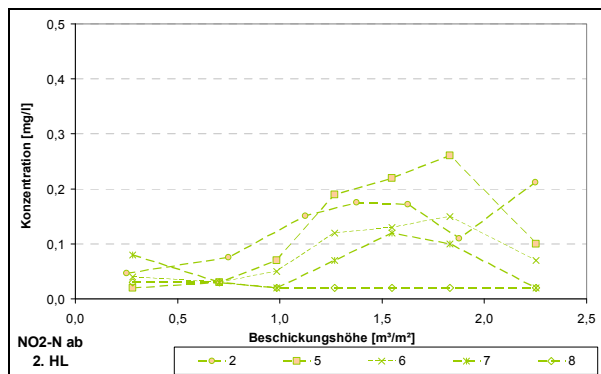
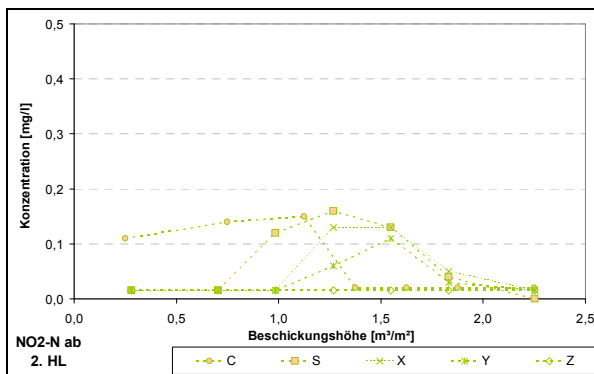
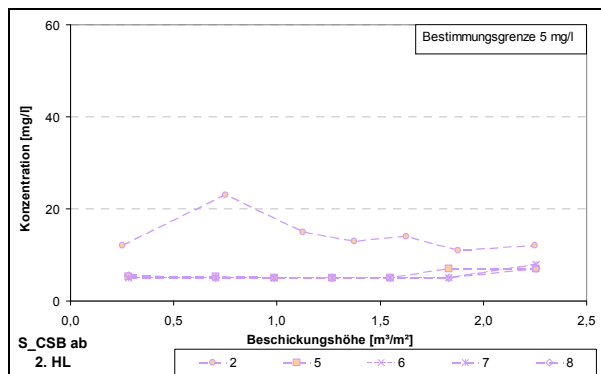
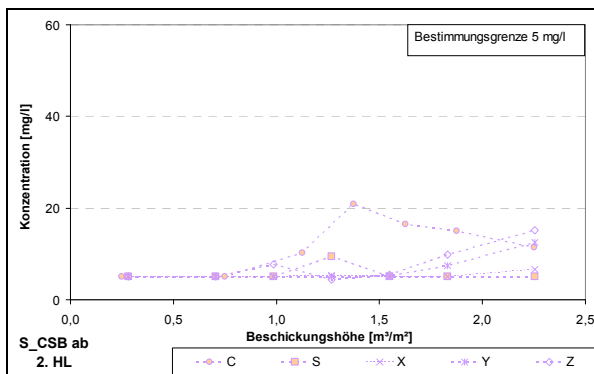
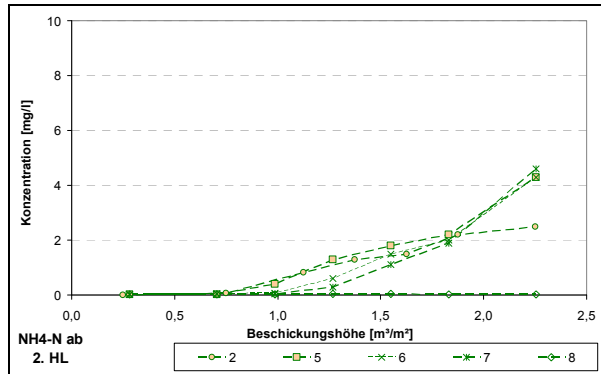
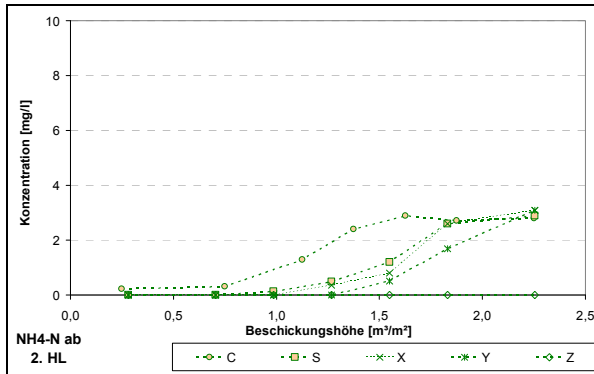


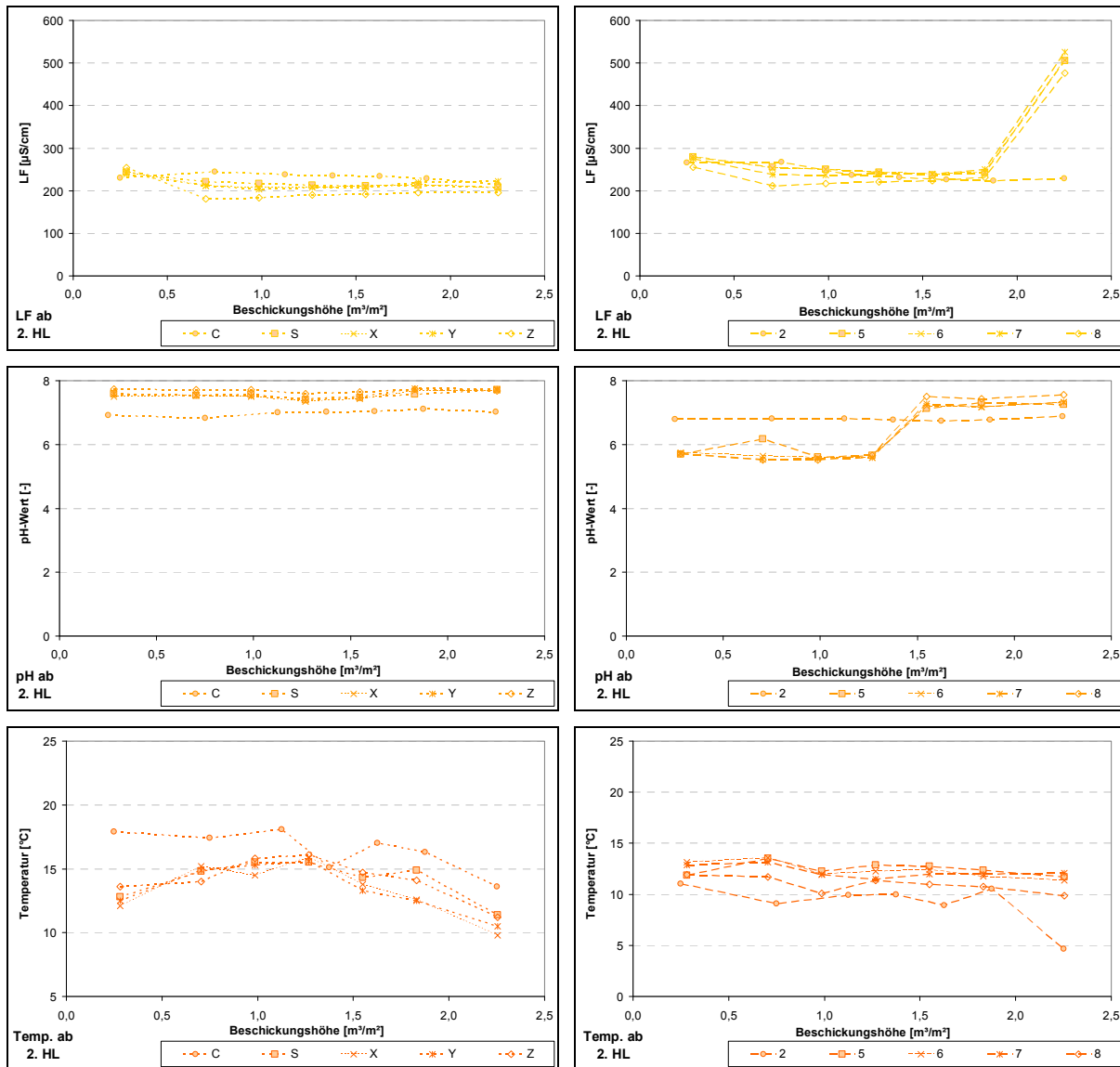




**Bild-Anhang 5.37:** Ablaufganlinien des 1. Hochlastversuchs für alle Substrate an beiden Standorten für die Parameter S\_CSB, NH4-N, NO2-N, NO3-N, LF, pH und Temperatur

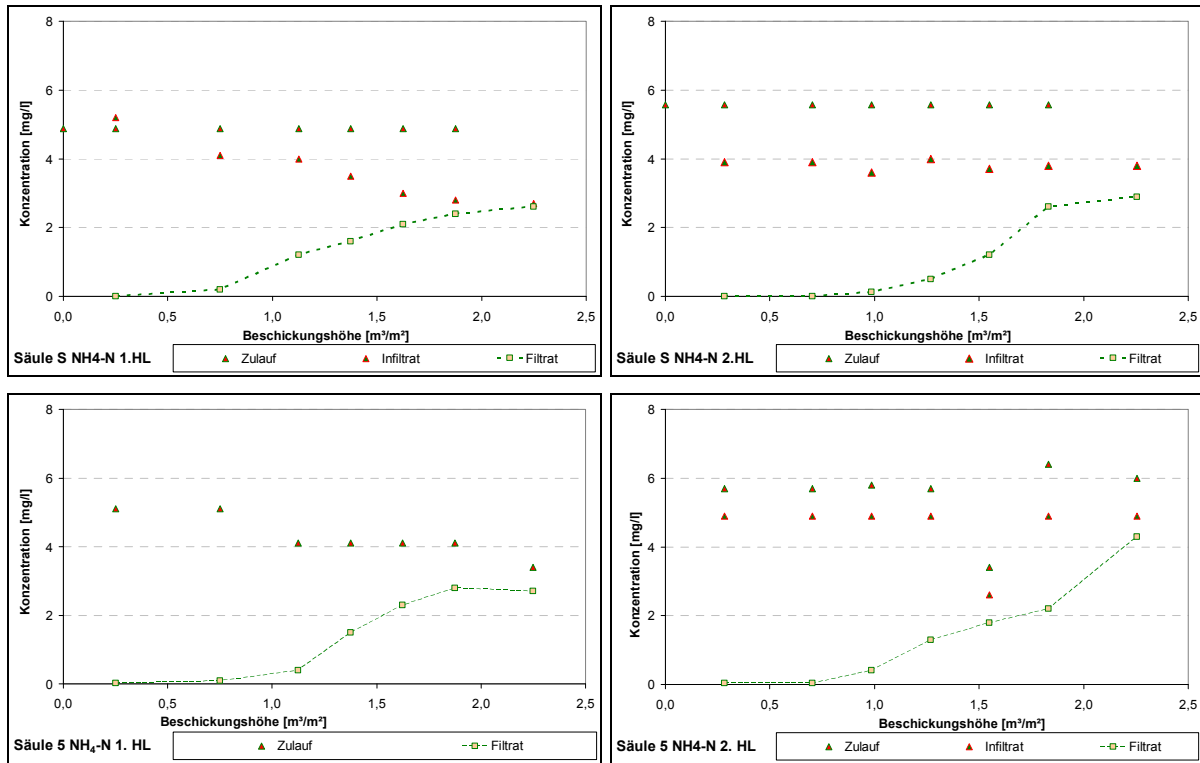
2. Hochlastversuch:





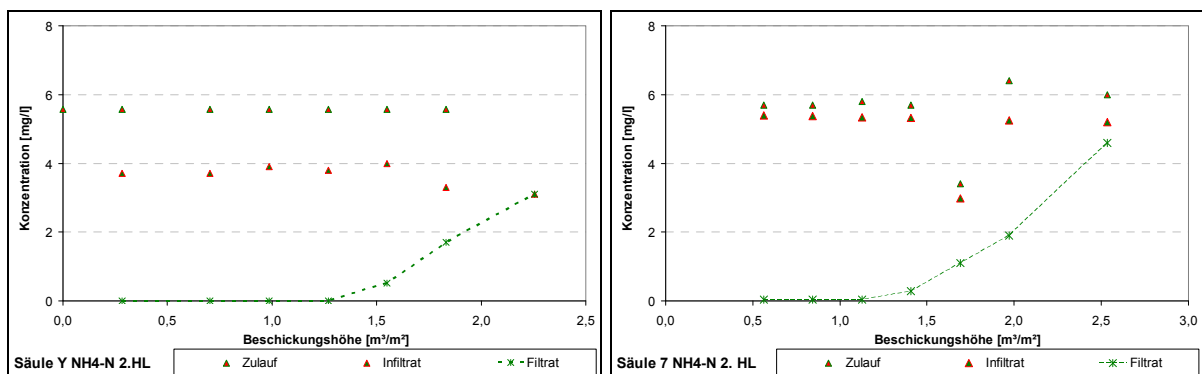
**Bild-Anhang 5.38:** Ablaufganglinien des 2. Hochlastversuchs für alle Substrate an beiden Standorten für die Parameter S\_CSB, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, LF, pH und Temperatur

### Anhang 5.7 Ergebnisse zum Frachtrückhalt



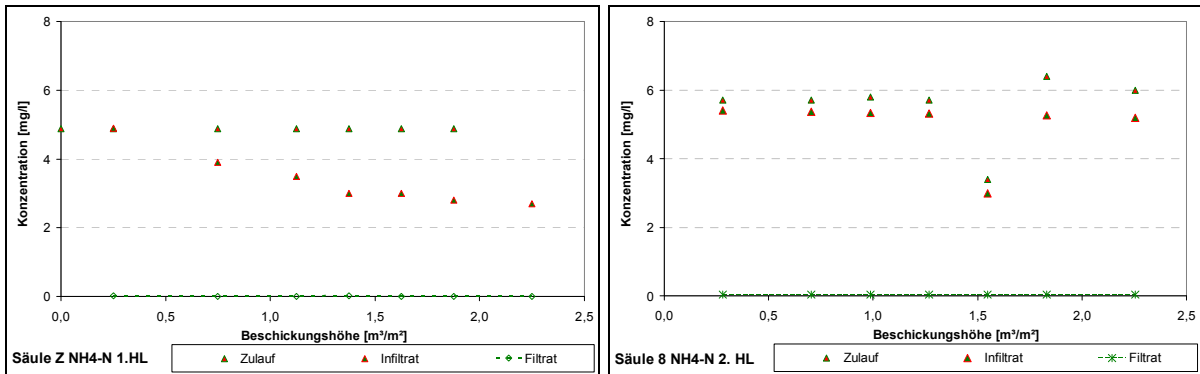
Zulauf: Beschickungswasser aus Vorlagebehälter; Infiltrat: Beschickungswasser nach Beschickung und vor Infiltration  
oben: TU KL; unten: FH MS

**Bild-Anhang 5.39: Verläufe der NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen von Zulauf, Infiltrat (Überstau) und Filtrat (Ablauf) des Substrates DWAll (1.+2. HL-Versuch)**



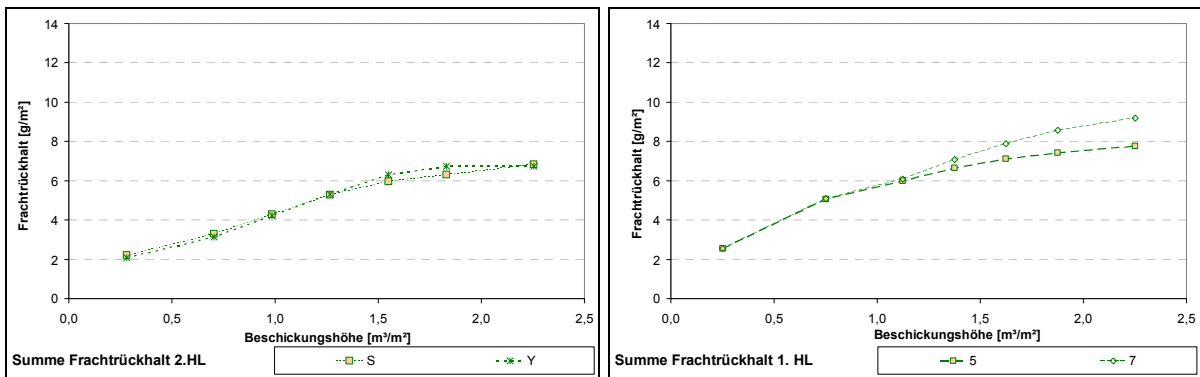
Zulauf: Beschickungswasser aus Vorlagebehälter; Infiltrat: Beschickungswasser nach Beschickung und vor Infiltration

**Bild-Anhang 5.40: Verläufe der NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen in Zulauf, Infiltrat und Filtrat des Substrates SUBII im 2. HL-Versuch**



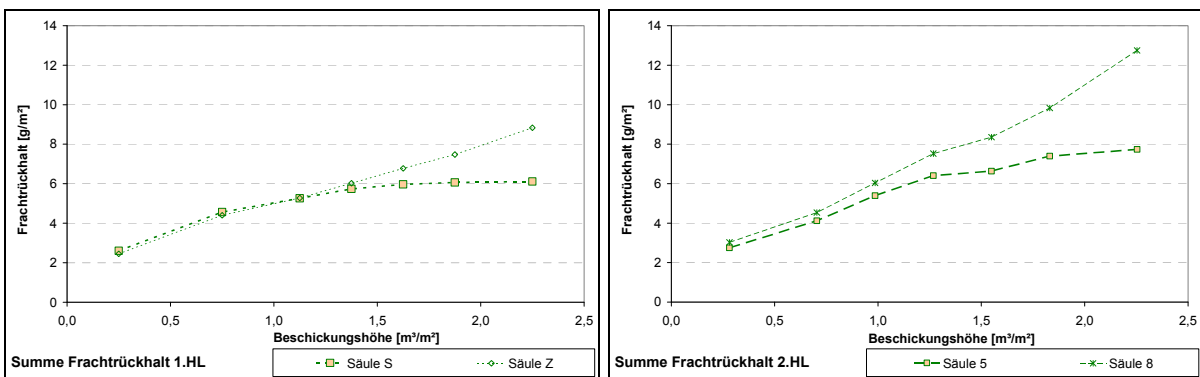
Zulauf: Beschickungswasser aus Vorlagebehälter; Überstau: infiltrierendes Beschickungswasser

**Bild-Anhang 5.41: Verläufe der NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen in Zulauf, Überstau und Ablauf des Substrates LS im 1. bzw. 2. HL-Versuch**



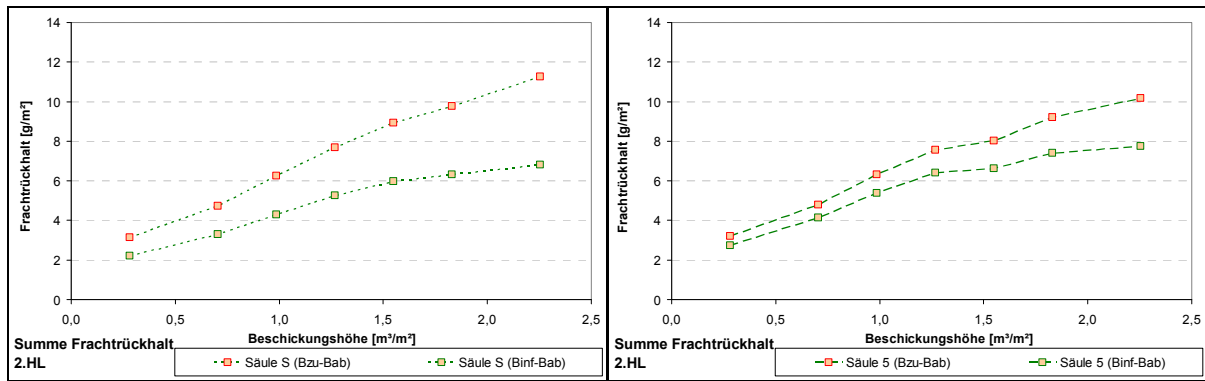
Substrat DWAll: Säule S (TU KL) und Säule 5 (FH MS) Substrat SUBII: Säule Y (TU KL) und 7 (FH MS)  
links: 2. HL-Versuch (TU KL) rechts: 1. HL-Versuch (FH MS)

**Bild-Anhang 5.42: Frachtrückhalt für NH<sub>4</sub>-N im Filtersubstrat DWAll und SUBII**



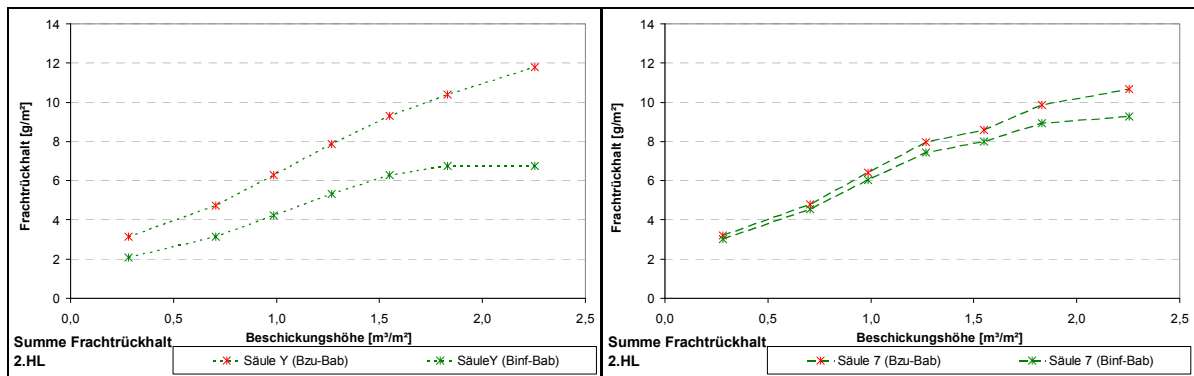
Substrat DWAll: Säule S (TU KL) und Säule 5 (FH MS) Substrat LS: Säule Z (TU KL) und 8 (FH MS)  
links: 1. HL-Versuch (TU KL) rechts: 2. HL-Versuch (FH MS)

**Bild-Anhang 5.43: Frachtrückhalt für NH<sub>4</sub>-N im Filtersubstrat DWAll und LS**



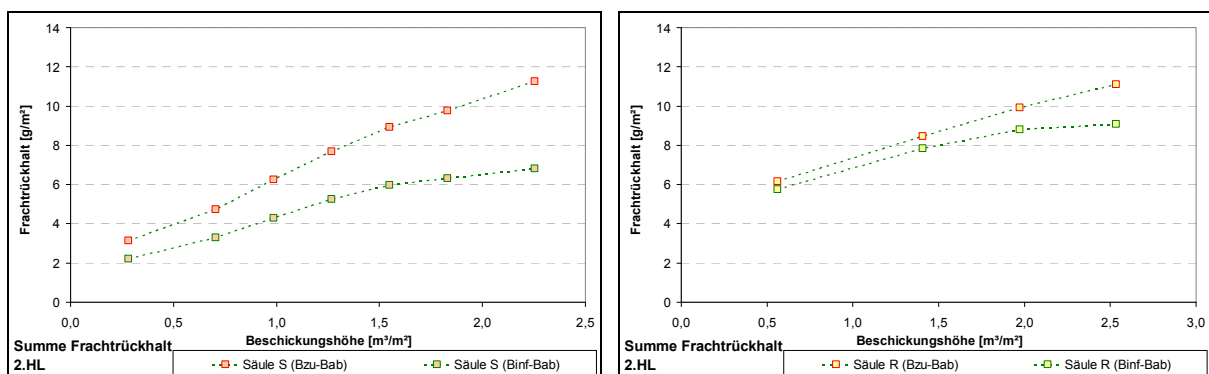
Säulen S/5 (Bzu-Bab) Frachtrückhalt der Säule als Differenz von Zulauf- und Abflafracht  
 Säulen S/5 (Binf-Bab) Frachtrückhalt der Säule als Differenz von Infiltrat- und Abflafracht  
 links: 2. HL-Versuch (TU KL) rechts: 2. HL-Versuch (FH MS)

**Bild-Anhang 5.44: Frachtrückhalt für NH<sub>4</sub>-N in der Gesamtsäule und im Filtersubstrat DWII**



Säulen Y/7 (Bzu-Bab) Frachtrückhalt der Säule als Differenz von Zulauf- und Abflafracht  
 Säulen Y/7 (Binf-Bab) Frachtrückhalt der Säule als Differenz von Infiltrat- und Abflafracht  
 links: 2. HL-Versuch (TU KL) rechts: 2. HL-Versuch (FH MS)

**Bild-Anhang 5.45: Frachtrückhalt für NH<sub>4</sub>-N in der Gesamtsäule und im Filtersubstrat SUBII**



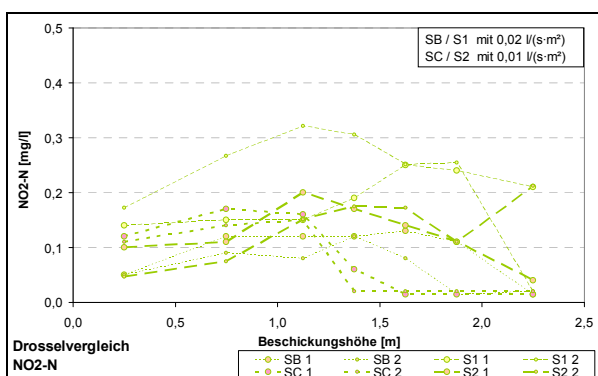
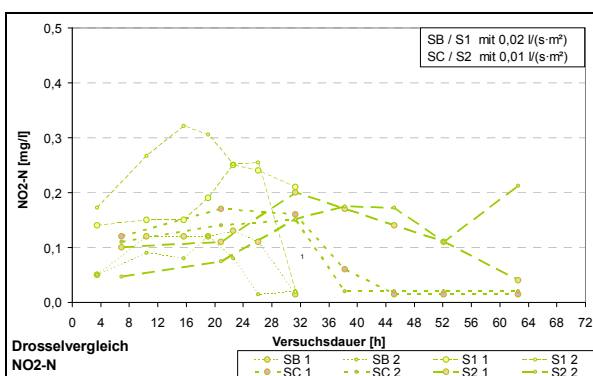
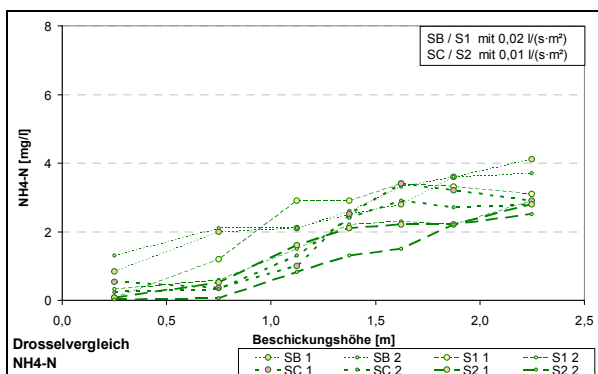
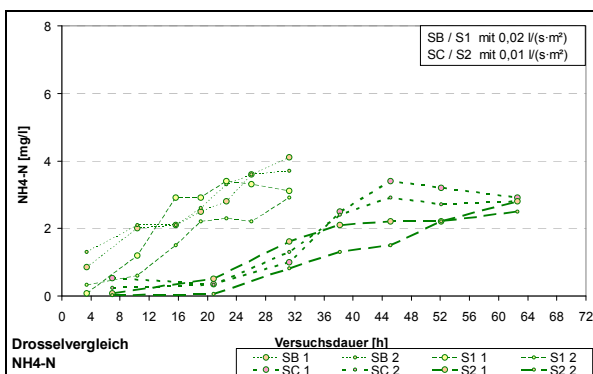
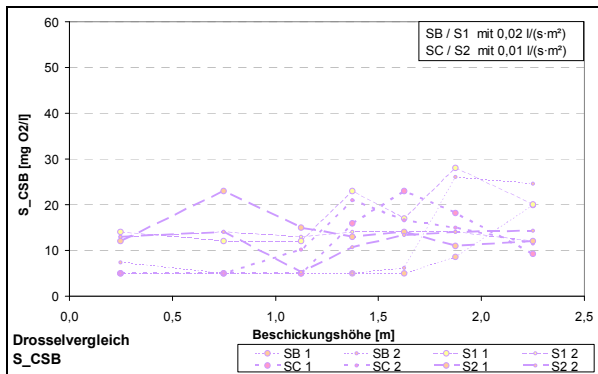
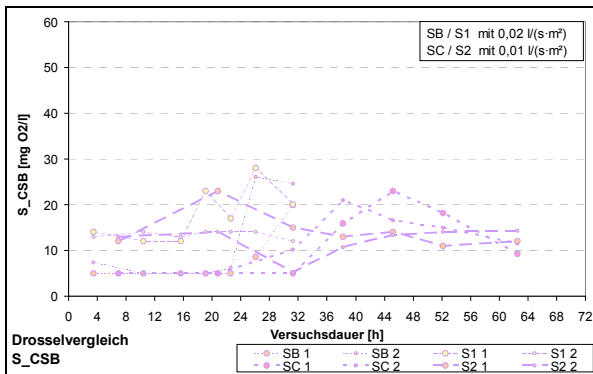
Säulen S/R (Bzu-Bab) Frachtrückhalt der Säule als Differenz von Zulauf- und Abflafracht  
 Säulen S/R (Binf-Bab) Frachtrückhalt der Säule als Differenz von Infiltrat- und Abflafracht  
 links: Drosselabfluss q<sub>d</sub>=0,01 l/s·m<sup>2</sup>, 2. HL-Versuch (TU KL) rechts: Drosselabfluss q<sub>d</sub>=0,02 l/s·m<sup>2</sup>, 2. HL-Versuch (TU KL)

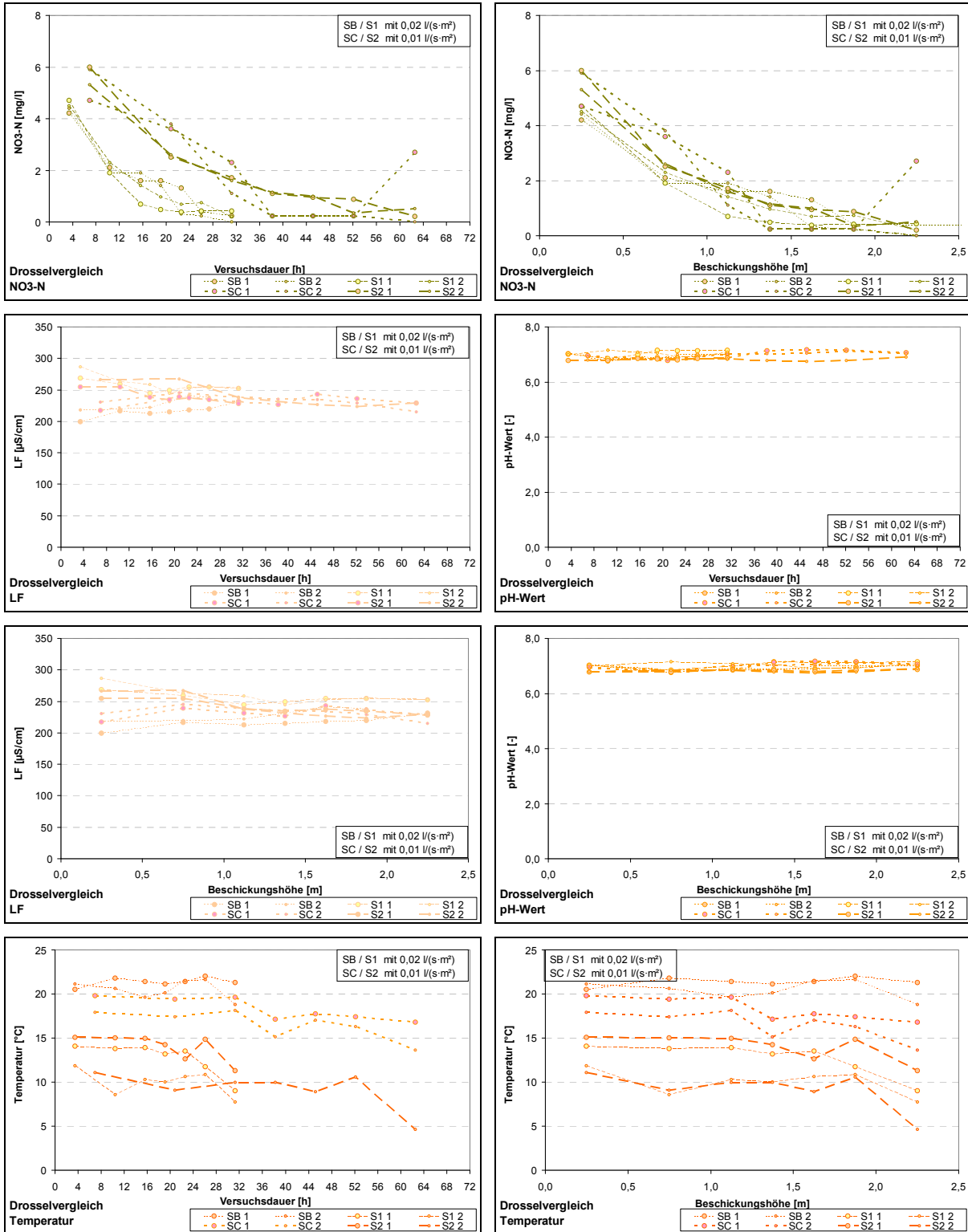
**Bild-Anhang 5.46: Frachtrückhalt für NH<sub>4</sub>-N in der Gesamtsäule und im Filtersubstrat DWII bei unterschiedlicher Abflussdrosselung**

# Anhang 6 Ergebnisse zu Kapitel 6 (Einflüsse der Abflussdrosselung)

## Anhang 6.1 Drosselvergleich am Substrat DWA I

Darstellung des Drosselvergleich 0,01 und 0,02 l/s·m<sup>2</sup> mit Substrat DWA I aus der Standardisierung (Kapitel 4.2.5) für alle Parameter



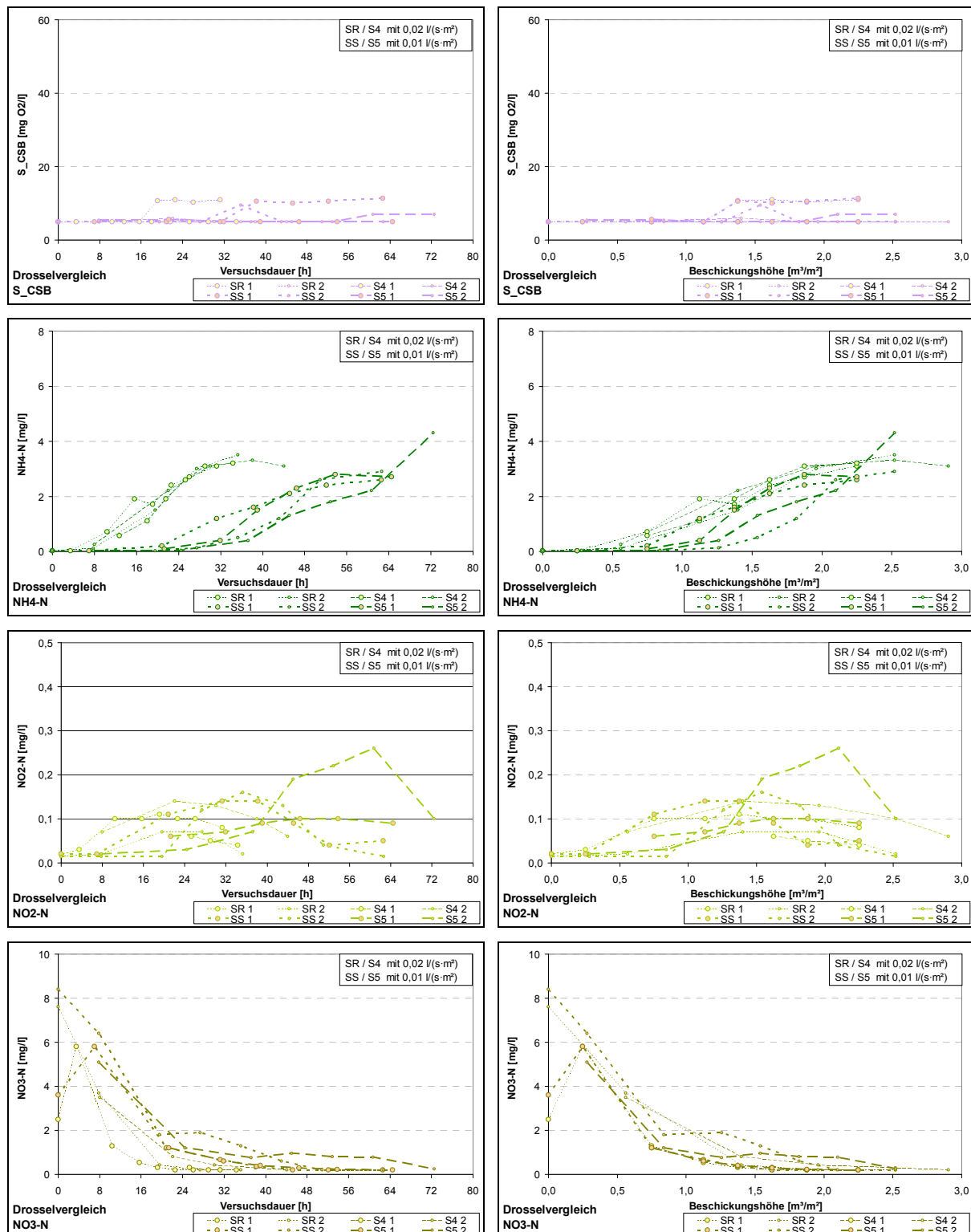


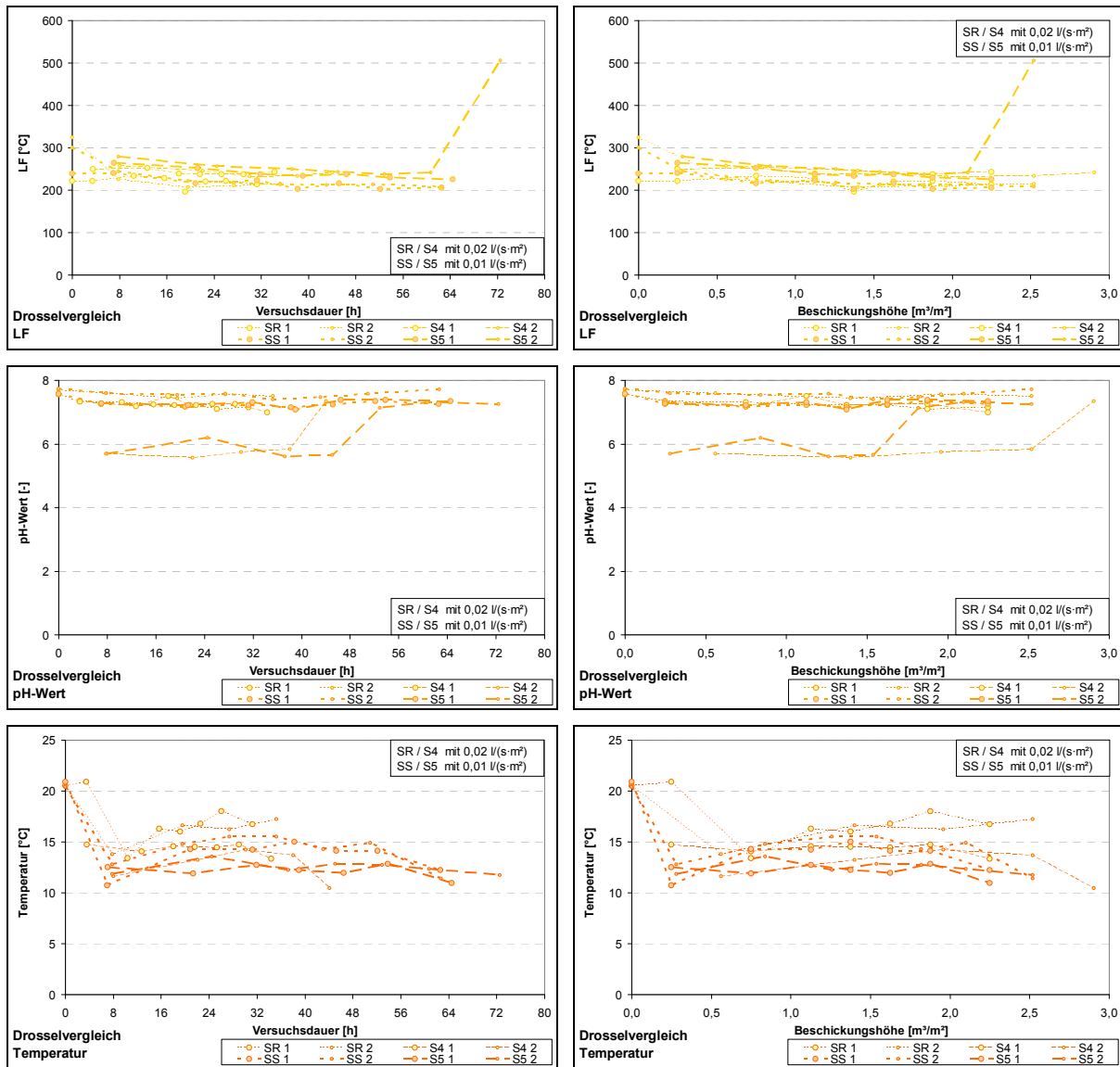
**Bild-Anhang 6.47:** Ablaufganglinien des Substrats DWAI für 2 Drosseleinstellungen (TU KL und FH MS) über Versuchsdauer (links) und über die Beschickungshöhe en für die Parameter S\_CSB, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, LF, pH und Temperatur



## Anhang 6.2 Drosselvergleich am Substrat DWA II

Darstellung des Drosselvergleich 0,01 und 0,02 l/s·m<sup>2</sup> mit Substrat DWAII aus der Verifikation (Kapitel 5.2.2)





**Bild-Anhang 6.48:** Ablaufganglinien des Substrats DWAI für 2 Drosselinstellungen (TU KL + FH MS) über Versuchsdauer (links) und über die Beschiebungshöhe (rechts) für die Parameter S\_CSB, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, LF, pH und Temperatur

### Anhang 6.3 Daten der Nicht-DWA-Substrate für den Parameter NH4-N

Tabelle-Anhang 6.12: Übersicht der Frachten, Frachtrückhalte und Wirkungsgrade (Säulen TU KL)

Nr.	Substrat	Versuch	qd	Fracht			Frachtrückhalt			Wirkungsgrad		
				$B_{Zu}$	$B_{Inf}$	$B_{Fil}$	$\Delta B_R$	$\Delta B_{ges}$	$\Delta B_s$	$\eta_{ges}$	$\eta_R$	$\eta_s$
	[-]	[-]	[l/s·m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]
7	SUBII	(HL2)	0,01	14,2	9,1	2,4	5,1	11,8	6,7	83	36	74
8	LS	(HL1)	0,01	12,2	8,8	0,0	3,4	12,2	8,8	100	28	100

B = Fracht;  $\Delta$  = Frachtrückhalt;  $\eta$  = Wirkungsgrad; ..Zu = Zulauf; ..Inf = Infiltrat; ..Ab = Ablauf; ..R = Retentionsraum; ..s = Substrat;  
 ..ges = Versuchssäule; n.b.: nicht bestimmt, da keine Überstauproben vorhanden;  
 \*1: identisch mit Zulauffracht, da kein Abbau in Überstau;  
 \*2: kein Abbau im Überstau;

Tabelle-Anhang 6.13: Übersicht der Frachten, Frachtrückhalte und Wirkungsgrade (Säulen FH MS)

Nr.	Substrat	Versuch	qd	Fracht			Frachtrückhalt			Wirkungsgrad		
				$B_{Zu}$	$B_{Inf}$	$B_{Fil}$	$\Delta B_R$	$\Delta B_{ges}$	$\Delta B_s$	$\eta_{ges}$	$\eta_R$	$\eta_s$
	[-]	[-]	[l/s·m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]
8	LS	(HL2)	0,01	14,2	13,5	0,1	14,1	0,7	13,4	99	5	99

B = Fracht;  $\Delta$  = Frachtrückhalt;  $\eta$  = Wirkungsgrad; ..Zu = Zulauf; ..Inf = Infiltrat; ..Ab = Ablauf; ..R = Retentionsraum; ..s = Substrat;  
 ..ges = Versuchssäule; n.b.: nicht bestimmt, da keine Überstauproben vorhanden;

## Anhang 7 Ergebnisse zu Kapitel 7 (Überprüfung der Handlungsanleitung)

Darstellung der Untersuchungsergebnisse von Einfahrphase und Prüfphasen aus der Überprüfung der Handlungsanleitung des Substrates DWAll mit unterschiedlichen Drosselabflusspenden.

### Anhang 7.1 Einfahrphase Überprüfung der Handlungsanleitung (Kapitel 7.2.1)

Darstellung der Ergebnisse der 6 Beschickungen der Parameter CSB, S\_CSB und NH4-N

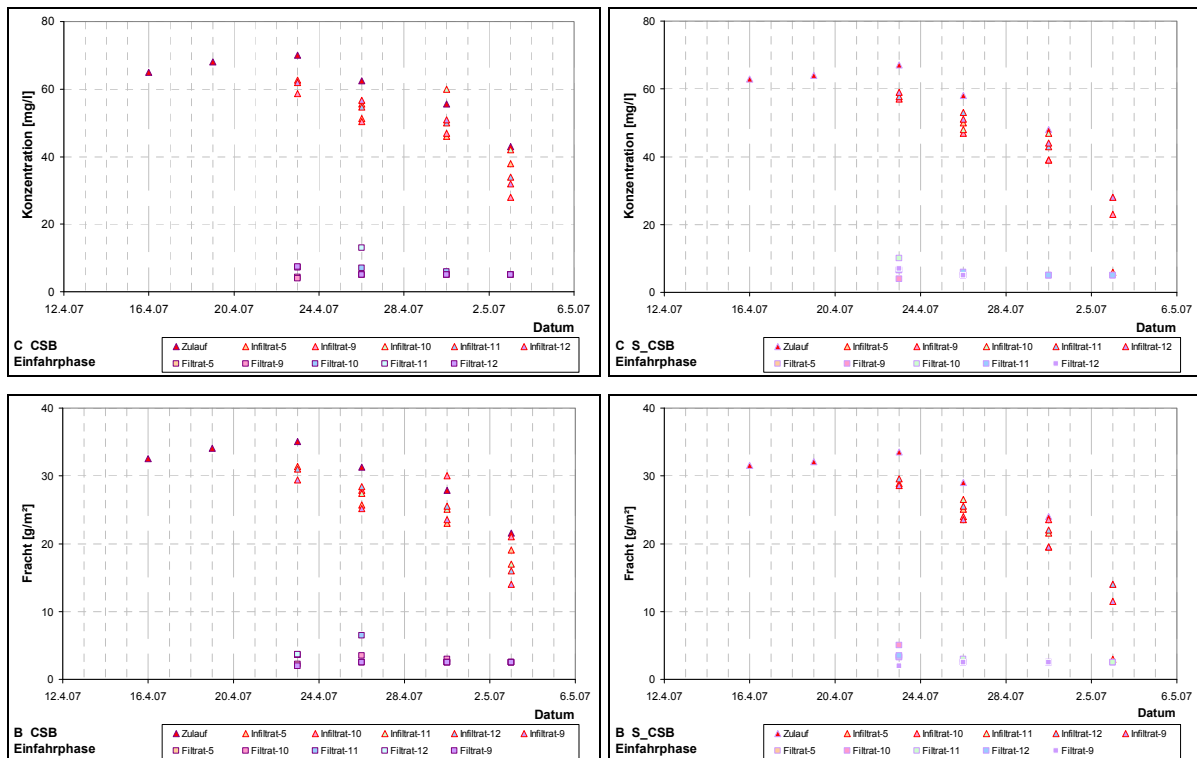
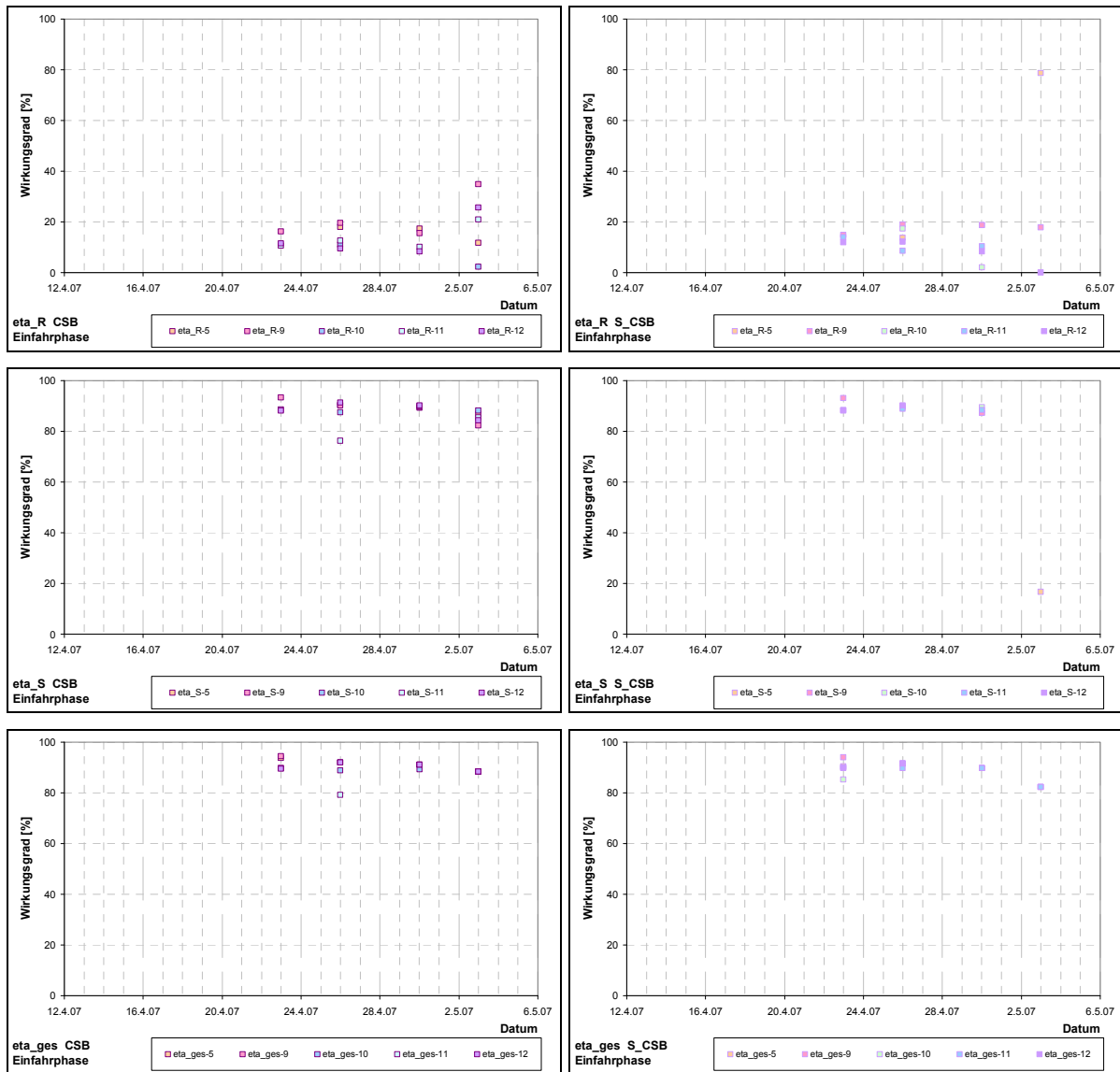
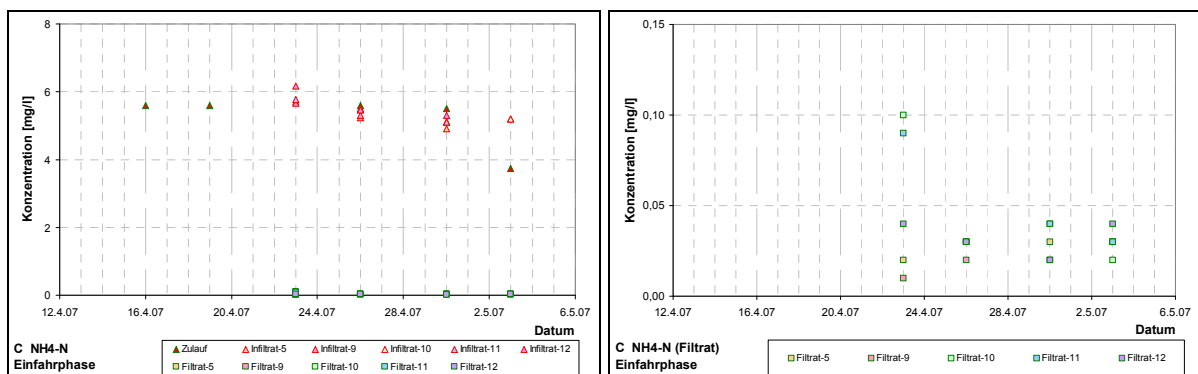


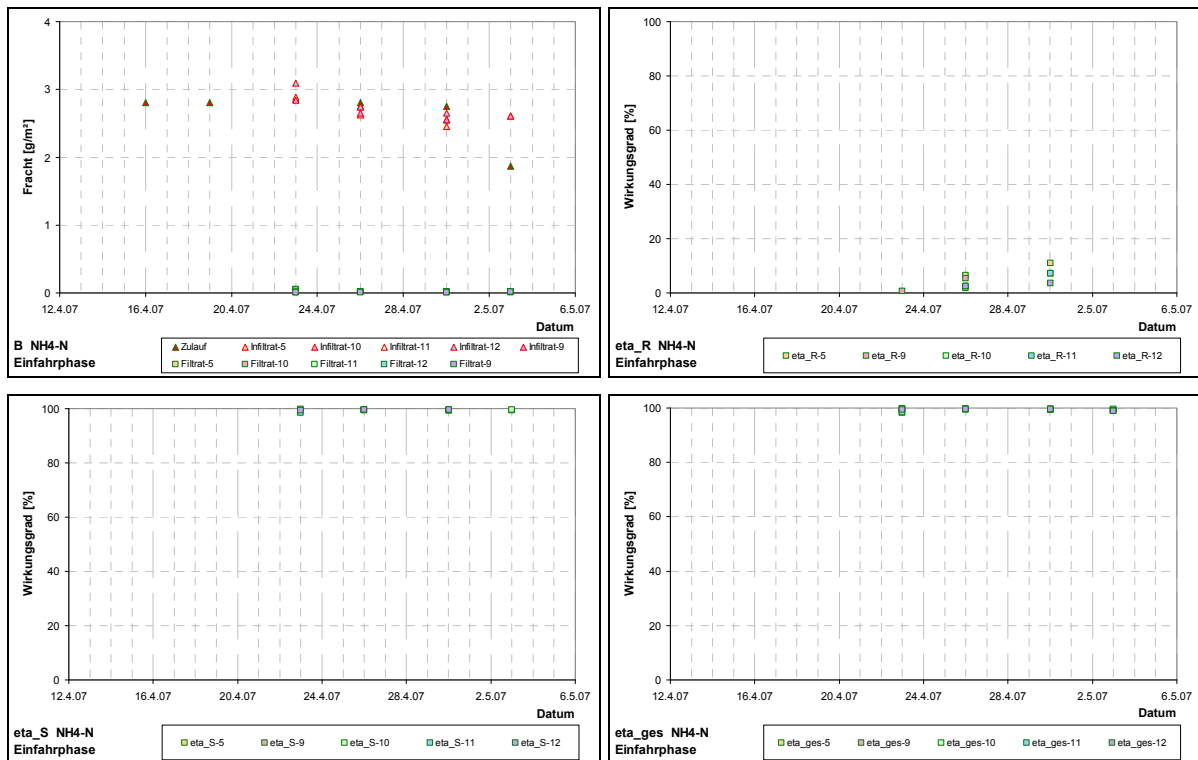
Bild-Anhang 7.49: Konzentrationen (oben) und Frachten (unten) für CSB (links) und S\_CSB (rechts)



**Bild-Anhang 7.50:** Wirkungsgrade des Retentionsraums (oben), des Substrats (mitte) und der gesamten Säule (unten) für CSB (links) und S\_CSB (rechts)



**Bild-Anhang 7.51: NH<sub>4</sub>-N Konzentrationen aller Proben der Einfahrphase (links) und der Filtratproben im Detail (rechts)**



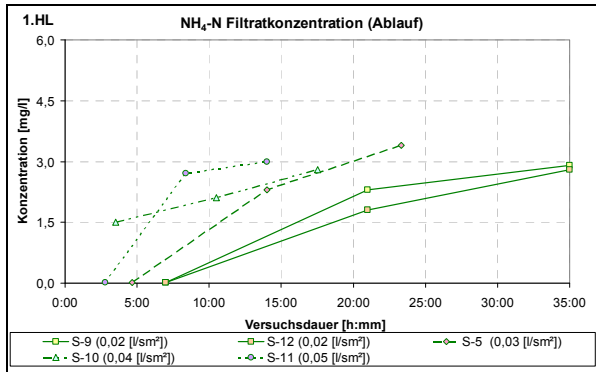
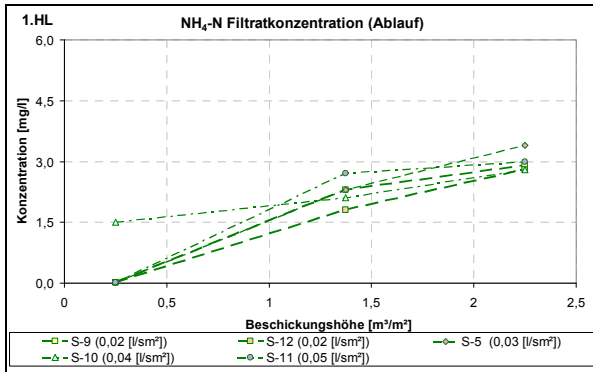
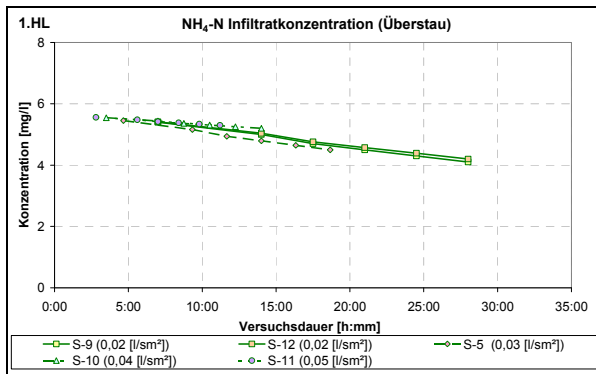
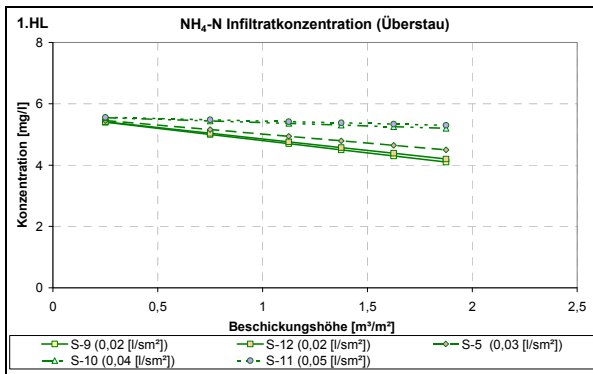
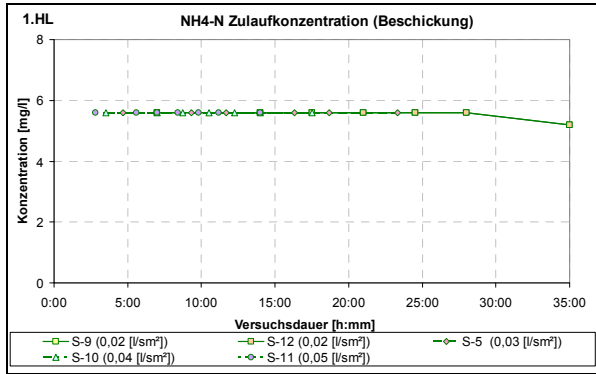
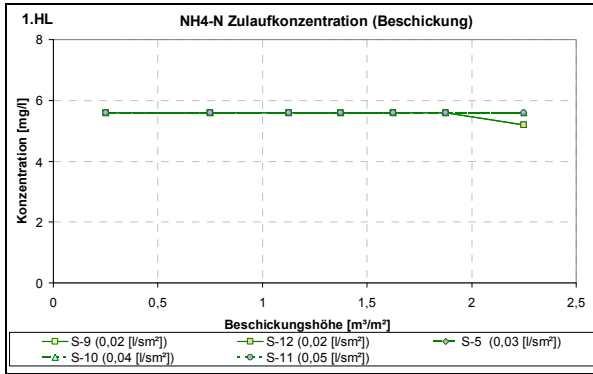
**Bild-Anhang 7.52 Wirkungsgrade des Retentionsraums (oben), des Substrats (mitte) und der gesamten Säule (unten) für CSB (links) und S\_CSB (rechts)**

### Prüfphasen der Überprüfung der Handlungsanleitung

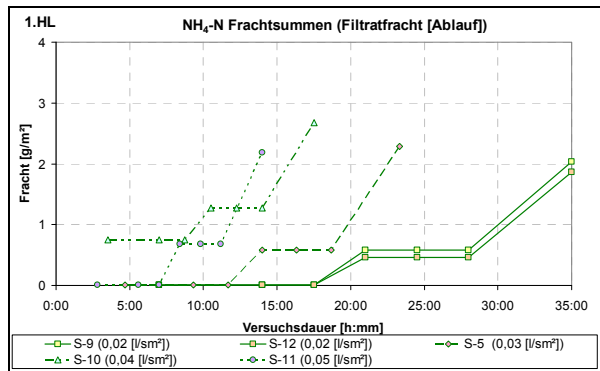
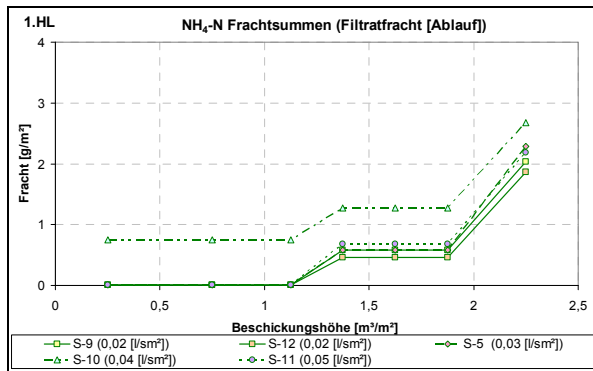
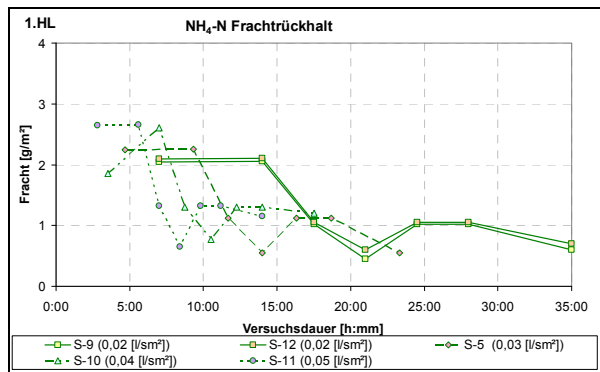
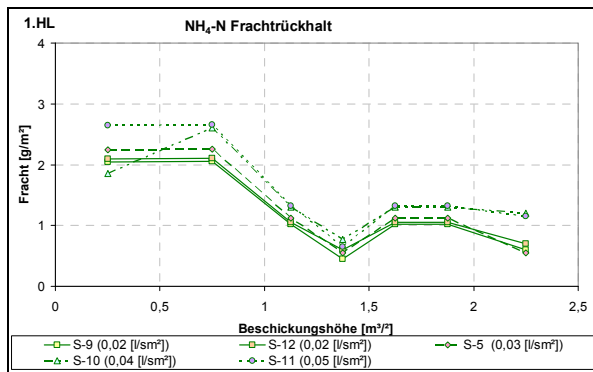
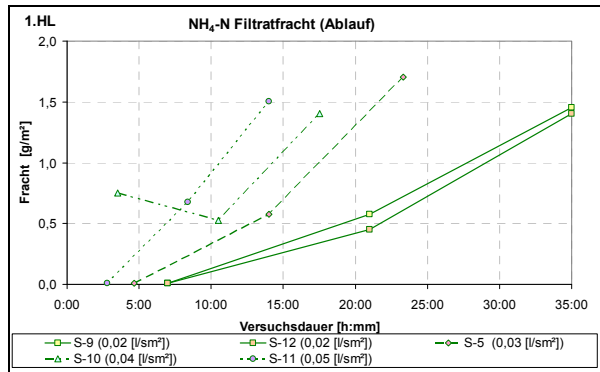
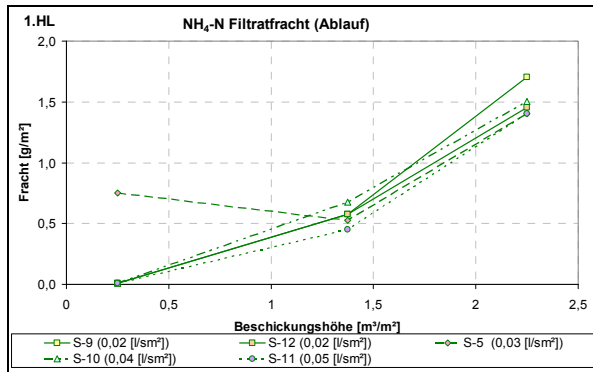
Darstellung der Ergebnisse der 4 Hochlastversuche mit unterschiedlichen Drosselabflussspenden (0,02; 0,03; 0,04; 0,05 l/s·m<sup>2</sup>) aus der Überprüfung der Handlungsanleitung (Kapitel 7.2.2). Die Ergebnisse (Ordinate) für NH<sub>4</sub>-N und S\_CSB sind einerseits mit der Beschickungshöhe (linke Abbildungsspalte) und andererseits mit der Versuchsdauer (rechte Abbildungsspalte) auf der Abszisse dargestellt.

# Anhang 7.2 1. Hochlastversuch

## NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen

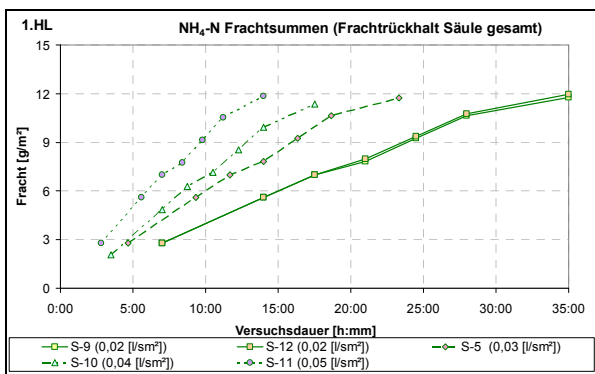
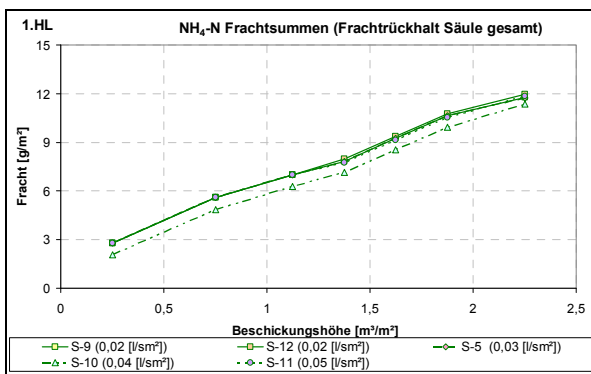
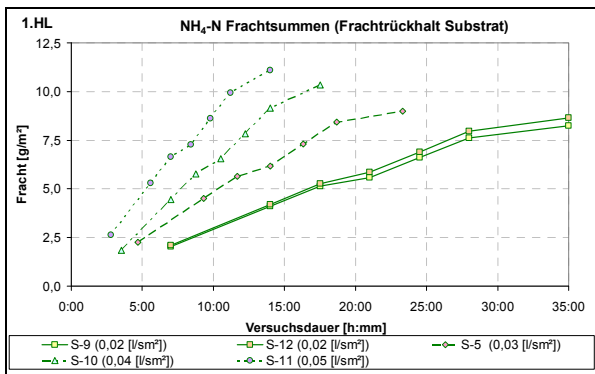
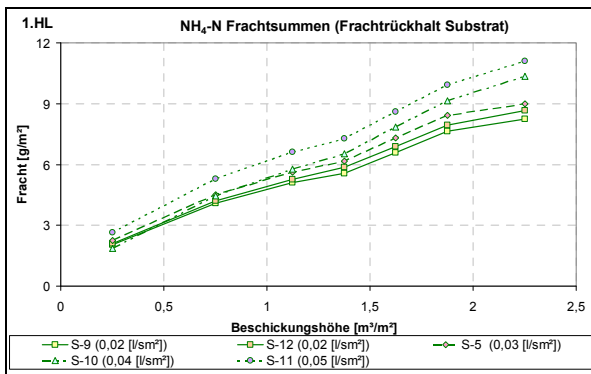
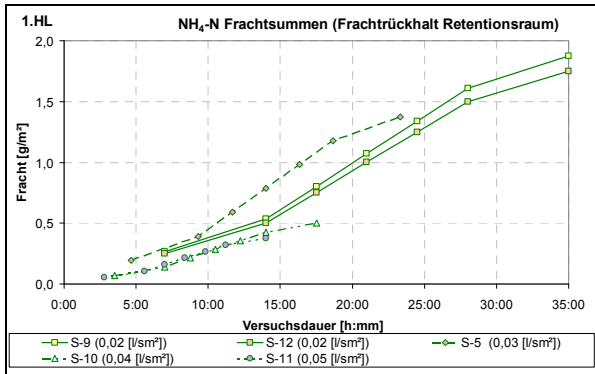
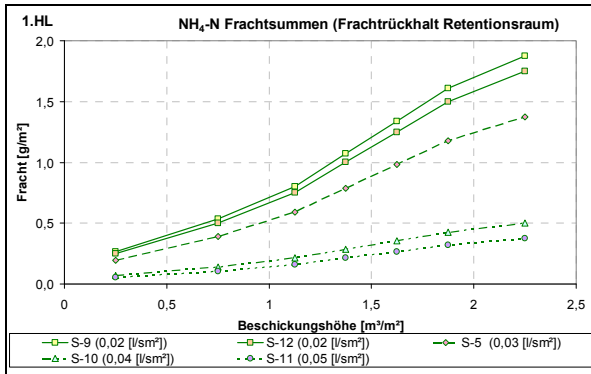


NH<sub>4</sub>-N-Frachten

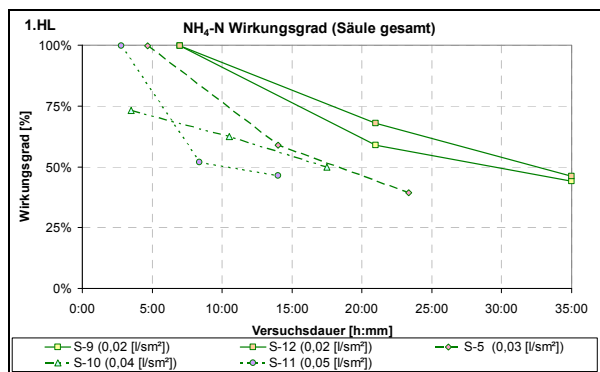
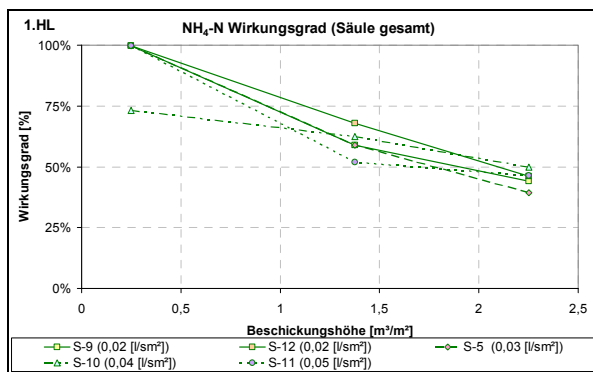
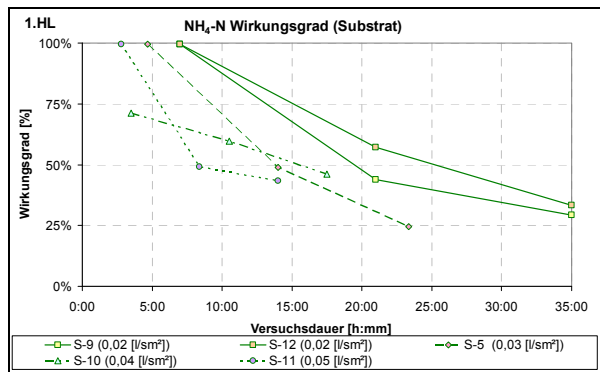
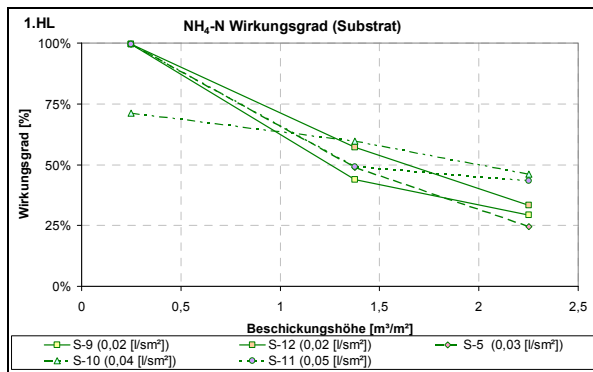
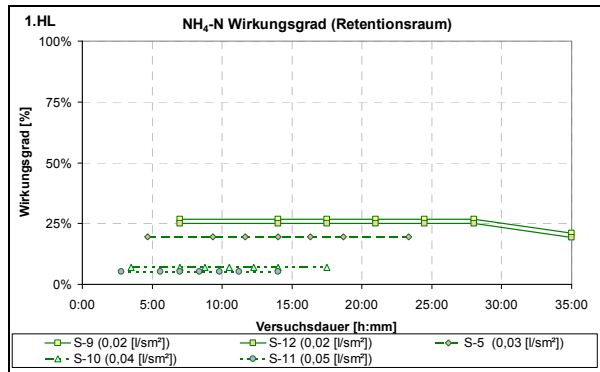
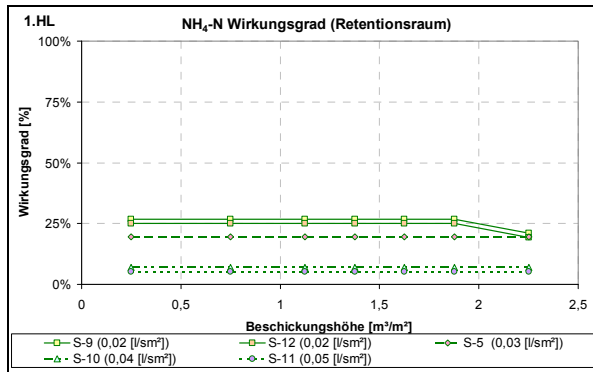




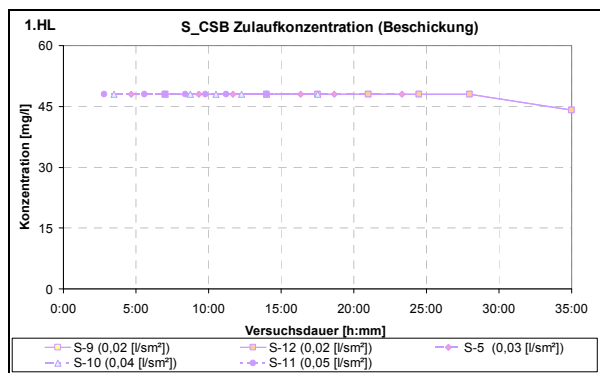
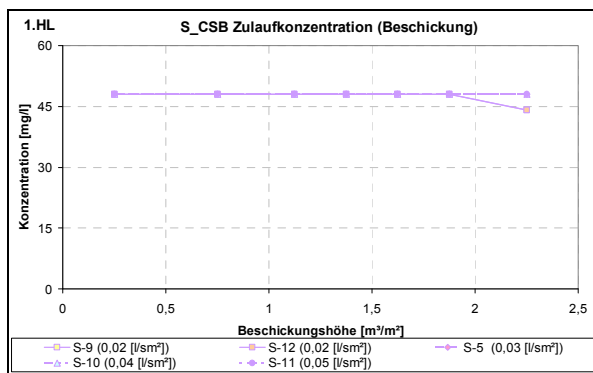
NH<sub>4</sub>-N-Frachtrückhalte als Summenlinien

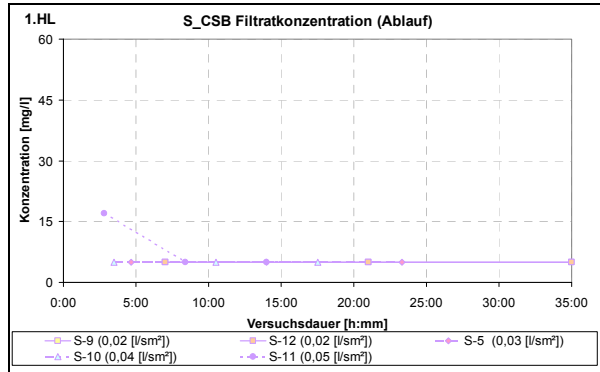
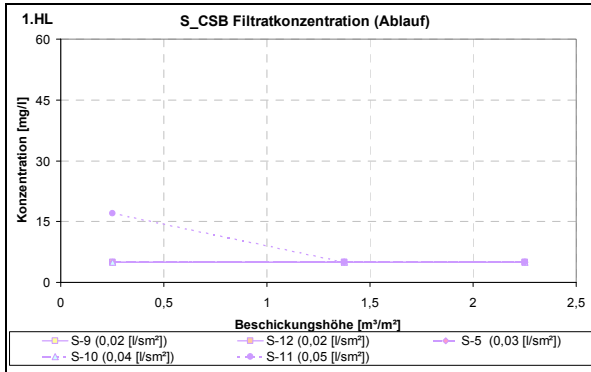
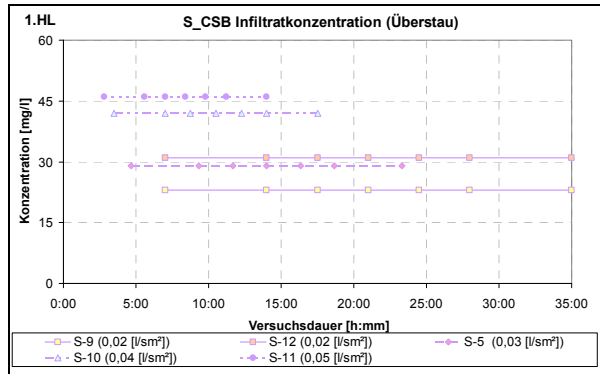
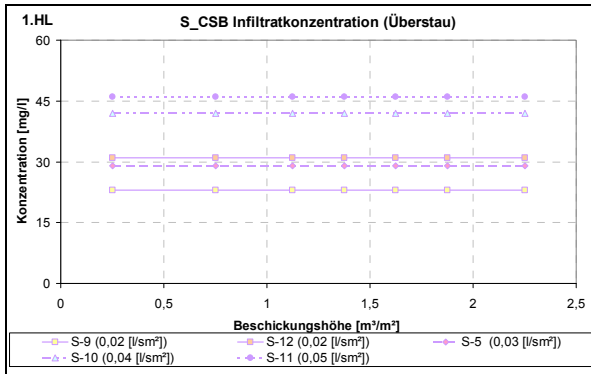


NH<sub>4</sub>-N-Wirkungsgrade

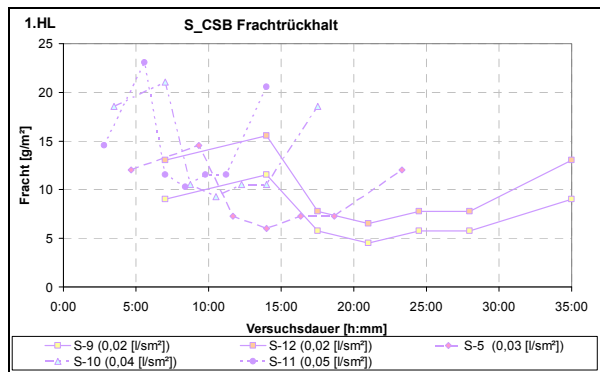
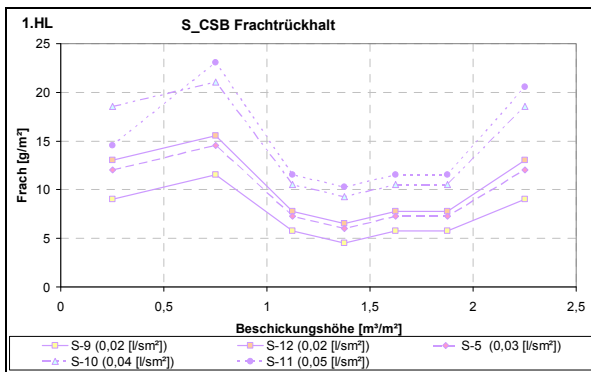
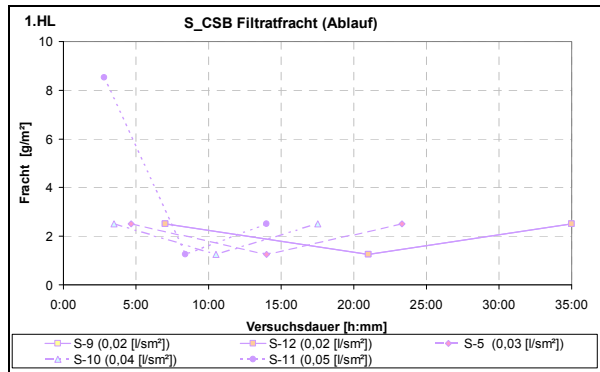
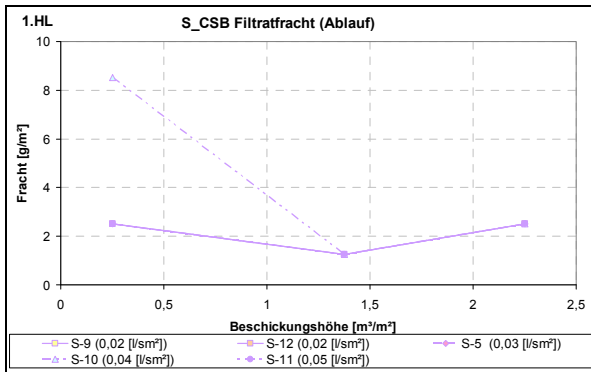


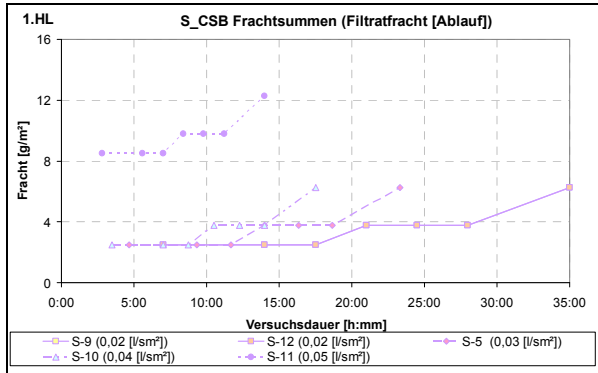
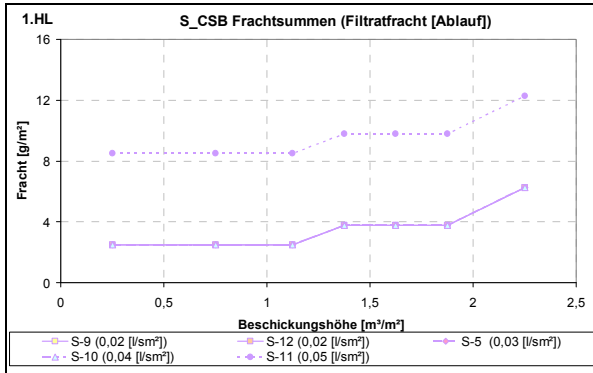
S<sub>CSB</sub>-Konzentrationen



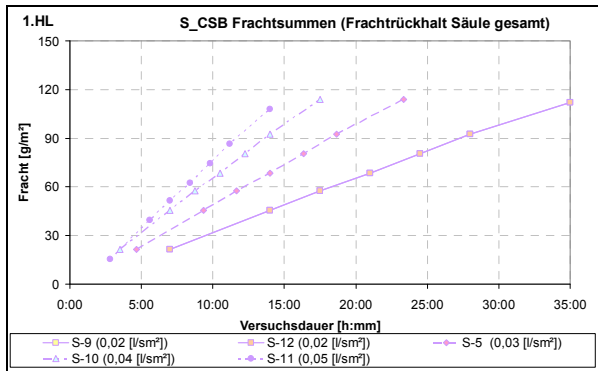
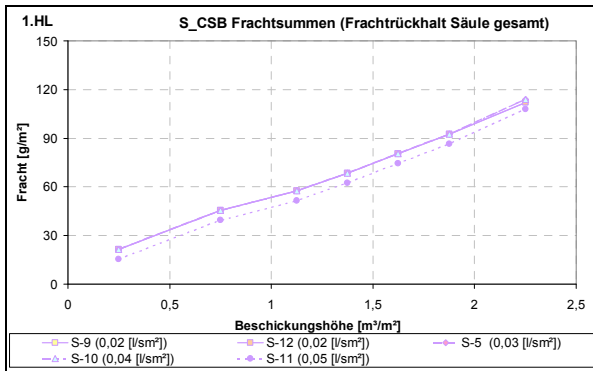
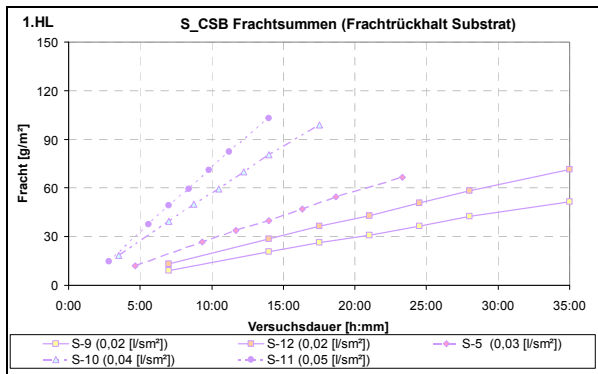
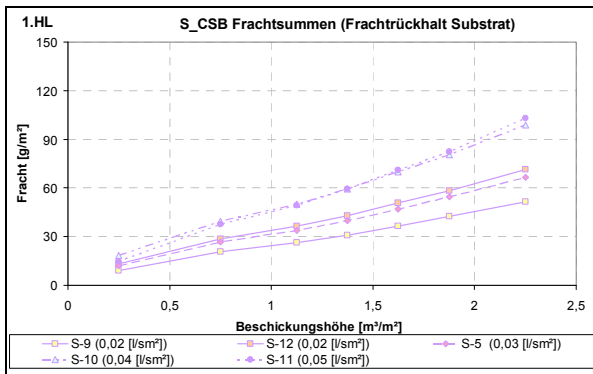
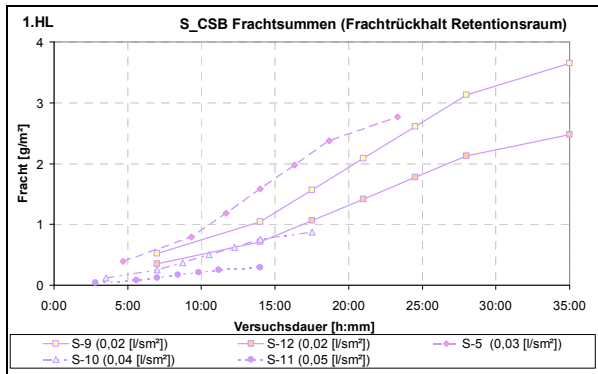
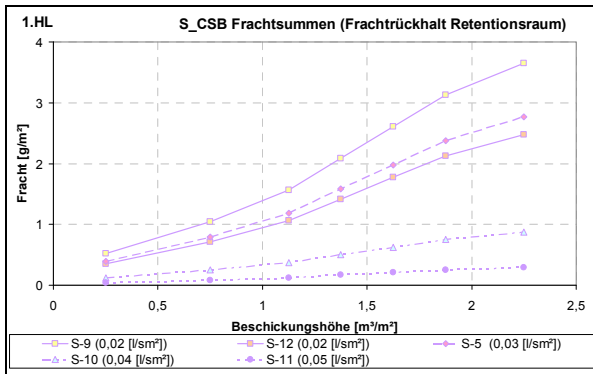


S\_CSB-Frachten

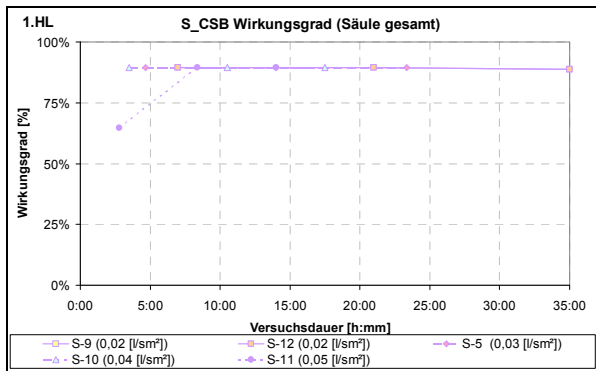
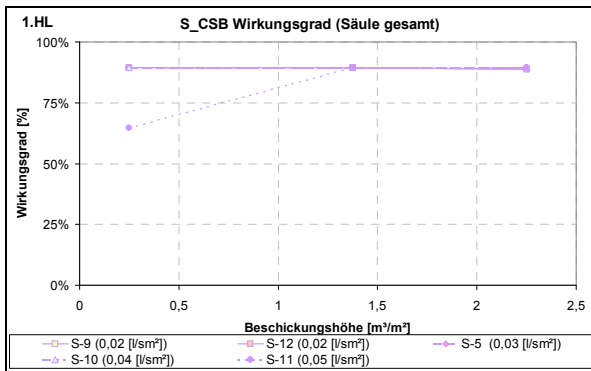
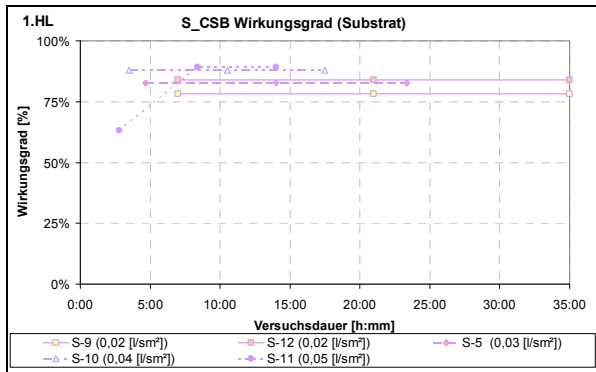
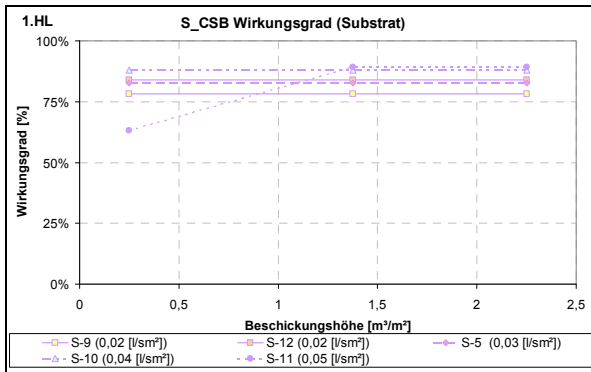
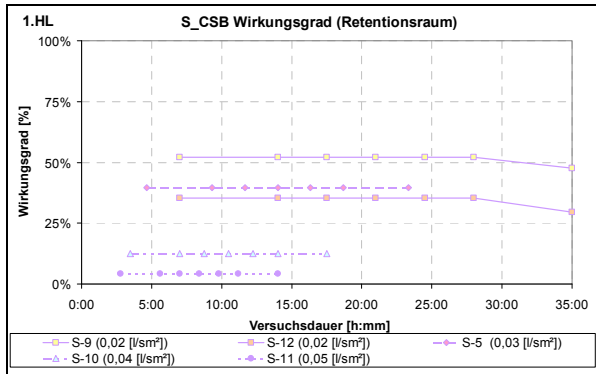
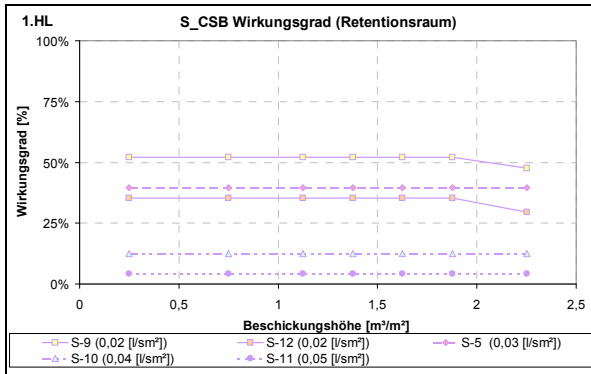




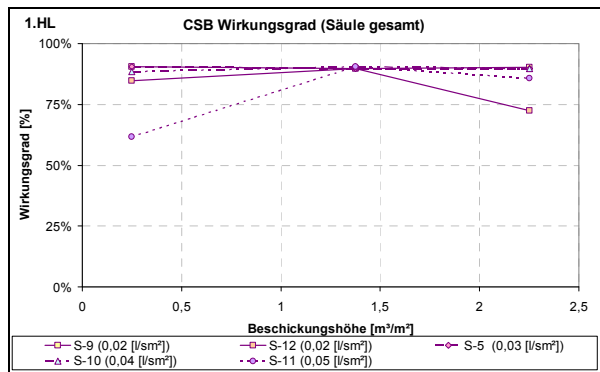
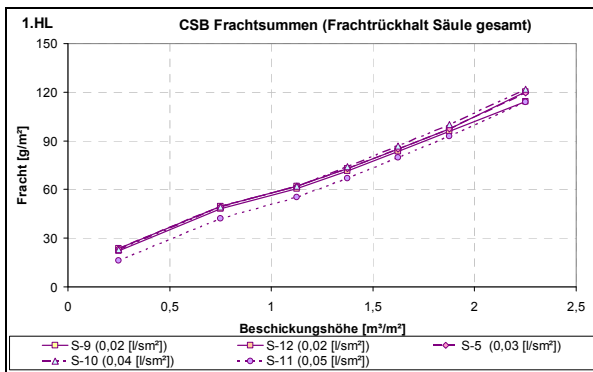
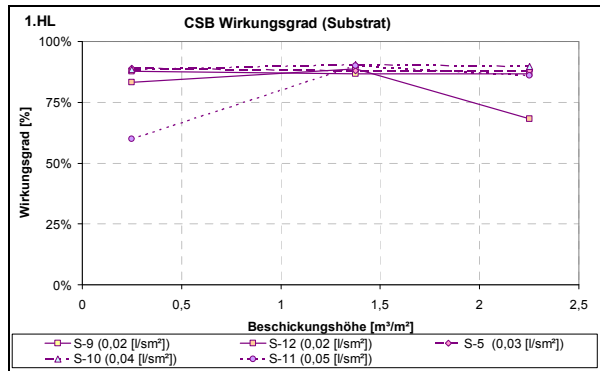
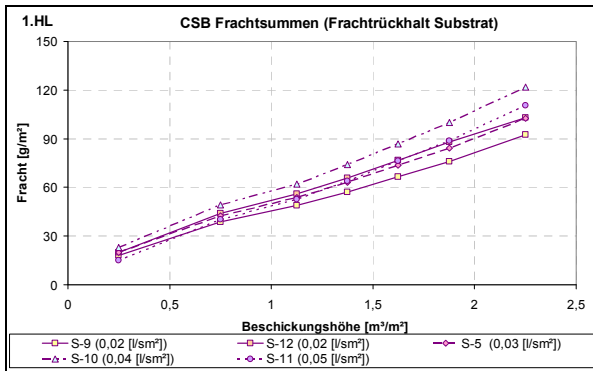
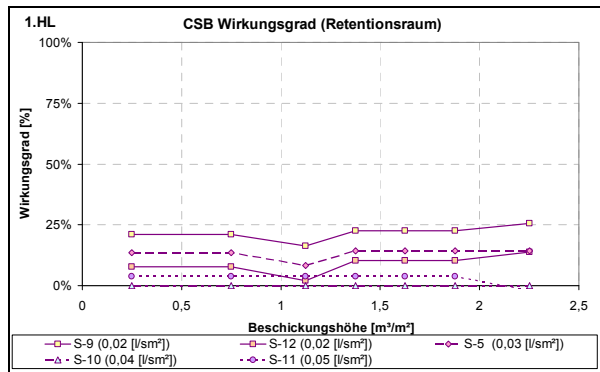
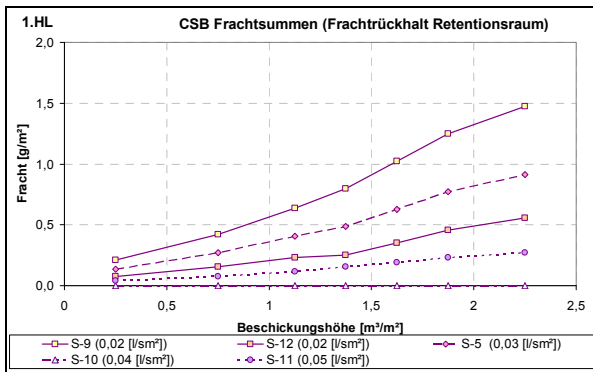
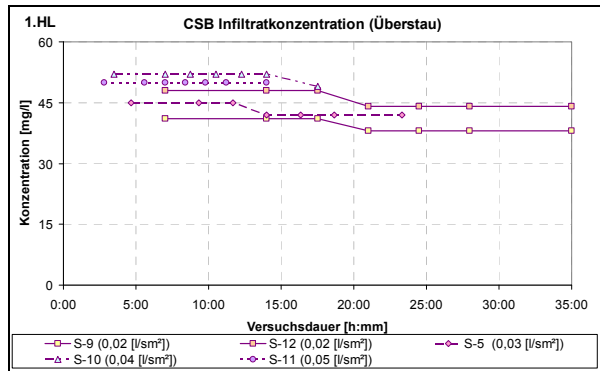
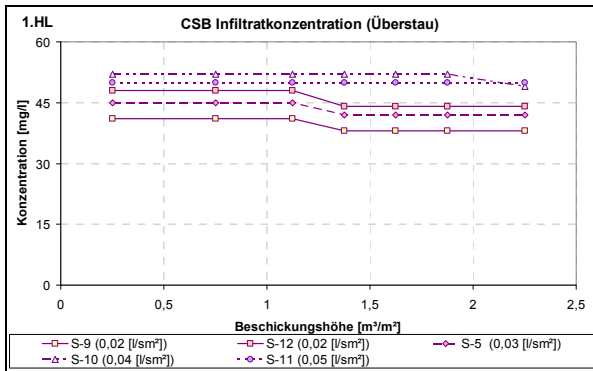
S\_CSB-Frachtrückhalte als Summenlinien



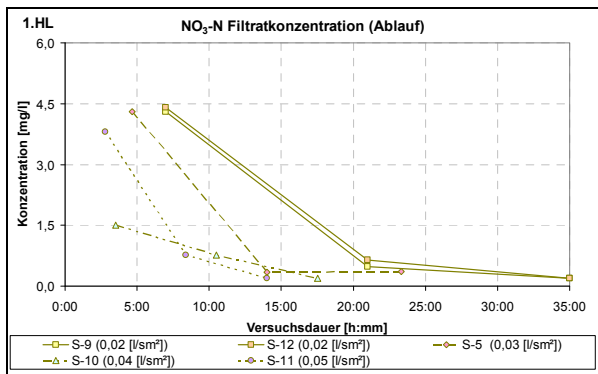
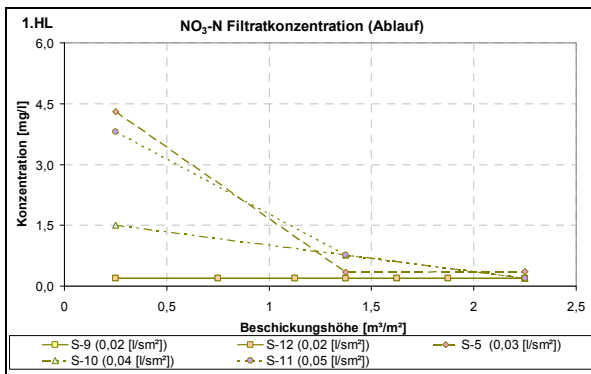
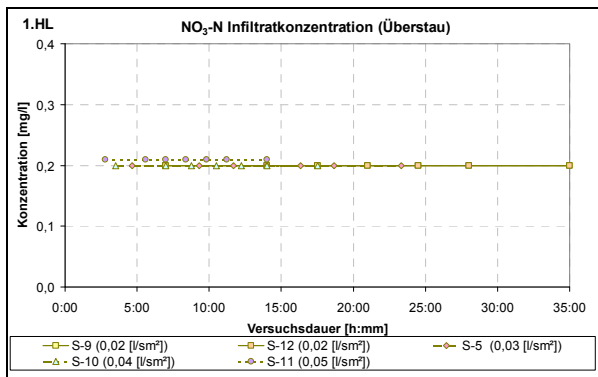
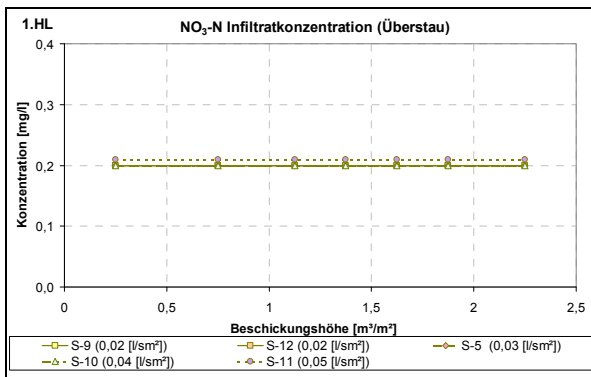
S\_CSB-Wirkungsgrade



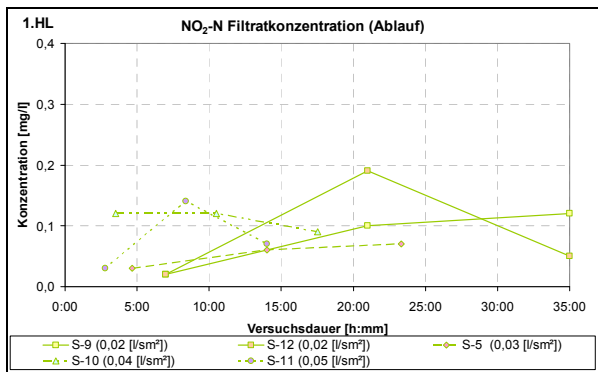
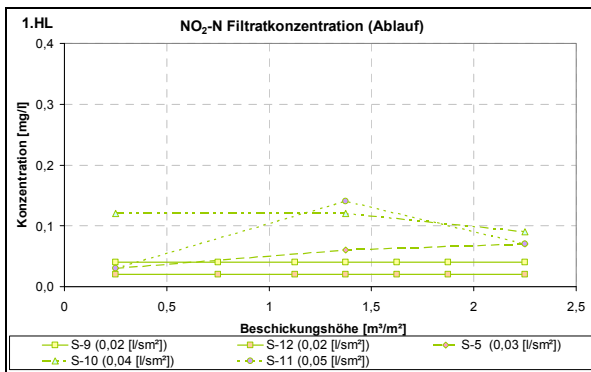
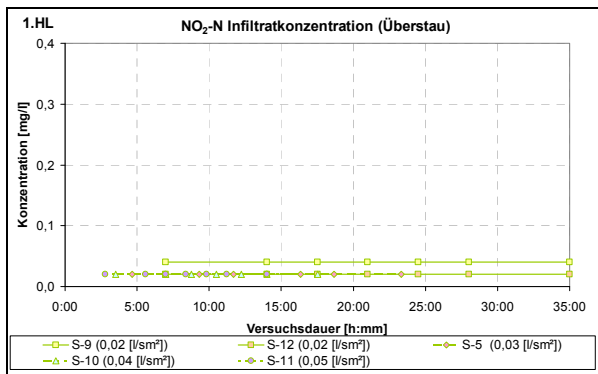
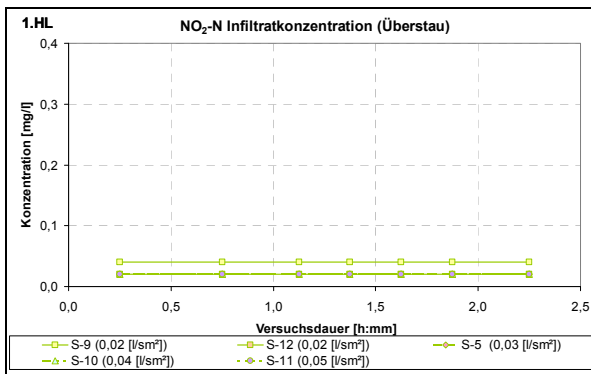
CSB-Konzentrationen, Frachten, Frachtsummen und Wirkungsgrade



NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen

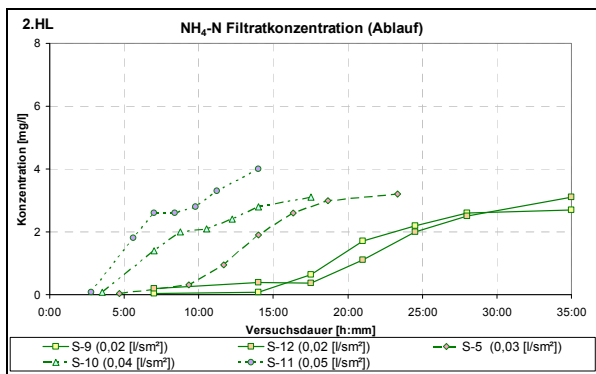
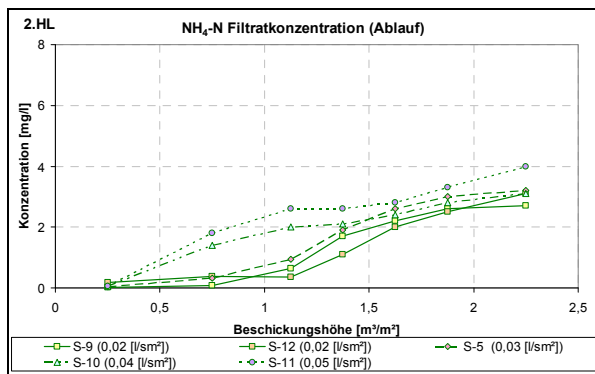
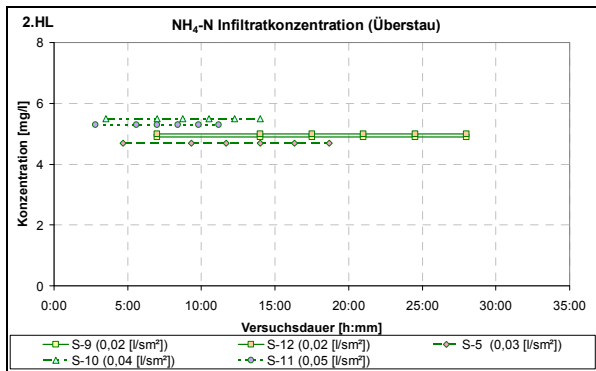
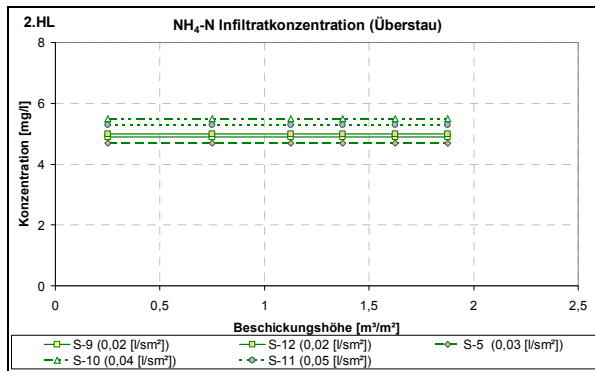
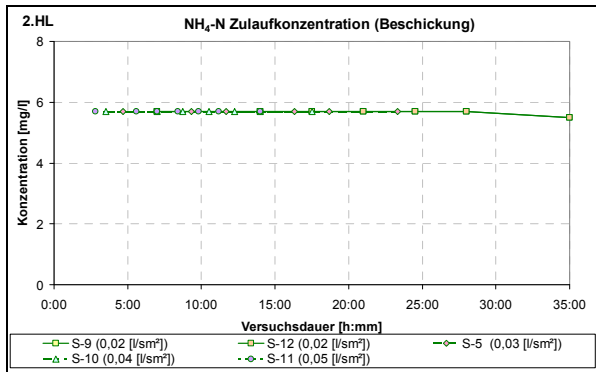
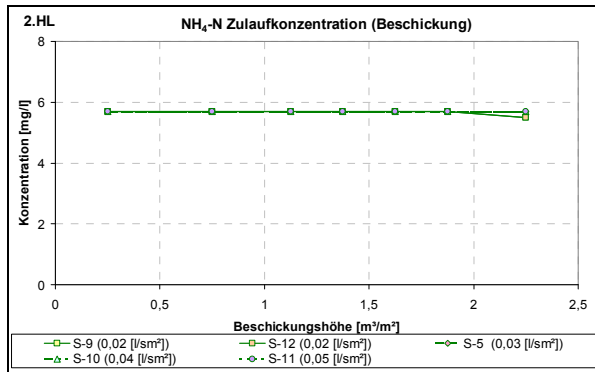


NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen



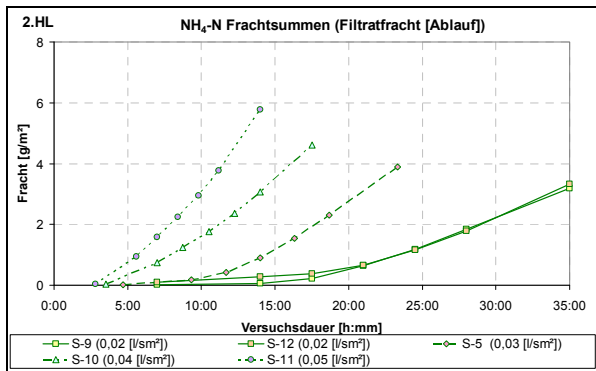
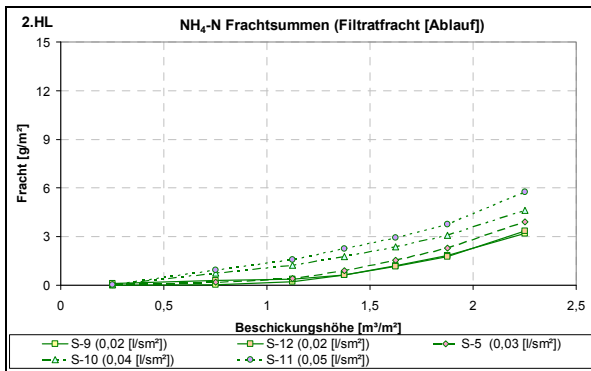
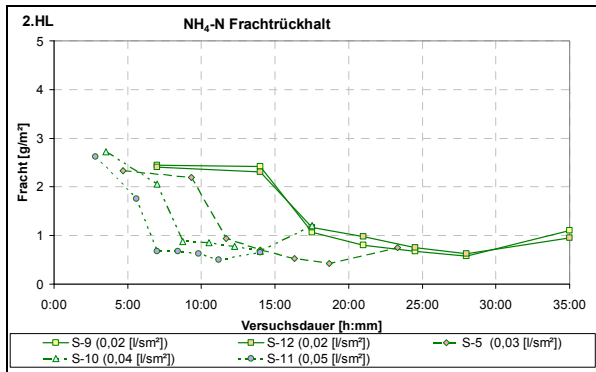
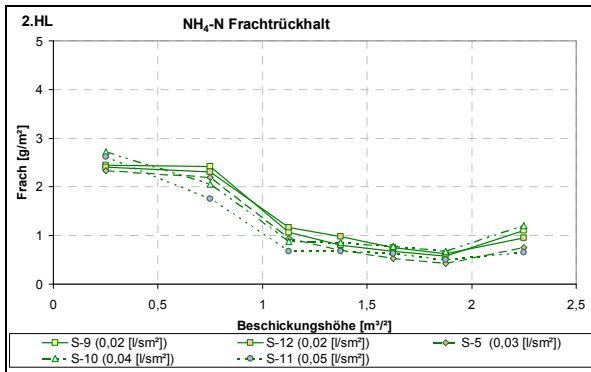
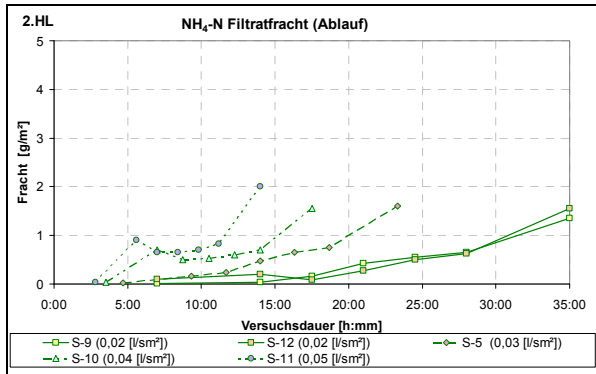
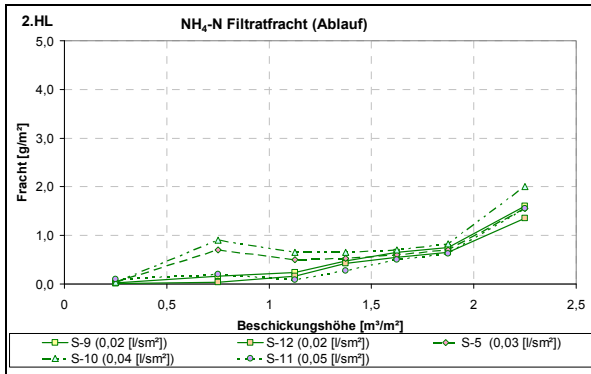
## Anhang 7.3 2. Hochlastversuch

### NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen

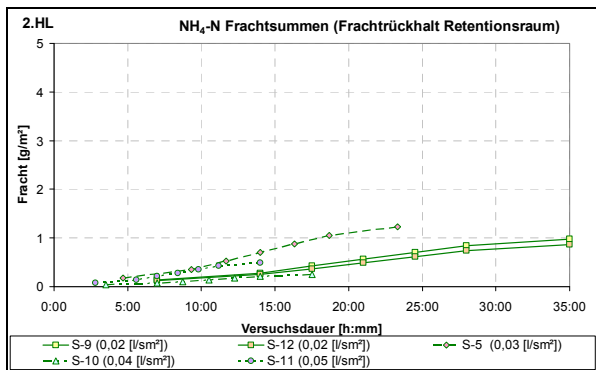
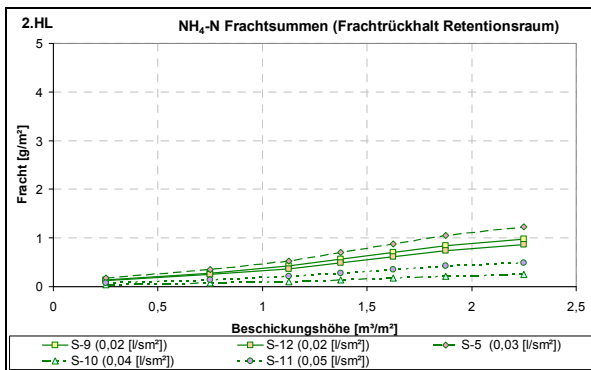


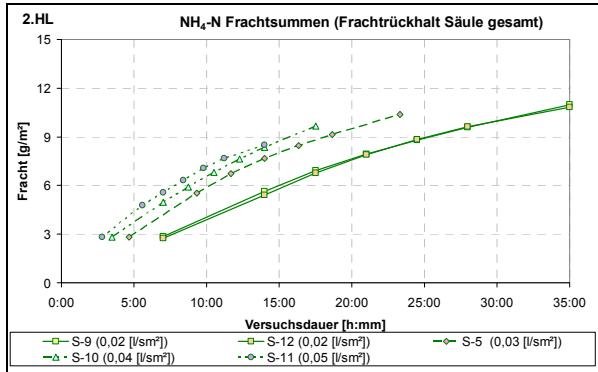
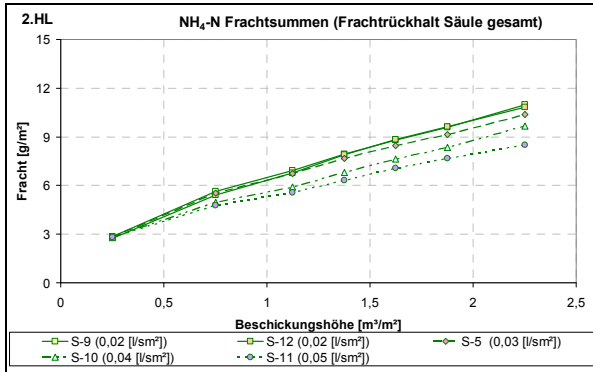
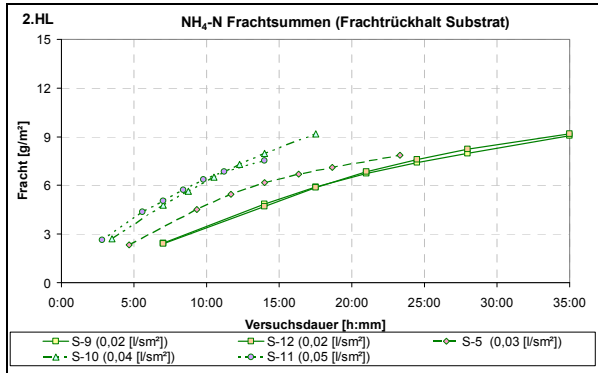
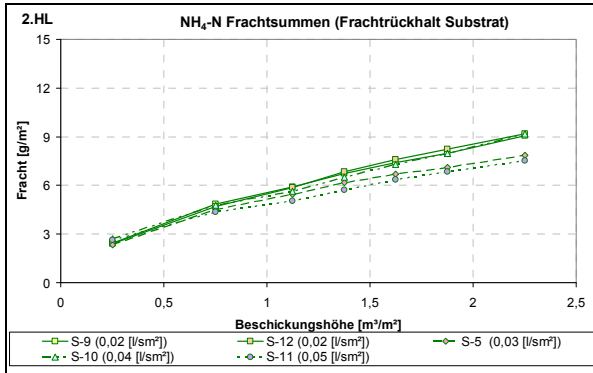


NH<sub>4</sub>-N-Frachten

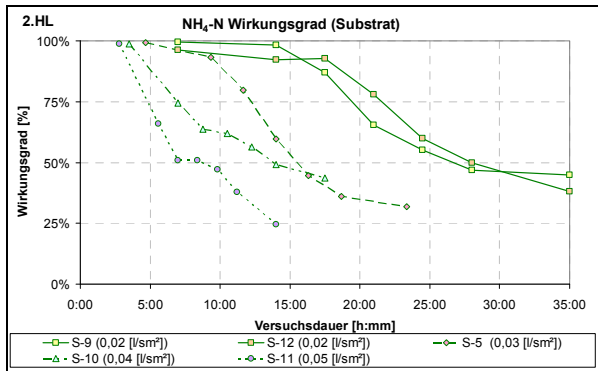
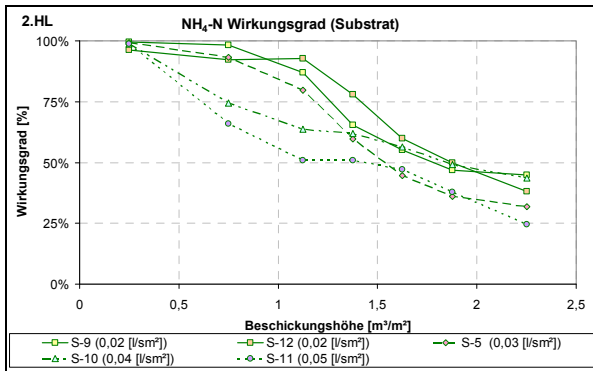
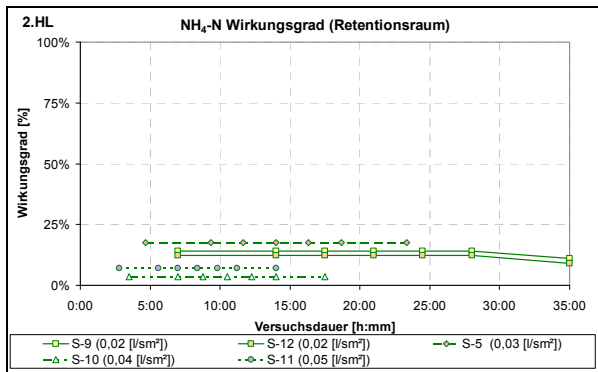
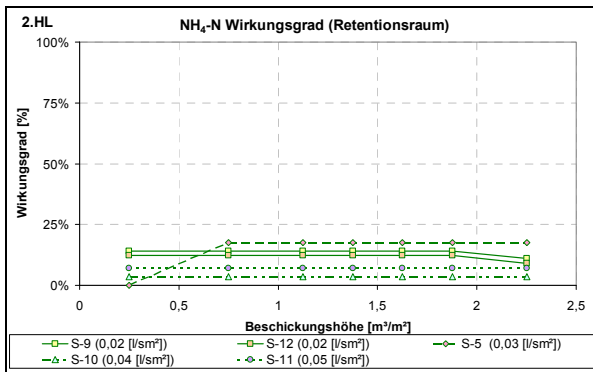


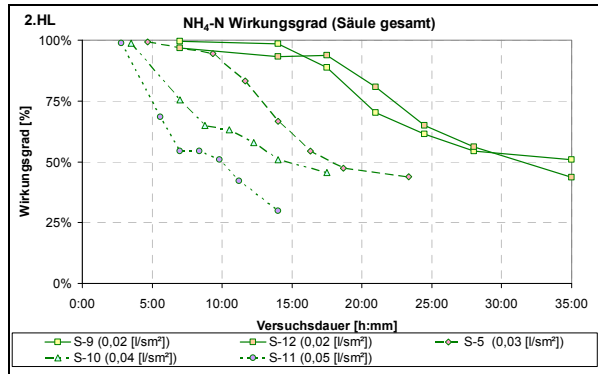
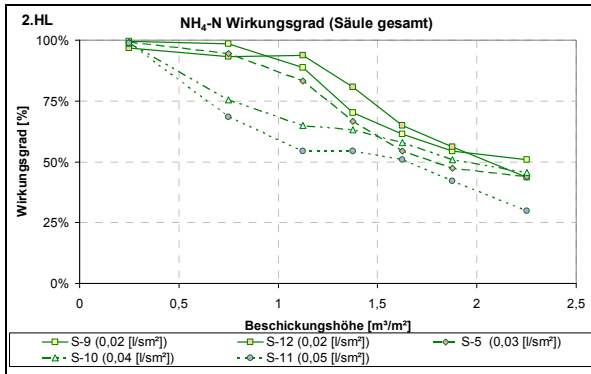
NH<sub>4</sub>-N-Frachtrückhalte als Summenlinien



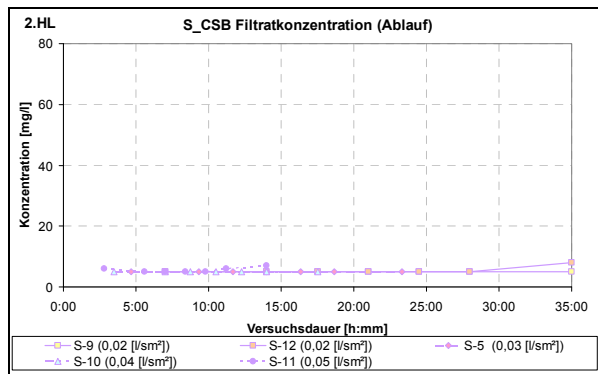
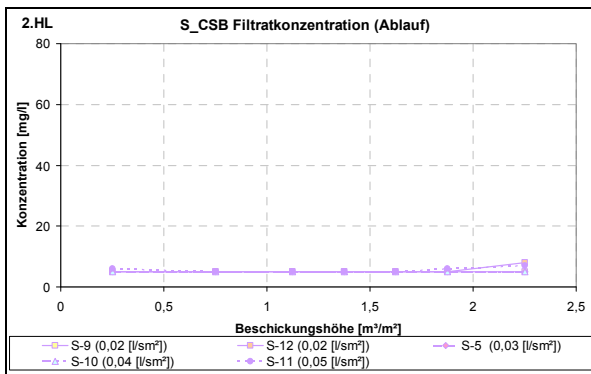
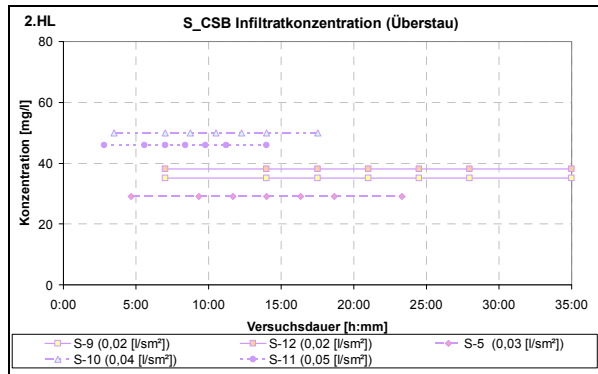
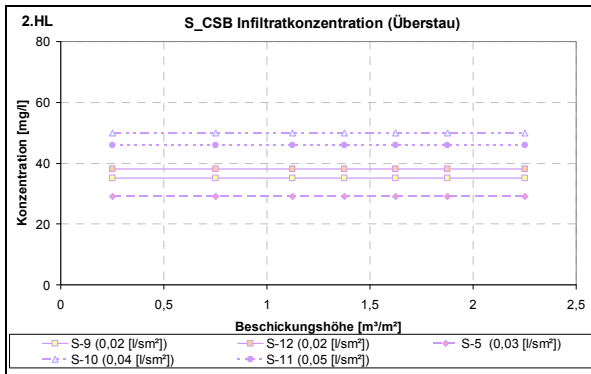
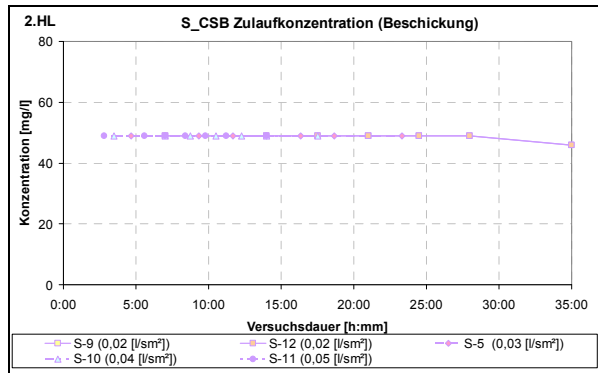
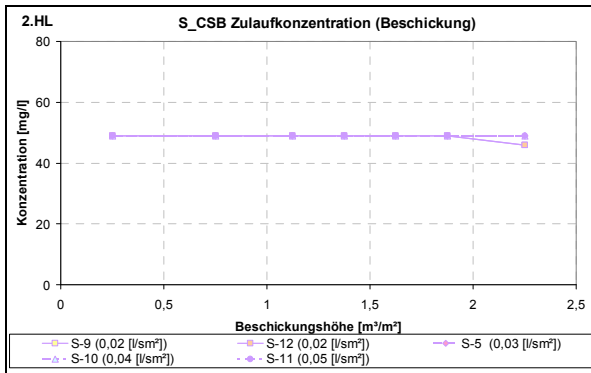


NH<sub>4</sub>-N-Wirkungsgrade

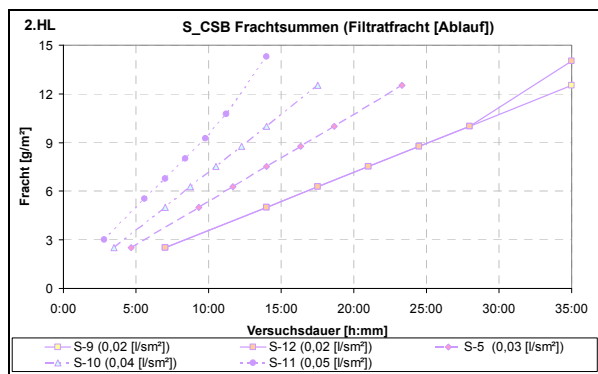
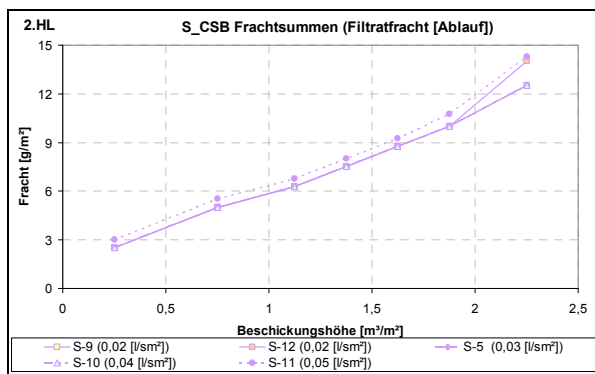
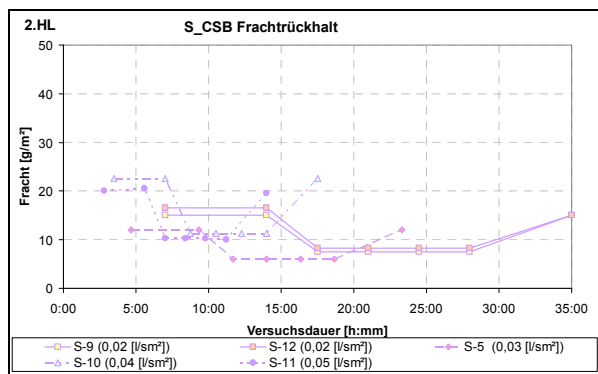
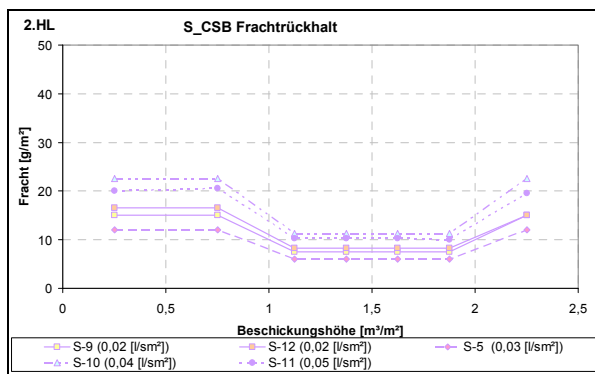
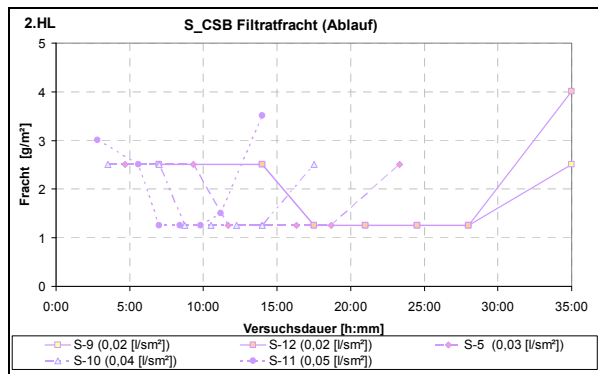
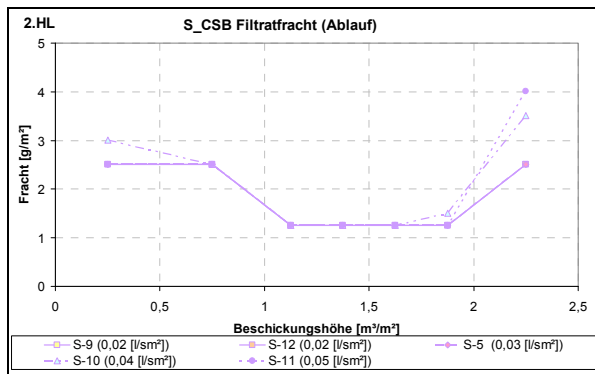




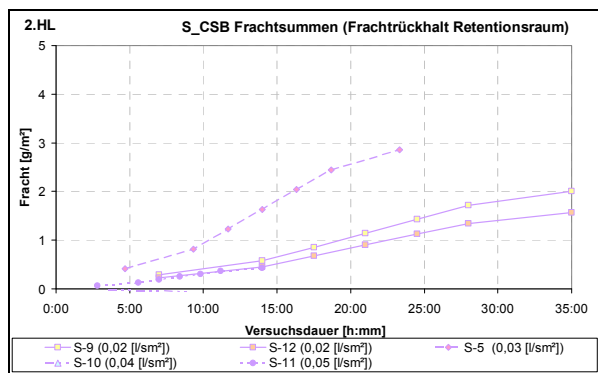
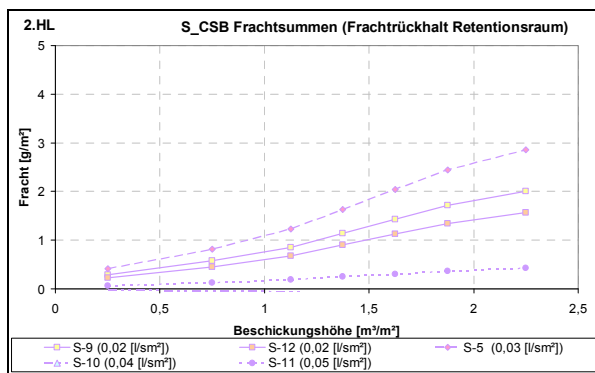
S\_CSB-Konzentrationen

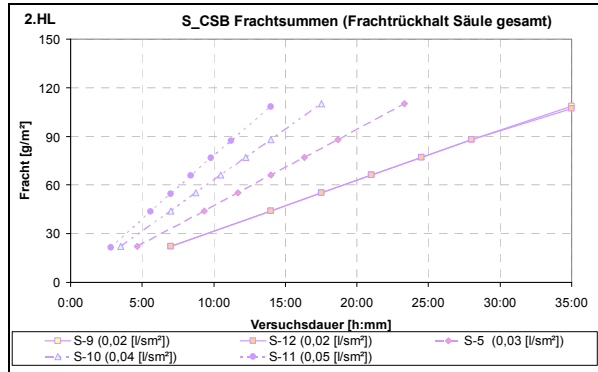
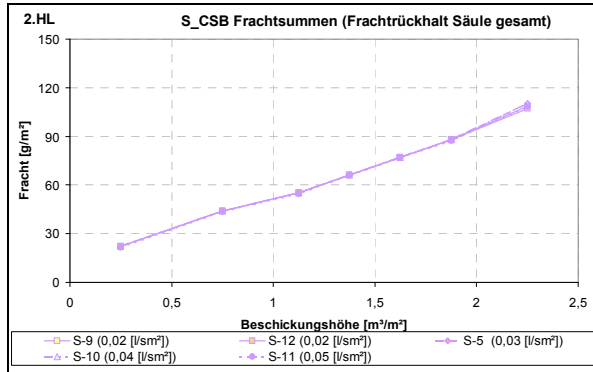
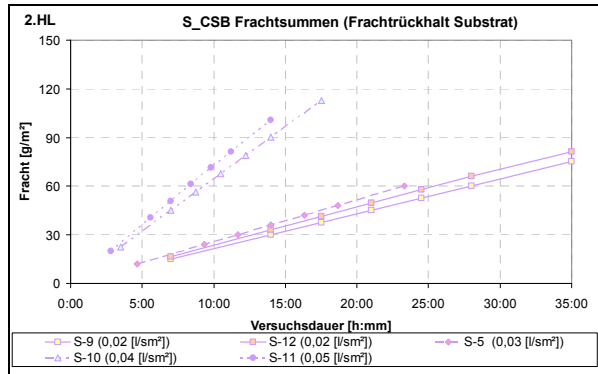
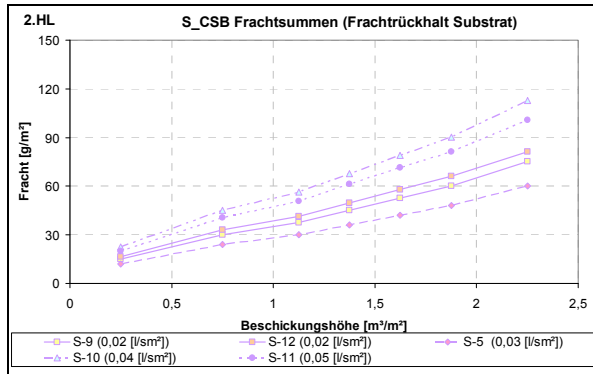


S\_CSB-Frachten

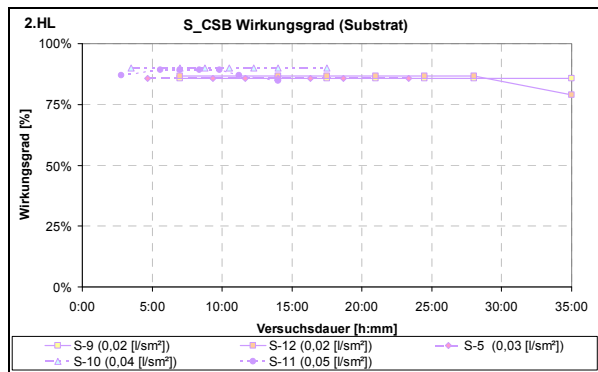
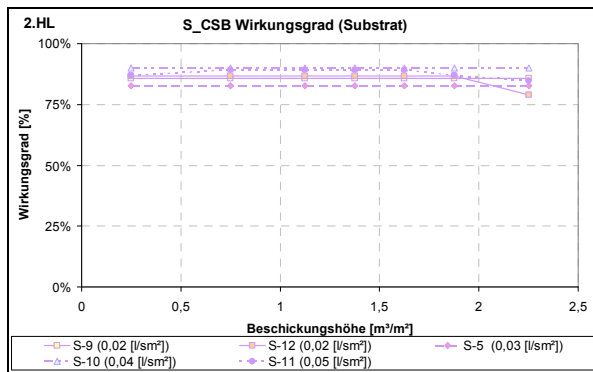
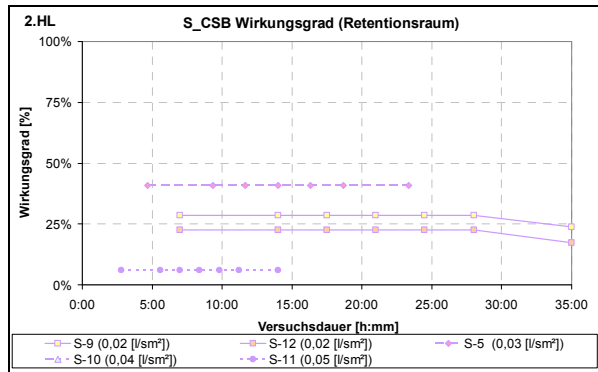
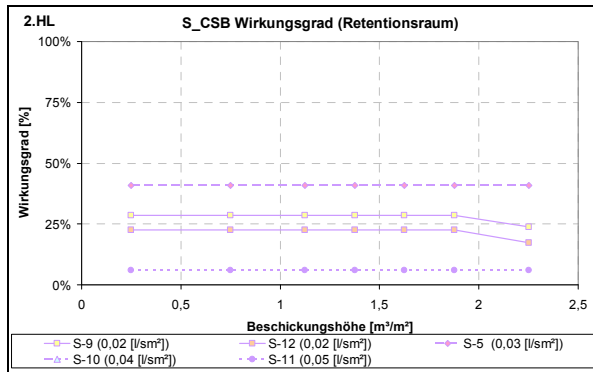


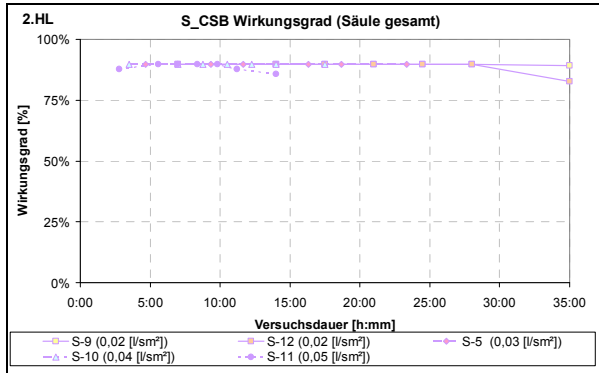
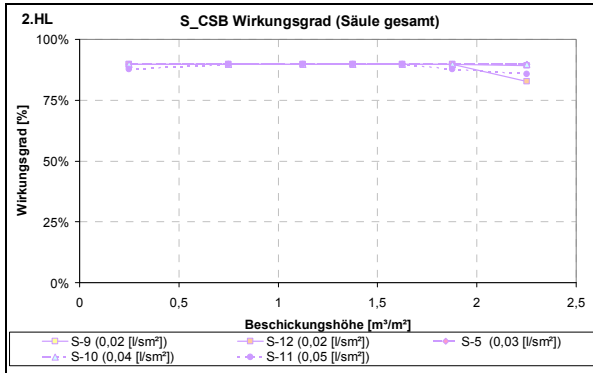
S\_CSB-Frachtrückhalte als Summenlinien



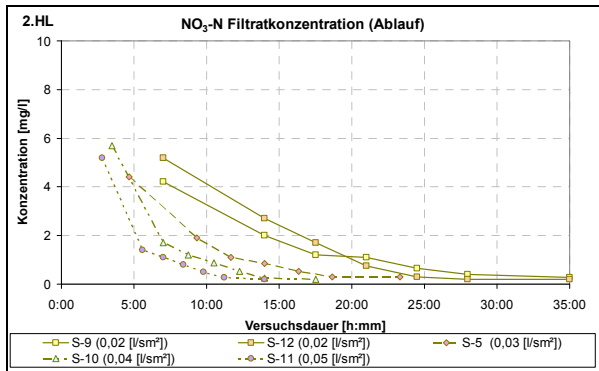
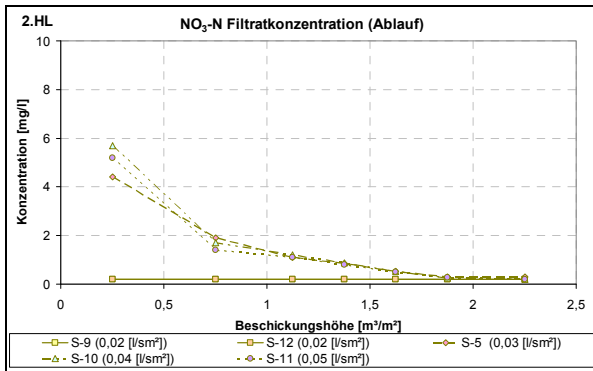
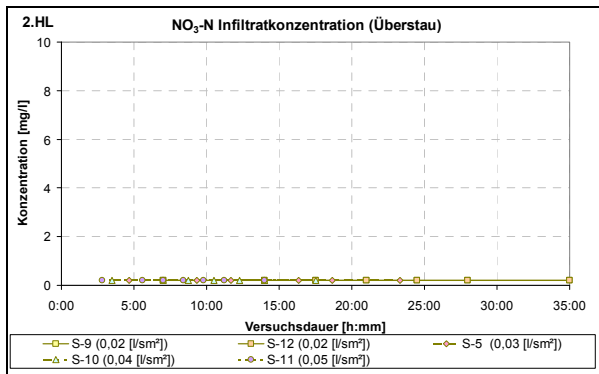
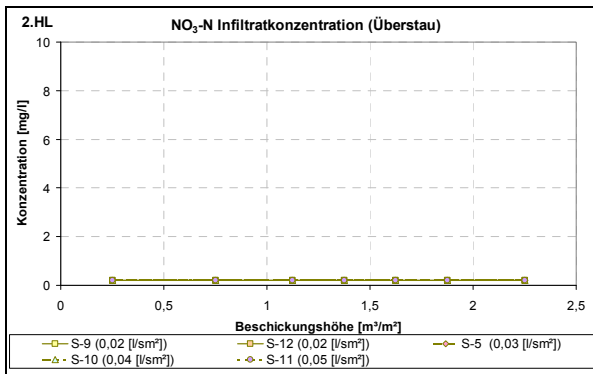
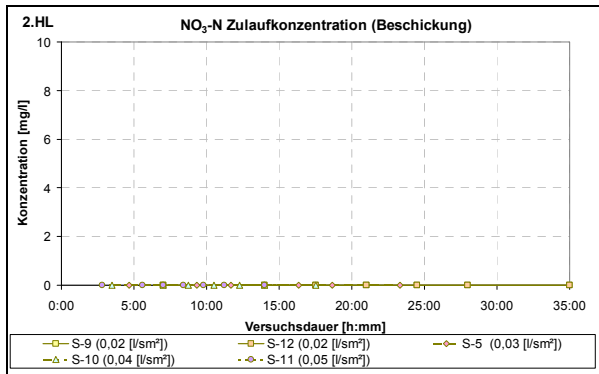
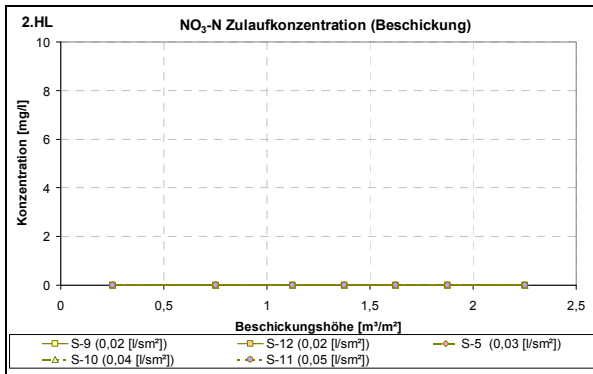


S-CSB-Wirkungsgrade

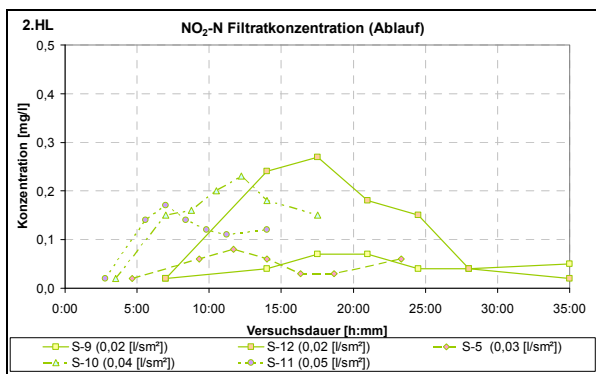
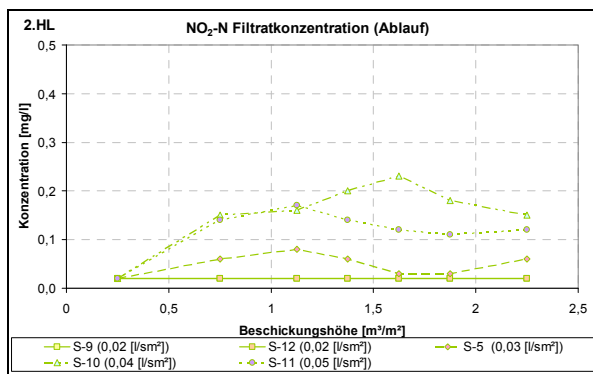
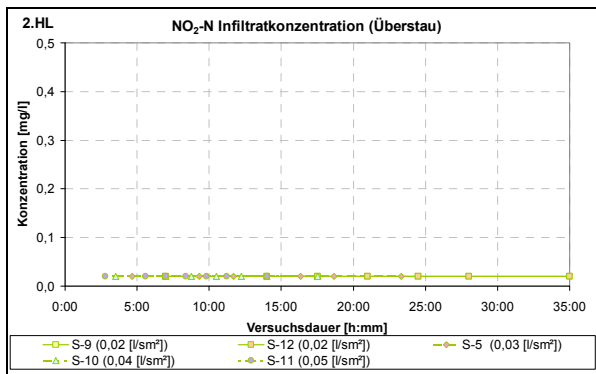
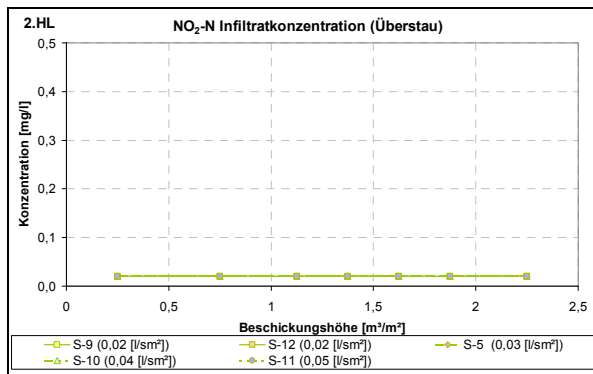
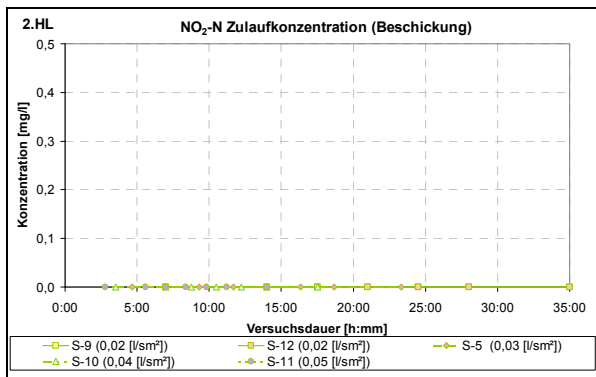
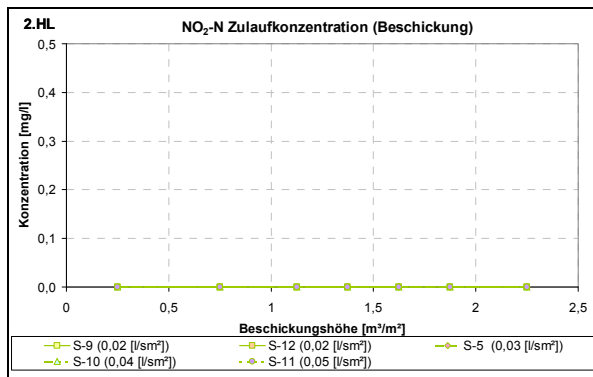




NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen

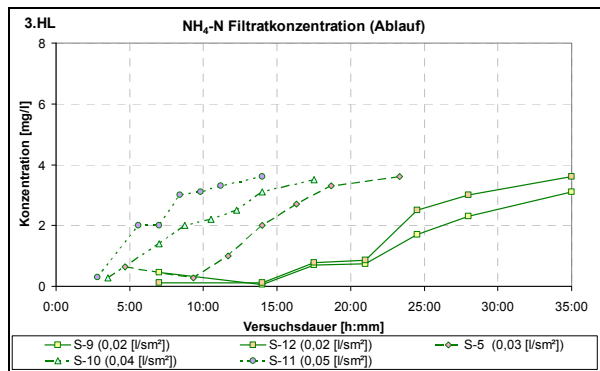
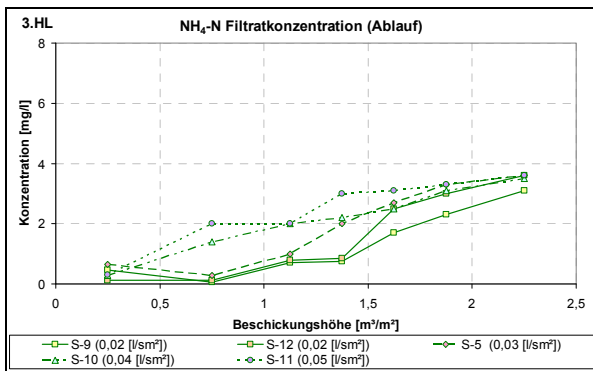
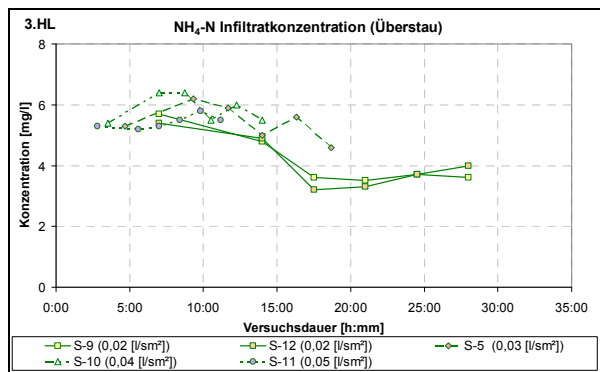
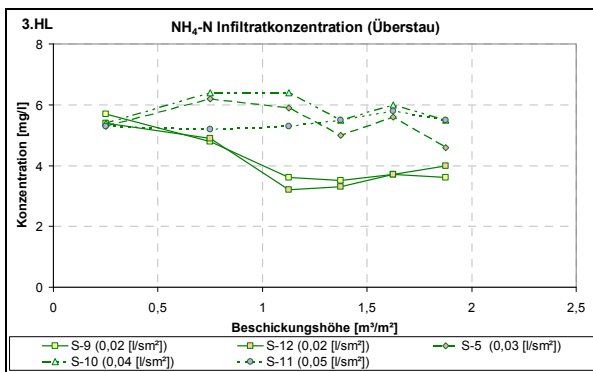
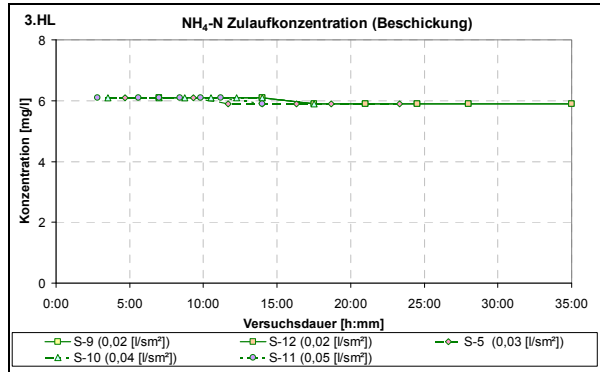
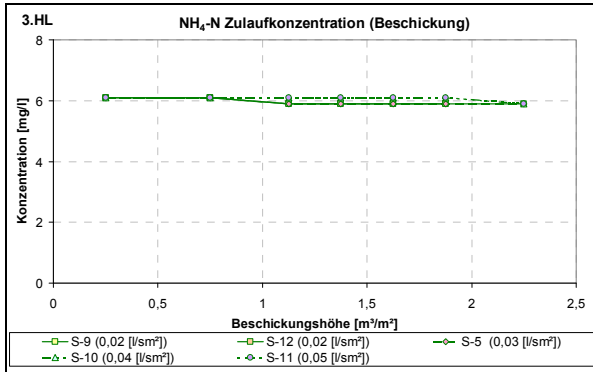


NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen



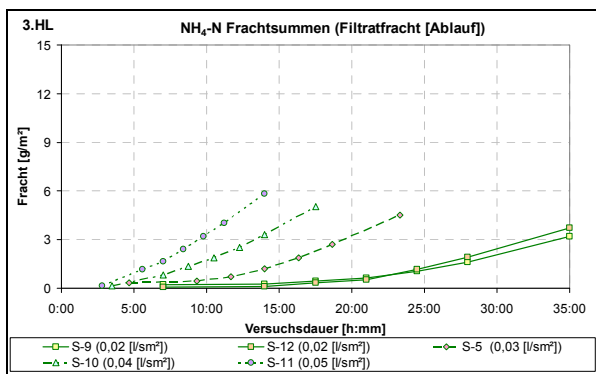
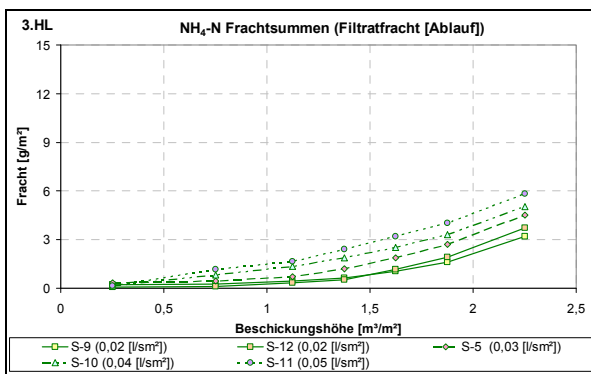
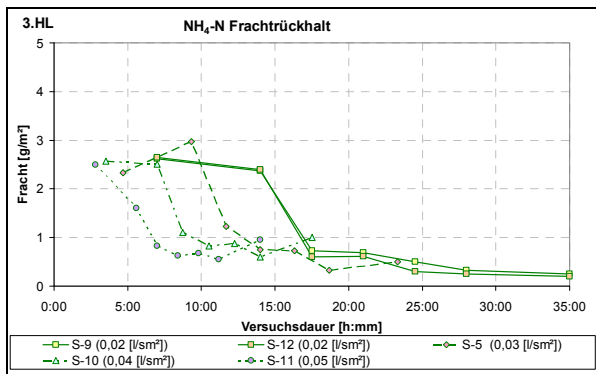
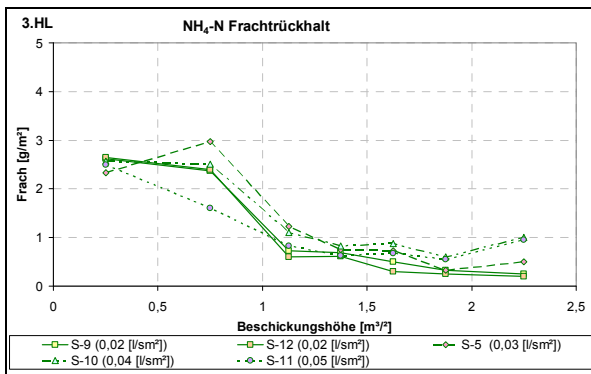
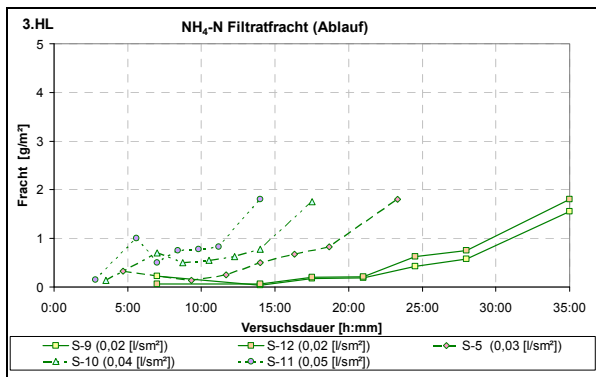
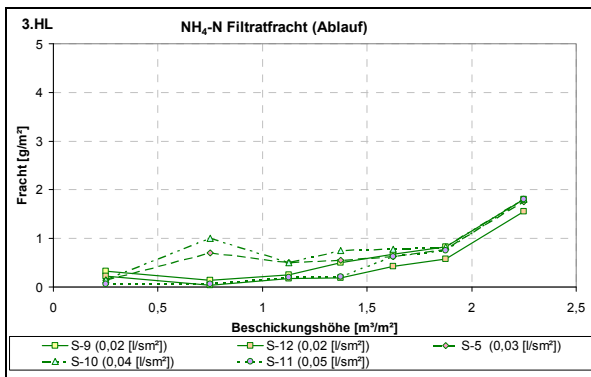
### Anhang 7.4 3. Hochlastversuch

#### NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen

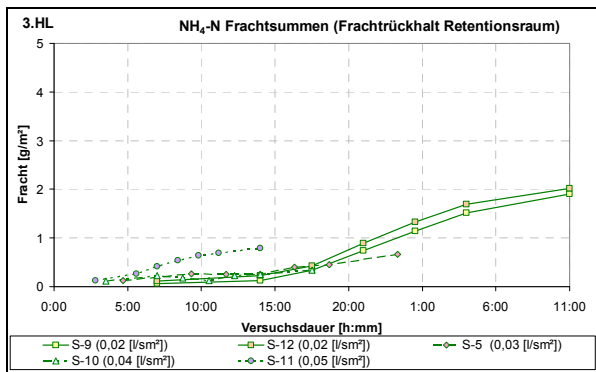
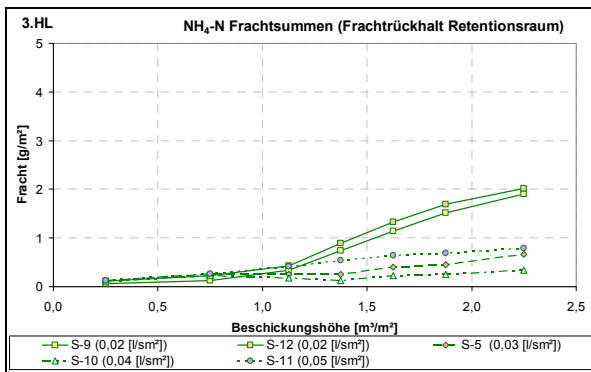


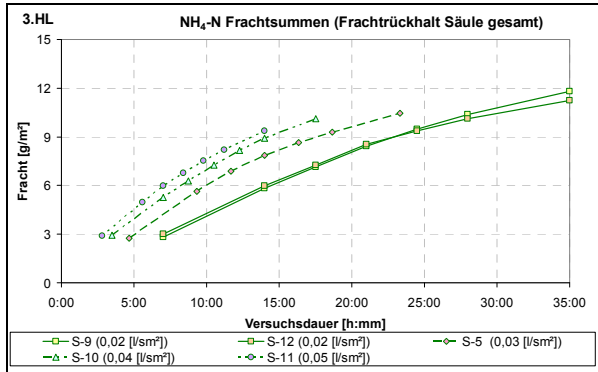
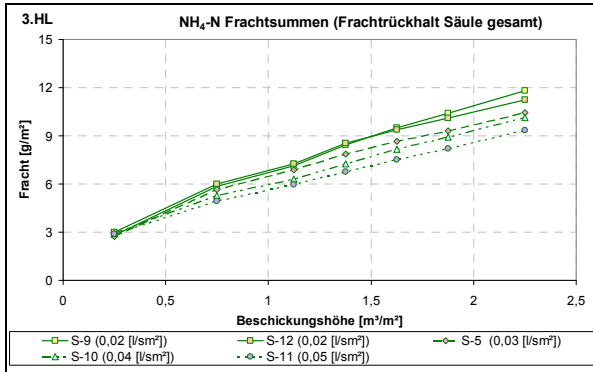
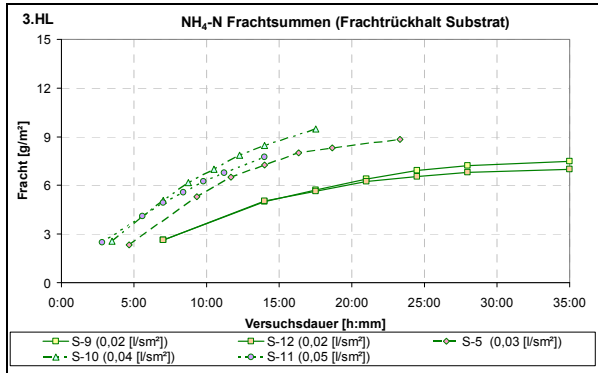
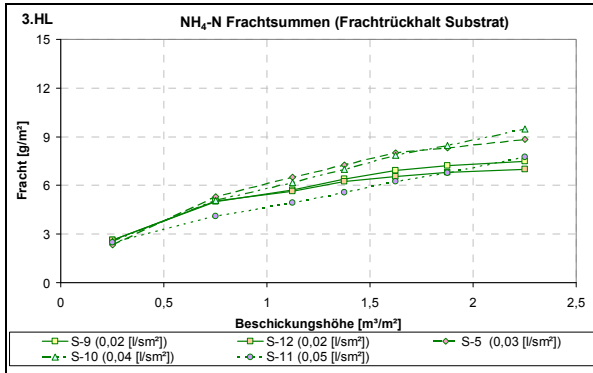


NH<sub>4</sub>-N-Frachten

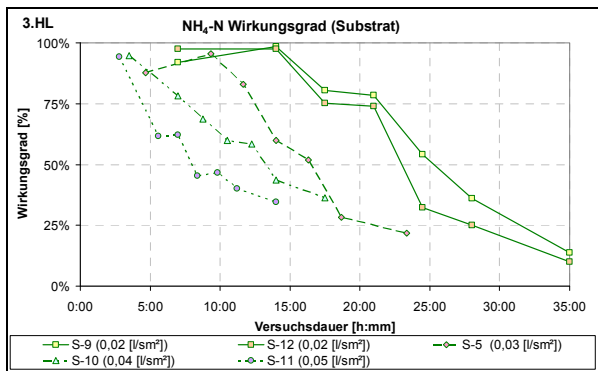
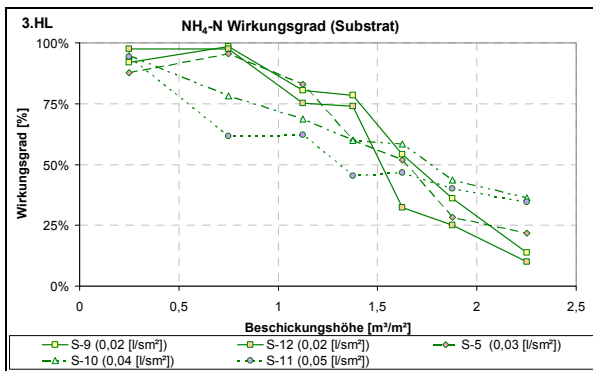
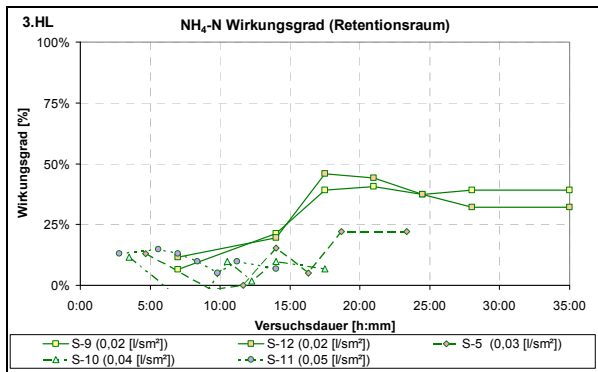
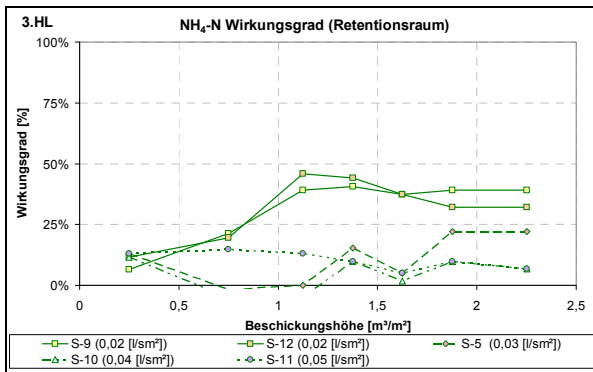


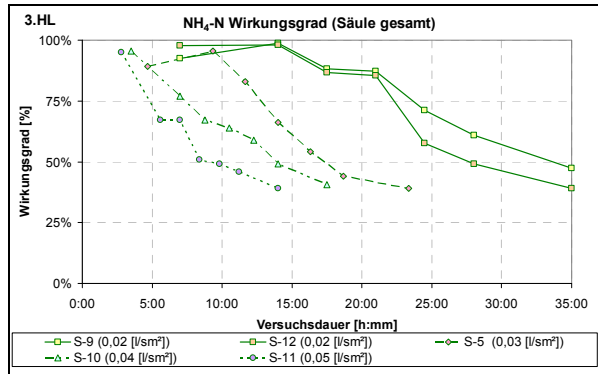
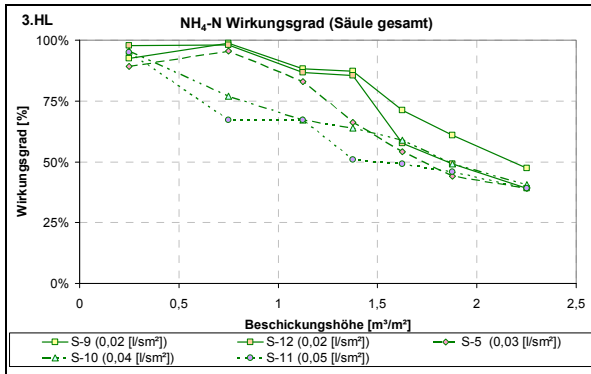
NH<sub>4</sub>-N-Frachtrückhalte als Summenlinien



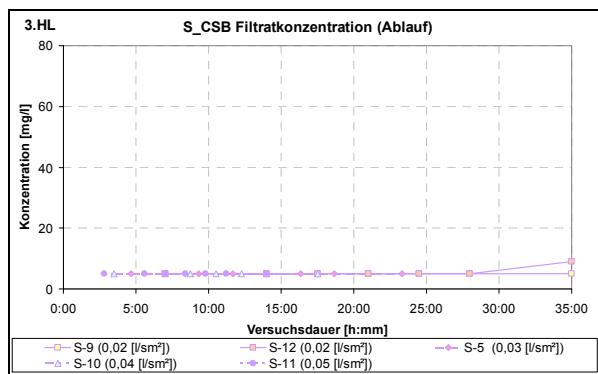
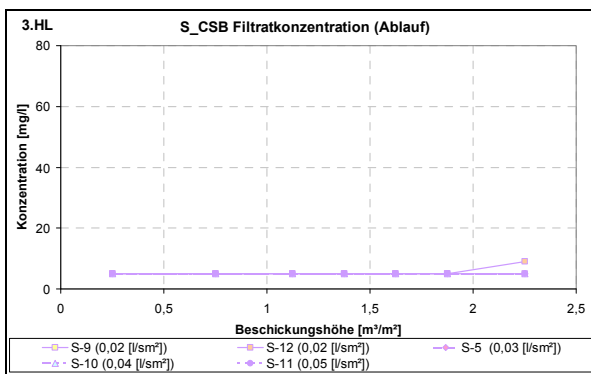
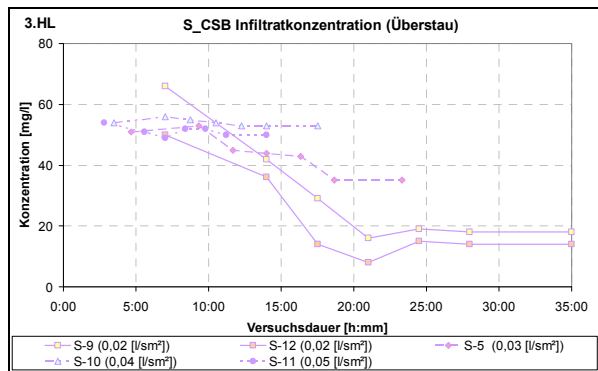
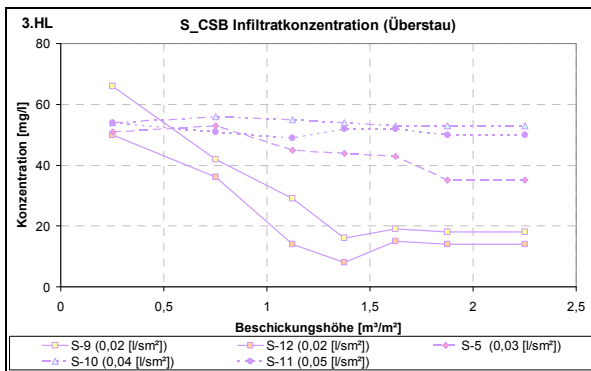
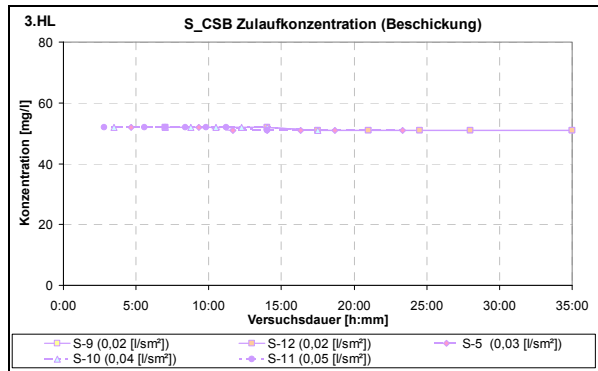
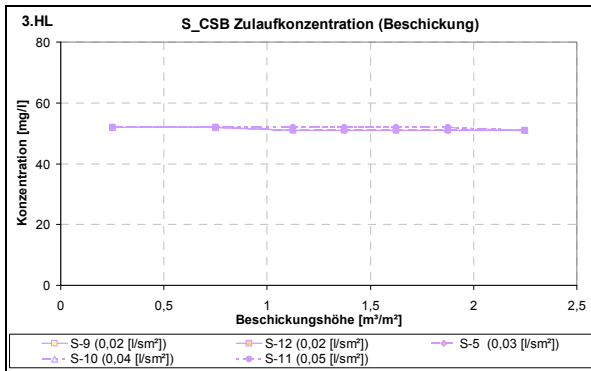


NH<sub>4</sub>-N-Wirkungsgrade

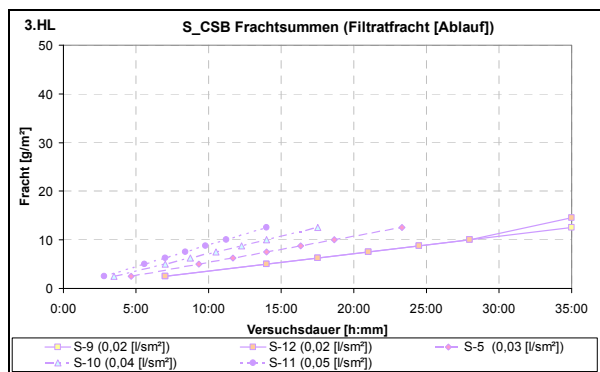
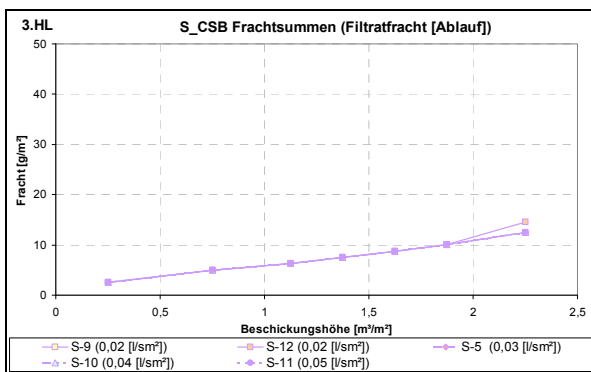
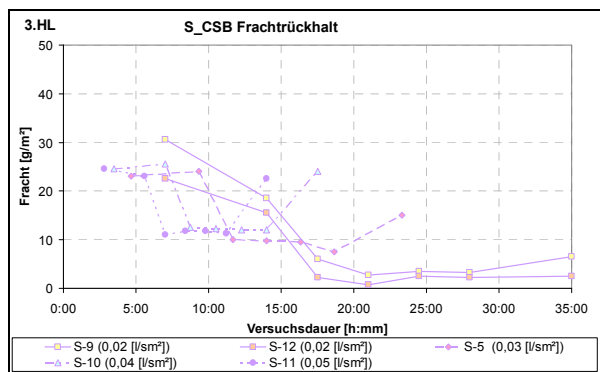
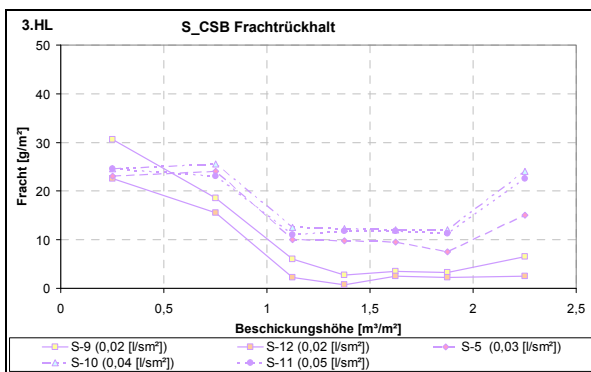
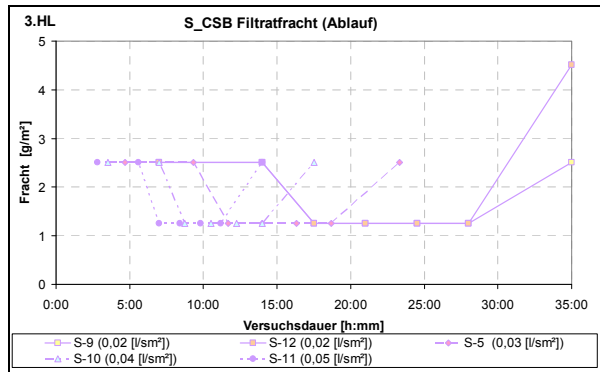
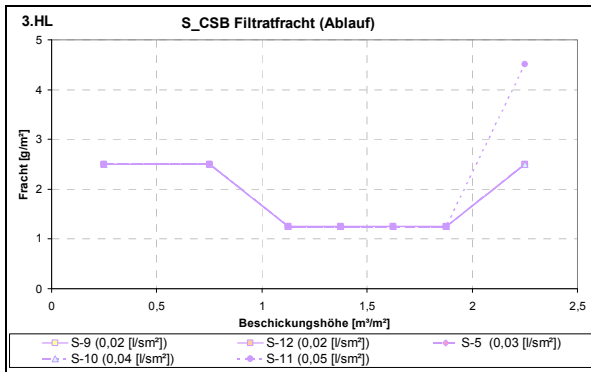




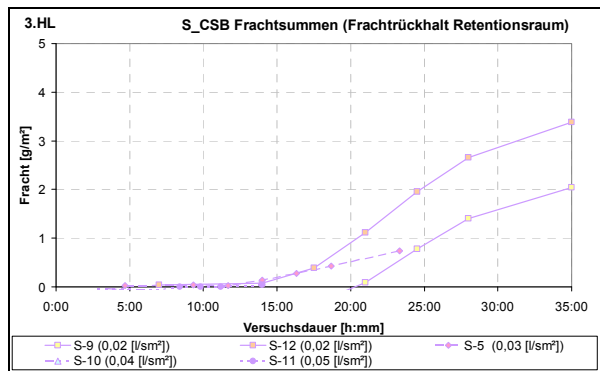
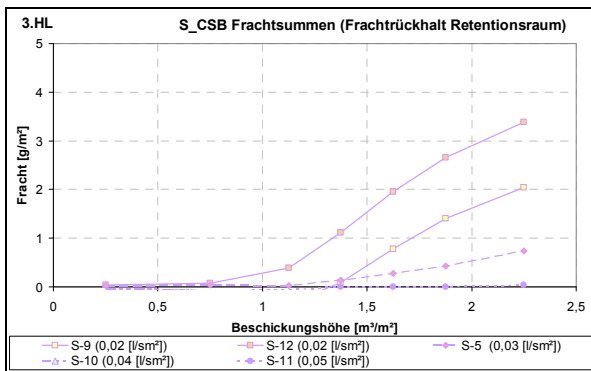
S\_CSB-Konzentrationen

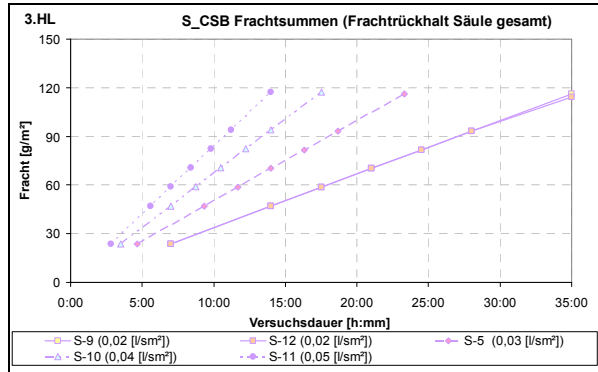
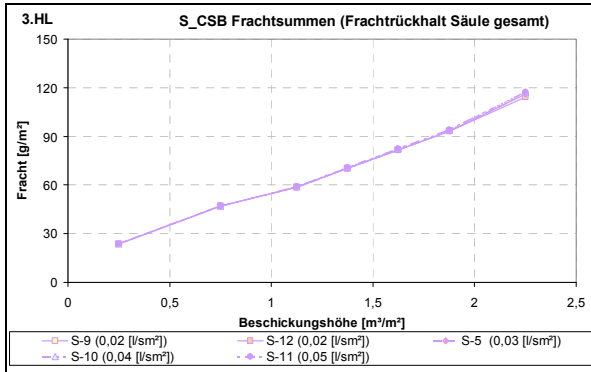
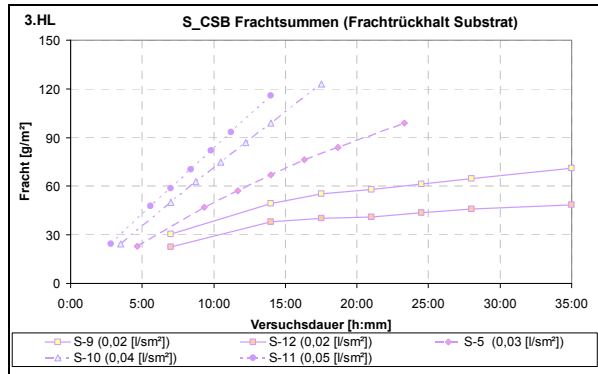
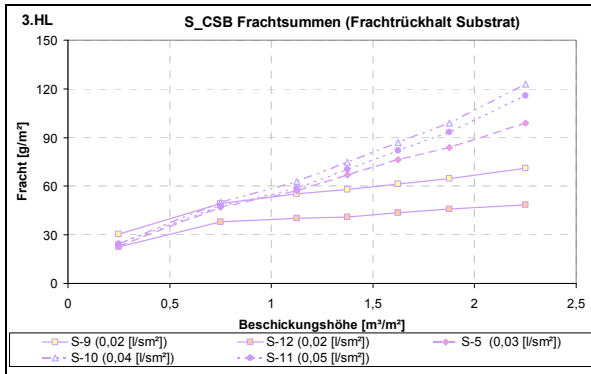


S\_CSB-Frachten

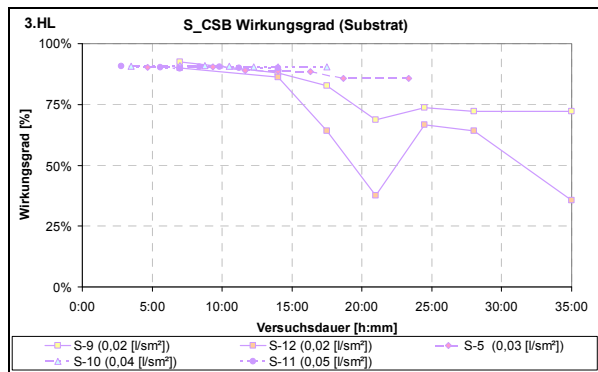
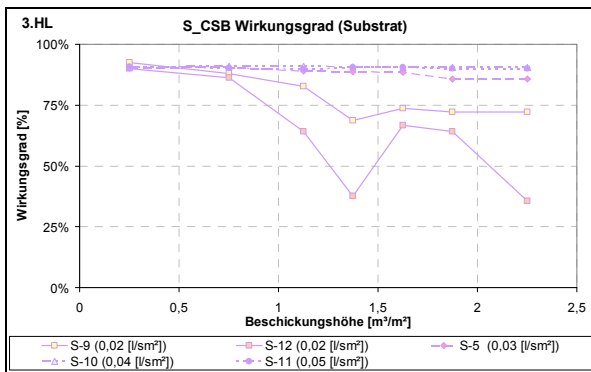
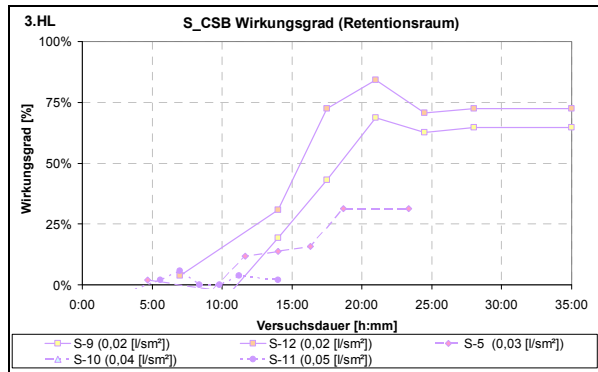
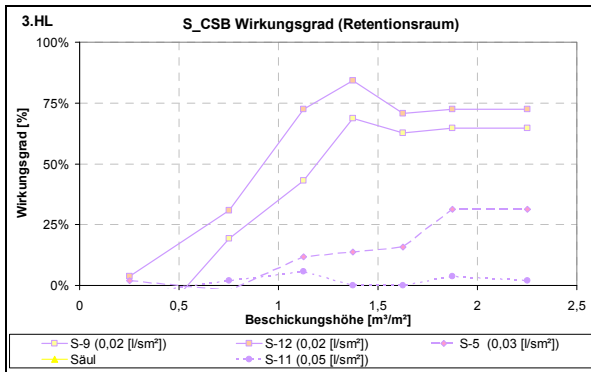


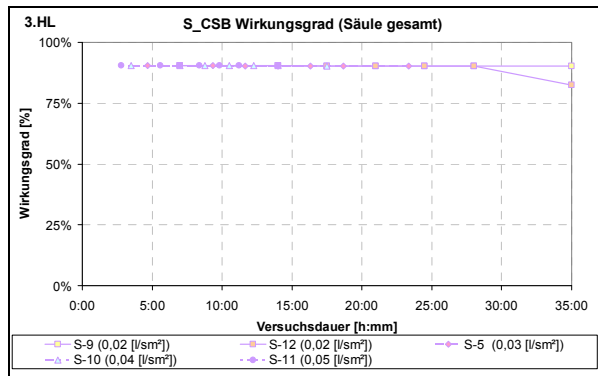
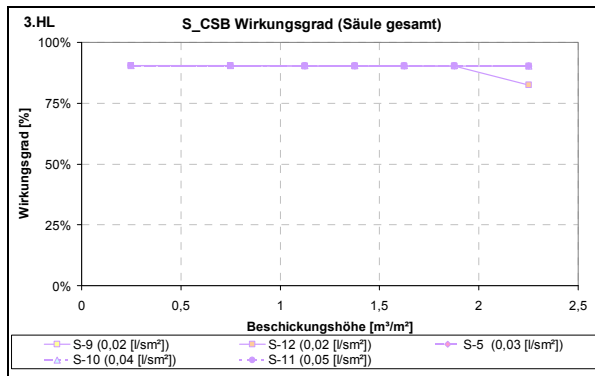
S\_CSB-Frachtrückhalte als Summenlinien



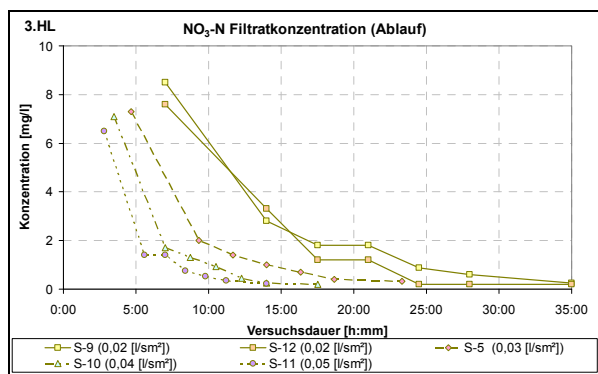
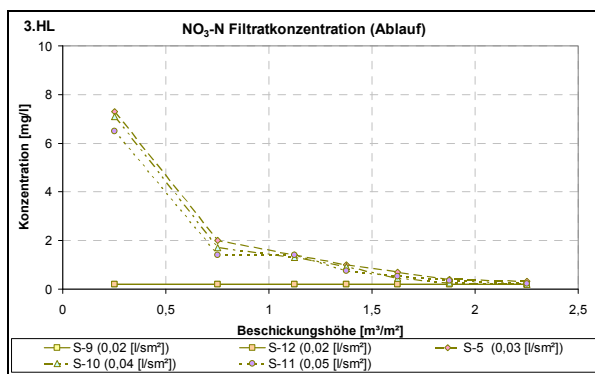
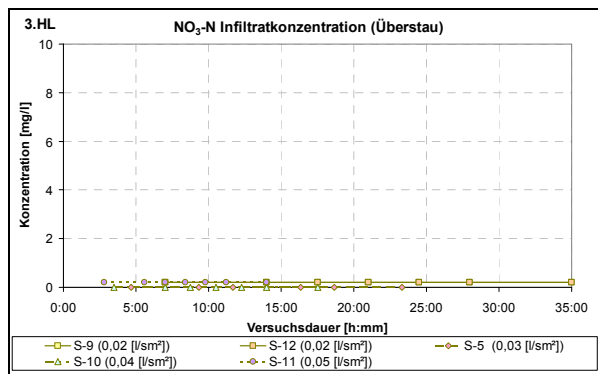
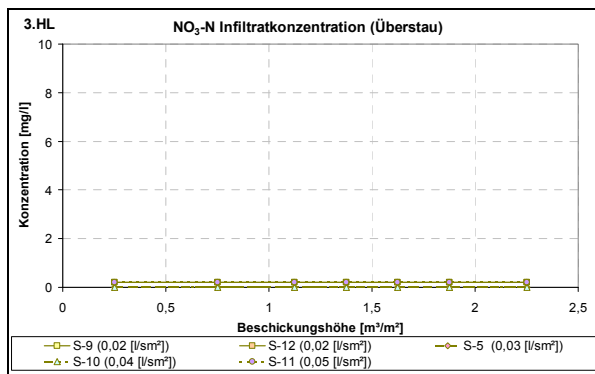
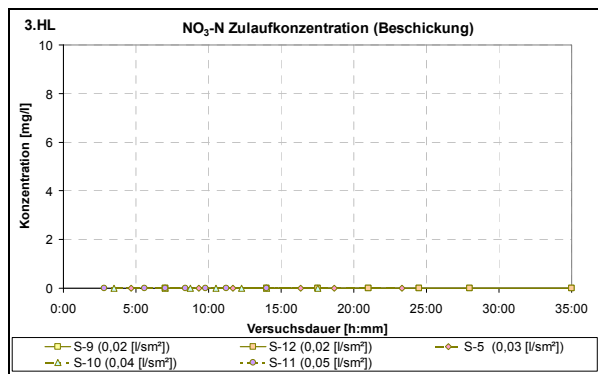
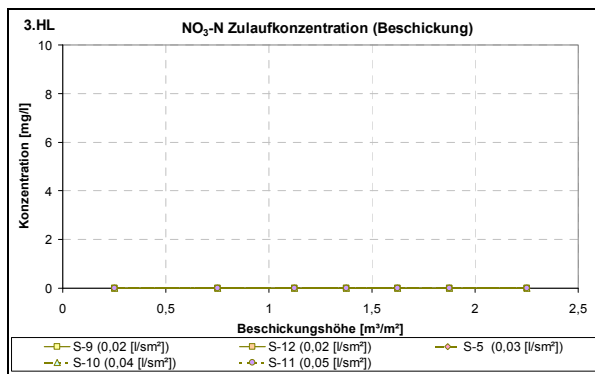


S\_CSB-Wirkungsgrade

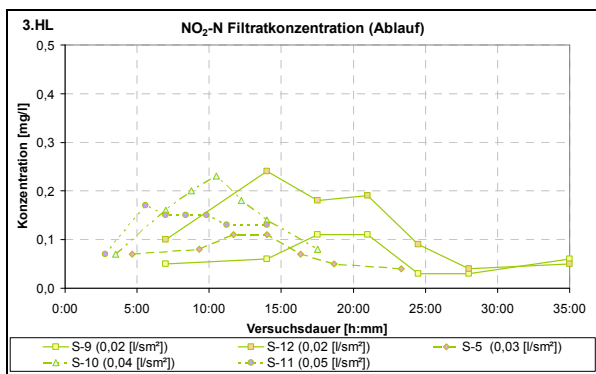
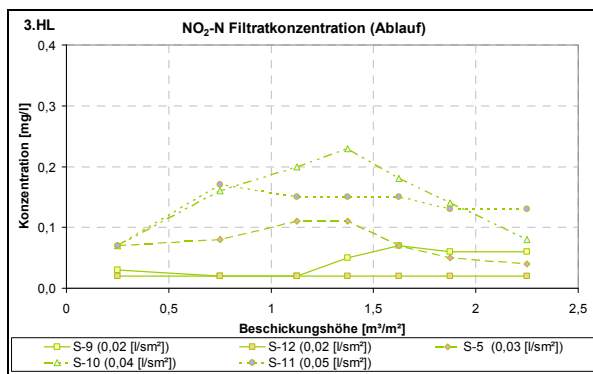
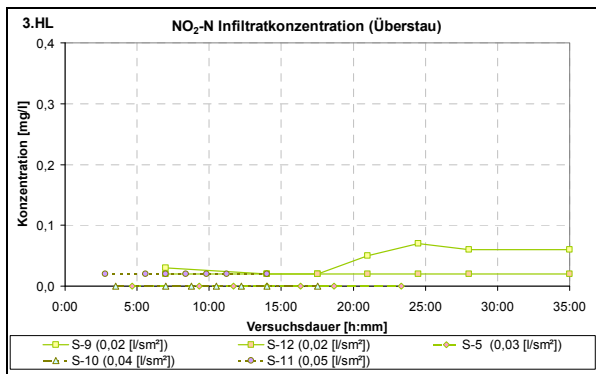
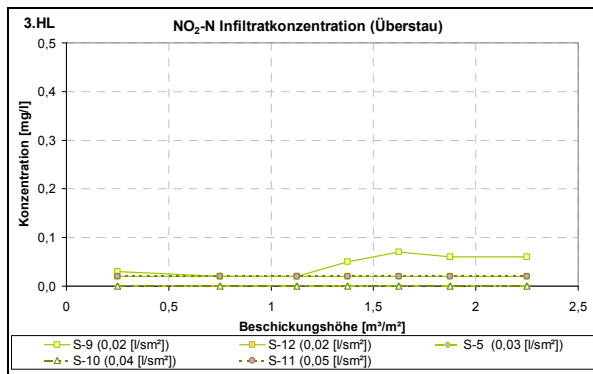
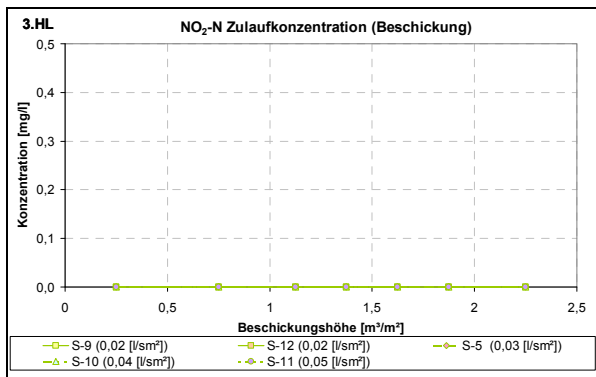
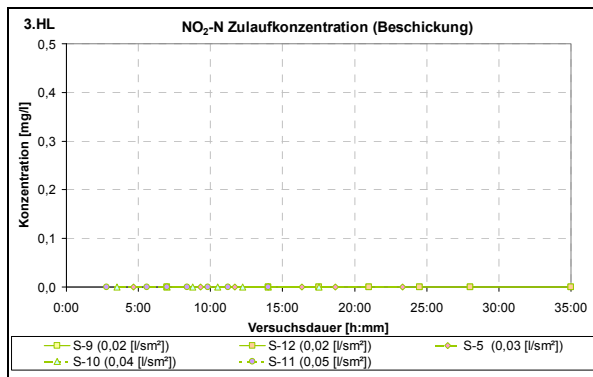




NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen

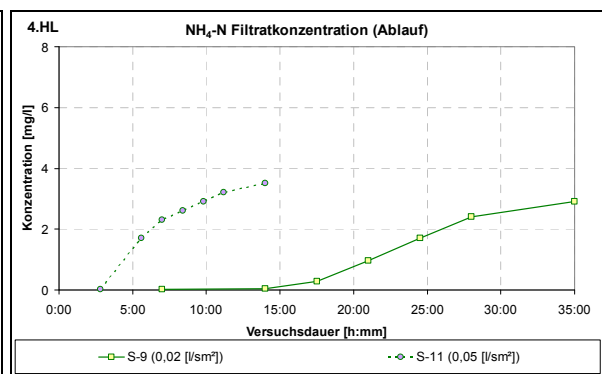
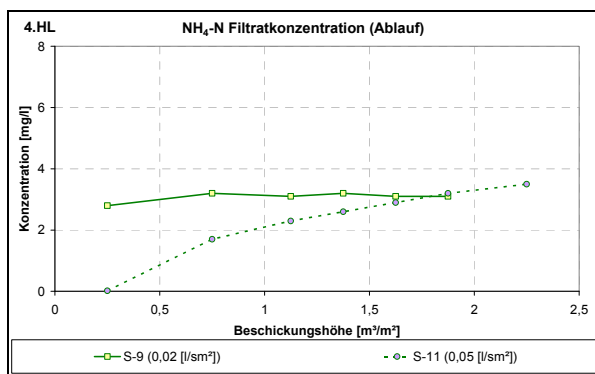
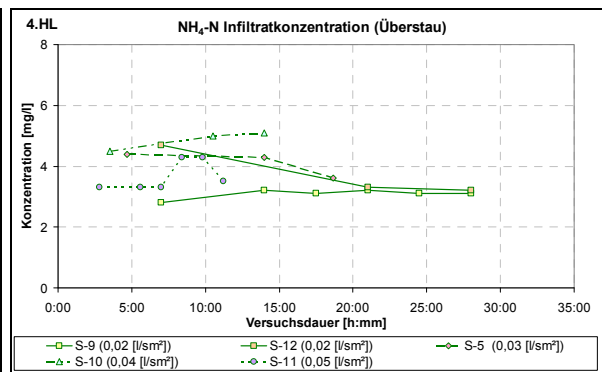
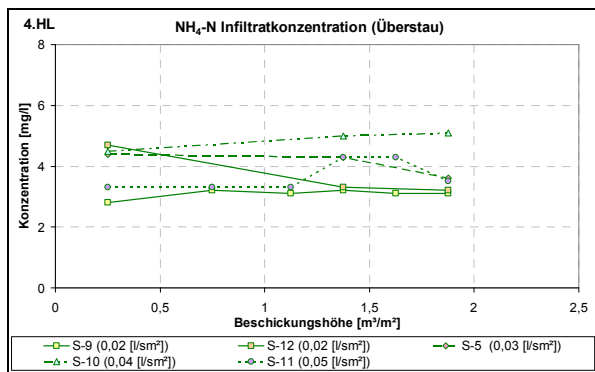
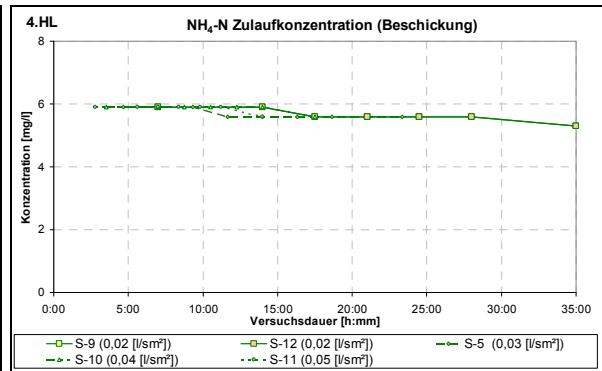
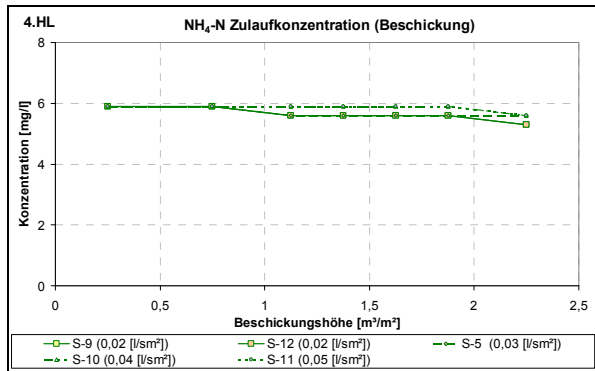


NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen



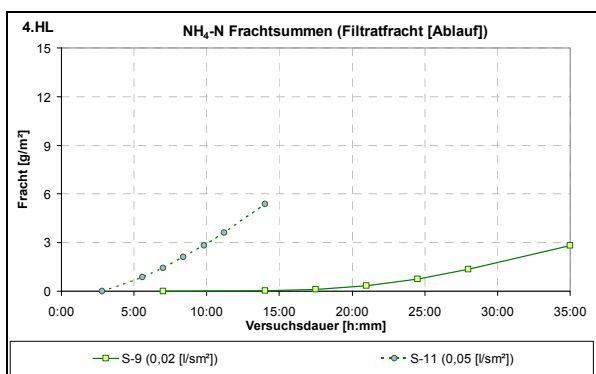
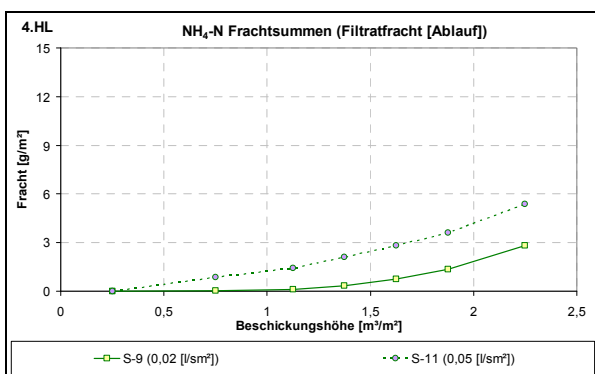
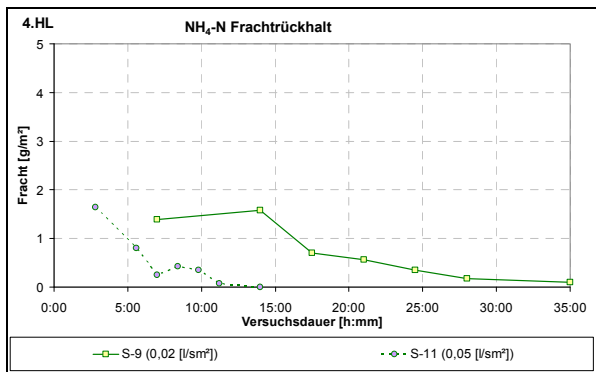
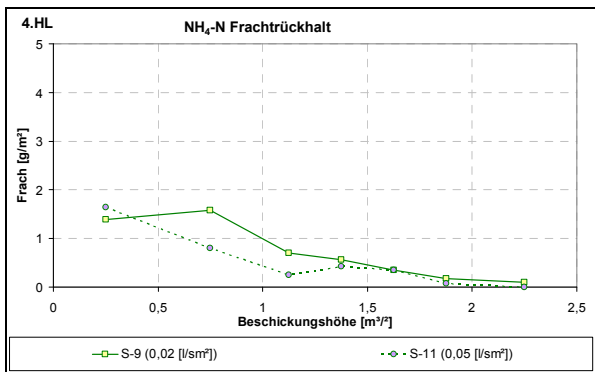
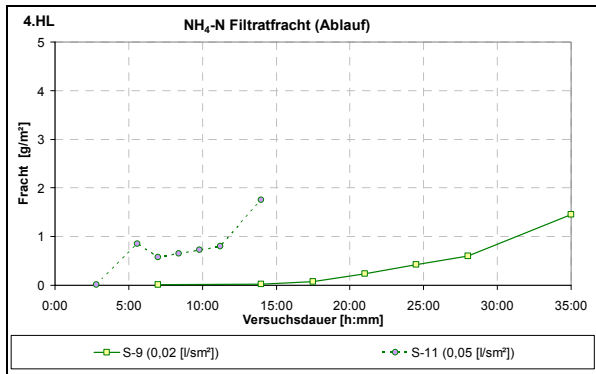
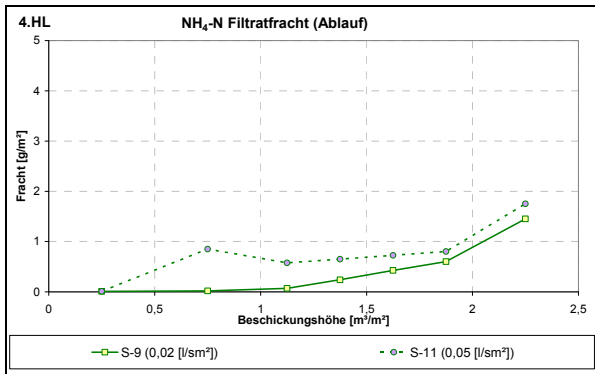
## Anhang 7.5 4. Hochlastversuch

### NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen

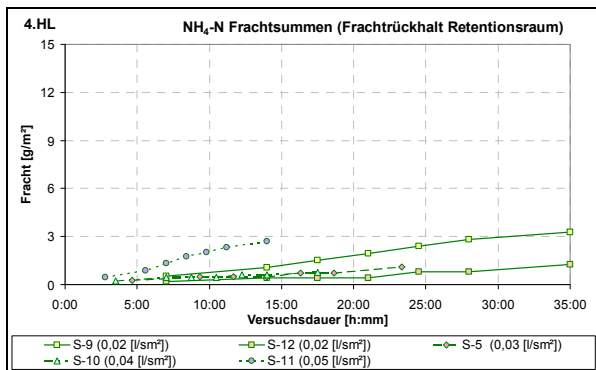
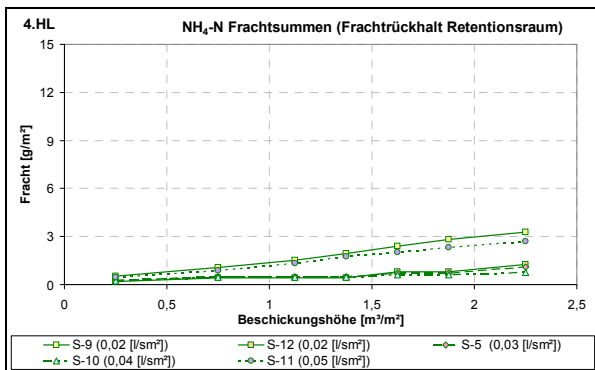


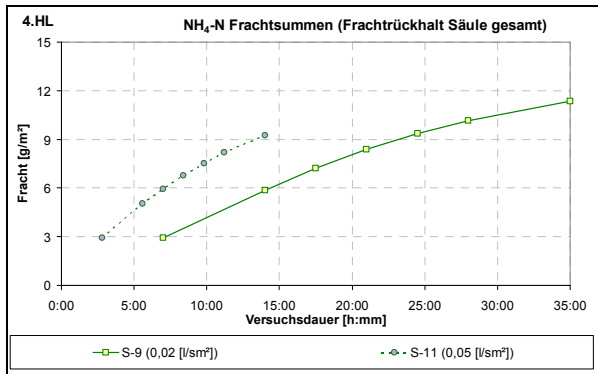
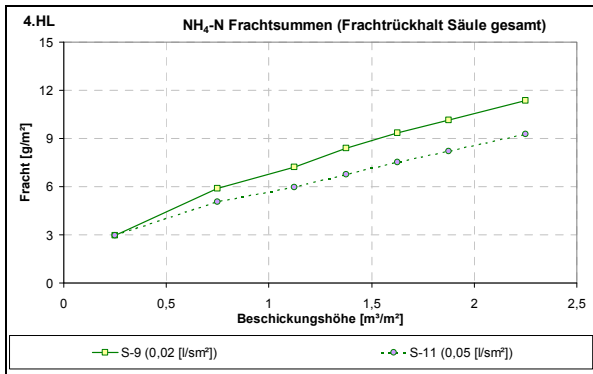
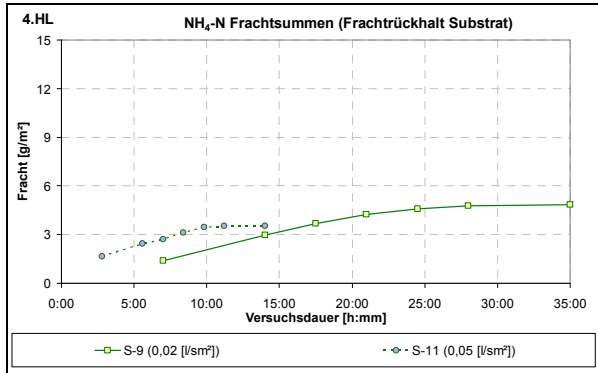
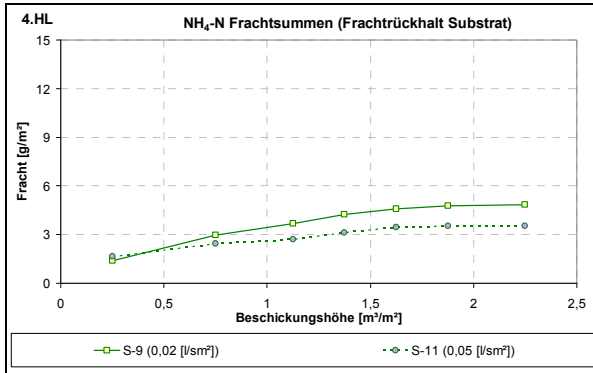


NH<sub>4</sub>-N-Frachten

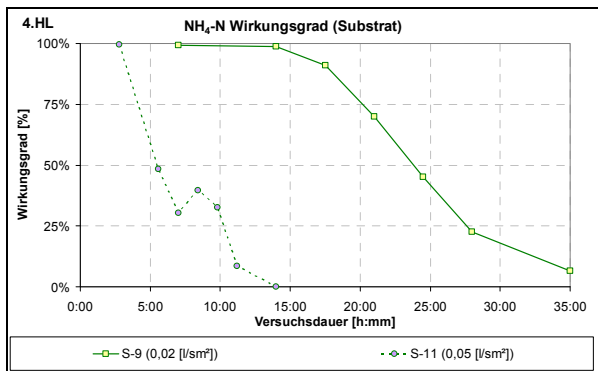
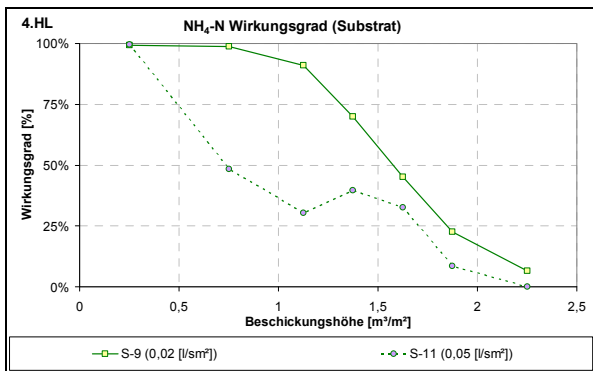
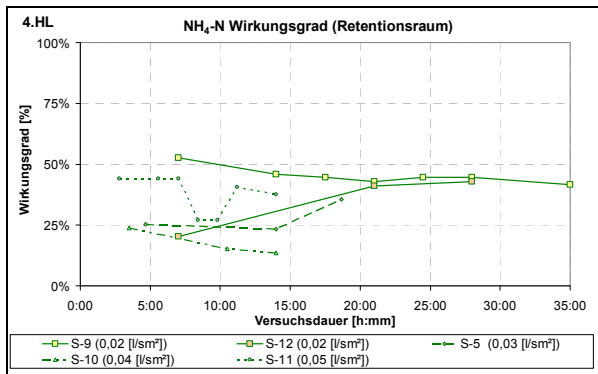
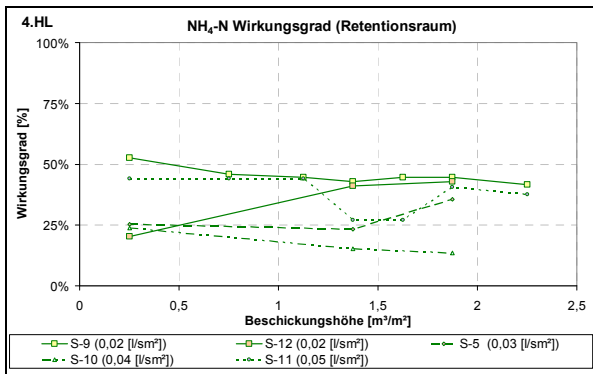


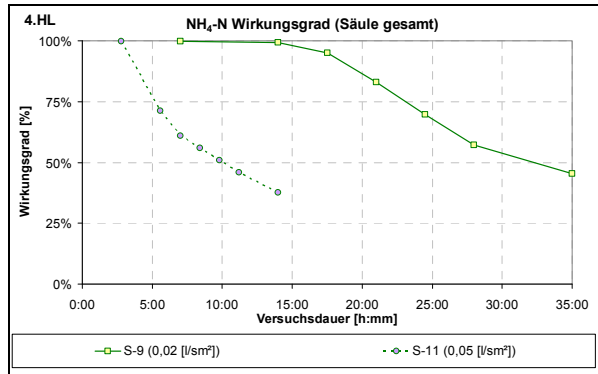
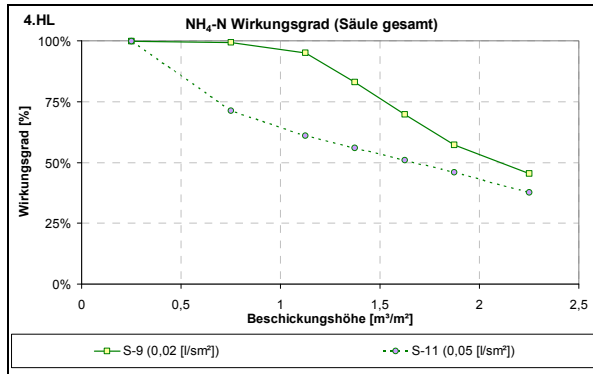
NH<sub>4</sub>-N-Frachtrückhalte als Summenlinien



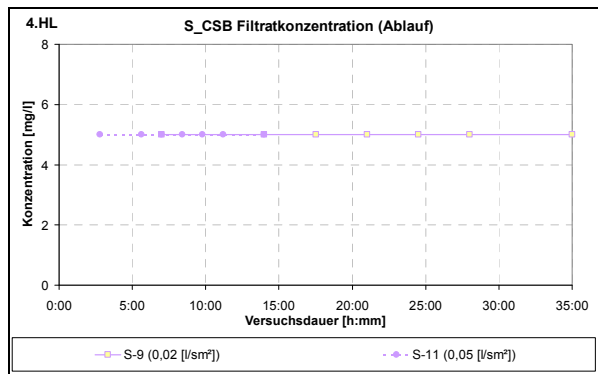
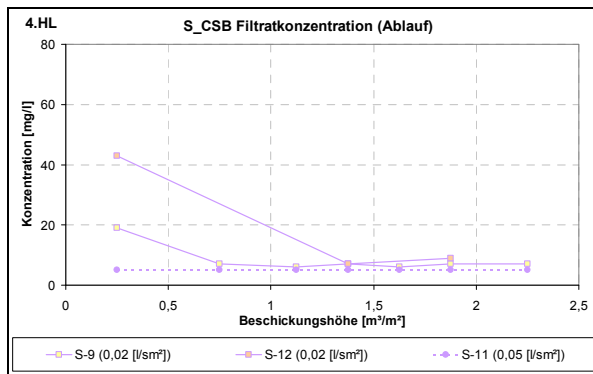
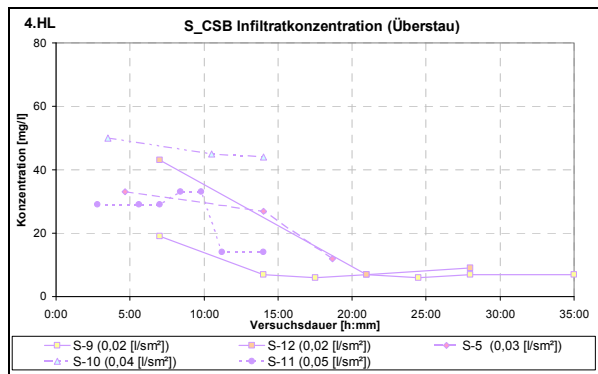
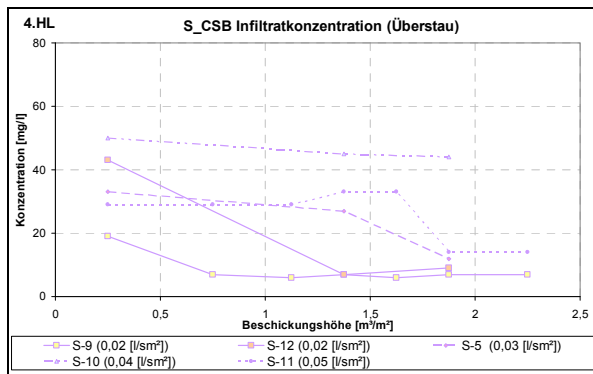
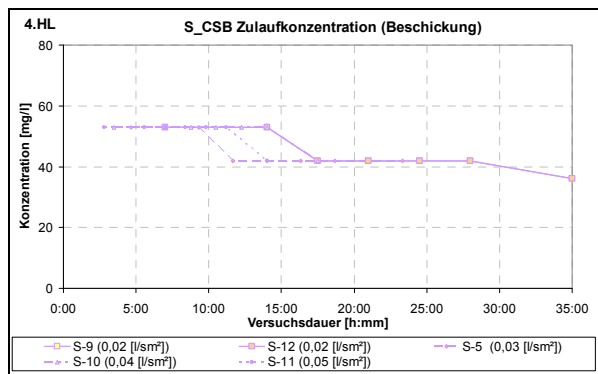
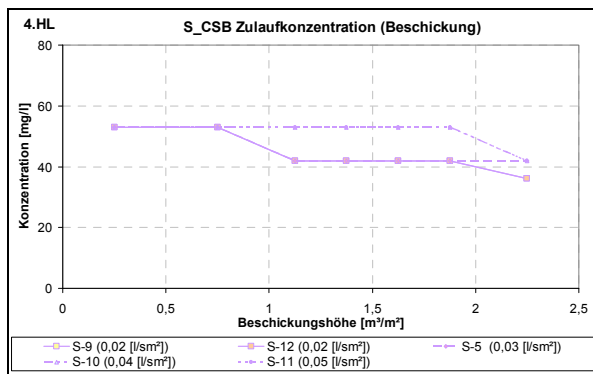


NH<sub>4</sub>-N-Wirkungsgrade

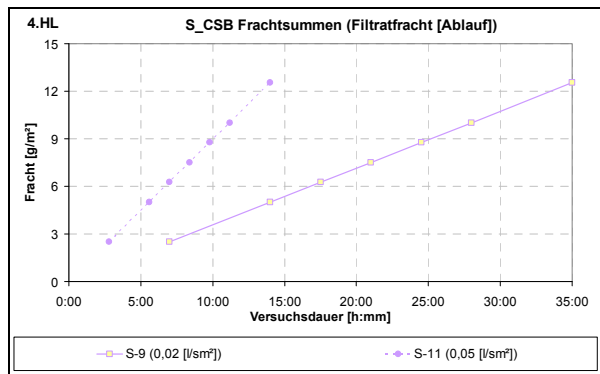
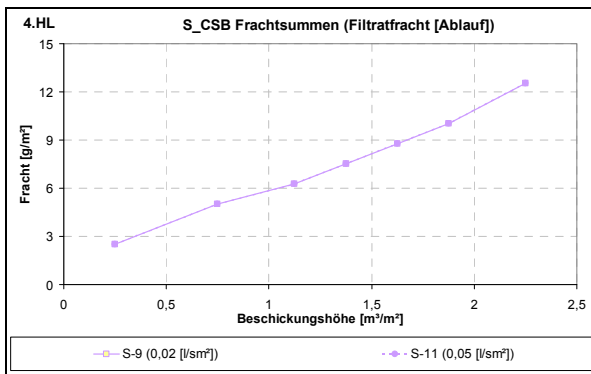
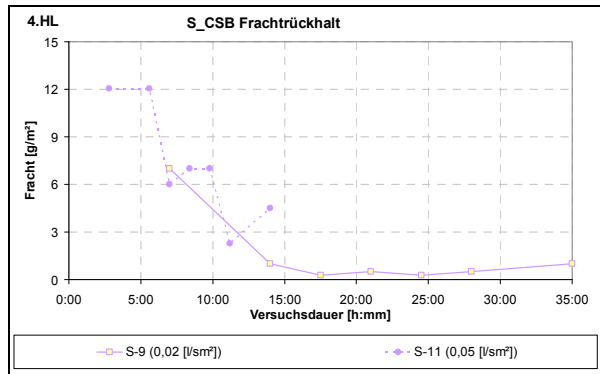
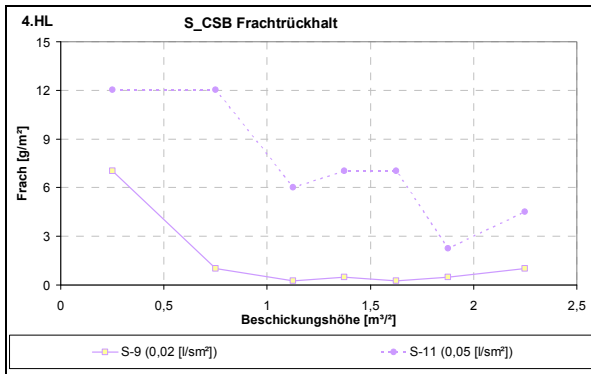




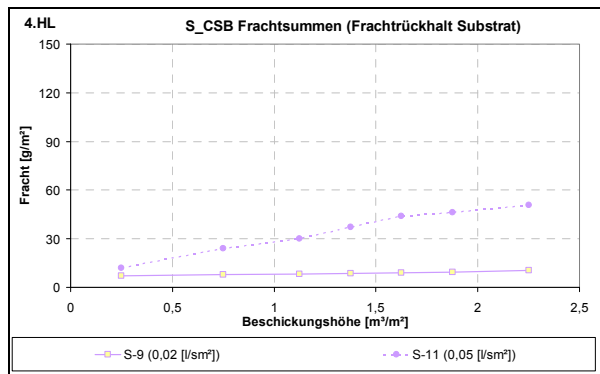
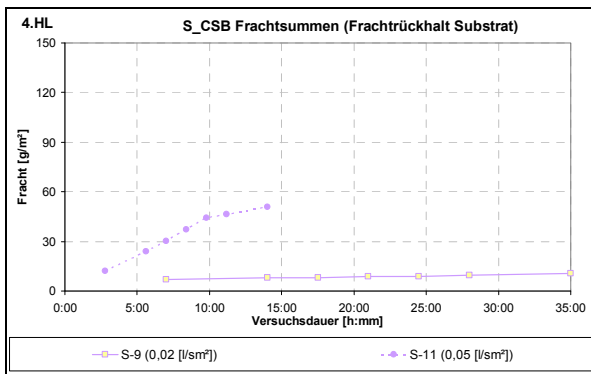
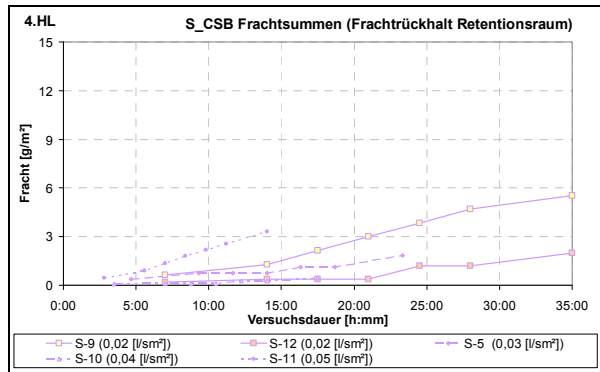
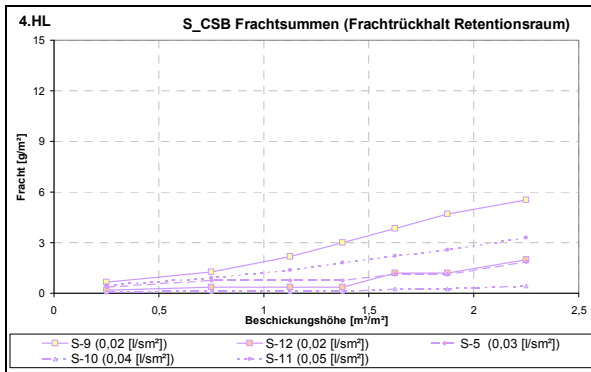
S\_CSB-Konzentrationen

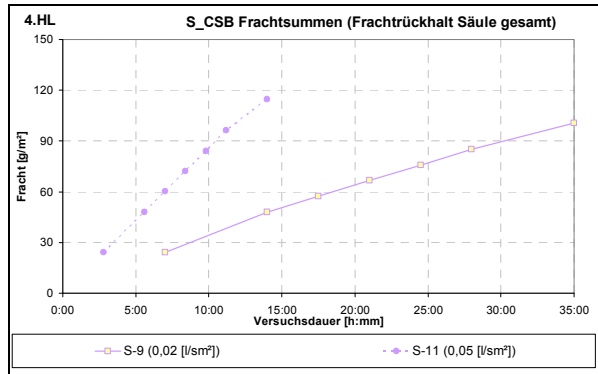
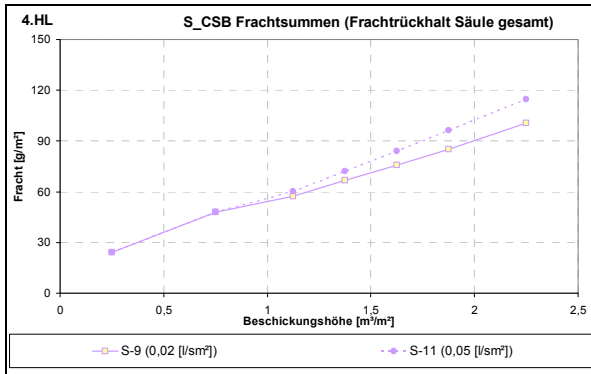


S\_CSB-Frachten

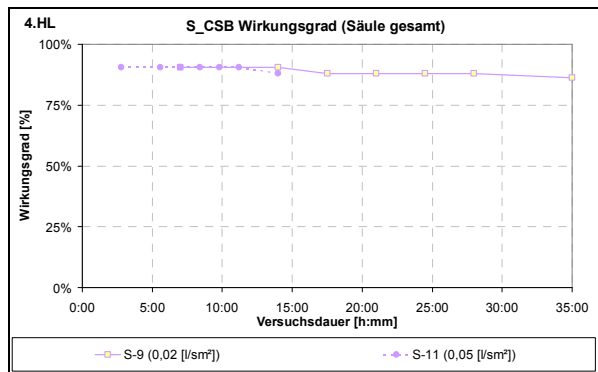
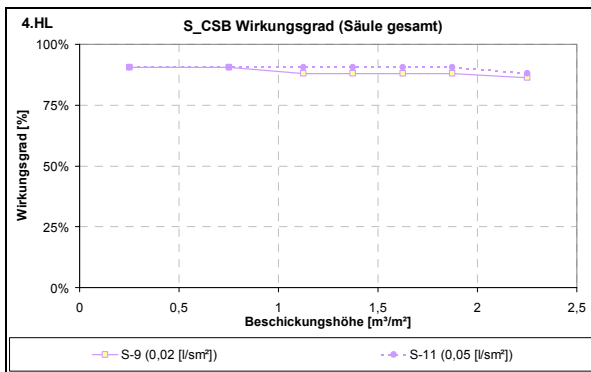
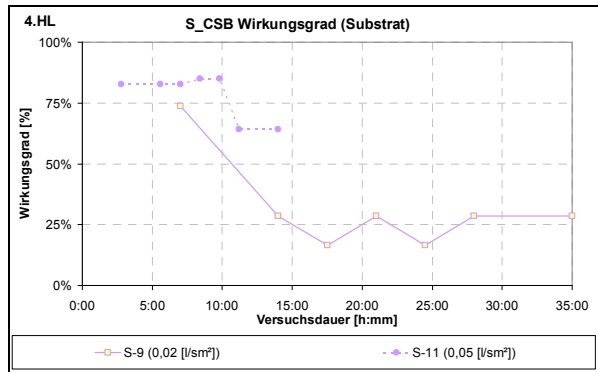
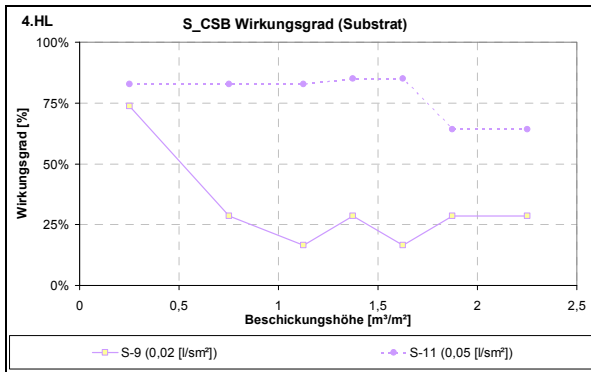
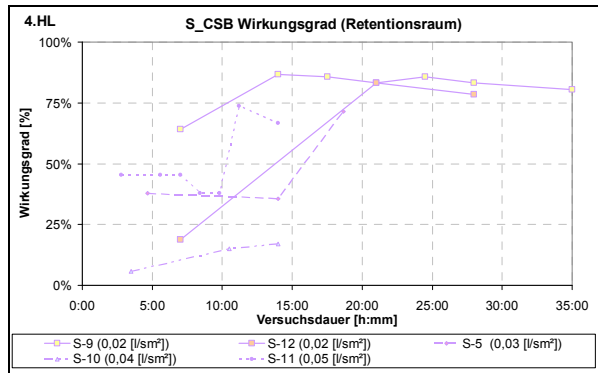
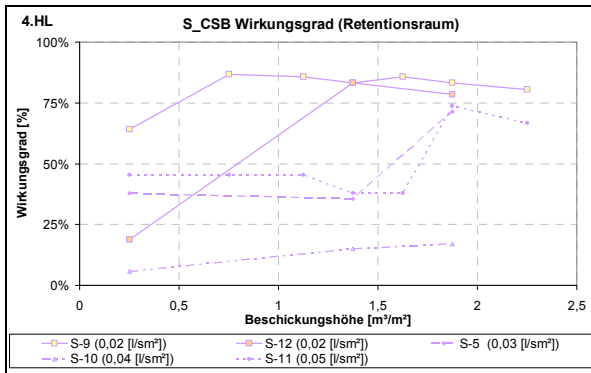


S\_CSB-Frachtrückhalte als Summenlinien

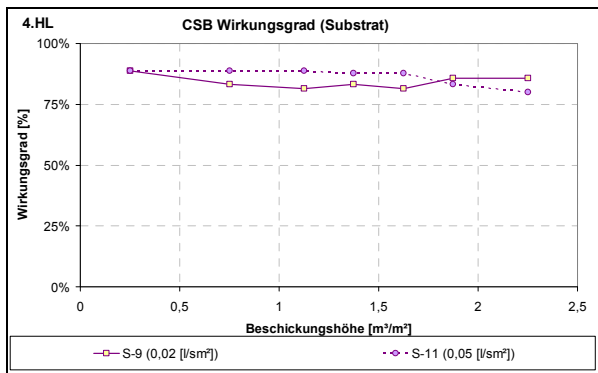
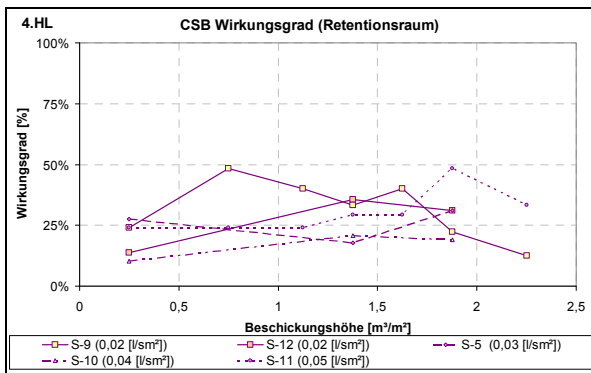
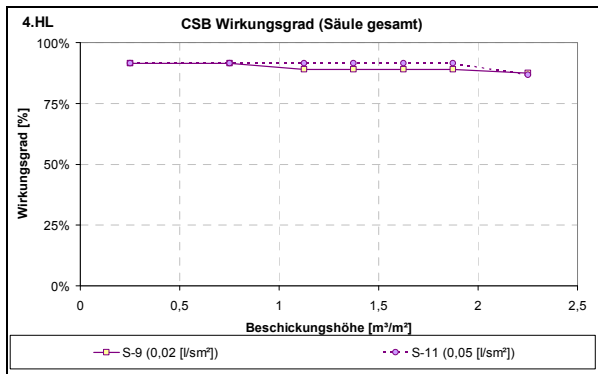
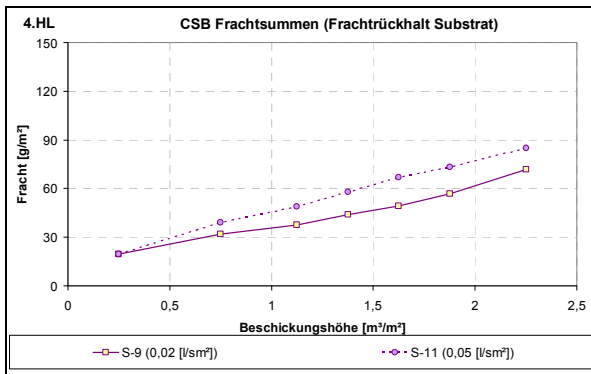
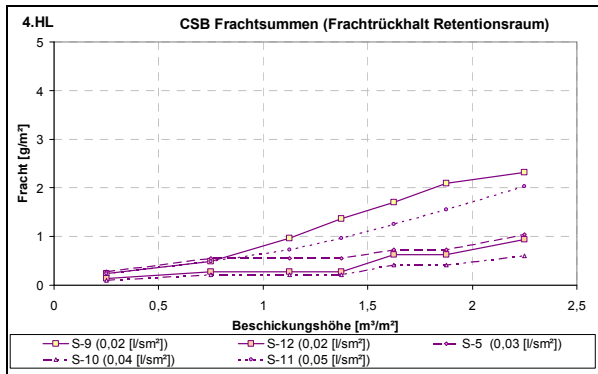
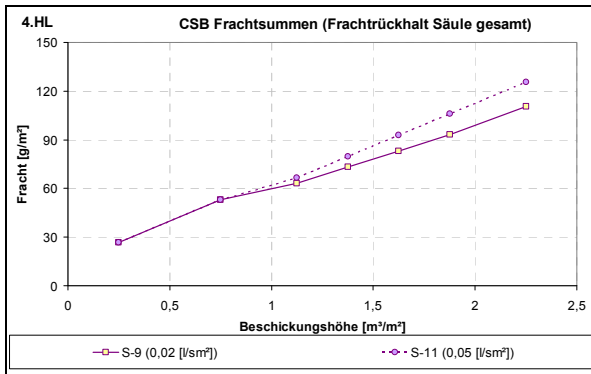
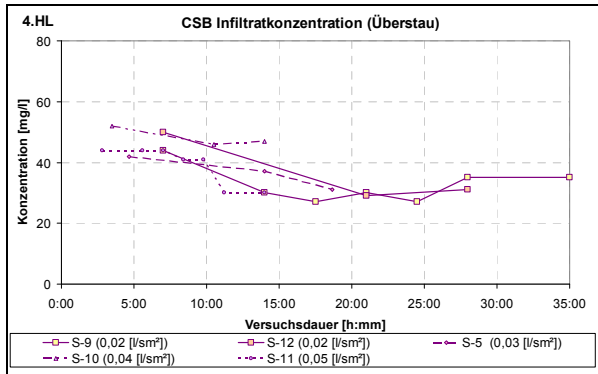
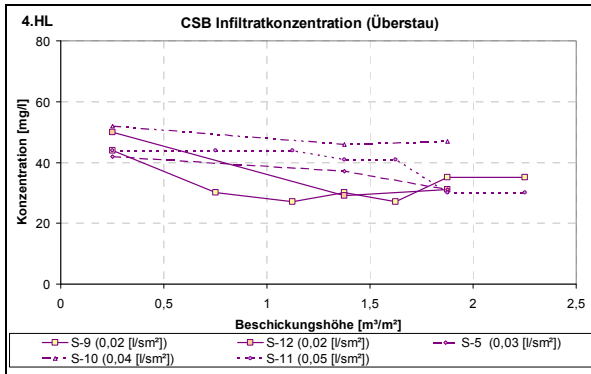




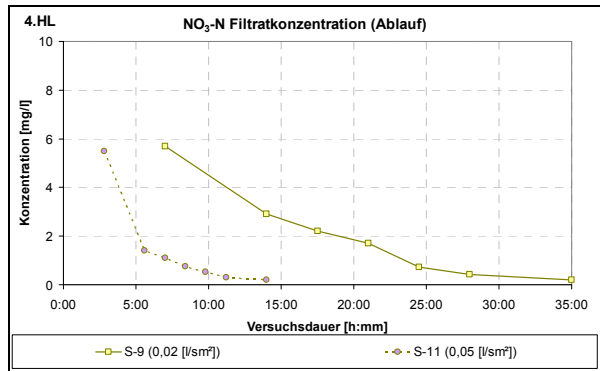
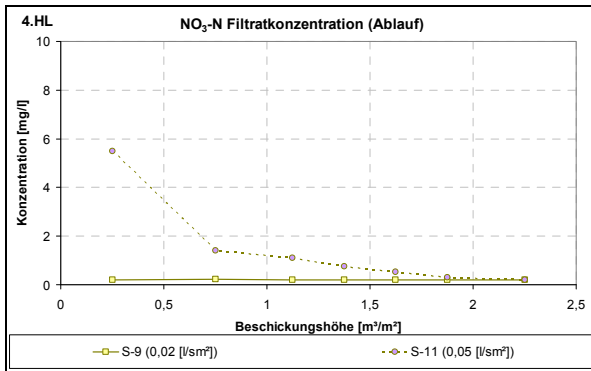
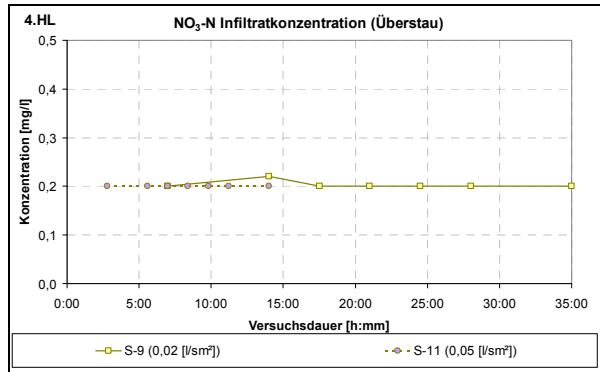
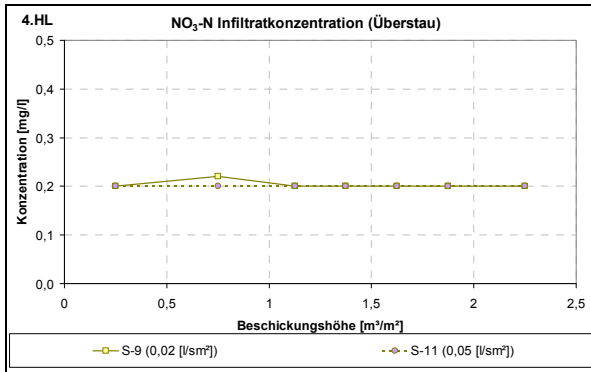
S\_CSB-Wirkungsgrade



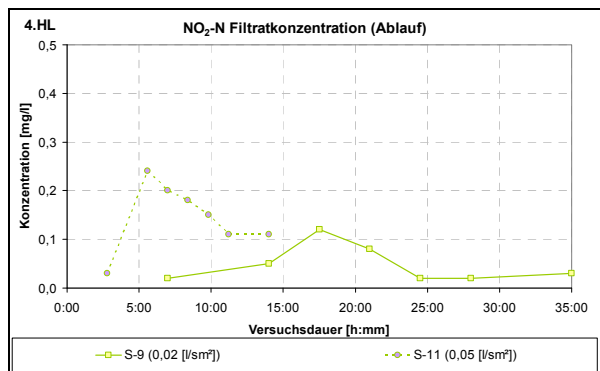
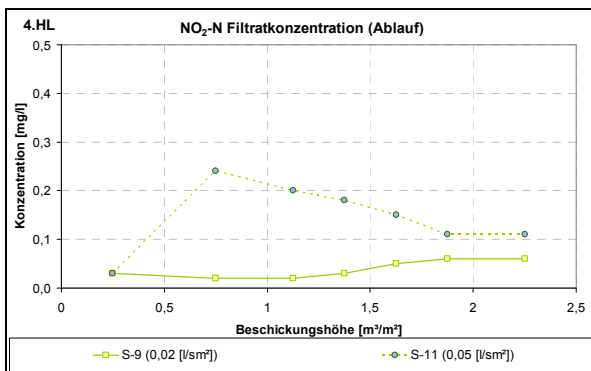
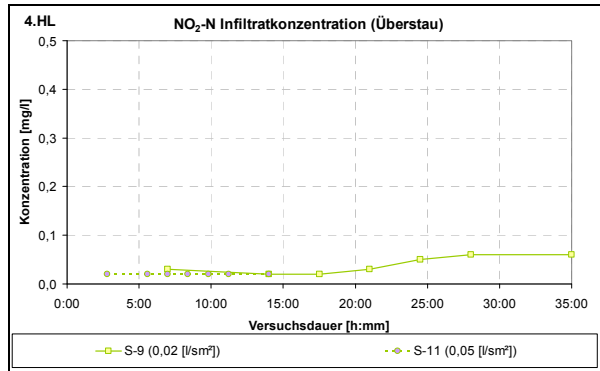
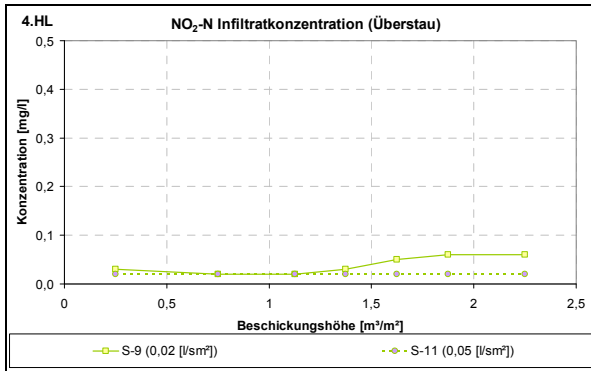
CSB-Konzentrationen, Frachten, Frachtsummen und Wirkungsgrade



NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen



NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen



### Anhang 9 Ergebnisse zu Kapitel 9 (Nutschenversuche)

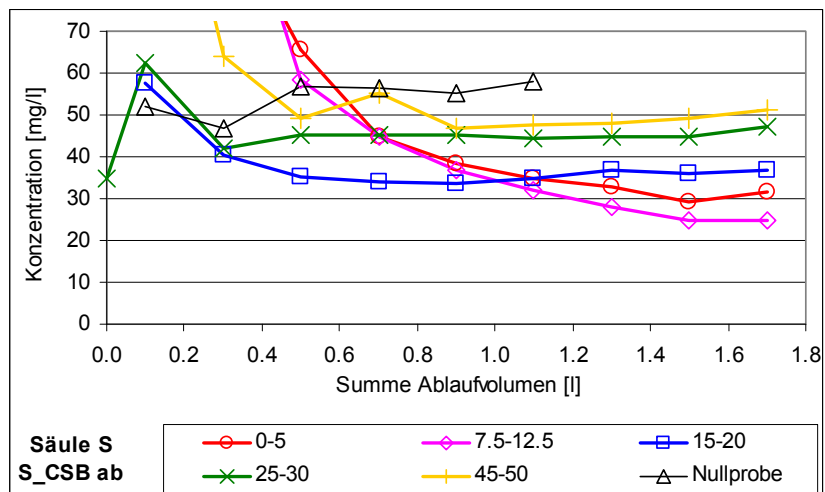


Bild-Anhang 9.53: Ablaufganglinien S\_CS ab Nutschen mit Substrat DWAll

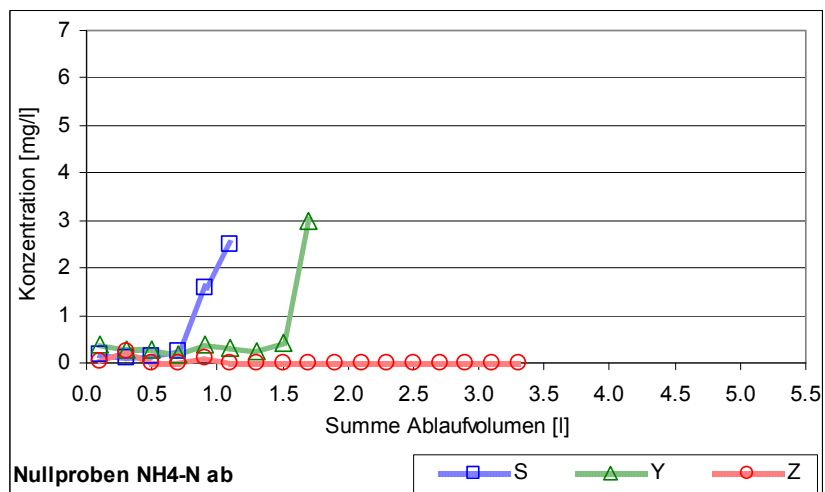
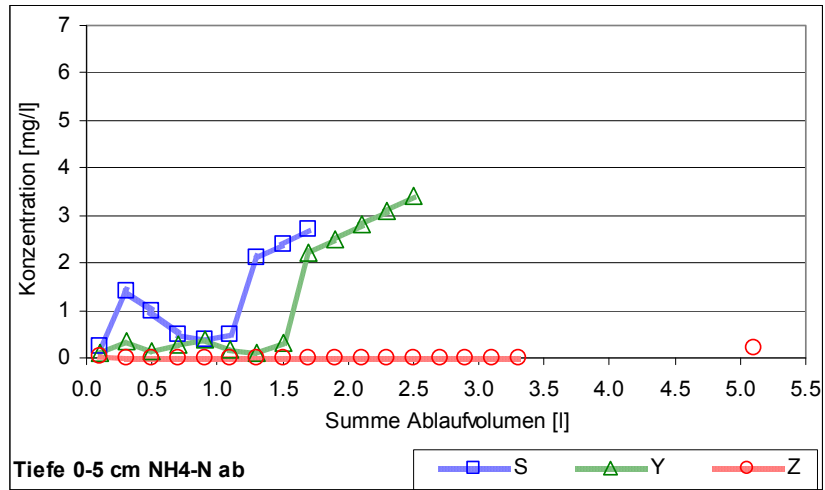
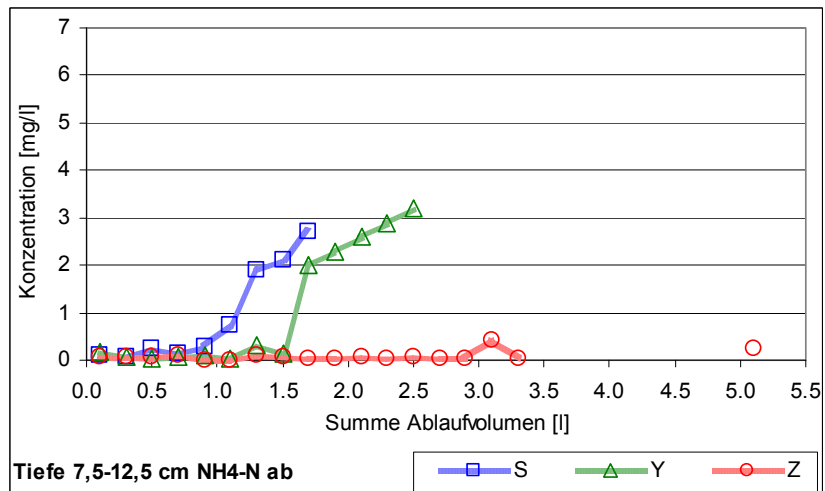


Bild-Anhang 9.54: Substratvergleich NH4-N Nutschen mit Nullproben

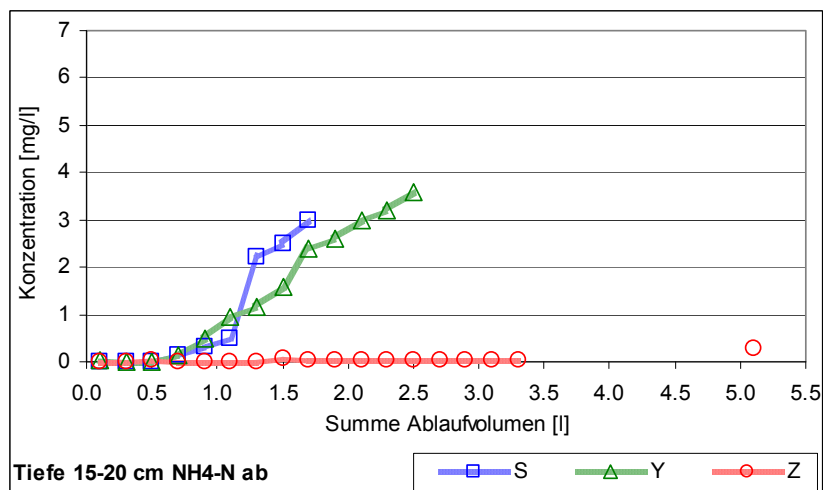




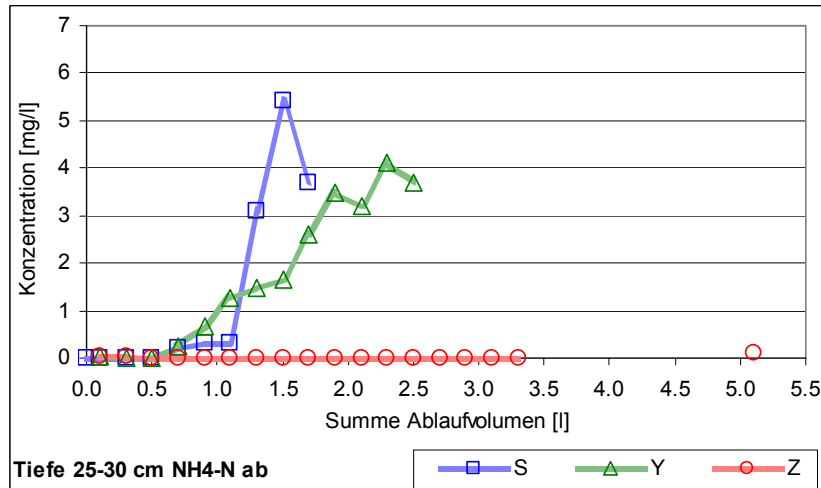
**Bild-Anhang 9.55: Substratvergleich NH4-N Nutschen aus Tiefe 0-5 cm**



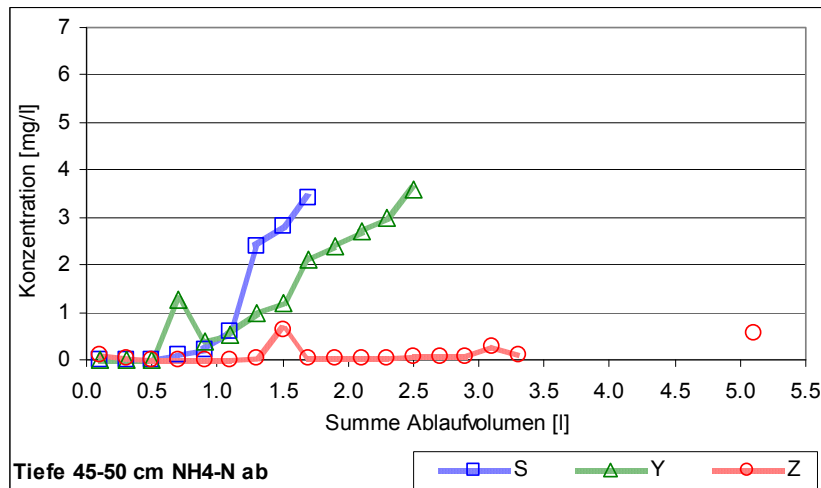
**Bild-Anhang 9.56: Substratvergleich NH4-N Nutschen aus Tiefe 7,5-12,5 cm**



**Bild-Anhang 9.57: Substratvergleich NH4-N Nutschen aus Tiefe 15-20 cm**

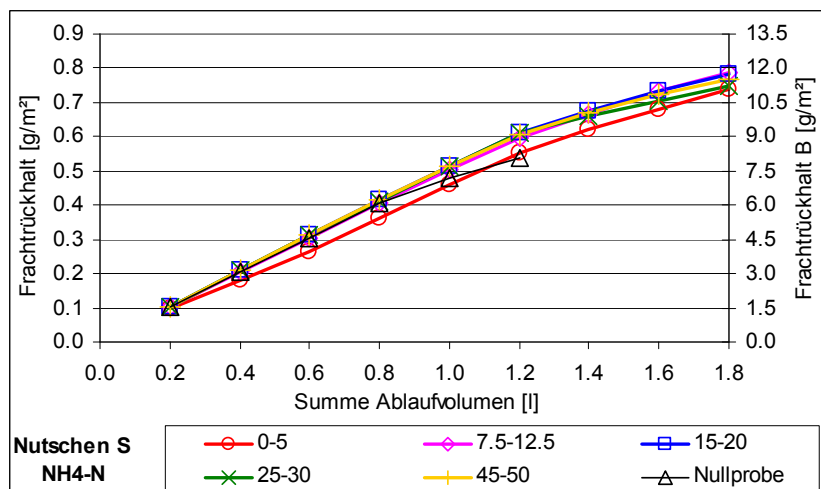


**Bild-Anhang 9.58: Substratvergleich NH4-N Nutschen aus Tiefe 25-30 cm**

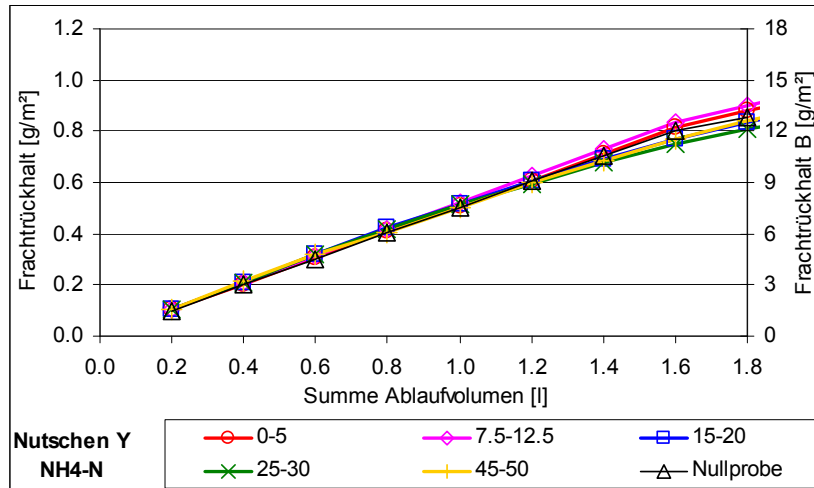


**Bild-Anhang 9.59: Substratvergleich NH4-N Nutschen aus Tiefe 45-50 cm**

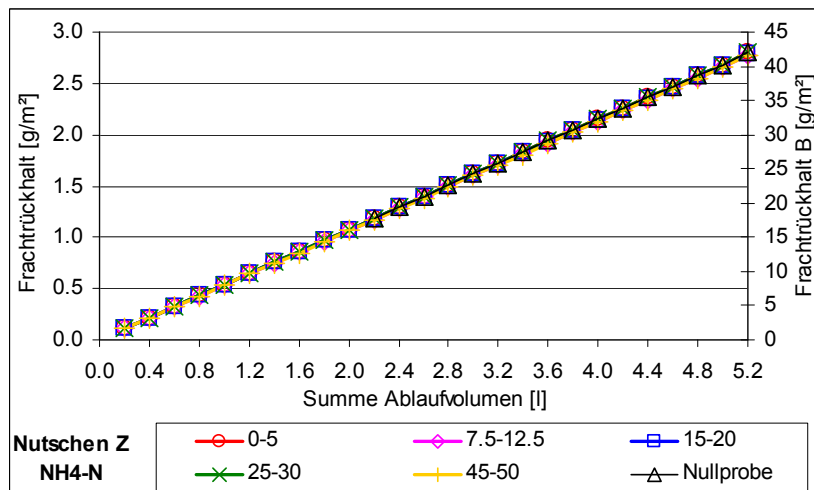
### Anhang 9.1 Auswertung der Ergebnisse



**Bild-Anhang 9.60: Summe absoluter Frachtrückhalt NH4-N Nutschen mit Substrat DWAll  
Frachtrückhalt B = Frachtrückhalt \* 75 cm/5 cm**

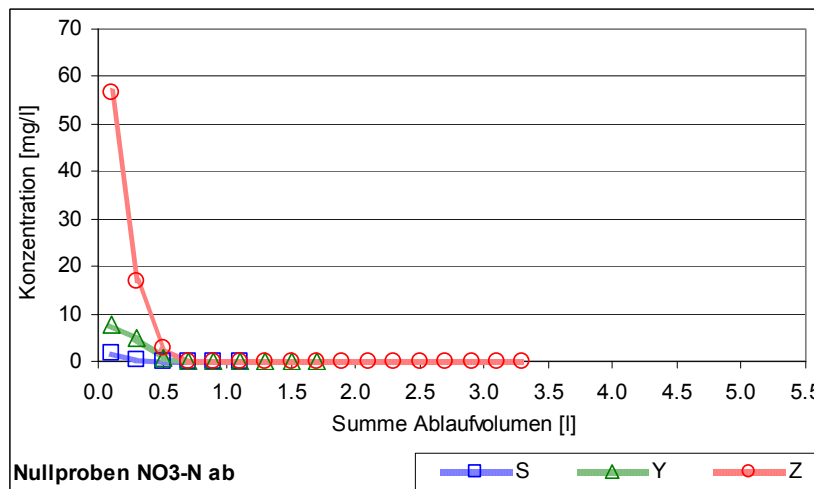


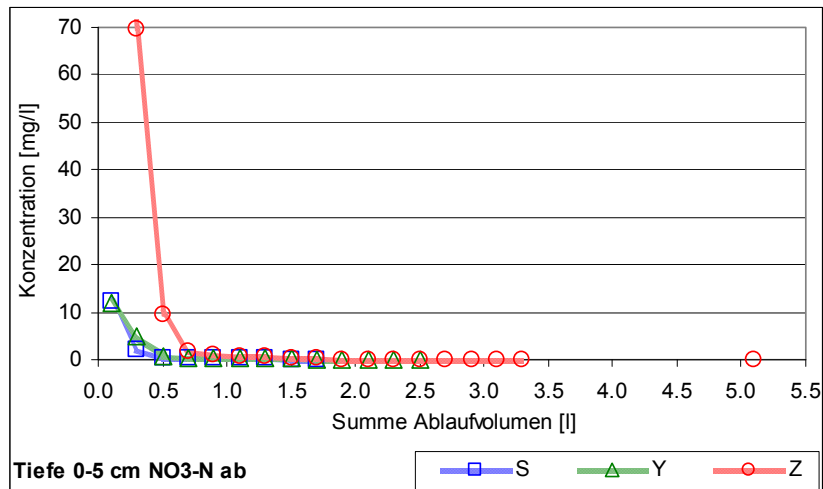
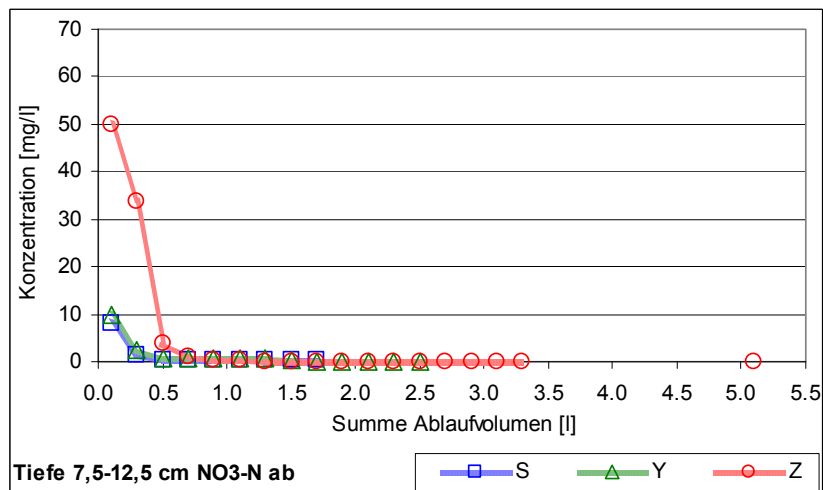
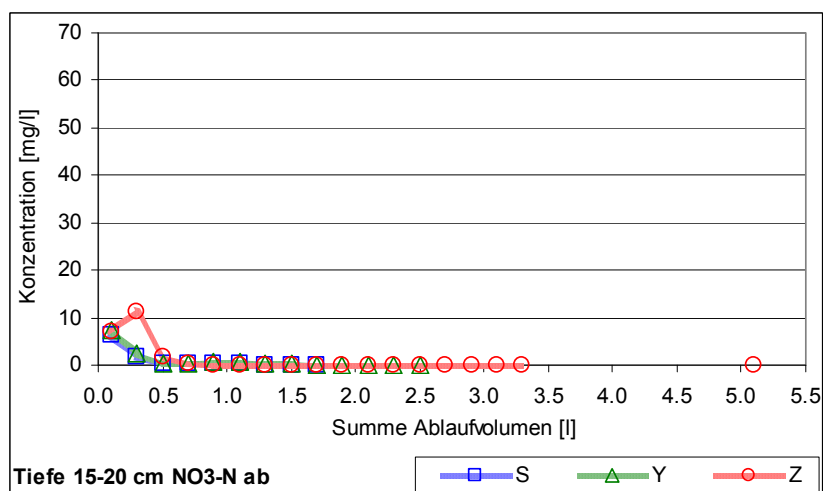
**Bild-Anhang 9.61:** Summe absoluter Frachrückhalt NH4-N Nutschen mit Substrat SUBII  
 Frachrückhalt B = Frachrückhalt \* 75 cm/5 cm



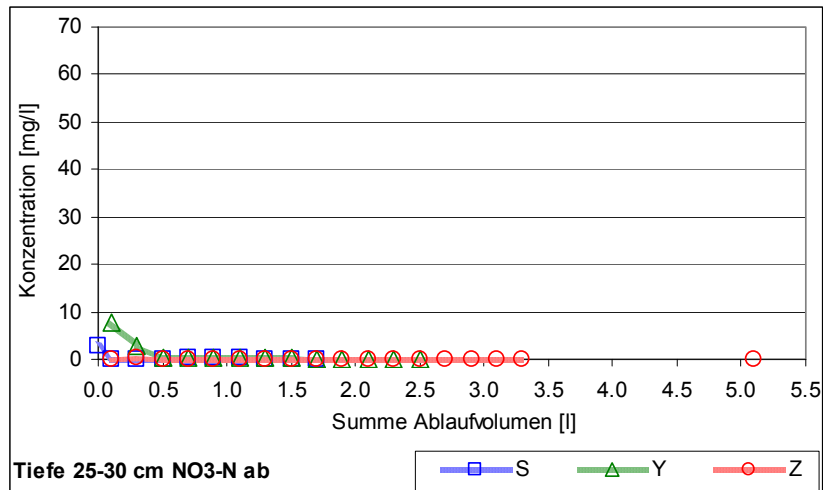
**Bild-Anhang 9.62:** Summe absoluter Frachrückhalt NH4-N Nutschen mit Substrat LS  
 Frachrückhalt B = Frachrückhalt \* 75 cm/5 cm

zu Kapitel 9.3.2

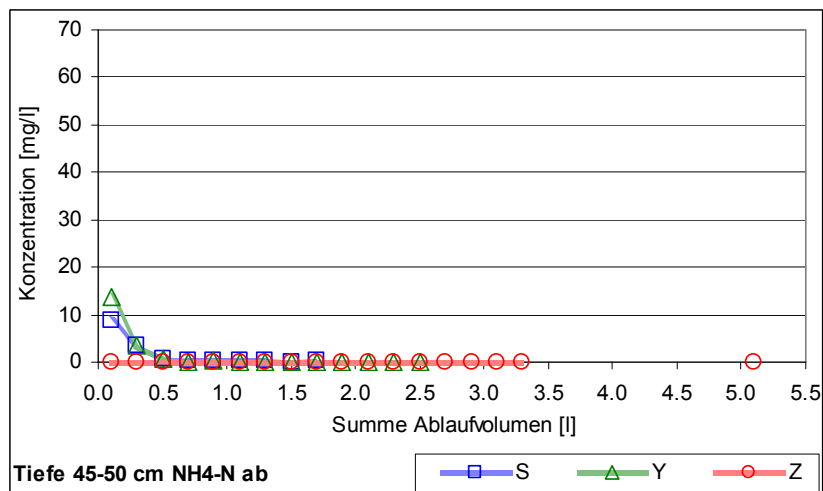


**Bild-Anhang 9.63: Substratvergleich NO<sub>3</sub>-N Nutschen mit Nullproben****Bild-Anhang 9.64: Substratvergleich NO<sub>3</sub>-N Nutschen aus Tiefe 0-5 cm****Bild-Anhang 9.65: Substratvergleich NO<sub>3</sub>-N Nutschen aus Tiefe 7,5-12,5 cm**

**Bild-Anhang 9.66: Substratvergleich NO<sub>3</sub>-N Nutschen aus Tiefe 15-20 cm**

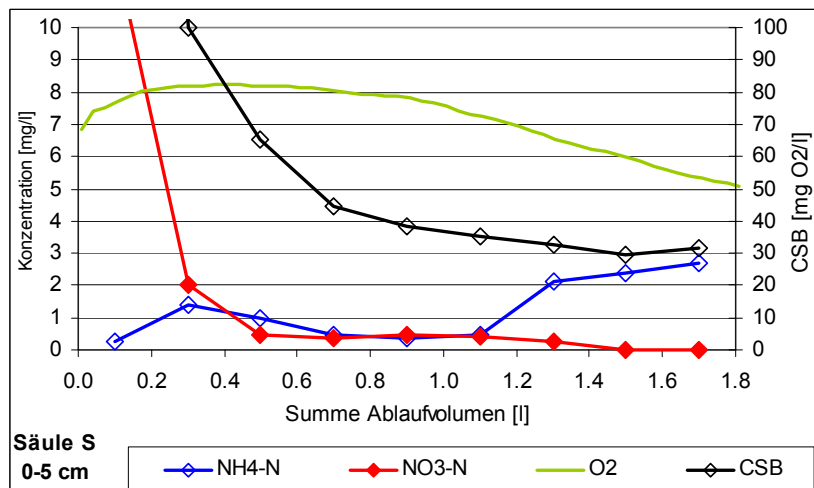


**Bild-Anhang 9.67: Substratvergleich NO<sub>3</sub>-N Nutschen aus Tiefe 25-30 cm**

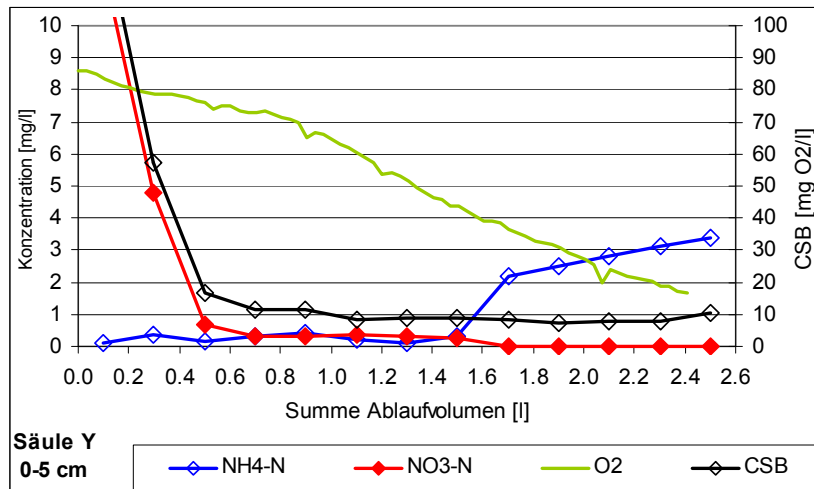


**Bild-Anhang 9.68: Substratvergleich NO<sub>3</sub>-N Nutschen aus Tiefe 45-50 cm**

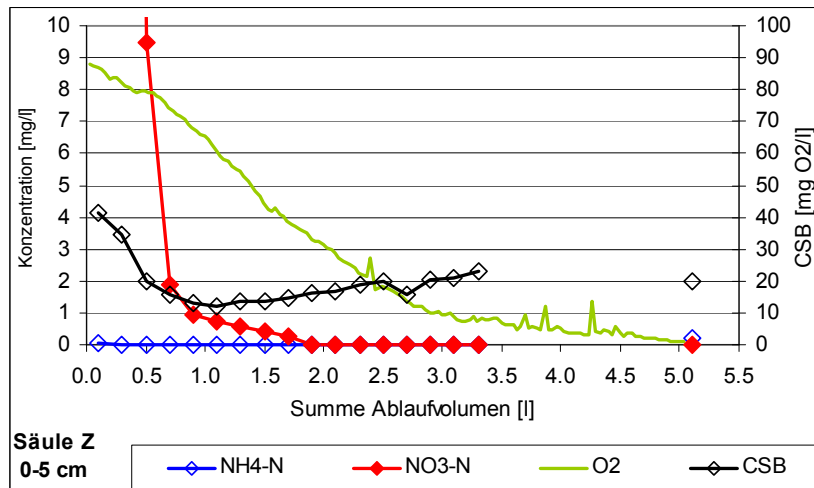
**Darstellung der Ablaufganglinien (Kapitel 9.3) für die untersuchten Säulen**



**Bild-Anhang 9.69: Ablaufganglinien Substrat DWAll Tiefe 0-5 cm**

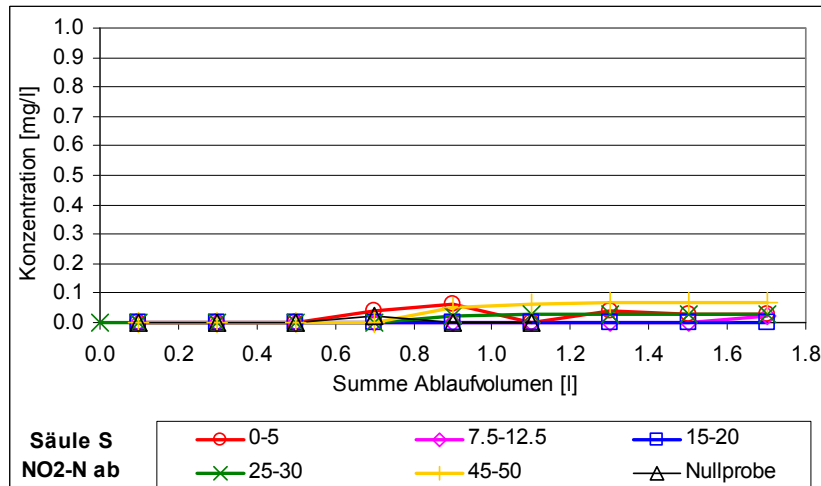


**Bild-Anhang 9.70: Ablaufganglinien Substrat SUBII Tiefe 0-5 cm**

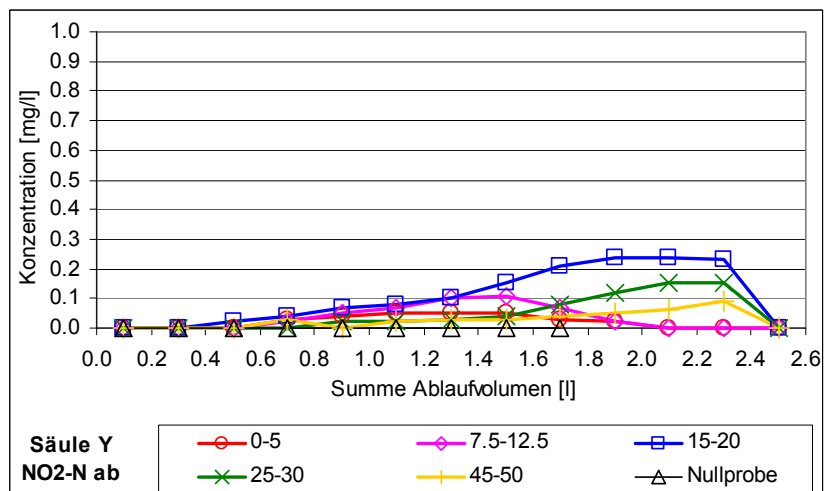


**Bild-Anhang 9.71: Ablaufganglinien Substrat LS Tiefe 0-5 cm**

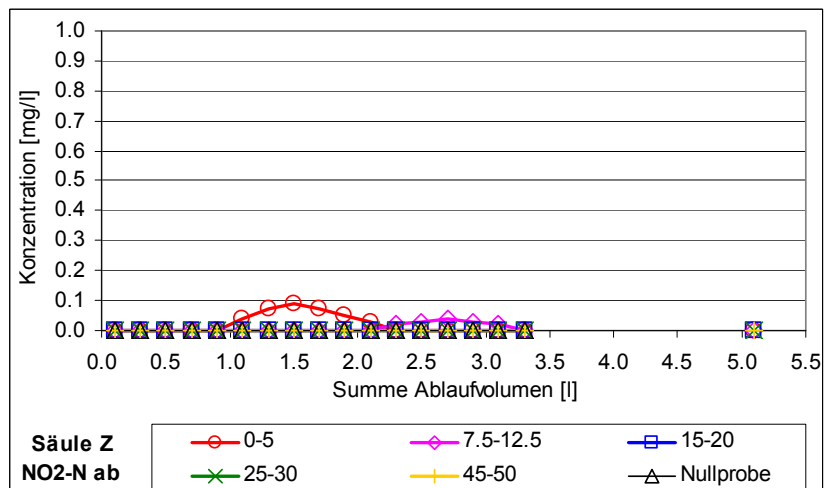
**Nitrit-Stickstoff:**



**Bild-Anhang 9.72: Ablaufganglinien NO<sub>2</sub>-N Nutschen mit Substrat DWaII**

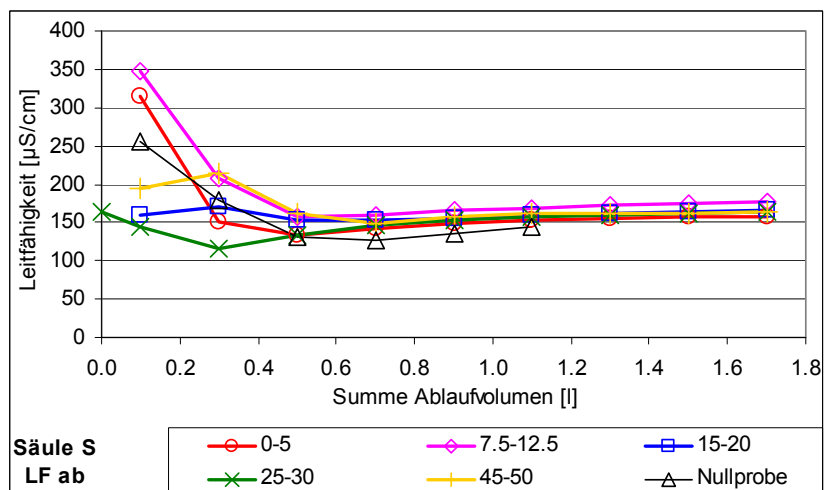


**Bild-Anhang 9.73: Ablaufganglinien NO<sub>2</sub>-N Nutschen mit Substrat SUBII**

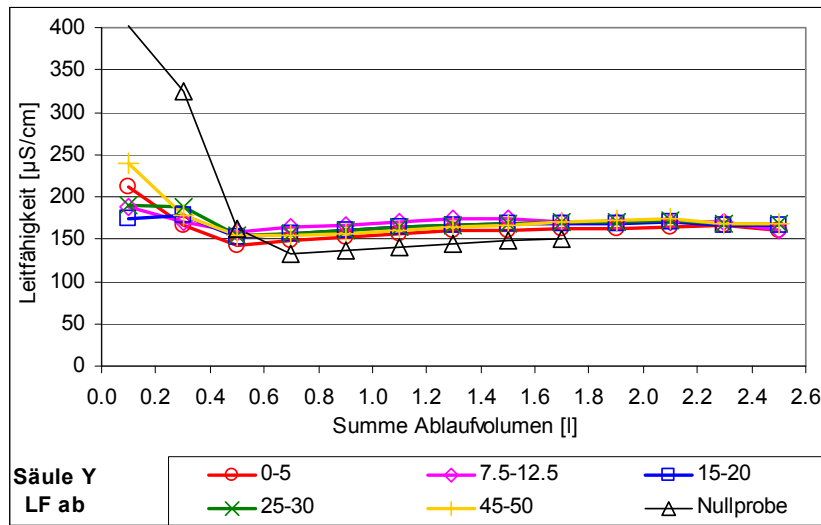


**Bild-Anhang 9.74: Ablaufganglinien NO<sub>2</sub>-N Nutschen mit Substrat LS**

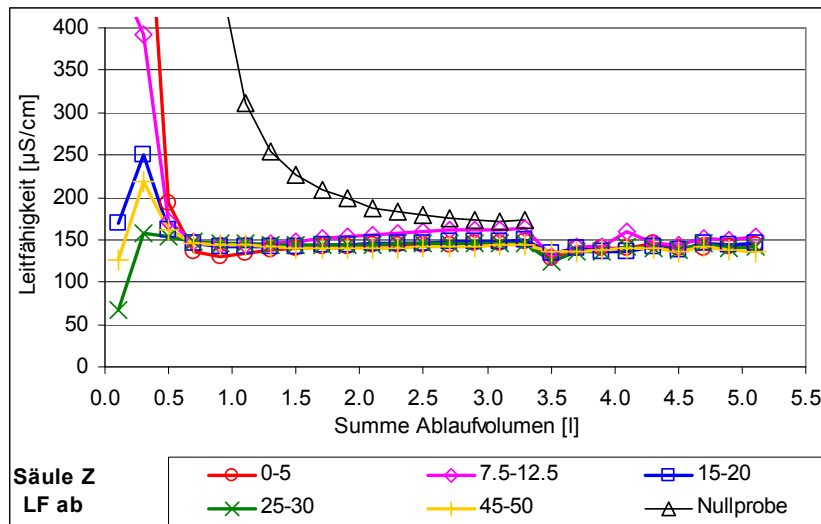
**elektrische Leitfähigkeit:**



**Bild-Anhang 9.75: Ablaufganglinien elektrische Leitfähigkeit Nutschen mit Substrat DWAll**

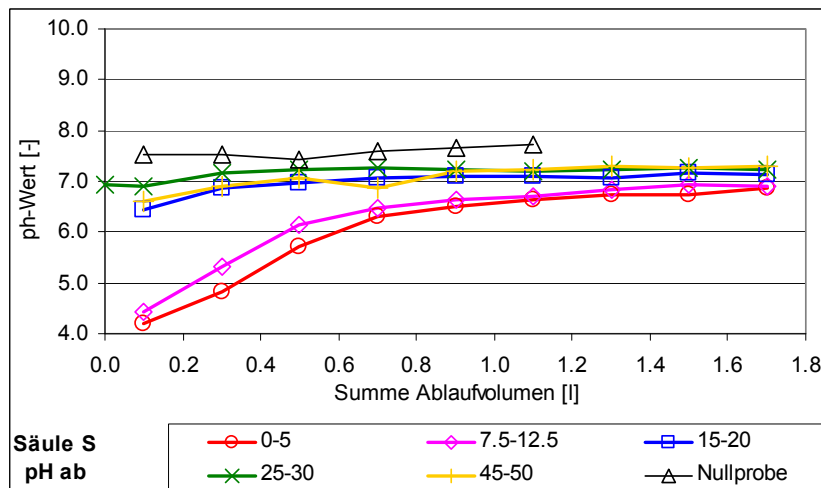


**Bild-Anhang 9.76: Ablaufganglinien elektrische Leitfähigkeit Nutschen mit Substrat SUBII**



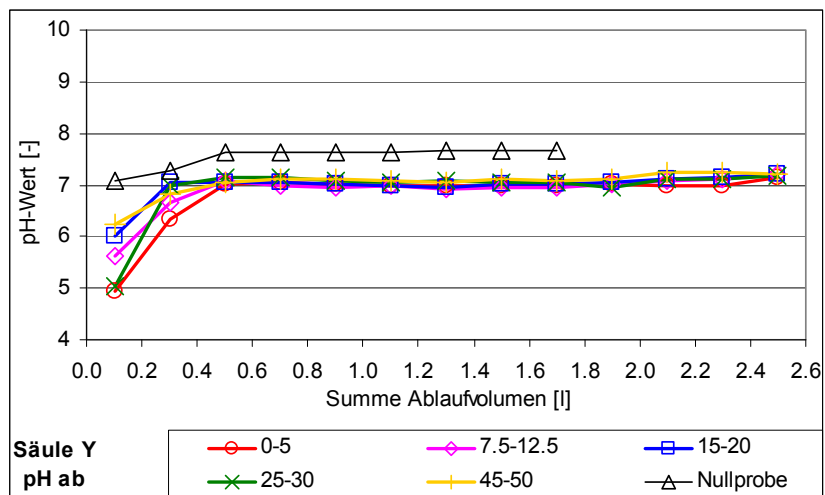
**Bild-Anhang 9.77: Ablaufganglinien elektrische Leitfähigkeit Nutschen mit Substrat LS**

pH-Wert:

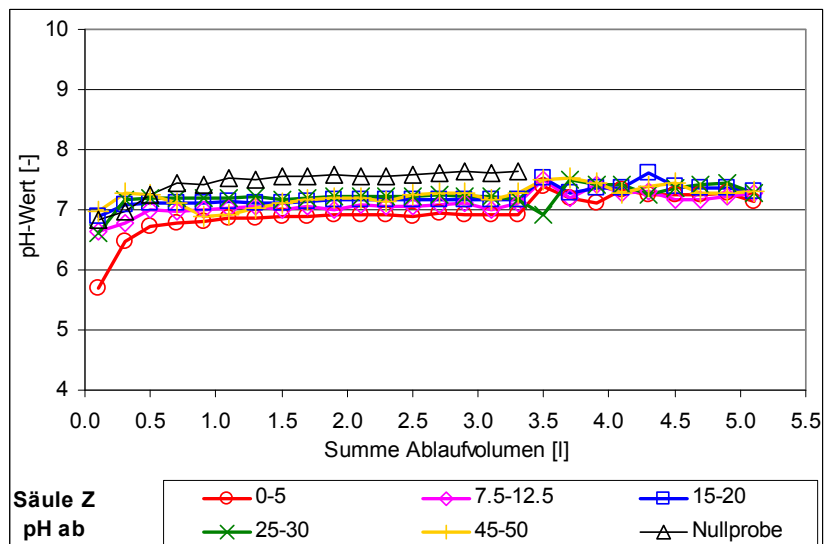




**Bild-Anhang 9.78: Ablaufganglinien pH-Wert Nutschen mit Substrat DWaII**



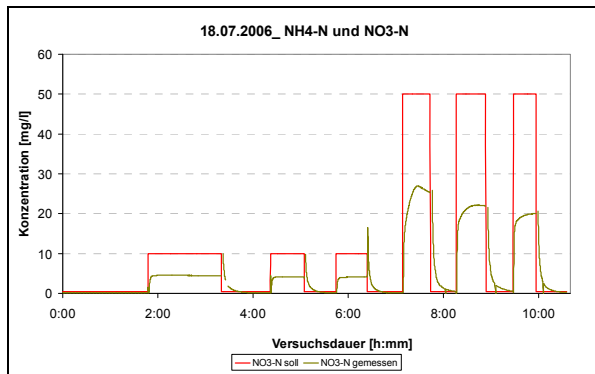
**Bild-Anhang 9.79: Ablaufganglinien pH-Wert Nutschen mit Substrat SUBII**



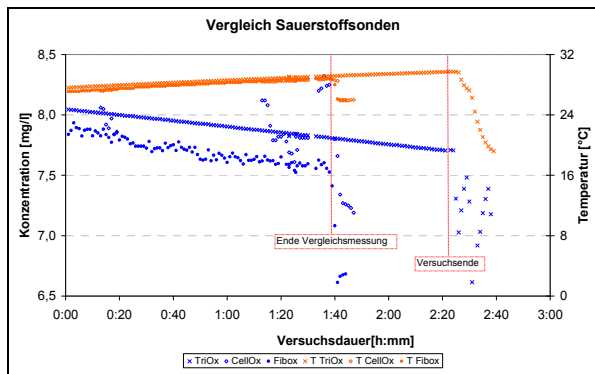
**Bild-Anhang 9.80: Ablaufganglinien pH-Wert Nutschen mit Substrat LS**



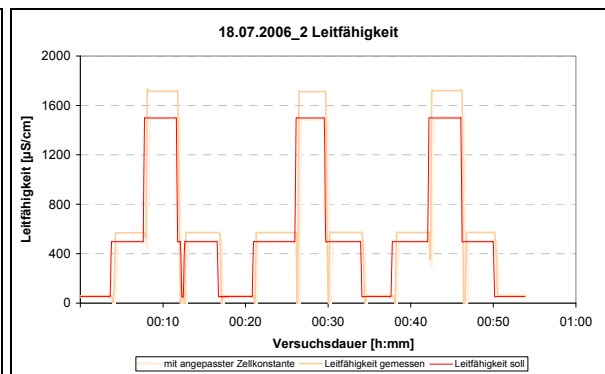
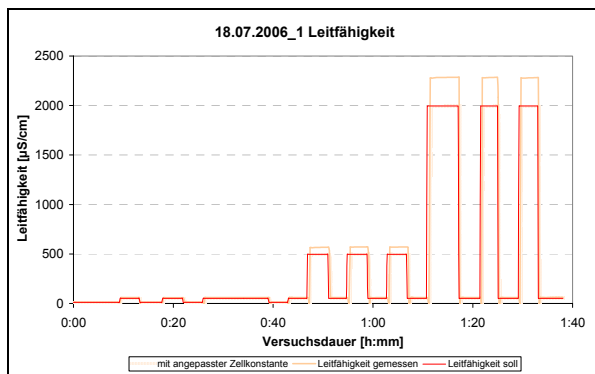
### Nitratstickstoff



### Sauerstoff

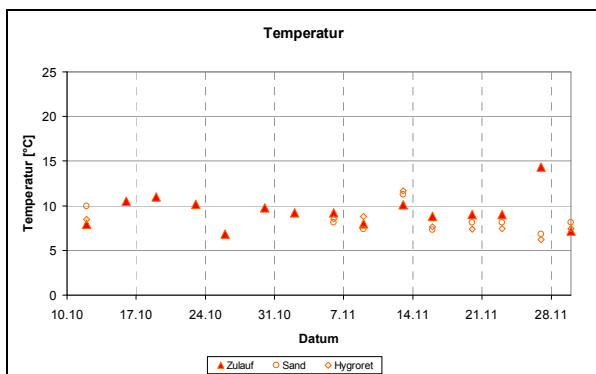
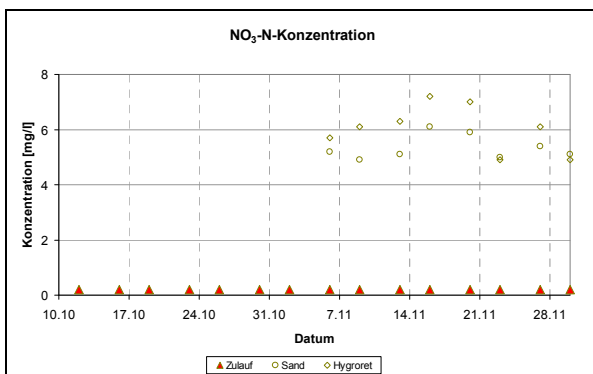
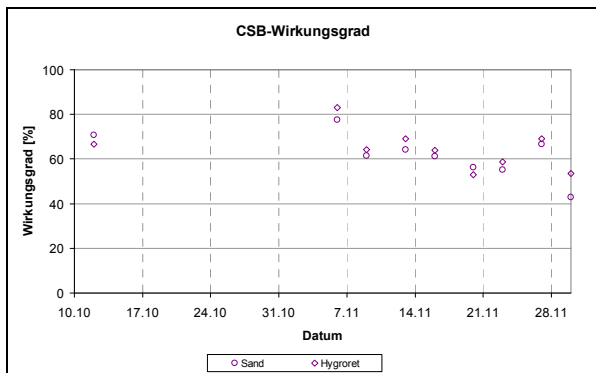
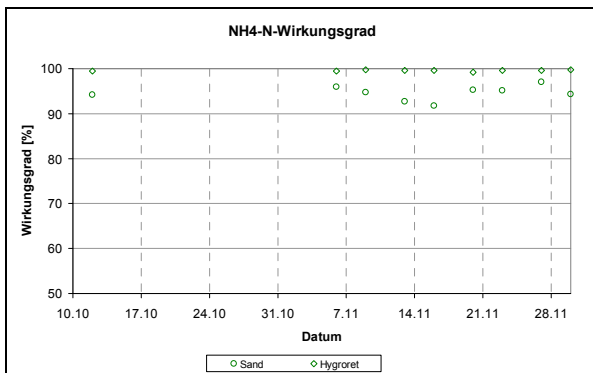
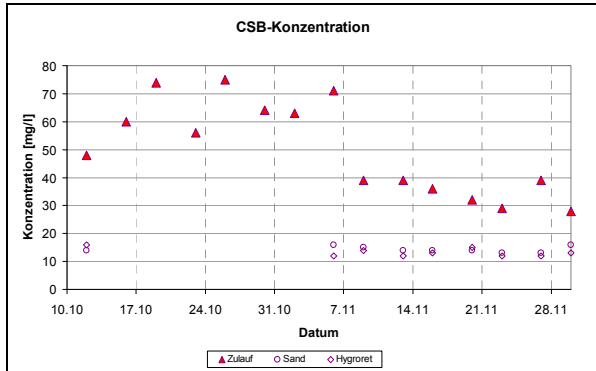
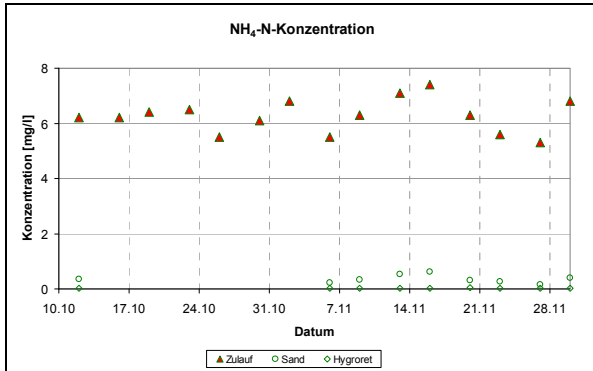


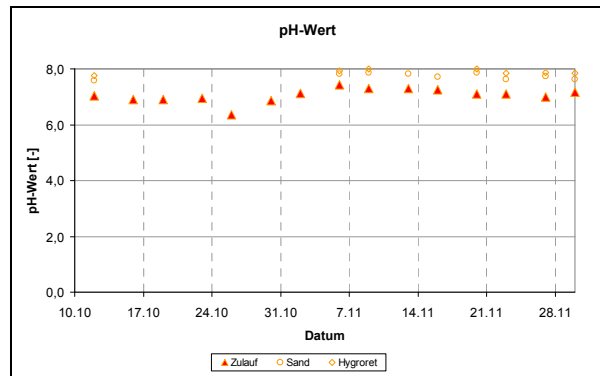
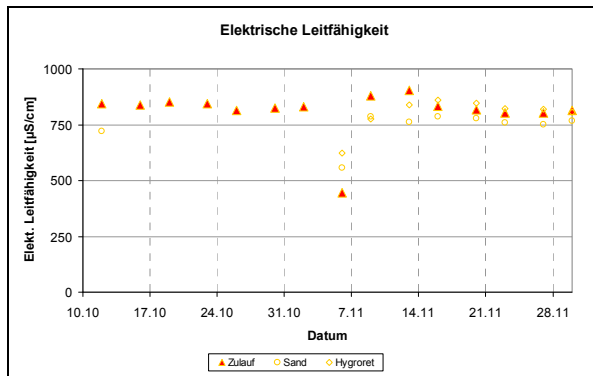
### Elektrische Leitfähigkeit



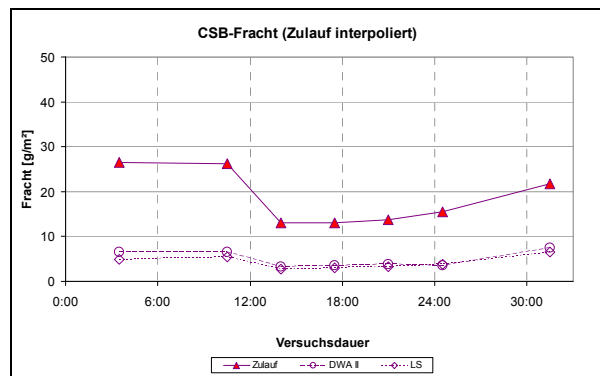
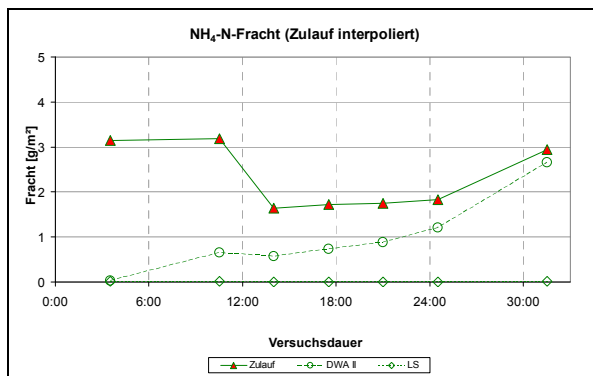
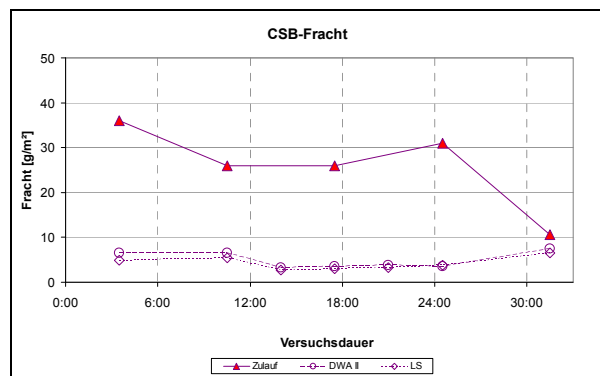
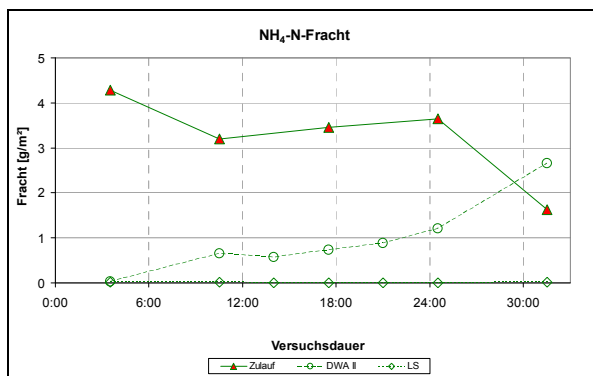
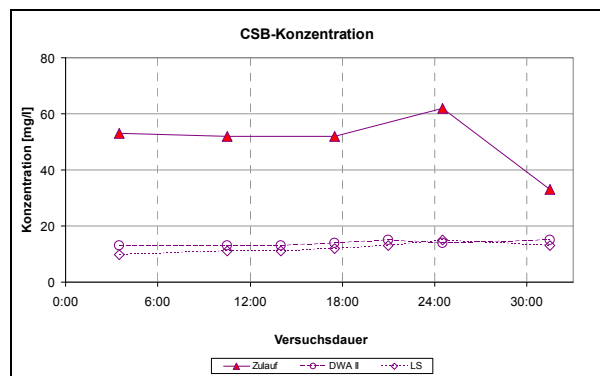
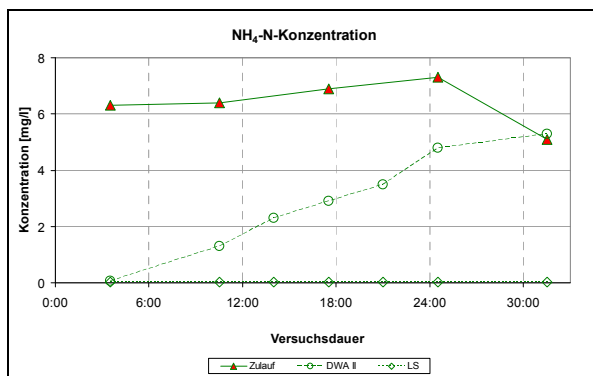
## Anhang 13 Ergebnisse zu Kapitel 13 (Lysimeterversuche)

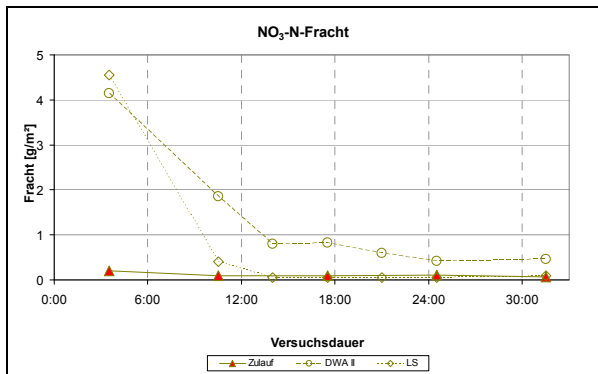
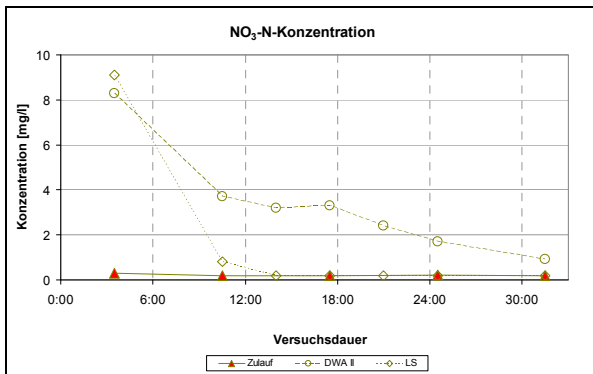
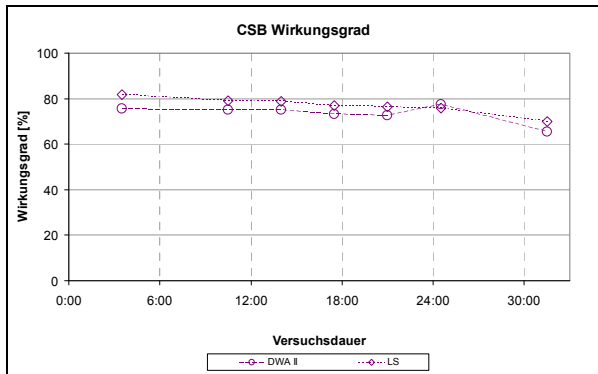
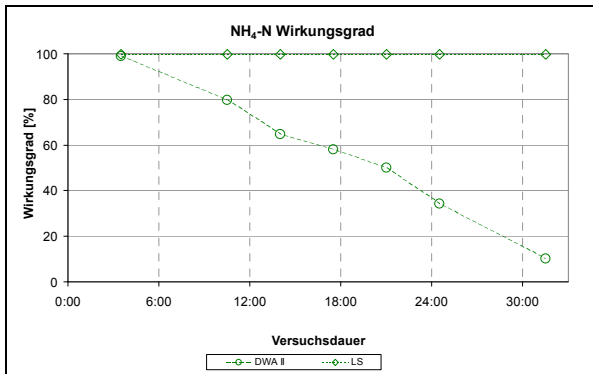
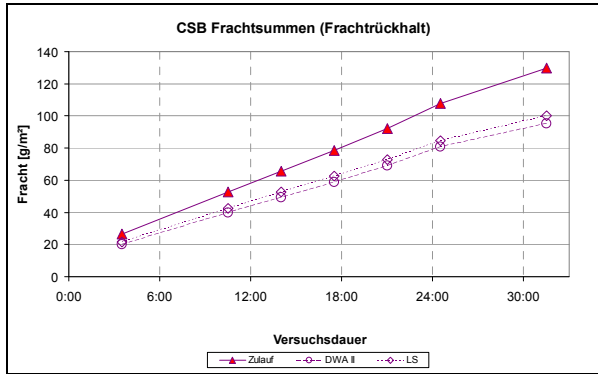
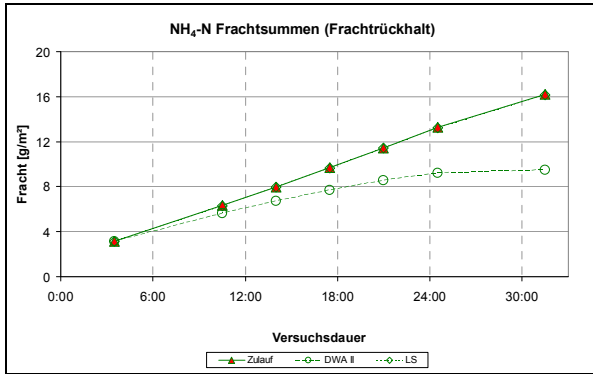
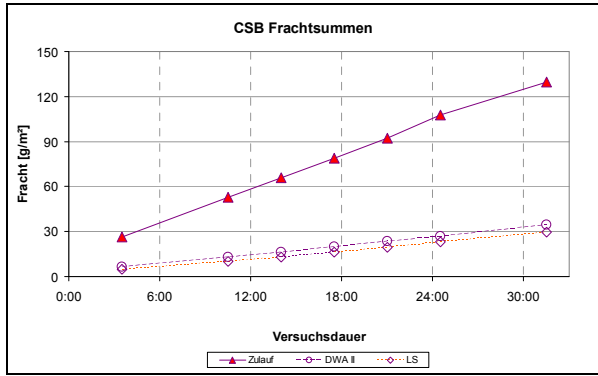
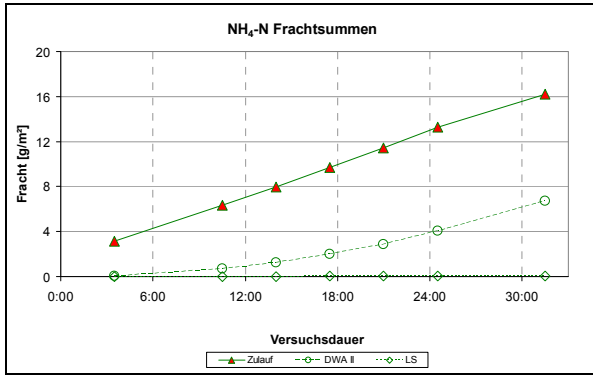
### Anhang 13.1 Diagramme Einfahrphase Lysimeter





### Anhang 13.2 Diagramme HL Lysimeter





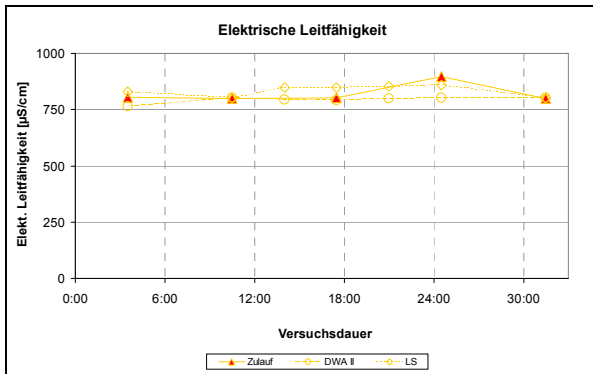
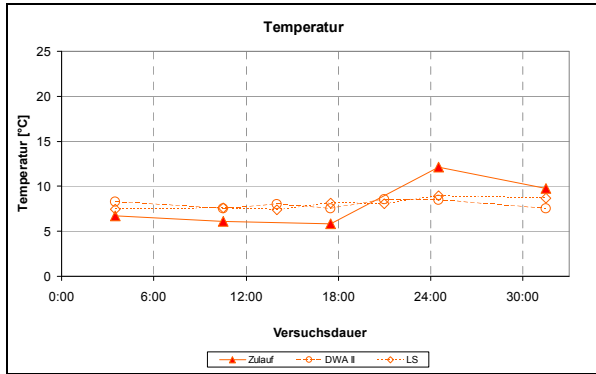
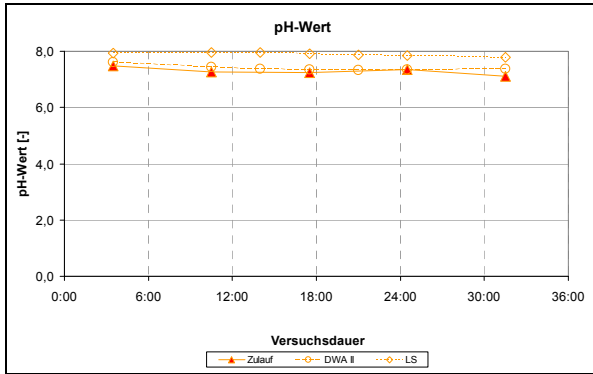
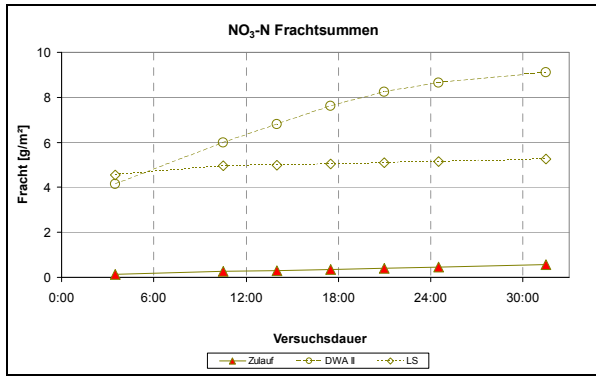
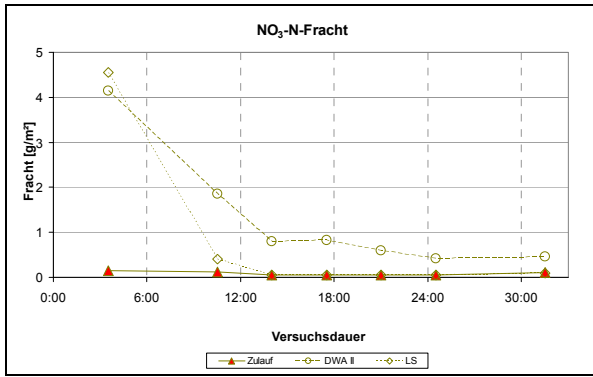


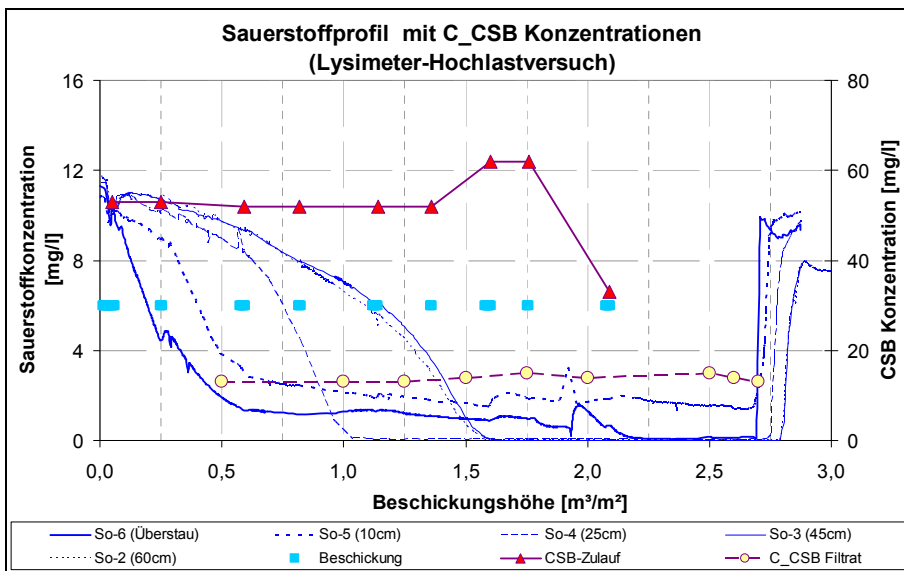
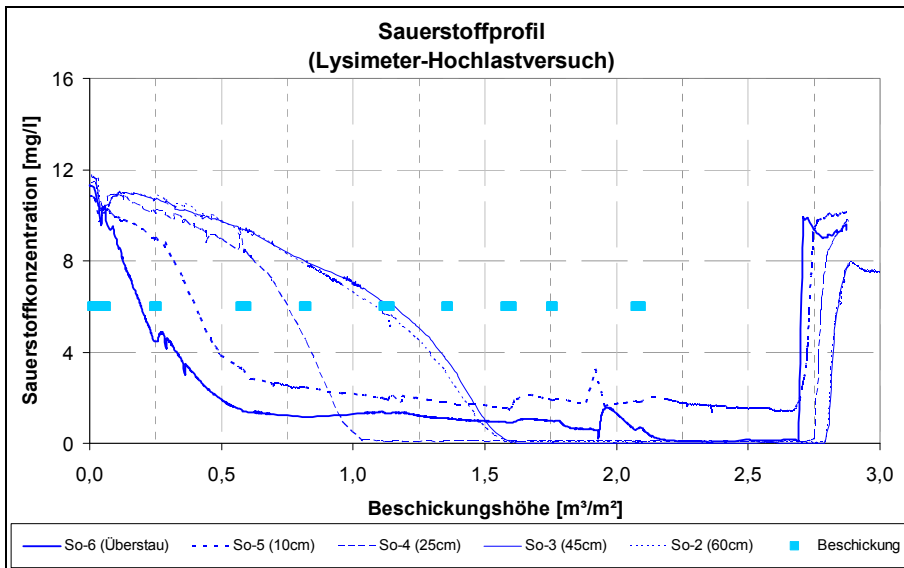
Tabelle-Anhang 13.14: Analytik der Zu- und Abläufe der Hochlastversuche

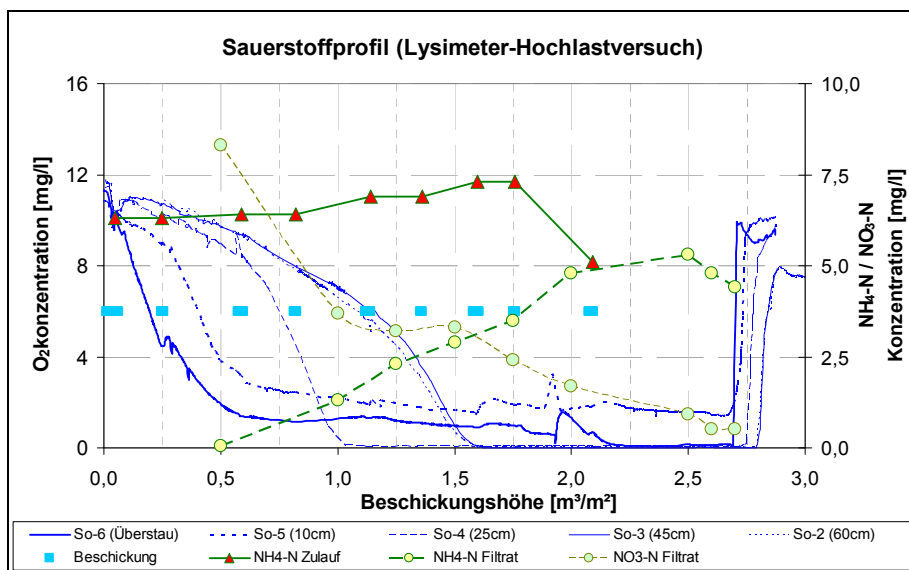
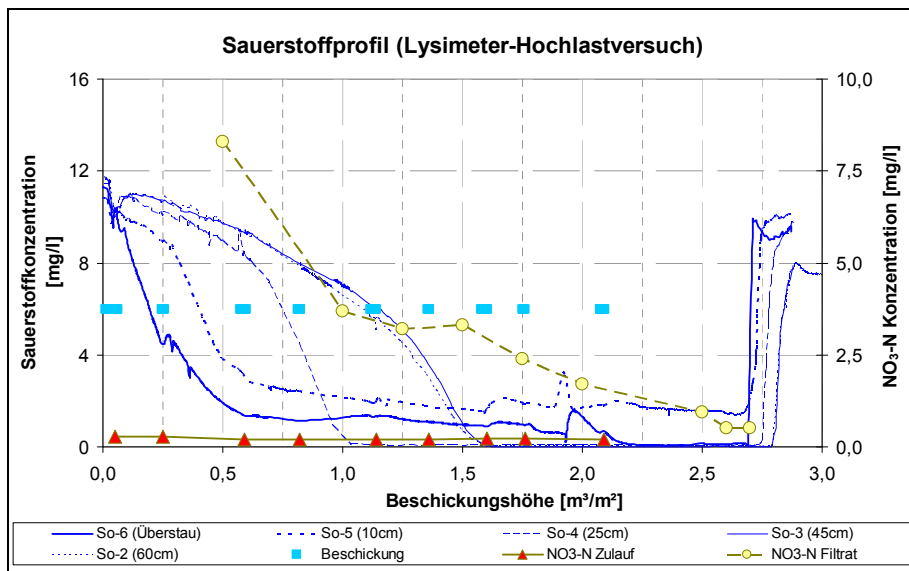
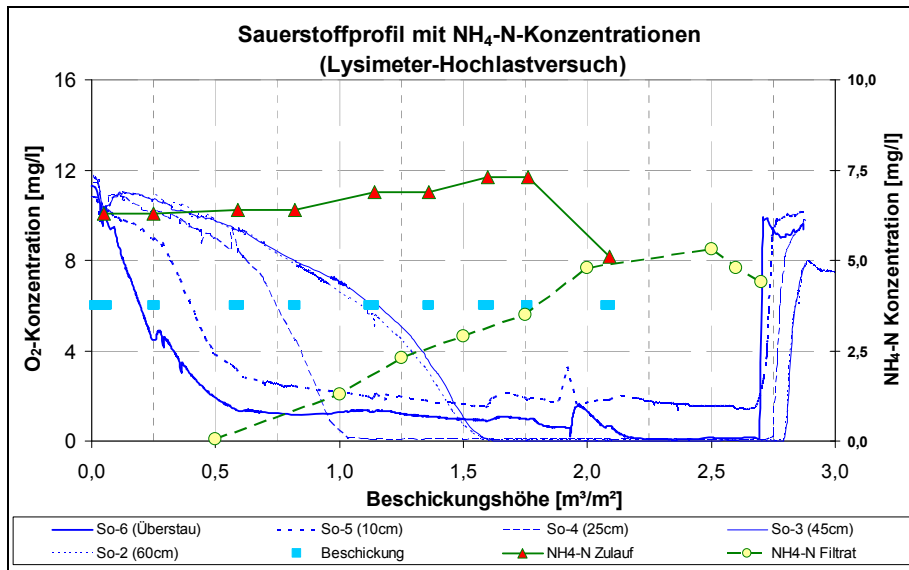
Datum	Probenname	CSB	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	LF	pH	T
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[μS/cm]	[-]	[°C]
04.12.06	Zulauf 1	53	6,30	0,29	806	7,48	6,7
04.12.06	Zulauf 2	52	6,35	0,20	799	7,27	6,1
05.12.06	Zulauf 3	52	6,90	0,20 <sup>1)</sup>	803	7,25	5,8
05.12.06	Zulauf 4	62	7,30	0,22	896	7,36	12,2
05.12.06	Zulauf 5	34	5,00	0,20 <sup>1)</sup>	797	7,16	10,3
05.12.06	Zulauf 6	33	5,10	0,20 <sup>1)</sup>	801	7,06	9,2
06.12.06	DWA II-MP 1	13	0,06	8,30	764	7,61	8,3
06.12.06	DWA II-MP 2	13	1,30	3,70	802	7,44	7,5
06.12.06	DWA II-MP 3	13	2,30	3,20	795	7,37	8,0
06.12.06	DWA II-MP 4	14	2,90	3,30	792	7,35	7,6
06.12.06	DWA II-MP 5	15	3,50	2,40	799	7,33	8,6
06.12.06	DWA II-MP 6	14	4,80	1,70	802	7,34	8,5
06.12.06	DWA II-MP 7	15	5,30	0,93	802	7,37	7,5
06.12.06	DWA II-Nachlauf 1	14	4,80	0,51	795	7,37	7,6
06.12.06	DWA II-Nachlauf 2	13	4,40	0,51	779	7,58	8,3
06.12.06	LS-MP 1	10	0,02	9,10	830	7,93	7,5
06.12.06	LS-MP 2	11	0,02	0,80	802	7,96	7,6
06.12.06	LS-MP 3	11	0,02 <sup>1)</sup>	0,20 <sup>1)</sup>	849	7,95	7,4
06.12.06	LS-MP 4	12	0,02 <sup>1)</sup>	0,20 <sup>1)</sup>	848	7,91	8,1
06.12.06	LS-MP 5	13	0,02 <sup>1)</sup>	0,20 <sup>1)</sup>	854	7,88	8,1
06.12.06	LS-MP 6	15	0,02 <sup>1)</sup>	0,20 <sup>1)</sup>	860	7,84	9,0
06.12.06	LS-MP 7	13	0,02 <sup>1)</sup>	0,20 <sup>1)</sup>	802	7,78	8,7
06.12.06	LS-Nachlauf 1	14	0,02	0,20 <sup>1)</sup>	825	7,75	8,0
06.12.06	LS-Nachlauf 2	13	0,02	0,20 <sup>1)</sup>	811	7,83	8,3

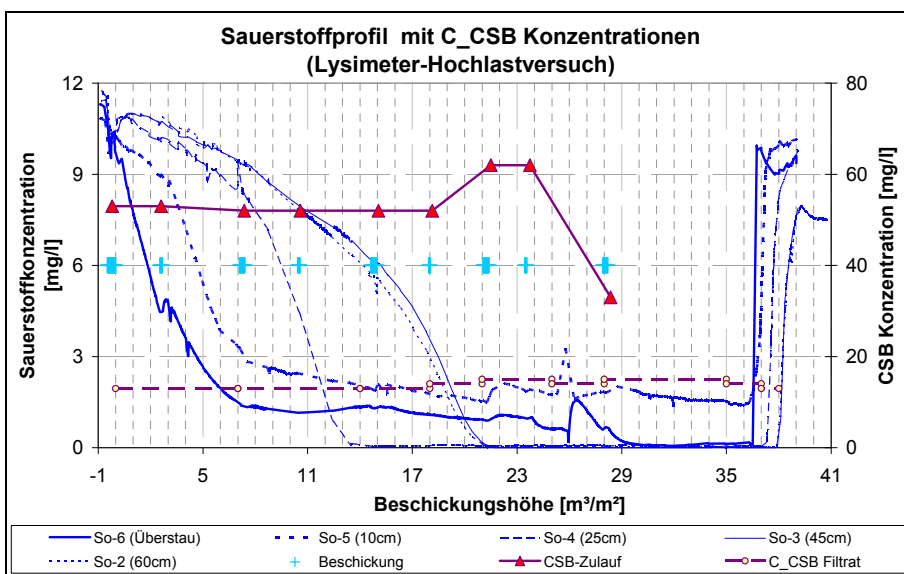
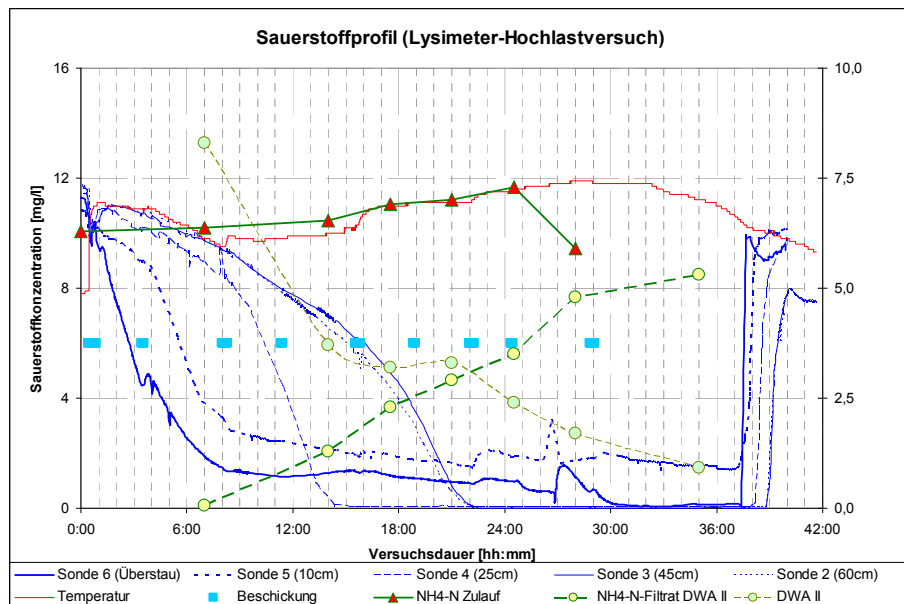
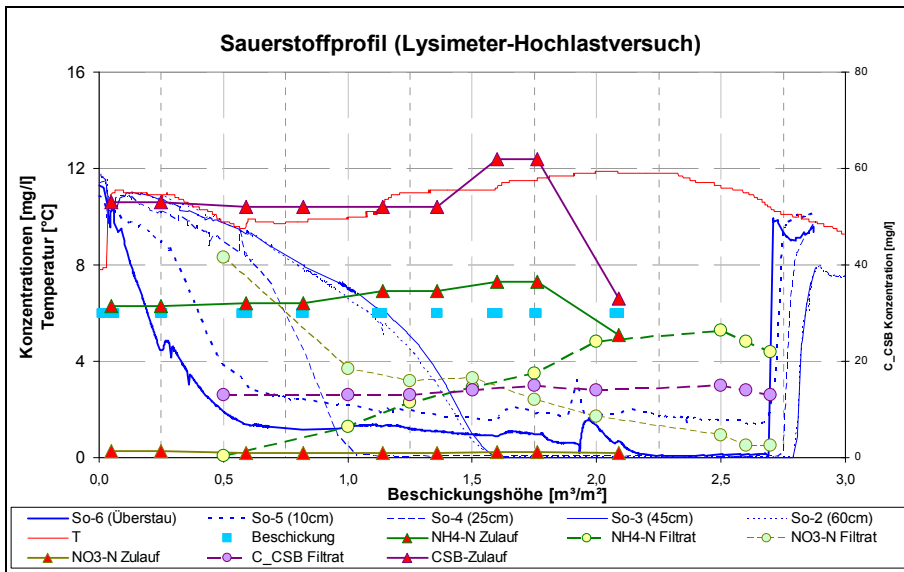
<sup>1)</sup> Messwert liegt unterhalb der Nachweisgrenze



### Anhang 13.3 Sauerstoffprofil Lysimeter HL-Versuch







## Anhang 14      Daten und Ergebnisse zu Kapitel 14 (Simulationen)

### Anhang 14.1 Analysemethoden für hydrogeologische Substrateigenschaften

Die verwendeten Verfahren sind in Tabelle-Anhang 14.15 aufgeführt. Die von den allgemein bekannten Methoden abweichenden und nicht in Literatur beschriebenen Verfahren werden im Anschluss an Tabelle-Anhang 14.15 kurz skizziert.

**Tabelle-Anhang 14.15: Übersicht der verwendeten Bestimmungsmethoden.**

Nr.	Parameter	Kurz	Einheit	Verfahren
1-1	Porenvolumen / Porosität	PV	[Vol.- %]	aus der Ermittlung der Lagerungsdichte nach DIN 18126 [1996]
1-2	effektives Porenvolumen	PV <sub>eff</sub>	[Vol.- %]	direkte volumetrische Bestimmung in der Säule, durch Einstau von „Unten“, Bestimmung des effektiven PV
1-3	effektives Porenvolumen	PV <sub>eff</sub>	[Vol.- %]	Ermittlung der effektiven Porosität aus Tracerversuch (siehe Kapitel 11.1)
2-1	Wassersättigungsgehalt (Voll- / Restsättigung)		[Vol.- %]	Bestimmung aus Bodenfeuchtemessung in zwei Filtertiefen (FOK -15 cm und FOK -50 cm)
2-2	Restsättigung		[Vol.- %]	aus bestimmung PV <sub>eff</sub> Nr. 2-1
3-1	Durchlässigkeitsbeiwert (ungesättigt)	K <sub>f</sub>	[m/s]	Bestimmung aus Säulenversuchen (Sickerzeiten = Dauer Beschickungsanfang bis Ablaufanfang)
3-2	Durchlässigkeitsbeiwert (gesättigt)	K <sub>f</sub>	[m/s]	Berechnung aus der Sieblinie (DIN 18123 [1983]) mit empirischer Formel nach HAZEN (HÖLTING/COLDEWEY [2005])
3-3	Durchlässigkeitsbeiwert (gesättigt)	K <sub>f</sub>	[m/s]	Bestimmung aus insitu-Versuch durch Abwandlung des in DIN 18130-1 [1998] beschriebenen Verfahrens zur Bestimmung des K <sub>f</sub> -Wertes im Labor mit fallender Druckhöhe.

Das modifizierte Verfahren zur Ermittlung des effektiven Porenvolumens und des Durchlässigkeitsbeiwerts sowie der Restsättigung ist ein Kombinationsversuch, dessen Auswertung die Bestimmung dieser drei Größen ermöglicht. Lediglich das Verfahren und die Ergebnisse der Bodenfeuchtemessung soll an dieser Stelle etwas ausführlicher vorgestellt werden. Dieses Verfahren wurde die die Ermittlung von Prozessparametern erstmals eingesetzt und hat sich als äußerst ergiebig erwiesen. Ähnlich wie die in situ Messung der Sauerstoffgehalte im Filter bieten auch die in situ gemessenen Werte der Bodenfeuchte wertvolle Informationen. Für die Modellierung der Prozesse sind die Bodenfeuchtemessun-

gen als wertvoll anzusehen. Gerade der nur unzureichend bekannte Vorgang der Fließvorgänge im ungesättigten Bereich eines Retentionsbodenfilters, konnte mittels der Bodenfeuchtsonden besser beschrieben werden.

## **Anhang 14.2 Bestimmung des effektiven Porenvolumens**

Das handfeucht in die Säule eingebaute Material wird mit einer Flächenbeschickung von  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2$  konsolidiert. Dies entspricht in der Versuchssäule einem Volumen von 28,4 l. Das Filtrat ist aufzufangen und volumetrisch zu bestimmen, um den Restwassergehalt zu quantifizieren. Das fertig eingebaute Substrat wird durch den Ablauf der Dränage von „unten“ eingestaut. Das infiltrierte Volumen wird bestimmt. Die Ergebnisse für Dränageschicht, Filterschicht und Kiesschutzschicht werden in ein Protokoll eingetragen. Aus den Volumina des infiltrierten Wassers und dem Gesamtvolumen der jeweiligen Schicht lässt sich der entsprechende effektive Porenanteil (effektive Porenvolumen) bestimmen. Nach der Ermittlung der Porenvolumina wird ein Überstau über FOK erzeugt und der Durchlässigkeitsbeiwert wird im ungedrosselten System bestimmt. Die entsprechenden Ablaufvolumina werden in adäquaten Zeitabständen (bei Sanden 0,5 bis 1 Minute) abgelesen. Aus den entstehenden Wertepaaren können bis zu 8 Durchlässigkeitsbeiwerte ermittelt werden, über diese wird der Mittelwert gebildet. Das Ablesen erfolgt in der Plexiglassäule und nicht in einem Überstaurohr, was die Ablesung etwas ungenauer macht. Bei der Versuchsdurchführung in Bezug auf Qualität des Wassers und Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes sind die in der DIN 18130-1 [1998] beschriebenen Randbedingungen zu berücksichtigen.

Der in der DIN 18126 [1996] Beschriebenen Versuch zur „Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung“ dient der Ermittlung der Verdichtbarkeit von Böden. Da bei dieser Untersuchung auch der minimale und maximale Porenanteil des jeweiligen Substrats bestimmt wird, wurde dieser Versuch für die in der Verifikation genutzten Substrate durchgeführt.

## **Anhang 14.3 Prozessmodell Constructed Wetlands 2D (CW2D)**

Das Modell CW2D wurde von LANGERGRABER [2001] entwickelt und besteht aus zwei Bausteinen, dem ursprünglichen Grundwassermodell HYDRUS-2D (SIMUNEK et al. [1999]) und einer Reaktionskinetik für bepflanzte Bodenfilter. Mit diesem kombinierten Modell können der Wasser- und Stofftransport in variabel gesättigten Medien sowie die biochemischen Umwandlungs- und Abbauprozesse für organische Verbindungen, Stickstoffverbindungen und anorganischem Phosphor simuliert werden.

Die Reaktionskinetik für bepflanzte Bodenfilter berücksichtigt 13 Stoffe und 9 Abbau- bzw. Umwandlungsprozesse. Die Stoffe sind Sauerstoff, die drei Kohlenstoff-Fractionen (organisches Material) schnell abbaubare Kohlenstoffverbindungen (CR), langsam abbaubare Kohlenstoffverbindungen (CS) und inerte Kohlenstoffverbindungen (CI), Ammonium, Nitrat, Nitrit, Stickstoff, anorganischer Phosphor sowie heterotrophe und autotrophe Mikroorganismen. Organische gebundene Bestandteile von Ammonium und Phosphor werden als Nährstoffandteile des organischen Materials modelliert. Die simulierten Prozesse sind Respiration, Hydrolyse, zweistufige Nitrifikation, Denitrifikation und Lysisprozesse der Bakterien (LANGERGRABER/SIMUNEK [2005, [2006]]).

Die Reaktionskinetik von CW2D basiert auf dem Activated Sludge Modell (ASM) (HENZE et al. [2000]). Allerdings wird die Nitrifikation als zweistufiger Prozess abgebildet, d. h. das Ammonium zuerst in Nitrit und dann weiter in Nitrat umgewandelt wird (vgl. NOWAK [1996]).

## HYDRUS-2D

Für die Berechnung des Wasser- und Stofftransports wird der Modellbaustein HYDRUS-2D in einer leicht veränderten Form verwendet. Für die numerische Lösung der Richards-Gleichung bietet HYDRUS-2D drei Möglichkeiten. Dies sind das hydraulische Modell nach „van Genuchten“ auf der Basis von Mualem, das modifizierte „van Genuchten“ Modell und das hydraulische Modell nach Brooks-Corey.

Aufgrund der Datenverfügbarkeit wird das hydraulische Modell nach „van Genuchten“ ausgewählt, da auf der einen Seite weniger Parameter als bei den weiteren Modellen erforderlich sind, und diese allgemein verfügbar sind (siehe z. B. DIN 4220 [1998]). Des Weiteren hat LANGERGRABER [2001] einen Vergleich der unterschiedlichen hydraulischen Modelle durchgeführt und konnte dabei keine signifikanten Unterschiede feststellen. Gleichung (14-1) stellt das hydraulische Modell nach van Genuchten vor (SIMUNEK et al. [1999]).

$$\Theta_e(h) = \frac{\Theta(h) - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} = \left( 1 + |\alpha \cdot h|^n \right)^{-m} \quad (14-1)$$

$$K(\Theta) = K_s \cdot \Theta_e' \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \Theta_e^{1/m} \right)^m \right]^2$$

mit  $\Theta_e$  = effektiver Wassergehalt [ $\text{dm}^3/\text{dm}^3$ ],  $\Theta(h)$  = Wassergehalt in Abhängigkeit von der Saugspannung [ $\text{dm}^3/\text{dm}^3$ ],  $\Theta_s$  = Sättigungswassergehalt [ $\text{dm}^3/\text{dm}^3$ ],  $\Theta_r$  = Restwassergehalt [ $\text{dm}^3/\text{dm}^3$ ],  $h$  = Saugspannungshöhe [dm],  $n$  = Exponent in der Bodenwasser-Retentionsfunktion [-],  $m$  = empirischer Koeffizient ( $m = 1-1/n$ ) [-],  $l$  = Parameter des Porenkontakts [-],  $K(\Theta)$  = ungesättigte Leitfähigkeit [ $\text{dm}^3/\text{h}$ ],  $K_s$  = gesättigte Leitfähigkeit [ $\text{dm}^3/\text{h}$ ]

Bei Beschickungsereignissen tritt an der Oberfläche eines Bodenfilters häufig ein Überstau auf, der mit der zu Projektbeginn verfügbaren HYDRUS-2D Version nicht direkt zu berechnen war. Damit es nicht zu Programmabstürzen und zu sinnvollen Simulationsergebnissen kommt, sind zwei unterschiedliche Verfahren entwickelt worden. Auf der einen Seite wurde ein kontinuierlicher Zufluss, der im Bereich der maximalen Infiltrationskapazität des Bodens lag, iterativ bestimmt und auf der anderen Seite wurde ab der Filteroberkante eine ca. 100 cm hohe fiktive Überstauschicht in das Modell implementiert, damit das Modell keinen Oberflächenabfluss berechnet.

Eine weitere Änderung des ursprünglichen HYDRUS-2D Code ist für die Berechnung des gedrosselten Abflusses notwendig. Am unteren Rand des Finite-Elemente Netz wird eine maximale Geschwindigkeit und eine minimale Saugspannung vorgegeben, die besonders bei Langzeitsimulationen sinnvolle Saugspannungen in der Bodensäule liefert.

Die Berechnung des Stofftransports erfolgt mit der Konvektions-Dispersions-Gleichung. Diese kann sowohl für den eindimensionalen als auch für den zwei- oder dreidimensionalen Fall verwendet werden. Im Folgenden ist die Transportgleichung für den eindimensionalen Fall aufgeführt (SIMUNEK et al. [1999]):

$$\frac{\partial \Theta \cdot c_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \cdot s_i}{\partial t} = \nabla \cdot (\Theta \cdot D_i \cdot \nabla c_i) - \nabla (q \cdot c_i) + S \cdot c_{s,i} + r_i \quad 14-2$$

mit  $c_i$  = Konzentration in der gelösten Phase [ $\text{mg}/\text{dm}^3$ ],  $s_i$  = Konzentration in der festen Phase [ $\text{mg}/\text{kg}$ ],  $D_i$  = effektiver Dispersionskoeffizient [ $\text{dm}_s^2/\text{h}$ ],  $q$  = volumetric flux density [ $\text{dm}_w^3/(\text{dm}_s^3 \cdot \text{h})$ ],  $S$  = Quellen- und Senkenterm [ $\text{dm}_w^3/(\text{dm}_s^3 \cdot \text{h})$ ],  $C_{s,i}$  = Konzentration der Quellen/Senke [ $\text{mg}/\text{dm}_w^3$ ],  $r_i$  = Reaktionsterm [ $\text{mg}/(\text{dm}_s^3 \cdot \text{h})$ ]

Für Abbau- und Umwandlungsprozesse wird eine Funktion 0. Ordnung verwendet. Die Gleichung (14-3) beschreibt diese Prozesse für die flüssige und feste Phase.

$$r_i = \Theta \cdot \sum_{j=1}^R v_{j,i} \cdot rc_j + \rho \sum_{j=1}^R v_{j,i} \cdot rs_j \quad (14-3)$$

mit  $\theta$  = Wassergehalt [-],  $\rho$  = Schüttdichte [ $\text{kg}/\text{dm}^3$ ],  $R$  = Prozessnummer [-],  $v_{j,i}$  = stöchiometrischer Faktor für Stoff  $i$  und Prozess  $j$  [ $\text{mg}/\text{mg}$ ],  $rc_j$  = Abbaukonstante für die flüssige Phase [ $\text{mg}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$ ],  $rs_j$  = Abbaukonstante für die feste Phase [ $\text{mg}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$ ]

Für die Adsorption wird folgender allgemein gültiger Sorptionsterm verwendet (SIMUNEK et al. [1999]):

$$s = \frac{k_s \cdot c^\beta}{1 + \eta \cdot c^\beta} \quad (14-4)$$

mit  $s$ = Stoffkonzentration in der festen Phase [mg/kg],  $k_s$ = empirischer Koeffizient [-],  $\beta$ = empirischer Koeffizient [-],  $\eta$ = empirischer Koeffizient [-],  $c$ = Stoffkonzentration in der flüssigen Phase [mg/dm<sup>3</sup>]

Wenn in der Gleichung (14-4) die Variablen  $\beta = 1$  und  $\eta = 0$  gesetzt werden, liegen lineare Adsorptionsisotherme vor, bei  $\eta=0$  liegen Freundlich-Isotherme vor und bei  $\beta=1$  liegen Langmuir-Isotherme vor.

Wenn chemisches Nicht-Gleichgewicht angenommen wird (two-site-sorption) werden hierfür die folgenden Gleichungen verwendet:

$$\begin{aligned} s_i &= s_i^e + s_i^k \\ s_i^e &= f \cdot s_i \\ s_i^k &= (1-f) \cdot s_i \end{aligned} \quad (14-5)$$

mit  $s_i$ = Konzentration in der festen Phase [mg/kg],  $s_i^e$ = zeitunabhängige Fraktion der sorbierten Masse [mg/kg],  $s_i^k$ = zeitabhängige Fraktion der sorbierten Masse [mg/kg],  $f$ = Anteil der Fraktion die mit der gelösten Phase im Gleichgewicht ist [-]

Der Faktor  $f$  bestimmt den Anteil/die Fraktion, die zeitunabhängig und somit unverzögert reagiert. Der Anteil  $(1-f)$  reagiert zeitabhängig (kinetische Sorption). Der Wert „ $f$ “ wird mit dem Parameter „Fraction“ eingegeben.

Ein Wert  $f = 1$  beschreibt ausschließlich Gleichgewichtsadsorption (instantaneous/unmittelbar) während ein  $f=0$  nur kinematische Sorption definiert.

$$\frac{ds_i^e}{dt} = f \cdot \frac{ds_i}{dt} \quad (14-6)$$

$$\frac{ds_i^k}{dt} = \omega_i \cdot \left[ (1-f) \cdot \frac{k_{s,i} \cdot c_i^{\beta_i}}{1 + \eta_i \cdot c_i^{\beta_i}} - s_i^k \right] \quad (14-7)$$

mit  $\omega_i$  Austausch Rate 1. Ordnung für Stoff  $i$  [1/h], stoffspezifische Relaxationskonstante

Vergleichbar mit der two-site-sorption kann auch ein physikalisches Nicht-Gleichgewicht angesetzt werden. Dieses wird als two-region bezeichnet. Der Wassergehalt ( $\Theta$ ) im Boden setzt sich aus einer mobilen ( $\Theta_m$ ) und einer immobilen ( $\Theta_{im}$ ) Zone des Wassers zusammen.

$$\Theta = \Theta_m + \Theta_{im} \quad (14-8)$$



Die Modellierung des Austausches zwischen mobiler und immobilisierter Phase erfolgt analog zur Gleichung (14-7). Weitere Details und spezifische mathematische Gleichungen für das Programm HYDRUS-2D können dem Programmhandbuch entnommen werden (SIMUNEK et al. [1999]).

### Die Bodenfilter-Reaktionskinetik von CW2D

Der Bodenfilter-Baustein von CW2D basiert auf dem Wasser- und Stofftransport von HYDRUS-2D. Tabelle-Anhang 14.16 listet die 12 Stoffe von CW2D auf. Zusätzlich besteht noch die Möglichkeit einen Tracer (Stoff 13) zu simulieren.

**Tabelle-Anhang 14.16: Stoffe in CW2D**

Nummer	Stoff	Bezeichnung	Einheit
1	<b>gelöster Sauerstoff</b>	O <sub>2</sub>	mg/l
	<b>organische Substanz</b>		
2	schnell abbaubare Kohlenstoffverbindungen	CR	mg/l
3	langsam abbaubare Kohlenstoffverbindungen	CS	mg/l
4	inert (nicht) abbaubare Kohlenstoffverbindungen	CI	mg/l
	<b>Mikroorganismen</b>		
5	heterotrophe Mikroorganismen	XH	mg/l
	autotrophe Mikroorganismen		
6	Nitrosomonas	XANs	mg/l
7	Nitrobacter	XANb	mg/l
	<b>Stickstoffverbindungen</b>		
8	Ammonium-Stickstoff	NH <sub>4</sub> -N	mg/l
9	Nitrit-Stickstoff	NO <sub>2</sub> -N	mg/l
10	Nitrat-Stickstoff	NO <sub>3</sub> -N	mg/l
11	Stickstoff-Stickstoff	N <sub>2</sub> -N	mg/l
	<b>Phosphor</b>		
12	anorganischer Phosphor	IP	mg/l
13	<b>Tracer</b>		mg/l

Biochemische Prozesse finden nur in der flüssigen Phase statt. Adsorbierte Stoffe werden in der Trockenphase erst desorbiert und anschließend abgebaut. Theoretisch kann für jeden der 13 Stoffe Adsorption simuliert werden. Organische Stickstoff- und Phosphoranteile werden als Bestandteil der organischen Substanz simuliert.

Die Mikroorganismen sind immobil und befinden sich alle in der festen Phase. Es wird davon ausgegangen, dass alle Organismen einheitlich im Biofilm existieren und es sich um eine homogene Matrix handelt. Im Lysis Prozess wird der Zerfall und Abbau der Mikroorganismen

zusammengefasst. Dieser Prozess wird durch konstante Parameter beschrieben und ist daher durch Umwelteinflüsse (z. B. Temperaturänderungen) nicht veränderbar.

Die heterotrophen Bakterien (XH) werden als Allrounder in CW2D verwendet und sind für die Prozesse Hydrolyse, Mineralisierung des organischen Materials (Respiration, aerober Abbau) und Denitrifikation (anoxischer Abbau) verantwortlich.

Hydrolyse (Mineralisierung) beschreibt den Umwandlungsprozess von langsam abbaubaren Kohlenstoffverbindungen (CS) in schnell abbaubare Kohlenstoffverbindungen (CR). Dabei entsteht ein geringer Anteil inerter Kohlenstoffverbindungen (CI). Bei der Hydrolyse werden geringe Mengen Ammonium und Phosphor freigesetzt. Für den Prozess ist die Anwesenheit von Sauerstoff nicht erforderlich.

Bei der Respiration (aerobes Wachstum von heterotrophen Bakterien) werden schnell abbaubare Kohlenstoffverbindungen (CR) unter Sauerstoffverbrauch abgebaut. Ebenfalls findet ein Aufbau von Biomasse mit einer Aufnahme von Phosphor (IP) und Ammonium ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) statt.

Bei der Nitrit- und Nitrat-Atmung (Wachstum von anoxischen Bakterien) wird Stickstoff produziert (Denitrifikation). Bei beiden Prozessen wird CR,  $\text{NH}_4\text{-N}$  und IP verbraucht.

Beim Zerfall (Lysis) der heterotrophen Mikroorganismen wird organisches Material (CR, CS und CI), Ammonium sowie Phosphor produziert.

Für die Nitrifikation sind die autotrophen Bakterien Nitrobacter und Nitrosomonas verantwortlich. Die Nitrifikation wird als zweistufiger Prozess simuliert und findet nur in Anwesenheit von Sauerstoff statt. Beim aeroben Wachstum der Nitrosomonas werden Ammonium und Sauerstoff verbraucht und Nitrit produziert. Dabei wird Phosphat und ein geringer Anteil von Ammonium von der Biomasse aufgenommen. Beim aeroben Wachstum der Nitrobacter wird Nitrit und Sauerstoff verbraucht. Dabei wird ebenfalls Ammonium und Phosphor durch die Biomasse aufgenommen.

Ähnlich dem Lysis Prozess der heterotrophen Organismen zerfallen autotrophe Bakterien zu organischem Material (schnell und langsam abbaubare sowie inerte Kohlenstoffverbindungen), Ammonium und Phosphor.

Die Tabelle-Anhang 14.17 veranschaulicht die oben beschriebenen Prozesse. Gleichzeitig führt sie stöchiometrische Faktoren (Parameter  $v$  aus Gleichung (14-3)) auf. Die roten Felder beschreiben eine Stoffabnahme durch den jeweiligen Prozess und die blauen Felder eine Stoffzunahme. Da Abbauvorgänge nur in der flüssigen Phase stattfinden, kann die Gleichung (14-3) zu Gleichung (14-9) vereinfacht werden. Die stöchiometrischen Faktoren ( $v_{ji}$ ) können der Tabelle-Anhang 14.19 und die Prozessraten ( $rc_j$ ) der Tabelle-Anhang 14.18 entnommen werden.

$$r_i = \Theta \cdot \sum_{j=1}^R v_{j,i} \cdot rC_j \tag{14-9}$$

Tabelle-Anhang 14.17: CW2D - Hauptstrukturen und stöchiometrische Matrix

Stoff \ Prozess		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		O2	CR	CS	CI	XH	XANS	XANb	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	N <sub>2</sub> -N	IP
<b>Heterotrophe Mikroorganismen</b>													
1	Hydrolyse	o	1-f <sub>Hyd,CI</sub>	-1	f <sub>Hyd,CI</sub>	o	o	o	v <sub>1,N</sub>	o	o	o	v <sub>1,P</sub>
2	Respiration	1-1/Y <sub>H</sub>	-1/Y <sub>H</sub>	o	o	1	o	o	v <sub>2,N</sub>	o	o	o	v <sub>2,P</sub>
3	Nitrat-Atmung	o	-1/Y <sub>H</sub>	o	o	1	o	o	v <sub>3,N</sub>	o	$\frac{-(1-Y_H)}{2.86Y_H}$	$\frac{(1-Y_H)}{2.86Y_H}$	v <sub>3,P</sub>
4	Nitrit-Atmung	o	-1/Y <sub>H</sub>	o	o	1	o	o	v <sub>4,N</sub>	$\frac{-(1-Y_H)}{1.71Y_H}$	o	$\frac{(1-Y_H)}{1.71Y_H}$	v <sub>4,P</sub>
5	Lysis	o	f <sub>BM,CR</sub>	1-f <sub>BM,CR</sub> -f <sub>BM,CI</sub>	f <sub>BM,CI</sub>	-1	o	o	v <sub>5,N</sub>	o	o	o	v <sub>5,P</sub>
<b>Nitrosomonas</b>													
6	aerobes Wachstum	$\frac{-(3.43-Y_{ANS})}{Y_{ANS}}$	o	o	o	o	1	o	v <sub>6,N</sub>	1/Y <sub>ANS</sub>	o	o	v <sub>6,P</sub>
7	Lysis	o	f <sub>BM,CR</sub>	1-f <sub>BM,CR</sub> -f <sub>BM,CI</sub>	f <sub>BM,CI</sub>	o	-1	o	v <sub>7,N</sub>	o	o	o	v <sub>7,P</sub>
<b>Nitrobacter</b>													
8	aerobes Wachstum	$\frac{-(1.14-Y_{ANb})}{Y_{ANb}}$	o	o	o	o	o	1	v <sub>8,N</sub>	-1/Y <sub>ANb</sub>	1/Y <sub>ANb</sub>	o	v <sub>8,P</sub>
9	Lysis	o	f <sub>BM,CR</sub>	1-f <sub>BM,CR</sub> -f <sub>BM,CI</sub>	f <sub>BM,CI</sub>	o	o	-1	v <sub>9,N</sub>	o	o	o	v <sub>9,P</sub>

Stoffzunahme	Stoffabnahme	o kein Einfluss
--------------	--------------	-----------------

Tabelle-Anhang 14.18: Prozessraten in CW2D

Prozessrate [mg/(dm <sup>3</sup> *h)]	
<b>Heterotrophe Organismen</b>	
1 Hydrolyse	
	(14-10)
$K_h \cdot \frac{c_{CS}/c_{XH}}{K_x + c_{CS}/c_{XH}} \cdot c_{XH}$	
2 Aerobes Wachstum der heterotrophen Bakterien (Respiration)	
	(14-11)
$\mu_H \cdot \frac{c_{O_2}}{K_{Het,O_2} + c_{O_2}} \cdot \frac{c_{CR}}{K_{Het,CR} + c_{CR}} \cdot f_{N,Het} \cdot c_{XH}$	
3 Nitrat-Atmung der heterotrophen Bakterien, Abbau von CR	
	(14-12)
$\mu_{DN} \cdot \frac{K_{DN,O_2}}{K_{DN,O_2} + c_{O_2}} \cdot \frac{c_{NO_3}}{K_{DN,NO_3} + c_{NO_3}} \cdot \frac{K_{DN,NO_2}}{K_{DN,NO_2} + c_{NO_2}} \cdot \frac{c_{CR}}{K_{DN,CR} + c_{CR}} \cdot f_{N,DN} \cdot c_{XH}$	
4 Nitrit-Atmung der heterotrophen Bakterien, Abbau von CR	
	(14-13)
$\mu_{DN} \cdot \frac{K_{DN,O_2}}{K_{DN,O_2} + c_{O_2}} \cdot \frac{c_{NO_2}}{K_{DN,NO_2} + c_{NO_2}} \cdot \frac{c_{CR}}{K_{DN,CR} + c_{CR}} \cdot f_{N,DN} \cdot c_{XH}$	
5 Lysis der heterotrophen Bakterien	
	(14-14)
$b_H \cdot c_{XH}$	
<b>Autotrophe Organismen – Nitrosomonas</b>	
6 Aerobes Wachstum der Nitrosomonas, Abbau von Ammonium	
	(14-15)
$\mu_{ANs} \cdot \frac{c_{O_2}}{K_{ANs,O_2} + c_{O_2}} \cdot \frac{c_{NH_4}}{K_{ANs,NH_4} + c_{NH_4}} \cdot \frac{c_{IP}}{K_{ANs,IP} + c_{IP}} \cdot c_{XANs}$	
7 Lysis der Nitrosomonas	
	(14-16)
$b_{ANs} \cdot c_{XANs}$	
<b>Autotrophe Organismen - Nitrobacter</b>	
8 Aerobes Wachstum der Nitrobacter, Abbau von Nitrit	
	(14-17)
$\mu_{ANb} \cdot \frac{c_{O_2}}{K_{ANb,O_2} + c_{O_2}} \cdot \frac{c_{NO_2}}{K_{ANb,NO_2} + c_{NO_2}} \cdot f_{N,ANb} \cdot c_{XANb}$	
9 Lysis der Nitrobacter	
	(14-18)
$b_{ANb} \cdot c_{XANb}$	
Faktor für Nährstoffe	
	(14-19)
$f_{n,x} = \frac{c_{NH_4}}{K_{x,NH_4} + c_{NH_4}} \cdot \frac{c_{IP}}{K_{x,IP} + c_{IP}}, \text{ mit } x = \text{Het, DN, ANb}$	

**Tabelle-Anhang 14.19: Stöchiometrische Faktoren für Ammonium Stickstoff**

Ammonium-Stickstoff		Stöchiometrischer Faktor
Hydrolyse	$v_{1,N}$	$i_{N,CS} - (1 - f_{Hyd,CI}) \cdot i_{N,CR} - f_{Hyd,CI} \cdot i_{N,CI}$
Respiration	$v_{2,N}$	$1/Y_H \cdot i_{N,CR} - i_{N,BM}$
Nitrat-Atmung	$v_{3,N}$	$1/Y_H \cdot i_{N,CR} - i_{N,BM}$
Nitrit-Atmung	$v_{4,N}$	$1/Y_H \cdot i_{N,CR} - i_{N,BM}$
Lysis heterotropher Organismen	$v_{5,N}$	$i_{N,BM} - (1 - f_{BM,CR} - f_{BM,CI}) \cdot i_{N,CS} - f_{BM,CR} \cdot i_{N,CR} - f_{BM,CI} \cdot i_{N,CI}$
aerobes Wachstum von Nitrosomonas	$v_{6,N}$	$-1/Y_{ANs} - i_{N,BM}$
Lysis Nitrosomonas	$v_{7,N}$	$i_{N,BM} - (1 - f_{BM,CR} - f_{BM,CI}) \cdot i_{N,CS} - f_{BM,CR} \cdot i_{N,CR} - f_{BM,CI} \cdot i_{N,CI}$
aerobes Wachstum von Nitrobacter	$v_{8,N}$	$-i_{N,BM}$
Lysis von Nitrobacter	$v_{9,N}$	$i_{N,BM} - (1 - f_{BM,CR} - f_{BM,CI}) \cdot i_{N,CS} - f_{BM,CR} \cdot i_{N,CR} - f_{BM,CI} \cdot i_{N,CI}$

**Tabelle-Anhang 14.20: Stöchiometrische Faktoren für Phosphor**

anorganischer Phosphor		Stöchiometrischer Faktor
Hydrolyse	$v_{1,P}$	$i_{P,CS} - (1 - f_{Hyd,CI}) \cdot i_{P,CR} - f_{Hyd,CI} \cdot i_{P,CI}$
Respiration	$v_{2,P}$	$1/Y_H \cdot i_{P,CR} - i_{P,BM}$
Nitrat-Atmung	$v_{3,P}$	$1/Y_H \cdot i_{P,CR} - i_{P,BM}$
Nitrit-Atmung	$v_{4,P}$	$1/Y_H \cdot i_{P,CR} - i_{P,BM}$
Lysis heterotropher Organismen	$v_{5,P}$	$i_{P,BM} - (1 - f_{BM,CR} - f_{BM,CI}) \cdot i_{P,CS} - f_{BM,CR} \cdot i_{P,CR} - f_{BM,CI} \cdot i_{P,CI}$
aerobes Wachstum von Nitrosomonas	$v_{6,P}$	$-i_{P,BM}$
Lysis Nitrosomonas	$v_{7,P}$	$i_{P,BM} - (1 - f_{BM,CR} - f_{BM,CI}) \cdot i_{P,CS} - f_{BM,CR} \cdot i_{P,CR} - f_{BM,CI} \cdot i_{P,CI}$
aerobes Wachstum von Nitrobacter	$v_{8,P}$	$-i_{P,BM}$
Lysis von Nitrobacter	$v_{9,P}$	$i_{P,BM} - (1 - f_{BM,CR} - f_{BM,CI}) \cdot i_{P,CS} - f_{BM,CR} \cdot i_{P,CR} - f_{BM,CI} \cdot i_{P,CI}$

Die Parameterwerte und weitere Details können LANGERGRABER/SIMUNEK [2006] entnommen werden.

## Anhang 14.4 Modelleingangsdaten

Tabellen der Konzentrationsganglinien der Filtrate der Säule 9, 12, 5, 10, 11 mit entsprechenden Probenahmezeitpunkten.

**Tabelle-Anhang 14.21: Konzentrationsganglinien der Säule 9 (mit  $q_d = 0,02$  l/s·m<sup>2</sup> betrieben)**

S-9	S_CSB		NH4-N		NO3-N		NO2-N	
	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL
7:00:00	5	5	0,02	0,03	4,30	4,2	0,02	0,02
14:00:00	5	5	1,03	0,08	2,60	2	0,06	0,04
17:30:00	5	5	1,79	0,64	1,33	1,2	0,08	0,07
21:00:00	5	5	2,30	1,7	0,48	1,1	0,10	0,07
24:30:00	5	5	2,47	2,2	0,40	0,65	0,11	0,04
28:00:00	5	5	2,64	2,6	0,32	0,39	0,11	0,04
35:00:00	5	5	2,90	2,7	0,20	0,28	0,12	0,05

**Tabelle-Anhang 14.22: Konzentrationsganglinien der Säule 12 (mit  $q_d = 0,02$  l/s·m<sup>2</sup> betrieben)**

S-12	S_CSB		NH4-N		NO3-N		NO2-N	
	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL
7:00:00	5	5	0,02	0,19	4,40	5,2	0,02	0,02
14:00:00	5	5	0,81	0,39	2,73	2,7	0,10	0,24
17:30:00	5	5	1,40	0,36	1,48	1,7	0,15	0,27
21:00:00	5	5	1,80	1,1	0,65	0,74	0,19	0,18
24:30:00	5	5	2,09	2	0,52	0,31	0,15	0,15
28:00:00	5	5	2,37	2,5	0,39	0,2	0,11	0,04
35:00:00	5	8	2,80	3,1	0,20	0,2	0,05	0,02

**Tabelle-Anhang 14.23: Konzentrationsganglinien der Säule 5 (mit  $q_d = 0,03$  l/s·m<sup>2</sup> betrieben)**

S-5	S_CSB		NH4-N		NO3-N		NO2-N	
	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL
4:39:36	5	5	0,02	0,04	4,30	4,4	0,03	0,02
9:19:48	5	5	1,03	0,32	2,54	1,9	0,04	0,06
11:39:36	5	5	1,79	0,95	1,22	1,1	0,05	0,08
14:00:00	5	5	2,30	1,9	0,34	0,85	0,06	0,06
16:19:48	5	5	2,61	2,6	0,35	0,52	0,06	0,03
18:39:36	5	5	2,93	3	0,35	0,31	0,07	0,03
23:19:48	5	5	3,40	3,2	0,36	0,31	0,07	0,06

**Tabelle-Anhang 14.24: Konzentrationsganglinien der Säule 10 (mit  $q_d = 0,05$  l/s·m<sup>2</sup> betrieben)**

S-10	S_CSB		NH4-N		NO3-N		NO2-N	
	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL
3:30:00	5	5	1,50	0,07	1,50	5,7	0,12	0,02
7:00:00	5	5	1,77	1,4	1,17	1,7	0,12	0,15
8:45:00	5	5	1,97	2	0,92	1,2	0,12	0,16
10:30:00	5	5	2,10	2,1	0,76	0,88	0,12	0,2
12:15:00	5	5	2,30	2,4	0,60	0,53	0,11	0,23
14:00:00	5	5	2,50	2,8	0,44	0,25	0,10	0,18
17:30:00	5	5	2,80	3,1	0,20	0,2	0,09	0,15

**Tabelle-Anhang 14.25: Konzentrationsganglinien der Säule 11 (mit  $q_d = 0,05$  l/s·m<sup>2</sup> betrieben)**

S-11	S_CSB		NH4-N		NO3-N		NO2-N	
	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL	1. HL	2. HL
2:48:00	17	6	0,02	0,07	3,80	5,2	0,03	0,02
5:36:00	5	5	1,21	1,8	2,45	1,4	0,08	0,14
7:00:00	5	5	2,10	2,6	1,44	1,1	0,12	0,17
8:24:00	5	5	2,70	2,6	0,77	0,8	0,14	0,14
9:48:00	5	5	2,79	2,8	0,61	0,49	0,12	0,12
11:12:00	5	6	2,87	3,3	0,44	0,27	0,10	0,11
14:00:00	5	7	3,00	4	0,20	0,2	0,07	0,12