

Modellierung der Gewässergüte der Bega unter Berücksichtigung der Durchführung von Maßnahmen zur Kanalnetzsteuerung für das Entwässerungssystem der Stadt Lemgo

April 2011

Im Auftrag der



Auftraggeber

Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo

Tiefbauamt

32655 Lemgo

Ansprechpartner:

Geschäftsführer der ALG, Herr Dipl.-Ing. J. Hennigs

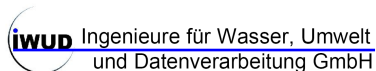
Herr Dipl.-Ing. K. Langhammer

Gefördert aus Mitteln der Abwasserabgabe durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen und begleitet durch die Bezirksregierung Detmold

Bearbeitung durch

 Hochschule Ostwestfalen-Lippe
University of Applied Sciences

Prof. Dr. Fettig (Projektleitung)

 iwud Ingenieure für Wasser, Umwelt
und Datenverarbeitung GmbH

Dipl.-Ing. K. Otte-Witte

 Westfälisches Umwelt Zentrum
Geschäftsstelle Höxter

Prof. M. Mieth (wissenschaftliche Leitung)

Dipl.-Ing. K. Ratte

 iwud

Dr.-Ing. L. Fuchs und Dipl.-Ing. M. Sommer

Ansprechpartner für die Projektbearbeiter:

Dipl.-Ing. Kai Otte-Witte

IWUD GmbH

Grüne Mühle 34, 37671 Höxter

Tel.: 05271/9516705 Fax.: 05271/9516710

E-Mail: k.otte-witte@iwud.de Internet: www.iwud.de

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung der bisherigen Projektphasen.....	1
1.1 Projektphasen I bis II [5, 6].....	1
1.2 Projektphase III.....	2
1.2.1 Zielsetzung der Projektphase III [8].....	2
1.2.2 Erweiterungen des Modellsystems gegenüber der Projektphase II.....	2
1.2.3 Untersuchungsgebiet.....	3
1.2.4 Allgemeines / Messkampagne August 2003.....	5
1.2.5 Kalibrierung des ATV-Modells mit den Daten der Messkampagne 2003.....	5
1.2.6 Ermittlung der Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten.....	7
1.2.7 Betrachtung der Schmutzfrachten aus den Kanalsystemen.....	8
1.2.8 Retentionsbodenfilter.....	13
1.2.9 Simulation von Regenereignissen mit Retentionsbodenfiltern.....	16
1.2.10 Bewertungen und Empfehlung als Ergebnis der Projektphase III.....	27
1.2.11 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	31
2 Zielstellung der Projektphase IV.....	33
3 Aufstellen des Kanalnetzmodells.....	33
3.1 Allgemeine Projektgrundlagen.....	33
3.2 Kanalnetzdaten.....	34
3.2.1 Schachtdaten.....	34
3.2.2 Haltungsdaten.....	35
3.2.3 Sonderbauwerke.....	35
3.2.4 Schmutzwassernetz.....	36
3.2.5 Regenwassernetz.....	36
3.3 Einzugsgebietsdaten.....	36
3.3.1 Luftbildbefliegung.....	36
3.3.2 Einzugsgebiete der Haltungen.....	38
3.4 Zuordnung Regenschreiber.....	40
3.5 Trockenwetterabfluss.....	42
3.5.1 Wasserverbrauch/Schmutzwasser.....	42
3.5.2 Ermittlung Industrierwasseranfall.....	42
3.5.3 Zuweisung der Schmutzwasserdaten zu den Kanalhaltungen.....	42
3.5.4 Fremdwasser.....	44
3.5.5 Kläranlagenzufluss bei Trockenwetter.....	45
3.5.6 Außengebiete und Gewässer.....	46
3.6 Schmutzfrachten.....	47
3.6.1 Trockenwetterabfluss.....	47

3.6.2 Regenbelastung.....	48
3.7 Modellkalibrierung.....	49
4 Kanalnetzsteuerung.....	50
4.1 Ermittlung von aktivierbarem Kanalstauvolumen.....	51
4.2 Schaffung von Netzmaschen.....	52
4.3 Analyse der Beckenausnutzung.....	54
4.4 Aufstellen eines ersten Steuerkonzepts.....	55
4.4.1 Einführung in den Fuzzy-Regelinterpreter CONTROL.....	55
4.4.2 Zielsetzung der Steuerung.....	58
4.4.3 Aufstellen erster Steuerregeln.....	59
4.5 Anwendung und Optimierung der Steuerregeln für ein Einzelereignis.....	61
4.5.1 Beschreibung der Regeln.....	61
4.5.2 Darstellung der Simulationsergebnisse für das Einzelereignis.....	64
4.5.3 Untersuchung weiterer Steuerungsvarianten.....	71
4.5.4 Ergebnisse der Seriensimulation.....	74
4.6 Auswahl der Steuerregeln.....	75
5 Gütemodellierung.....	75
5.1 Untersuchte Systemzustände.....	75
5.2 Gütemodellierung für das Kanalnetz.....	78
5.3 Ergebnisse der Gütemodellierung für die Bega.....	80
6 Schlussbetrachtung und Zusammenfassung.....	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemskizze Gewässermodell	3
Abbildung 2: Übersichtskarte Gewässersystem.....	4
Abbildung 3: Kalibrierung Temperatur.....	6
Abbildung 4: Systemgrafik Kanalnetz der Stadt Lemgo.....	9
Abbildung 5: Anpassung der KOSIM-Simulation an die Ergebnisse der hydrodynamischen Kanalnetzsimulation.....	10
Abbildung 6: Berechnete maximale CSB-Konzentrationen an der Werre	13
Abbildung 7: CSB E1, Werre-km 54,0.....	18
Abbildung 8: CSB E1, Werre-km 43,0.....	19
Abbildung 9: CSB E1, Werre-km 41,0.....	20
Abbildung 10: CSB E1, Werre, Maximalwerte.....	21
Abbildung 11: CSB E2, Werre, Maximalwerte.....	21
Abbildung 12: CSB E2, Werre, Überschreitung Grenzwert 20 mg/l.....	22
Abbildung 13: CSB E2, Bega-km 18,0.....	23
Abbildung 14: CSB E2, Bega-km 14,3.....	24

Abbildung 15: CSB E2, Bega, Maximalwerte.....	25
Abbildung 16: CSB E2, Bega, berschreitung Grenzwert 20 mg/l.....	25
Abbildung 17: Nitrat E1, Werre, Maximalwerte.....	26
Abbildung 18: Ergebnisse der Varianten 1a und 1b, Projektphase II, Maximalwerte Ammonium, aus [6].....	30
Abbildung 19: Kontrollfläche für die Luftbildbefliegung.....	37
Abbildung 20: Zuweisung von Flurstücken an Kanalhaltungen.....	39
Abbildung 21: Zuordnung der Regenschreiber.....	41
Abbildung 22: Natürliches Einzugsgebiet, Beispiel.....	47
Abbildung 23: Vergleich berechneter und gemessener Abfluss, RÜ Bismarckstraße, Ereignis 7.....	49
Abbildung 24: Vergleich berechneter und gemessener Abfluss, RÜ Puckewese, Ereignis 7.....	50
Abbildung 25: Wirksamkeit der Abflussteuerung in Abhängigkeit von der Häufigkeit der Niederschlagsereignisse [15].....	51
Abbildung 26: mit VOLUME ermittelte aktivierbare Kanalstauräume.....	52
Abbildung 27: Zusätzliche Verbindungsmöglichkeiten im Netz.....	53
Abbildung 28: Im Netz aktuell betriebene Rückhalteräume.....	54
Abbildung 29: Beispiel für eine Zugehörigkeitsfunktion der Messgröße Wasserstand (aus [10]).....	55
Abbildung 30: Bestimmung des Ausgangs-Fuzzy-Sets (aus [10]).....	56
Abbildung 31: Fuzzy-UND-Verknüpfung mit dem Minimums-Operator.....	57
Abbildung 32: Vorgehen zur Entwicklung einer regelbasierten Steuerstrategie nach Schütze [12].....	58
Abbildung 33: Steuerstellen im Netz	59
Abbildung 34: Systemskizze für die Steuerung.....	61
Abbildung 35: Abschlagsvolumenkurve, Abschlag Pagenhelle.....	64
Abbildung 36: Durchfluss unterhalb der Drossel am Stauraum Wall.....	65
Abbildung 37: Überleitung Steinweg, Abfluss.....	66
Abbildung 38: Abflussganglinie Abschlag Staukanal Wall.....	67
Abbildung 39: Abflussganglinie des Zuflusswehrs zum Becken a.d. Bega.....	68
Abbildung 40: Abflussganglinie unterhalb der Steuerung am Sammler Süd.....	69
Abbildung 41: Abflussganglinie unterhalb des neuen Steuerungsorgans am Sammler Nord.....	70
Abbildung 42: Abflussganglinie, Abschlag am Becken an der Kläranlage.....	71
Abbildung 43: Abflussganglinie unterhalb des Steuerorgans am Stauraum Wall.....	72
Abbildung 44: Abflussganglinien am Abschlag SK Wall.....	73
Abbildung 45: Abflussganglinie am Abschlag des Beckens Kläranlage.....	73

Abbildung 46: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der Projekphase III, Station 18,0.....	76
Abbildung 47: Längsschnitt minimaler Sauerstoff.....	81
Abbildung 48: Längsschnitt maximale Konzentration CSB.....	82
Abbildung 49: Station 18.0, Konzentrationsganglinie Parameter CSB.....	83
Abbildung 50: Station 14.3, Konzentrationsganglinie Parameter CSB.....	83
Abbildung 51: Station 14.3, Frachtganglinie Parameter CSB.....	84
Abbildung 52: Längsschnitt Überschreitungsdauer 20 mg/l CSB.....	85
Abbildung 53: Station 14.3, Konzentrationsganglinie Parameter Ammonium-N...	86
Abbildung 54: Längsschnitt maximale Konzentration Ammonium-N.....	86
Abbildung 55: Station 14.3, Konzentrationsganglinie Parameter Nitrat-N.....	88
Abbildung 56: Längsschnitt maximale Konzentration Nitrat-N.....	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundwerte und errechnete Konzentrationen der Niederschlagswasserverschmutzung [mg/l].....	11
Tabelle 2: Berücksichtigte Entlastungen.....	12
Tabelle 3: Zulässige Beschickungshöhen [7].....	16
Tabelle 4: Übersicht Varianten.....	17
Tabelle 5: Anschlussgrad versiegelter Flächen.....	38
Tabelle 6: Trockenwetterkonzentrationen.....	49
Tabelle 7: Regenwasserkonzentrationen.....	49
Tabelle 8: Volumen der im Netz vorhandenen aktivierbaren Stauräume.....	53
Tabelle 9: Grundstätzlich implementierte Steuerungsmöglichkeiten.....	61
Tabelle 10: Ergebnisse der Simulationen für die Serie mit 26 Ereignissen.....	76
Tabelle 11: Daten der untersuchten Retentionsbodenfilter.....	79
Tabelle 12: Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Kanalnetzberechnung für die Ereignisse E1 und E2.....	81
Tabelle 13: Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Kanalnetzberechnung für die Ereignisse E1 und E2.....	92

Anlagen

Anlage 1	:	Ergebnisse der Kanalnetzberechnung für ein Einzelereignis (gesteuertes Netz)
Anlage 2	:	Ergebnisse der Gewässergüteberechnung für das Ereignis E1 (Jährlichkeit 1, Dauer 60 Minuten)
Anlage 3	:	Ergebnisse der Gewässergüteberechnung für das Ereignis E2 (Jährlichkeit 2, Dauer 30 Minuten)

1 Zusammenfassung der bisherigen Projektphasen

1.1 Projektphasen I bis II [5, 6]

Das Fließgewässer-Güte-Simulations-Modell (FGSM)¹ der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV) wurde vom ATV-Fachausschuss 2.2 „Modellrechnungen in der Wassergütewirtschaft“ in den Jahren 1991 bis 1995 aufgestellt und bis heute kontinuierlich weiterentwickelt. Das Modell ist ein eigenständiges, modular aufgebautes PC-Programm, das neben chemisch-physikalischen auch biologische Prozesse im Gewässer abbilden kann. Aufbauend auf ein instationäres, eindimensionales, hydraulisches Modell zur Simulation des Abflusses können 17 Bausteine zur Gütesimulation herangezogen werden. Die Abflussberechnungen basieren auf den Saint-Venant-Gleichungen; zur Lösung der Differentialgleichungen wird das Charakteristiken-Verfahren eingesetzt.

Die Projektphase I (2000 bis 2002) umfasste die Aufstellung und Kalibrierung des Modells mit Hilfe der in der Gewässerüberwachung des Staatlichen Amtes für Umwelt und Arbeitsschutz OWL, Standort Minden (ehemals StUA Minden, heute Bezirksregierung Detmold), ermittelten Gewässerdaten für die obere Werre von Detmold bis zum Pegel Ahmsen unterhalb von Bad Salzuflen. Weiterhin wurden durch die Anwendung des Bilanzierungsmodells MOBINEG die punktuellen und diffusen Stofffrachten als Belastung der Werre abgeschätzt. Zu untersuchen war zusätzlich eine Kopplung zwischen FGSM und MOBINEG. Die Datenmenge, die in Projektphase I zur Verfügung stand, war für eine umfassende Kalibrierung des Modells jedoch nicht ausreichend.

Im Rahmen einer umfangreichen Messkampagne war es möglich, diese Datenlücken in Projektphase II (2002) zu schließen. Die Kalibrierung, d.h. die Anpassung der Rechenwerte an die gemessenen Werte, konnte für den Wasserspiegel (Hydraulik) und die Parameter Temperatur, BSB₅, CSB, Nitrat, Ammonium und Phosphat über weite Strecken mit guten bis sehr guten Ergebnissen durchgeführt werden. Teilweise ergaben sich Schwierigkeiten bei der Kalibrierung für den Parameter Sauerstoff. Eine mögliche Begründung kann in der überschätzten Wiederbelüftungsrate infolge der Turbulenz bei kleinen und schnell fließenden Gewässern liegen.

Weiterhin wurde in der Projektphase II die Auswirkung der Hauptmischwasserentlastung an der Kläranlage der Stadt Detmold auf die Gewässergüte der Werre untersucht. Dazu wurden das Kanalnetz der Stadt mit dem

¹ Auch als ATV-Gewässergütemodell bezeichnet. Nach der Umwandlung der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV) in die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) wird das Modell auch als DWA-Gewässergütemodell benannt.

Schmutzfrachtsimulationsmodell KOSIM abgebildet und Variantenberechnungen unter Einbeziehung verschiedener Bodenfilterkonstellationen für das Stadtgebiet Detmold durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden als Randbedingungen für Variantenberechnungen der Gewässergütesimulation genutzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Mischwasserentlastung zu einer hohen Stoßbelastung im Gewässer führt. Der Einsatz eines Retentionsbodenfilters würde zu einer deutlichen Reduzierung dieser Belastung d.h. einer erheblichen Verbesserung der Gewässergüte im Falle einer Mischwasserentlastung führen.

Abschließend wurden in der Projektphase II Empfehlungen für die Optimierung der Gütemessungen für die Gewässerüberwachung im Hinblick auf Gewässergütesimulationen erarbeitet.

1.2 Projektphase III

Die Ergebnisse der Projektphase III stellen die Grundlagen für die Bearbeitungen der Betrachtungen zur Kanalnetzsteuerung für die Stadt Lemgo dar. Um das Verständnis der Bearbeitungen für die Projektphase IV zu verbessern, werden die wesentlichen Ergebnisse der Projektphase III im folgenden Abschnitt dargestellt.

1.2.1 Zielsetzung der Projektphase III [8]

In der dritten Projektphase (2003-2004) sollte das vorhandene Gewässergütemodell der Werre um das Gewässer Bega erweitert werden. Analog zum Teilprojekt II war zu untersuchen, in welchem Umfang die Auswirkungen von Mischwasserentlastungen auf die Wasserqualität durch den Bau von Retentionsbodenfilteranlagen vermindert werden können. Durch numerische Simulationen sowohl der Schmutzfrachten aus den Kanalnetzen der Städte Lemgo, Lage, Detmold und Bad Salzuflen mithilfe des Programms KOSIM als auch der Gewässergüte mithilfe des Fließgewässergütemodells sollten die Auswirkungen von zu planenden Retentionsbodenfiltern im Anschluß an verschiedene Mischwasserentlastungen auf die Gewässergüte von Werre und Bega untersucht werden.

1.2.2 Erweiterungen des Modellsystems gegenüber der Projektphase II

Der Modellaufbau der Werre wurde von Projektphase II übernommen. Am Zufluss der Bega in die Werre wurde das Gewässerpolygon der Bega ergänzt. Das Gewässerpolygon der Bega umfasst die Strecke von der Mündung in die Werre bis unterstrom des Schlosses Brake bei Lemgo und deckt damit insgesamt etwa 18,5 km

Fließstrecke ab. Die Abbildung 1 zeigt die Systemskizze des gesamten Modells der Gewässer Bega und Werre.

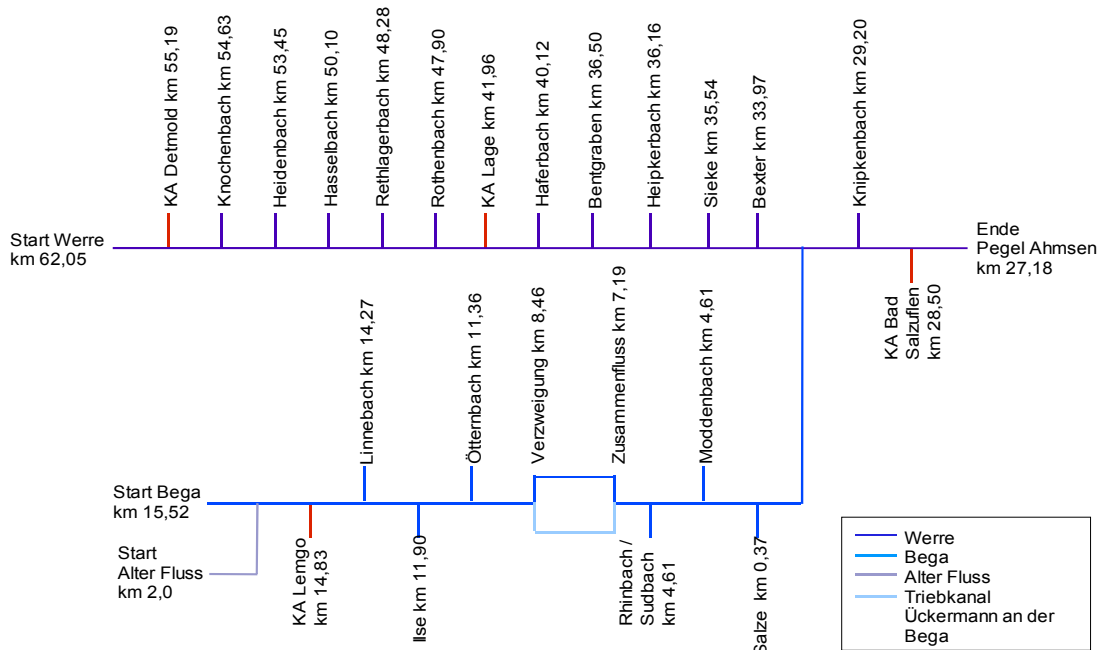


Abbildung 1: Systemskizze Gewässersmodell

1.2.3 Untersuchungsgebiet

Räumliche Lage

Das Untersuchungsgebiet "Obere Werre" liegt am östlichen Rand von Nordrhein-Westfalen im Regierungsbezirk Detmold und ist annähernd identisch mit den Gebietsgrenzen des Kreises Lippe. Das Gewässersystem Werre / Bega gehört zur Flussgebietseinheit der Weser. Abbildung 2 zeigt eine Übersichtskarte des Gewässersystems.

Das betrachtete Einzugsgebiet von Werre und Bega befindet sich zwischen der Quelle der Werre, die kurz oberhalb von Bad Meinberg bei Fließkilometer 71,90 entspringt, und endet am Pegel Ahmsen bei Fließkilometer 27,19. Die Bega entspringt bei Fließkilometer 38,8 bei Barntrup und mündet bei Werre-Fließkilometer 30,25 rechtsseitig in die Werre. Die Bega ist der größte Zufluss der Werre bis zum Pegel Ahmsen. Das Einzugsgebiet der Bega ist an der Einmündung in die Werre größer als das Einzugsgebiet der Werre bis zum Zusammenfluss.

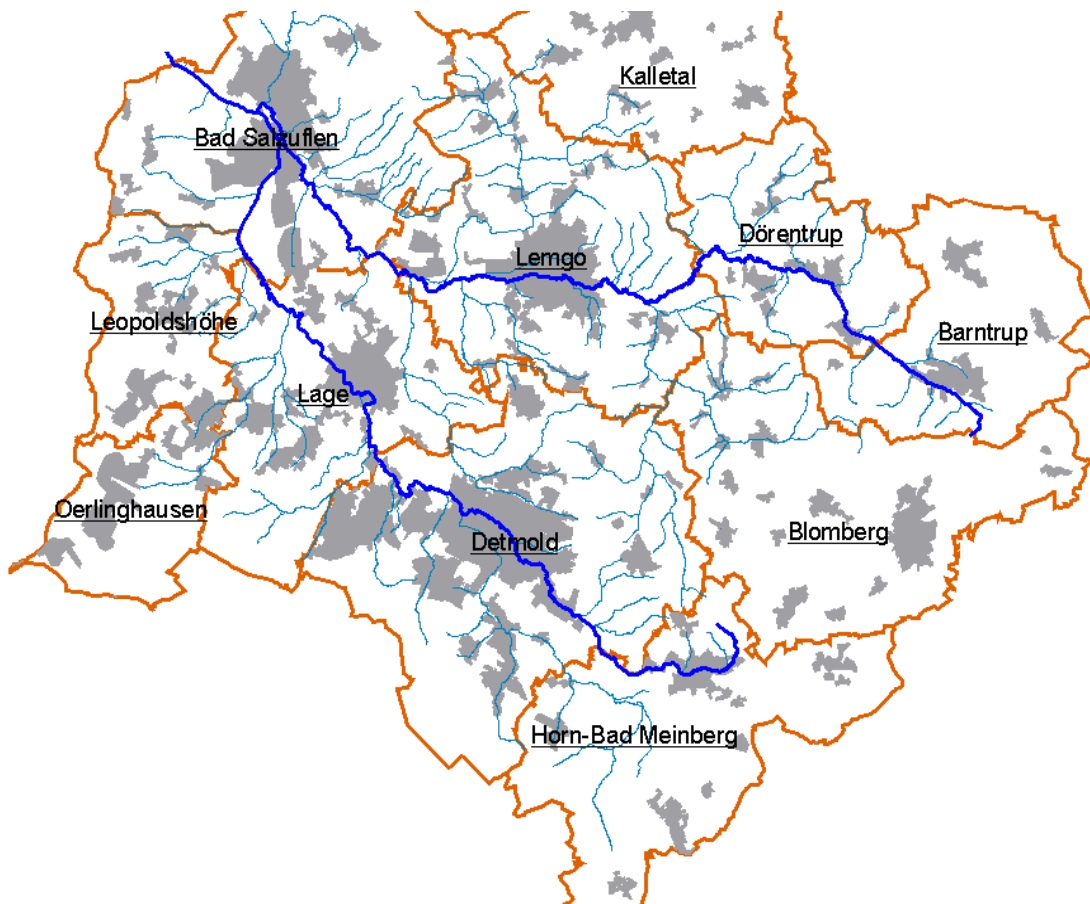


Abbildung 2: Übersichtskarte Gewässersystem

Das Landschaftsbild des Untersuchungsgebiets ist durch dichte Besiedelung, Landwirtschaft und Kleinindustrie in den Ortschaften geprägt.

Gewässerbeschreibung

Die Werre ist ein Mittelgebirgsfluss mit einer Länge von 72 km und einem Höhenunterschied von der Quelle bis zur Mündung von 195 m. Die Simulationsstrecke der Werre beginnt kurz nach der Einmündung der Wörbke bei Werre-km 62,09 und endet am Pegel Ahmsen bei Werre-km 27,185.

Auch die Bega lässt sich als Mittelgebirgsfluss charakterisieren. Die Fließlänge der Bega beträgt von der Quelle bei Barntrup bis zur Mündung in die Werre etwa 38,8 Kilometer. Dabei wird ein Höhenunterschied von 170 Metern überwunden. Das Untersuchungsgebiet der Bega beginnt bei Bega-km 18,52 am Schloß Brake in Lemgo und endet an der Mündung der Bega in die Werre.

Das Einzugsgebiet bis zum Pegel Ahmsen beträgt etwa 600 km², wovon etwa 376 km² auf die Bega entfallen. Der Mittelwasserabfluss am Pegel Ahmsen beträgt ca. 7,5 m³/s.

Das Gebiet ist stark durch Ackerbau und Grünlandwirtschaft geprägt. Die kommunalen Kläranlagen Detmold, Lage, Heipke und Bad Salzuflen leiten direkt in die Werre und die kommunale Kläranlage Lemgo leitet direkt in die Bega ein.

Kalibrierung ATV-Gewässergütemodell

1.2.4 Allgemeines / Messkampagne August 2003

Um Daten für die Kalibrierung des zu erweiternden Gewässergütemodells des Flusssystemes Werre / Bega zu erhalten, wurde während einer extremen Niedrigwasserphase in der Zeit vom 12. bis 14. August 2003 eine Messkampagne durchgeführt. Dabei wurde an jedem relevanten Zufluss sowie an verschiedenen Stellen in den Hauptgewässern Werre und Bega je eine Wasserprobe entnommen. Die Messstellen im Lageplan sind im Anhang, Karte 1 dargestellt. Es wurde nach einem Zeitplan verfahren, der die Fließgeschwindigkeit des Gewässers berücksichtigt, sodass eine Probenahme annähernd mit der „fließenden Welle“ durchgeführt wurde. Zusätzlich lagen die Messwerte der Kläranlagen vor.

Der Simulationszeitraum für das ATV-Gewässergütemodell wurde vom 08.08.2003, 0:00 Uhr bis 14.08.2003, 24:00 Uhr gewählt. Für die Kalibrierung standen acht Kontrollpunkte, die sich im Verlauf der Hauptgewässer befinden, zur Verfügung.

Für jeden Zufluss und für die acht Kontrollpunkte in den Hauptgewässern liegt je ein Wert für die verschiedenen chemischen und physikalischen Parameter vor. Für diese Knoten wurde ein konstanter Zustand angenommen. Für alle Werte, die Schwankungen unterliegen (Ablaufparameter Kläranlagen, Wetterverhältnisse), lagen auch Daten für die Zeit vor der Messkampagne vor, was eine problemlose Erweiterung des Simulationszeitraums möglich machte.

Bei der Bewertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die einmalige Beprobung eines Messpunktes dazu führen kann, dass unter Umständen ein Peak gemessen wird, der an anderen Messstellen beispielsweise durch Zeitverschiebung, Abbau oder Verdünnungseffekte nicht erfaßt wurde.

1.2.5 Kalibrierung des ATV-Modells mit den Daten der Messkampagne 2003

Die Kalibrierung des ATV-Modells konnte unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten mit guten bis sehr guten Ergebnissen abgeschlossen werden. Aufgrund der Niedrigwassersituation mussten einzelne Standardeinstellungen angepasst werden. Dies betraf Einstellungen aus dem Bereich des Stickstoffbausteins. Weiterhin musste die Wärmekapazität im Sediment bei der Kalibrierung des Temperaturbausteins

verändert werden. Durch diese Adaptation konnten unter Anpassung der Normkurve die vergleichsweise extremen Schwankungen zwischen Tag- und Nachttemperaturen sehr gut nachgebildet werden.

Neben den sehr guten Kalibrierungsergebnissen ergaben sich allerdings auch Problembereiche. Die Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Kalibrierung des Temperaturbausteins im Vergleich mit den Messwerten der Messkampagne.

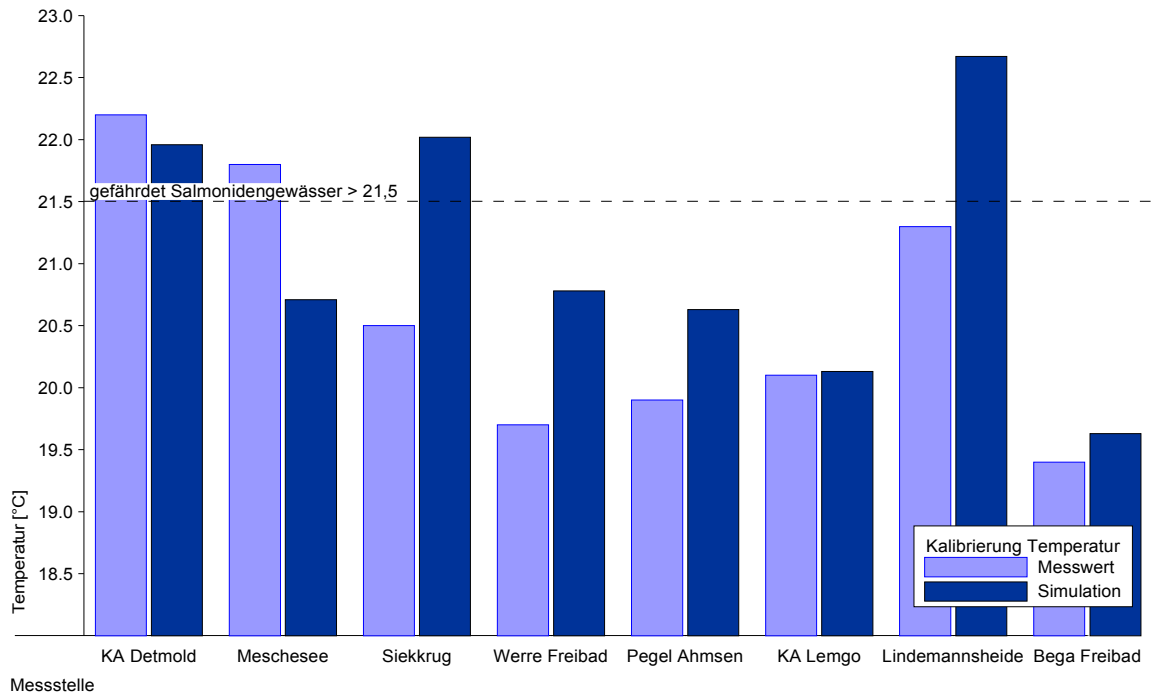


Abbildung 3: Kalibrierung Temperatur

Bei den Kalibrierungsergebnissen fast aller Bausteine zeigen sich an der Messstelle Siekkrug zum Teil erhebliche Differenzen zwischen den gemessenen und den berechneten Werten. Im Vergleich mit den ober- und unterstromigen Nachbarmessungen zeigt sich ebenfalls eine Abweichung in der Tendenz der Werte. Eine starke Änderung der Messwerte am Siekkrug durch die oberstromigen Zuflüsse kann aufgrund der gemessenen Werte sowie den geringen Zuflüssen an diesen Stellen ausgeschlossen werden. Dieser Sachverhalt deutet darauf hin, dass an der Messstelle Siekkrug ein lokal und zeitlich begrenzter Peak beprobt wurde. Dieses Phänomen zeigt die Problematik bei Einzelmessungen. Hier kann es immer zu nicht repräsentativen Ergebnissen kommen, wenn bei der Messung zufällig Peaks gemessen werden. Dies scheint an der Messstelle Siekkrug der Fall zu sein. Der Vergleich zwischen gemessenen und gerechneten Werten an diesem Messpunkt ist deshalb nicht aussagekräftig und bleibt bei der Gesamtbewertung der Kalibrierung unberücksichtigt.

Die Kalibrierung der konservativen Substanzen machte deutlich, dass die Abflussaufteilung im Modell nicht optimal ist. Konservative Substanzen unterliegen keinerlei Umsetzungsprozessen und eignen sich deshalb gut zum Testen der hydraulischen Parameter. Die Simulationsergebnisse an den Messstellen Bega Freibad und Pegel Ahmsen zeigen deutlich, dass der Abfluss der Salze, die durch die Einleitungen aus dem Staatsbad Bad Salzuflen als größte Chloridquelle gilt, zu gering angesetzt wurde. Trotz Anhebung der Abflussmenge an der Salze konnten die gemessenen Chloridwerte an den unterstrom des Zuflusses der Salze liegenden Messstellen Bega Freibad sowie Pegel Ahmsen nicht erreicht werden. Eine weitere Erhöhung des Salzeabflusses hätte jedoch dazu geführt, dass die anderen Zuflüsse nahezu trocken gefallen wären. Da die genaue Abflussverteilung nicht durch Messungen ermittelt werden konnte, wurden keine weiteren Anpassungen vorgenommen.

Die Ergebnisse des Sauerstoffbausteins waren trotz der bereits in den Teilprojekten I und II aufgetretenen zu hohen Wiederbelüftungsraten zufriedenstellend.

Zusammenfassend darf festgestellt werden, dass die Kalibrierung des Modells an Hand der Messwerte sehr erfolgreich verlief, so dass eine gute Ausgangsgrundlage für die Variantenuntersuchungen vorlag.

1.2.6 Ermittlung der Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten

Erstellung N-A-Modell

Im vorliegenden Projekt wurde ein detailliertes NA-Modell für das Einzugsgebiet der Werre bis zum Pegel Ahmsen aufgestellt, da an jedem Zuflussknoten des Gewässergütemodells eine Abflussganglinie vorgegeben werden muss.

Als Berechnungsverfahren wurde für die Niederschlagsabflußsimulation das Abflussbeiwertverfahren gewählt, da mit dem verwendeten Modell TALSIM keine befriedigenden Rechenläufe beim Einsatz der Bodenfeuchtesimulation durchgeführt werden konnte. Bei Angabe eines Abflussbeiwertes gelangt nach Abdeckung der Anfangsverluste (Benetzungs- und Muldenverlust) der übrige Anteil des Niederschlages im Verhältnis des Abflussbeiwertes zum Abfluss. Dies geschieht unabhängig von der Vorgeschichte und den Merkmalen des Niederschlages (Höhe, Intensität, Dauer).

Das Modell wurde an Hand von beobachteten Regenereignissen für Niederschläge im Sommer kalibriert und validiert.

Im Anschluss an die Kalibrierung wurden die für die Gewässergütesimulation benötigten Bemessungsniederschläge mit dem N-A-Modell simuliert. An Hand der durch die Kalibrierung gewonnenen Parameter wurden für alle

Bemessungsniederschläge die Abflussganglinien berechnet und der weiteren Projektbearbeitung verfügbar gemacht.

Analyse natürlicher Regenreihen und Ermittlung der maßgeblichen Niederschlagsverteilung

Zur Auswahl einer realen Regenverteilung wurde eine 13-jährige Regenreihe der Station Detmold analysiert. Aus den analysierten Einzelregen wurden dann Ereignisse mit verschiedenen Dauern betrachtet und als maßgebliche Regenverteilung ein 35 minütiges Regenereignis vom 23. Juni 2003 mit einem Niederschlag von 15,5 mm ausgewählt. Diese Niederschlagsverteilung wurde normiert und auf die statistischen Niederschlagsmengen angewendet.

Für die Simulationsrechnungen wurden zwei künstliche Niederschläge gebildet. Dafür wurden die Niederschlagsmengen für die Städte nach KOSTRA und der Intensitätsverlauf nach dem normierten Regen gewählt. Es wurden die folgenden Niederschläge verwendet:

- Ereignis E1: Niederschlag mit der Dauer $D = 60$ min und der Häufigkeit $n = 1$
- Ereignis E2: Niederschlag mit der Dauer $D = 30$ min und der Häufigkeit $n = 1$

Mit diesen beiden Regenereignissen wurde die Simulation der Kanalnetze Lemgo, Detmold, Lage und Bad Salzuflen mit KOSIM sowie die Simulation des natürlichen Gebietsabflusses mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell TALSIM durchgeführt, um die Randbedingungen für die Simulation mit dem Fließgewässergütemodell zu erhalten.

1.2.7 Betrachtung der Schmutzfrachten aus den Kanalsystemen

KOSIM-Modelle der Städte

Das grundsätzliche Vorgehen zur Ermittlung der Schmutzfrachten aus den Kanalsystemen entspricht dem Verfahren, das schon in der Projektphase II für das Kanalnetz der Stadt Detmold angewendet wurde. Diese Verfahren wurde auf die Kanalnetze der Städte Lage, Bad Salzuflen und Lemgo ausgedehnt. Ziel war es, über die Schmutzfrachten und die Entlastungsmengen die Einleitungsschwerpunkte als Belastung der Werre und der Bega zu lokalisieren, die eine stoffliche und hydraulische Belastung des Gewässers darstellen und somit für weitergehende Maßnahmen zur Verringerung der Belastungen in Betracht kommen. Es wurden alle wesentlichen Einleitungen aus den Mischsystemen in die Werre und die Bega im Untersuchungsgebiet erfasst.

Für die Städte Detmold, Lage und Bad Salzuflen lagen bestehende Modelldatensätze für das Programmsystem KOSIM vor. Im Gegensatz hierzu wurde für das Entwässerungssystem der Stadt Lemgo bisher noch kein Modelldatensatz für das Programmsystem KOSIM erstellt. Die vorhandenen und für Lemgo in der Vergangenheit durchgeführten Schmutzfrachtsimulationen wurden mit einem anderen, zu KOSIM nicht kompatiblen Modellsystem durchgeführt.

Da es das Ziel war, für alle Städte die gleiche Vorgehensweise bei der Ermittlung der Schmutzfrachten anzuwenden, wurde der KOSIM-Datensatz für das Abwassernetz der Stadt Lemgo im Rahmen einer Projekterweiterung neu aufgestellt. Als Datengrundlage wurde der von der Ingenieurgesellschaft Dorsch Consult erstellte Generalentwässerungsplan von 1989 sowie dessen Fortschreibung von 1997 durch die Stadt bereitgestellt. Nach Datenanalyse, Ableitung und Zusammenstellung der entsprechenden Eingangsdaten konnte das KOSIM-Modell für die Stadt Lemgo erstellt werden. Es wurde eine umfangreiche Kalibrierung des Modells an Hand vorliegender hydrodynamischer Kanalnetzberechnungen durchgeführt. Die Systemskizze des Abwassernetzes der Stadt Lemgo ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Anpassung der KOSIM-Simulationen an die sehr detaillierten Berechnungen mit der Ganglinien-Volumen-Methode (GVM) für den Stauraumkanal F03R. Es ist erkennbar, daß die Ergebnisse der hydrodynamischen Simulationen mit der GVM für den Zu- und Ablauf zum Stauraumkanal sowie auch die Überlaufwassermengen mit dem KOSIM-Modell sehr gut abgebildet werden können.

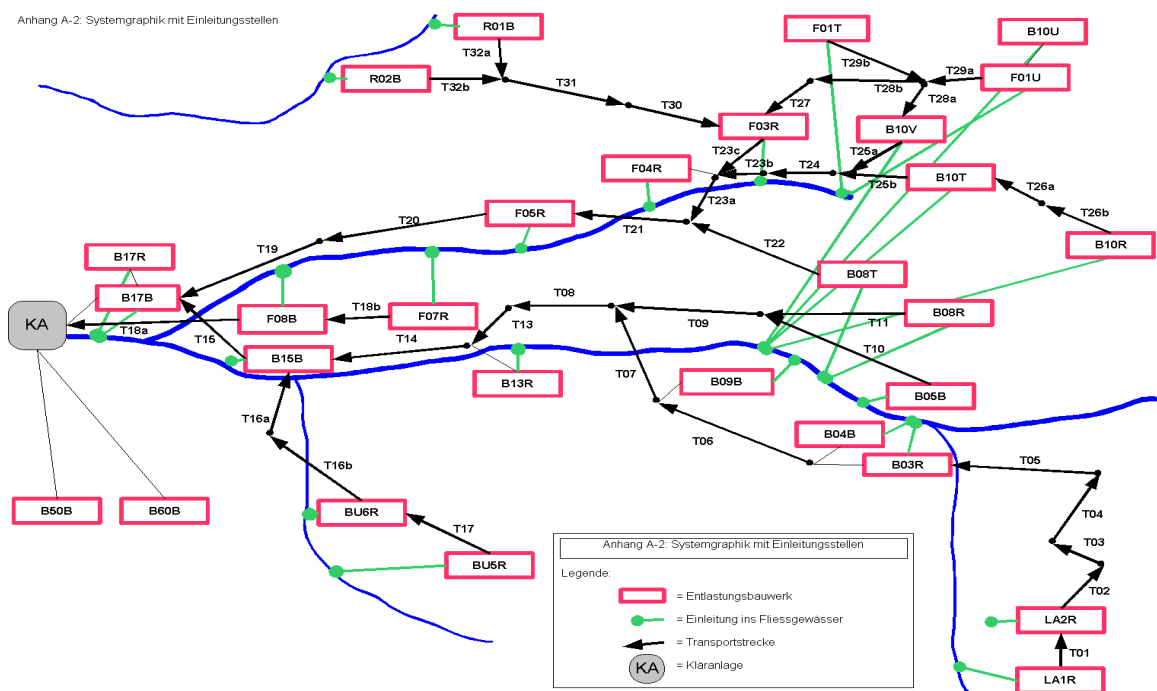


Abbildung 4: Systemgraphik Kanalnetz der Stadt Lemgo

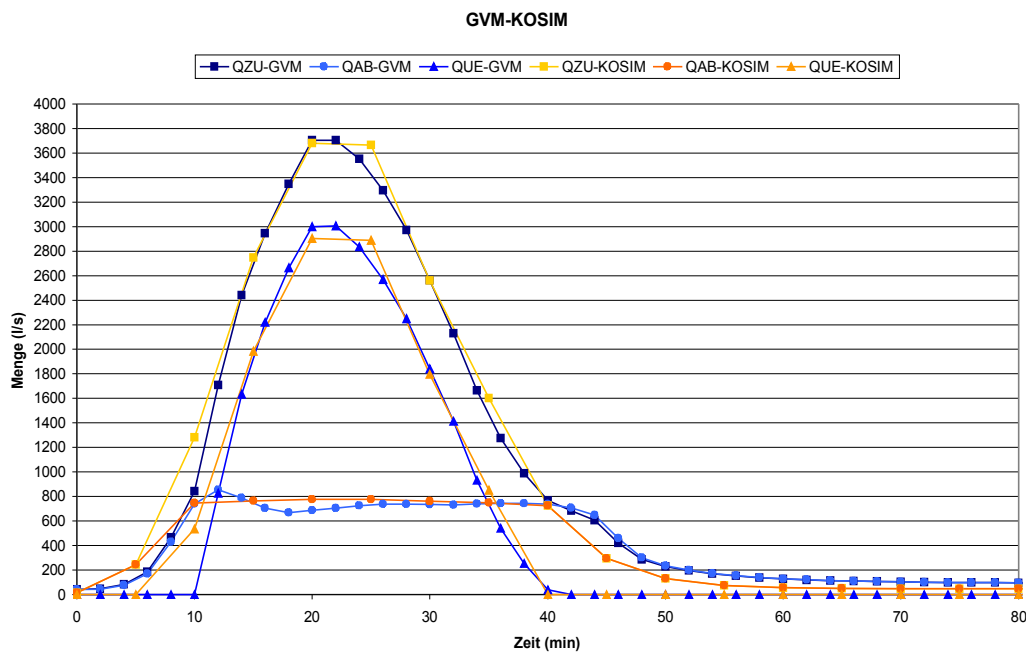


Abbildung 5: Anpassung der KOSIM-Simulation an die Ergebnisse der hydrodynamischen Kanalnetzsimulation (Ganglinien-Volumen-Methode, GVM), Zufluss, Abfluss und Überlauf am Stauraumkanal F03R der Stadt Lemgo

Von der Stadt Lage und der Stadt Bad Salzuflen wurden für die Simulation der Entwässerungsnetze KOSIM-Datensätze übergeben. Simulationsläufe zur Kontrolle der Modelle auf Funktionstüchtigkeit wurden erfolgreich durchgeführt. Kleinere Änderungen zur Anpassung an die aktuelle Situation konnten jeweils erfolgreich umgesetzt werden.

Der KOSIM-Modelldatensatz für die Stadt Detmold wurde vom Ingenieurbüro Redeker erstellt. Die Anpassung des Datensatzes wurde schon während der zweiten Projektphase durchgeführt.

Regenwasserverschmutzung

Die Bestimmung der Regenwasserabflusskonzentration orientiert sich an dem BWK Merkblatt 3, kurz BWK M3 [2] sowie dessen Begleitband [3]. In diesen Veröffentlichungen wurden aus mehreren Messprogrammen Grundbelastungen des Regenabflusses abgeleitet. Diese Konzentrationen wurden auf einen Jahresniederschlag von $h_{Nj} = 800$ mm und einem Jahresabflussbeiwert von $\Psi = 0,7$ normiert.

Die jeweils anzusetzenden örtlichen mittleren Konzentrationen $c_{r,m}$ in Abhängigkeit vom örtlichen mittleren Jahresniederschlag und -abflussbeiwert wurden nach Gleichung 1 berechnet:

$$c_{r,m} = c_r * \left(\frac{800}{h_{N,j}}\right) * \left(\frac{0,7}{\psi}\right) \quad \text{Gleichung 1}$$

- mit: $c_{r,m}$ = mittlere Konzentration des Regenabflusses [mg/l]
 c_r = Grundwert der mittleren Konzentration des Regenabflusses [mg/l]
 h_N = mittlerer Jahresniederschlag [mm]
 ψ = mittlerer Jahresabflussbeiwert [-]

Für die Städte wurden zum Teil sehr unterschiedliche Jahresabflussbeiwerte ermittelt. Dies ist auf die unterschiedliche Herangehensweise bei der Aufstellung der Modelldatensätze für KOSIM zurückzuführen. Messungen der Niederschlagswasserkonzentrationen lagen nicht vor. Da der mittlere Jahresabflussbeiwert und der mittlere Jahresniederschlag nach dem hier angewendeten Verfahren einen großen Einfluss auf die Stoffkonzentrationen haben, wurden für die Berechnung der mittleren Konzentrationen des Regenabflusses ($c_{r,m}$) in Absprache mit dem StAfUA für alle Städte einheitliche Werte für den Jahresniederschlag und den mittleren Jahresabflussbeiwert angenommen. Für den mittleren Jahresniederschlag wurde der mittlere Jahresniederschlag der Station Detmold aus dem Zeitraum 1990 bis 2003 von 942 mm/a und ein mittlerer Jahresabflussbeiwert von 0,7 angesetzt. Die Tabelle 1 zeigt die sich ergebenden mittleren Regenwasserkonzentrationen.

Tabelle 1: Grundwerte und errechnete Konzentrationen der Niederschlagswasserverschmutzung [mg/l]

	CSB	BSB₅	AFS	P_{ges.}	NH₄-N	N_{org.}	NO₃-N
c_r	120	20	160	0,44	1	4	1,23
$c_{r,m}$	102	17	136	0,37	0,85	3,4	1,05

Die mittleren Konzentrationen wurden für die konkreten Ereignisse mit einem Ereignisfaktor in Abhängigkeit vom Effektivniederschlag angepasst.

Simulation von Regenereignissen für den Ist-Zustand

Für die Berechnung des Ist-Zustandes wurden die in den KOSIM- und den N-A-Modellen ermittelten Abflussganglinien in das Gewässergütemodell integriert.

In Absprache mit den StAfUA wurde eine Niedrigwassersituation betrachtet, da diese den „Worst-Case“ für die Gewässergüte bei einem Starkregenereignis darstellt.

Als Berechnungszeitraum wurden sieben Tage (08. bis 14. August) gewählt, analog zum Berechnungszeitraum der Kalibrierung. Der Zeitpunkt für den Regenbeginn des Niederschlagsereignisses wurde am fünften Berechnungstag (12. August) um zwölf Uhr mittags gewählt. Hierdurch ergab sich sowohl eine ausreichend lange Zeitspanne zum

Einfahren des Modells vor dem Regenereignis als auch zur Ermittlung der Auswirkungen des Regenereignisses auf die Gewässergüte.

Für die natürlichen Zuflüsse wurden die Ganglinien aus der N-A-Modellierung verwendet. Die bei der Messkampagne trocken gefallenen Zuflüsse Bentgraben, Bexter, Knipkenbach und Sieke wurden aufgrund der räumlichen Nähe mit den Parametern des Heipkerbachs belegt; der Heidenbach wurde mit den Parametern des Knochenbachs belegt.

Die relevanten Mischwasserentlastungen und die entsprechenden Abflüsse wurden über die vier verschiedenen KOSIM-Simulationen der einzelnen Städte ermittelt. Es wurden nur die Entlastungen betrachtet, die direkt in Werre, Bega und den Alten Fluss entlasten. Da einige Entlastungen räumlich sehr nah zueinander am Gewässer angeordnet sind, wurden teilweise mehrere Entlastungen zusammengefasst. In gleicher Weise wurden die einzelnen Entlastungen am Alten Fluss zu einer Gesamteinleitung als „Zufluss Alter Fluss“ modelliert. Folgende Entlastungen wurden im Modell berücksichtigt (Tabelle 2):

Tabelle 2: Berücksichtigte Entlastungen

Stadt	Entlastung	Fluss	Station
Lemgo	B10R, B10T, B10U, B10V, B09B, B08R, B08T, B05B, B04B, B03R Becken-überlauf, B03R Klärüberlauf	Bega	18,5
Lemgo	B13	Bega	17,2
Lemgo	B15	Bega	16,4
Lemgo	B17	Bega	15,1
Lemgo	F01T, F01U, F03R, F04R, F05 Becken-überlauf, F05 Klärüberlauf, F07, F08	Alter Fluss als Einleitung in Bega	15,5
Detmold	RÜ 04	Werre	56,8
Detmold	RÜ 07	Werre	55,7
Detmold	DB 06	Werre	55,1
Lage	R 103	Werre	44,1
Lage	KSR 111	Werre	42,8
Lage	KSR 110	Werre	41,9
Bad Salzuflen	RÜ 9, RÜ 9.1	Bega	2,1
Bad Salzuflen	KSR 11	Werre	33,1
Bad Salzuflen	RÜB 08	Werre	32,5

Es wurden die Parameter Abfluss, CSB, BSB₅, pH, Sauerstoff, Ammoniak, Ammonium, Nitrat und Phosphat untersucht. Die Ergebnisse zeigen teilweise erhebliche Stoßbelastungen, die von den Mischwasserentlastungen verursacht werden. In der Abbildung 6 sind beispielhaft die Ergebnisse für den Parameter CSB dargestellt. Bei der Interpretation der Werte ist zu beachten, dass es sich bei der in der Abbildung 6 dargestellte Linie um die maximal während des Betrachtungszeitraums aufgetretenen CSB-Werte handelt. (Die Maximalwerte stellen keine Ganglinie im eigentlichen Sinne dar). Die Einleitungsstellen sind jeweils deutlich an den schlagartig steigenden CSB-Konzentrationen, z. B. in Detmold (um km 56) oder Lage (um km 43), zu erkennen.

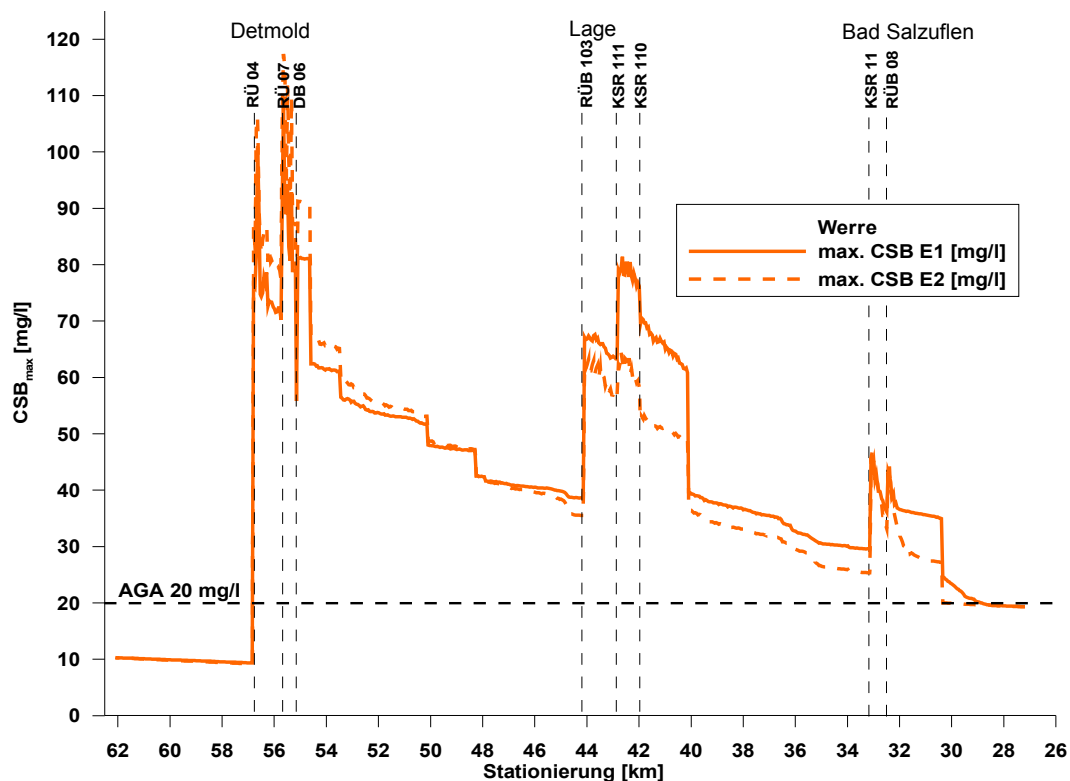


Abbildung 6: Berechnete maximale CSB-Konzentrationen an der Werre für die beiden Niederschlagsereignisse E1 ($D=60$, $n=1$) und E2 ($D=30$, $n=1$)

1.2.8 Retentionsbodenfilter

Im Auftrag des MUNLV NRW wurde das „Handbuch für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern“ [7] erstellt. Die darin aufgeführten Anforderungen an die Errichtung und den Betrieb eines Retentionsbodenfilters sind die zukünftige Grundlage für die Genehmigung und Förderung solcher Anlagen. Auf der Basis dieses Handbuches wurden die erforderlichen Abmessungen der infrage kommenden Retentionsbodenfilter ermittelt.

Aus den Ergebnissen von Langzeitsimulationen mit KOSIM ließen sich eindeutig die Entlastungsbauwerke lokalisieren, deren Überlauf eine hydraulische sowie stoffliche Belastung für das Fließgewässer darstellen. Für die Städte Lemgo, Detmold, Lage und Bad Salzuflen wurden folgende Retentionsbodenfilter untersucht:

- **Lemgo:** Aus der Vielzahl der in Frage kommenden Entlastungen konnte durch Bildung von Entlastungsschwerpunkten und Variationen der Kanalnetzkonfiguration der Bau von zwei Retentionsbodenfiltern an den Einleitungsstellen B17 (RBF Lemgo I) und B04 (RBF Lemgo IIa) als geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Gewässerbelastung ermittelt werden. Auf Grund der räumlichen Nähe verschiedener Einleitungspunkte am Schloß Brake wurde eine Zusammenfassung der Entlastungen und eine gemeinsame Beschickung mit dem Überlauf der Bauwerke B04B und B03R zu einem Retentionsbodenfilter (RBF Lemgo IIb) mit in Betracht gezogen.
- **Lage:** Die Entlastungsbauwerke mit der größten hydraulischen und stofflichen Belastung sind der Stauraumkanal mit untenliegender Entlastung KSR (BÜ) 111 und das Durchlaufbecken RÜB (BÜ) 103. Die Verknüpfung der Bauwerke zeigt die Zusammenführung der Abflüsse des Kanalnetzes der Stadt Lage zum Bauwerk KSR 111 und dem nachgeschalteten KSR 110. Dort ergibt sich auch ein Standort für eine geeignete Anordnung eines Retentionsbodenfilters. Bei Betrachtung des Lageplans der Stadt Lage wird auf Grund der örtlichen Gegebenheiten der Bau eines weiteren Retentionsbodenfilters im Stadtgebiet nur schwer möglich sein. Dennoch wurde als eine weitere Variante ein Retentionsbodenfilter hinter der Entlastung des Bauwerks RÜB 103 mit aufgenommen, um die damit verbundene mögliche Reduzierung der Gewässerbelastung aufzuzeigen.
- **Detmold:** Der Retentionsbodenfilter der Stadt Detmold befindet sich bereits in der Detailplanung durch das Ingenieurbüro Redeker, Detmold. Die durch die Detailplanung ermittelten Dimensionierungswerte wurden in das KOSIM-Modell übernommen. Um die Möglichkeiten einer weiteren Reduzierung der Gewässerbelastung aufzuzeigen, wurde das KOSIM Modell der Stadt Detmold um einen zweiten Retentionsbodenfilter erweitert. Die Entlastungen der beiden Regenüberläufe RÜ 04 und RÜ 07 stellen ebenfalls eine nicht unerhebliche Belastung dar und beschicken in der Variante 5 den Retentionsbodenfilter Detmold II.
- **Bad Salzuflen:** Für Bad Salzuflen wurde kein Retentionsbodenfilter untersucht. Die Mischwasserentlastungen der Stadt Bad Salzuflen sind im Vergleich zum Gewässerabfluss gering, so dass hier der Aufwand für den Bau eines Retentionsbodenfilters nicht gerechtfertigt erscheint. Bad Salzuflen profitiert dabei von der erheblich höheren Wasserführung der Werre und der Bega in Bad Salzuflen gegenüber z. B. der Werre in Detmold.

Die Reinigungsleistung und Ablaufqualität eines Retentionsbodenfilters werden zum einen durch die Systemdaten wie z.B. Substrateigenschaften, Filterabmessungen, Wirkung der Vorbehandlungsanlage und zum anderen durch die Eingangsgrößen, das heißt Menge, Qualität und zeitliche Folge des Zulaufs bestimmt. Aufgrund von Betriebserfahrungen sind Substrateigenschaften, Aufenthaltszeit und flächenspezifische Beschickung des Filters für die Reinigungsleistung entscheidend. Zur Ermittlung der Eingangsgrößen ist ein an Niederschlags-Abfluss-Daten kalibriertes Schmutzfrachtmodell wie z.B. KOSIM zu verwenden. Nach dem das zu erreichende Behandlungsziel des Retentionsbodenfilters bestimmt ist, werden für die Dimensionierung entsprechende Zielgrößen festgelegt. Nach den beiden grundlegenden Funktionen eines Retentionsbodenfilters, Retention und Reinigung, werden Filterfläche und Retentionsvolumen getrennt dimensioniert.

Die Bestimmung des Retentionsvolumens V_{RBF} [m³] erfolgt iterativ im Nachweisverfahren. Unter den örtlichen Aspekten des Gewässerschutzes werden Drosselabfluss $\max Q_d$ [l/s], Entlastungshäufigkeit n [1/a] und der hydraulische Wirkungsgrad η_h [%] als Zielgrößen vorgegeben. Zur Ermittlung des Speichervolumens können bei sandigem Filtermaterial 15 Prozent des Filtervolumens als Porenvolumen berücksichtigt werden. Nach der Wahl eines Retentionsvolumens werden mit Hilfe der Langzeitsimulation der hydraulische Wirkungsgrad und die Entlastungshäufigkeit für den Retentionsbodenfilter und die Retentionsbodenfilteranlage bestimmt. Durch iterative Bestimmung des Volumens wird der Nachweis der Einhaltung der geforderten Zielgrößen erbracht.

Die Bestimmung der benötigten Filterfläche A_{RBF} [m²] erfolgt über einen empirischen Bemessungsansatz. Als Zielgrößen werden das im Retentionsbodenfilter behandelte Abflussvolumen $V_{Q_b,RBF}$ [m³/a], die Beschickungshöhe h_f [m/a] im langjährigen Mittel und im Einzeljahr sowie die Filtergeschwindigkeit V_f [l/(s*m²)] festgelegt. Die Bemessung der Filterfläche erfolgt unter Einhaltung der Zielgrößen h_f und V_f mit den Bedingungen $A_{RBF} \geq V_{Q_b} / h_f$ [m²] und $A_{RBF} \geq Q_{d,RBF} / V_f$ [m²]. Das behandelte Abflussvolumen wird ebenfalls mit Hilfe der Langzeitsimulation ermittelt. Tabelle 3 gibt die zulässigen Beschickungshöhen für Misch- und Trennsystem als Wertebereich im langjährigen Mittel und als Maximalwert im Einzeljahr an.

Tabelle 3: Zulässige Beschickungshöhen [7]

System	Beschickungshöhe im langjährigen Mittel h_f [m/a]	Beschickungshöhe im Einzeljahr h_f [m/a]
Mischsystem	30 - 40	50
Trennsystem	40 - 50	60
Straßenentwässerung	40 - 50	60

Die Einhaltung der in Tabelle 3 angegebenen Beschickungshöhen ermöglicht nach den bisherigen Erkenntnissen einen störungsfreien Filterbetrieb. Eine Überschreitung dieser Werte verstärkt die Kolmationsneigung und sollte vermieden werden. Die Filtergeschwindigkeit wird über die Drosseleinrichtung des Ablaufs eingestellt. Dies setzt voraus, dass der Durchlässigkeitsbeiwert k_f des Filtersubstrats dauerhaft größer ist als die Filtergeschwindigkeit V_f . Sollte der k_f -Wert kleiner als V_f sein, fungiert der Filter als Drossel. Als Richtwert wird ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \geq 5 * V_f$ empfohlen. Eine zu hohe Geschwindigkeit verringert die Reinigungsleistung.

Je nach den Eigenschaften des Kanalnetzes sind unterschiedliche Parameter die bestimmenden Faktoren bei der Dimensionierung. Beim Retentionsbodenfilter Lemgo I ist die Flächenbeschickung die kritische Bemessungsgröße. Bei den anderen Retentionsbodenfiltern ist eher die Entlastungshäufigkeit der ausschlaggebende Faktor. Die Retentionsbodenfilter wurden jeweils einmal mit $n = 2$ und $n = 6$ dimensioniert und im ATV-Gütemodell eingebunden. Tabelle 4 zeigt die erforderlichen Volumina der einzelnen Retentionsbodenfilter als Ergebnisse der Dimensionierungsberechnungen.

Die Ablaufkonzentrationen der Retentionsbodenfilter wurden auf der Basis der im Handbuch für die Planung, den Bau und den Betrieb von Retentionsbodenfiltern [7] aufgeführten Betriebsergebnisse zusammengestellt bzw. aufgrund von Frachtbetrachtungen ermittelt.

1.2.9 Simulation von Regenerereignissen mit Retentionsbodenfiltern

Zur Optimierung der Anordnung der verschiedenen Retentionsbodenfilter wurden unterschiedliche Varianten betrachtet. Sämtliche Varianten wurden jeweils mit dem 60 minütigen Regenerereignis E1 und dem 30 minütigen Regenerereignis E2 berechnet. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Varianten.

Tabelle 4: Übersicht Varianten

Variante	Entlastungshäufigkeit [1/a]	Retentionsbodenfilter Volumen [m³] / Drosselabfluss [l/s]						
		Lemgo I	Lemgo IIa	Lemgo IIb	Lage	Lage II	Detmold I	Detmold II
1	2	24600/418	5900/98		9000/150		5500/34	
2	2	24600/418		7700/128	9000/150		5500/34	
3	6	23500/400	3100/50		6800/113		5500/34	
4	6	23500/400		4400/72	6800/113		5500/34	
5	2	24600/418		7700/128	9000/150	4400/72	5500/34	2000/32
6	2	24600/418		7700/128	9000/150	4400/72	5500/34	2000/32

Da nach [7] keine belastbaren Hinweise für eine gesicherte Denitrifikation in den Retentionsbodenfiltern vorliegen, wurde für die Varianten 1 bis 5 keine Denitrifikation

angenommen. Die Varianten 5 und 6 unterscheiden sich lediglich darin, dass bei der Variante 6 eine 20%-ige Denitrifikation unterstellt wurde, um den Einfluß der Denitrifikation zu veranschaulichen.

Für die Drosselabflüsse der Retentionsbodenfilter ergaben sich die Abflussganglinien und die Ganglinie für den Gesamtstickstoff aus KOSIM. Als Eingangsdaten für die Simulation mit dem ATV-Gewässergütemodell werden deutlich mehr Parameter als die mit KOSIM betrachteten Stoffe benötigt. Die fehlenden Werte wurden auf der Basis von Literaturdaten ergänzt.

Bezogen auf die Überläufe der Retentionsbodenfilter ergaben sich aus KOSIM Ganglinien für den Abfluss, Ortho-Phosphat, organischer Stickstoff, Ammonium, CSB und BSB₅. Temperatur, Calcium, Silizium, pH-Wert, Säurekapazität, Leitfähigkeit und Sauerstoff wurden entsprechend dem Ist-Zustand mit den Parameterwerten des Abwassers belegt.

Zur Interpretation der Berechnungsergebnisse wurde für jeden Parameter jeweils für Werre und Bega getrennt eine Auswertung der maximal auftretenden Konzentrationen über den Gewässerverlauf vorgenommen. Zusätzlich wurden die Überschreitungsdauern der jeweiligen Grenzwerte über den Gewässerlauf ermittelt. Weiterhin wurde an fünf Stellen des Gewässersystems (Bega-km 18,0 und 14,3 sowie Werre-km 54,0, 43,0 und 41,0) eine Auswertung über die Zeit vorgenommen.

Beispielhaft werden hier Teile der Auswertung für den Parameter CSB beim Regenereignis E1 dargestellt. Da in den neueren Veröffentlichungen keine Grenzwerte für den CSB angegeben werden, wurde auf den AGA-Richtwert von 20 mg/l zurückgegriffen.

Die Abbildung 7 zeigt die Ganglinie des CSB für die berechneten Varianten am Kilometer 54 der Werre und damit ca. 1 km unterhalb der Einleitung der Kläranlage und des Retentionsbodenfilters Detmold I für das 60 minütige Regenereignis. Im Ist-Zustand (schwarz) erreicht der Maximalwert des CSB im Gewässer an dieser Stelle ca. 60 mg/l. Er übertrifft damit den Richtwert der AGA um den Faktor 3. Da die Varianten 1 bis 4 in Detmold deckungsgleich sind, ist nur die Ganglinie der Variante 4 (rot) zu sehen. Durch den Retentionsbodenfilter Detmold I wird der Scheitelwert beim Ereignis E1 (60 Minuten) um ca. 10 mg/l abgemindert. In Kombination mit dem Retentionsbodenfilter Detmold II (Variante 5 und 6, violett) kann nur eine geringfügige weitere Verminderung der CSB-Belastung beim Ereignis E1 (60 min) erreicht werden. Beide Retentionsbodenfilter laufen bei diesem Ereignis über.

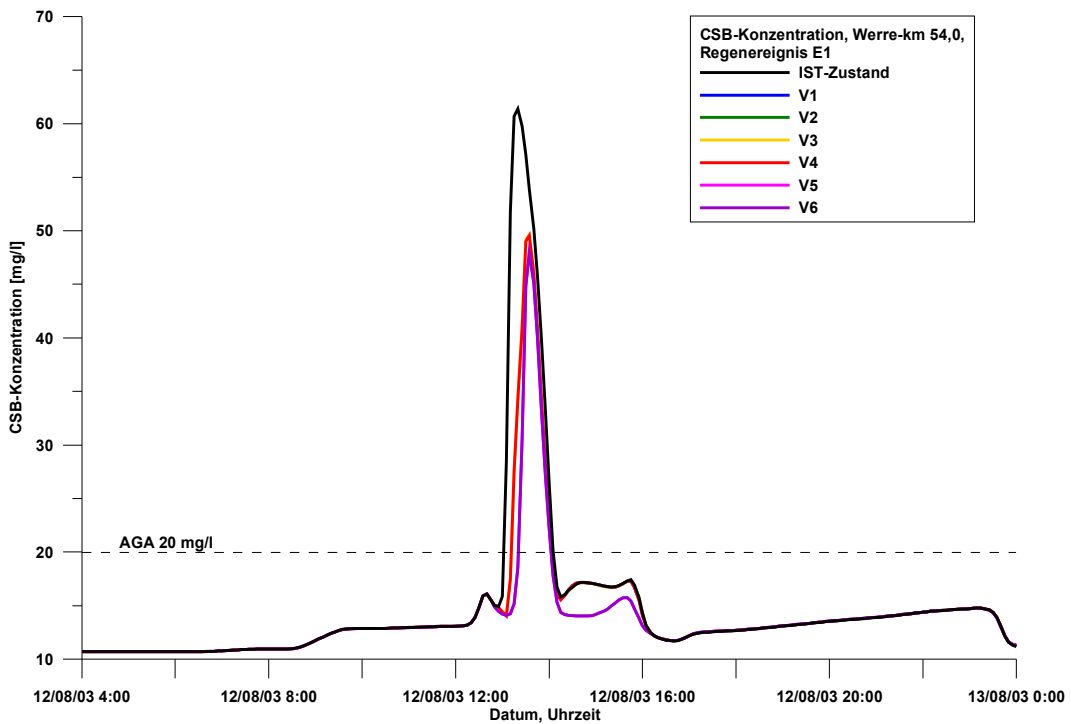


Abbildung 7: CSB E1, Werre-km 54,0

Die Abbildung 8 zeigt den CSB für den Werre-km 43,0, ca. 1 km unterhalb der Einleitung des Retentionsbodenfilters Lage II. Der erste Peak im Ist-Zustand und für die Varianten 1 bis 4 (in diesem Abschnitt deckungsgleich mit dem Ist-Zustand) wird durch die Einleitung RÜB 103 verursacht. Durch den Retentionsbodenfilter Lage II, der bei keinem der betrachteten Regenerereignisse überläuft, wird der CSB von über 60 mg/l im Ist-Zustand beim Ereignis E1 (60 min) auf ca. 10 mg/l reduziert. Der zweite Peak dagegen wird durch die Einleitungen in Detmold verursacht. Die Wirksamkeit der Retentionsbodenfilter Detmold I und II ist auch mehr als 10 km unterhalb der Einleitungen noch deutlich nachweisbar. Es wird auch deutlich, dass Reduzierungen der Spitzenbelastungen in Lage nur durch Veränderungen in Detmold und durch die Erstellung des Retentionsbodenfilters Lage II (Varianten 5 und 6) möglich sind. Bei den Varianten 5 und 6 würden ohne das Überlaufen der Retentionsbodenfilter Detmold I und Detmold II in Lage die AGA-Richtwerte für den CSB bei beiden Ereignissen eingehalten.

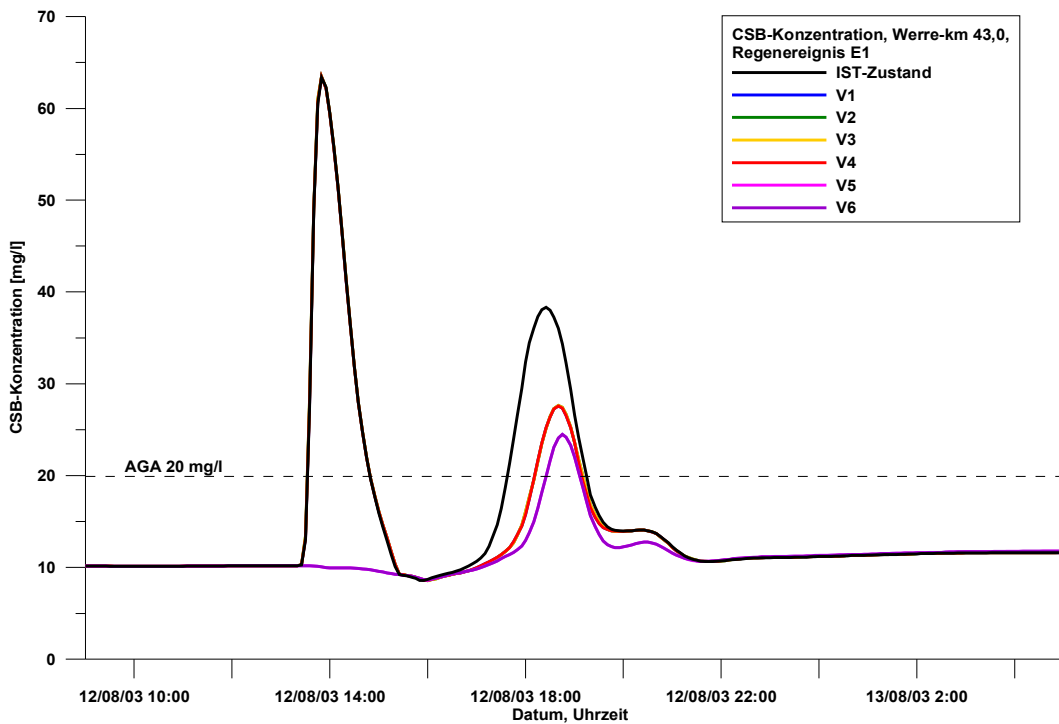


Abbildung 8: CSB E1, Werre-km 43,0

Die Abbildung 9 zeigt den CSB für den Werre-km 41,0, ca. 1 km unterhalb der Einleitung der Kläranlage der Stadt Lage. Der erste Gipfel wird durch die Einleitungen KSR 110 und KSR 111 verursacht. Die Varianten 1 bis 4 sind in diesem Bereich des Modells nahezu deckungsgleich, da der Retentionsbodenfilter Lage I bei keinem der Ereignisse überläuft. Der zweite Gipfel der Ganglinie im Ist-Zustand ergibt sich durch die oberhalb liegende Einleitung RÜB 103. Bei den Varianten 5 und 6 zeigt sich auch an dieser Stelle deutlich der Einfluss des Retentionsbodenfilters Lage II. Mit den Retentionsbodenfiltern in Lage und Detmold lassen sich die CSB-Konzentrationen in Lage, bezogen auf das Regenereignis E1 (60 Minuten), auf unter 30 mg/l absenken.

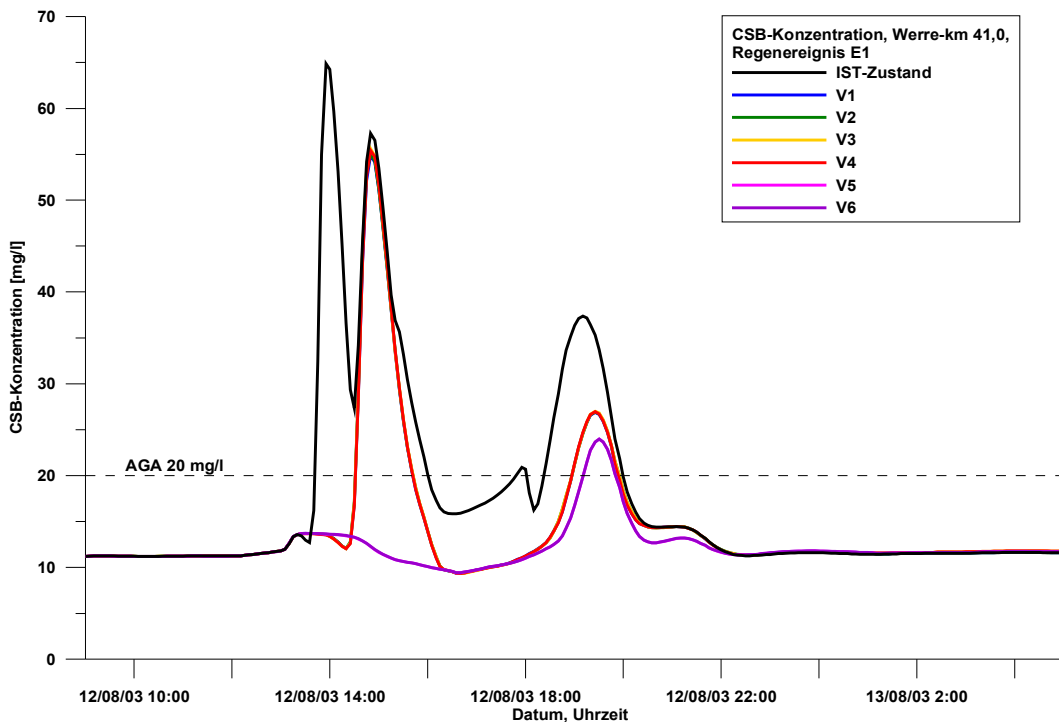


Abbildung 9: CSB E1, Werre-km 41,0

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Maximalwerte des CSB im Gewässer für die Werre. Die Abbildungen veranschaulichen die Wirkung der Retentionsbodenfilter in Detmold. Hier wird eine weitere Absenkung der CSB-Belastung vor allem durch den geringen Platz zum Bau des Retentionsbodenfilters Detmold I verhindert. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für das Ereignis E1 (60 min) und das Ereignis E2 (30 min) zeigen deutlich, dass eine wesentlich größere Reduzierung der CSB-Belastung möglich ist, wenn der Retentionsbodenfilter Detmold I, wie beim Ereignis E2 (30 min), nicht überläuft. Insgesamt kann die CSB-Spitzenbelastung durch den Bau der Retentionsbodenfilter Detmold I und Detmold II deutlich abgesenkt werden. Die Absenkung der CSB-Belastung durch die Retentionsbodenfilter in Detmold wirkt sich auch in Lage noch deutlich aus.

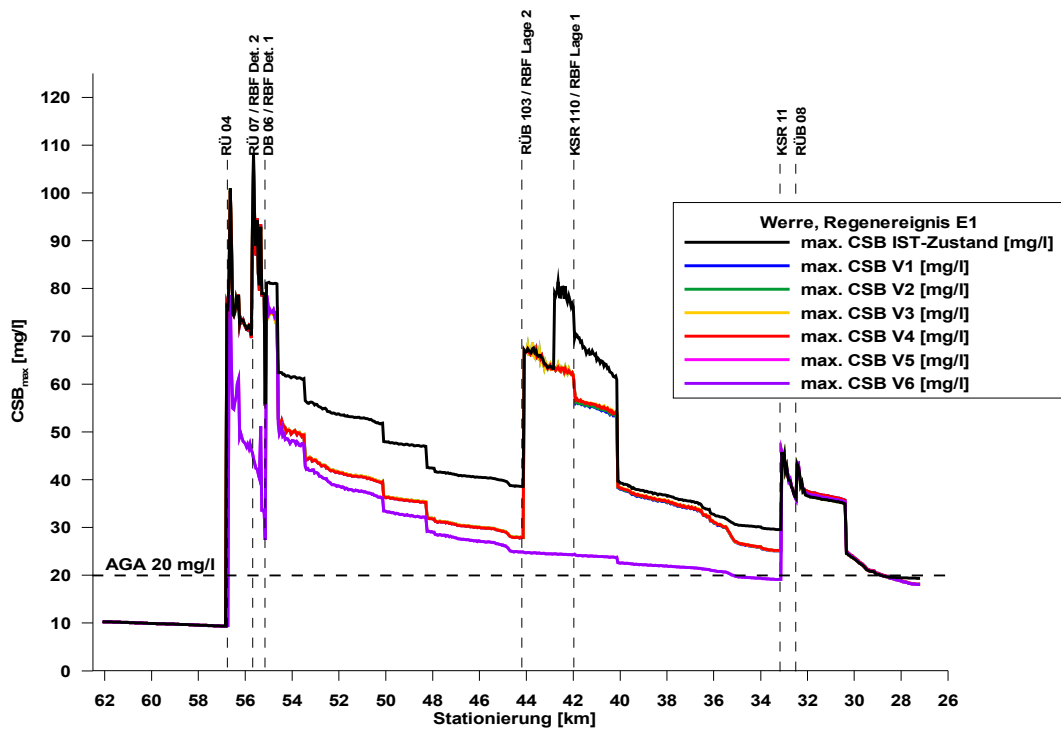


Abbildung 10: CSB E1, Werre, Maximalwerte

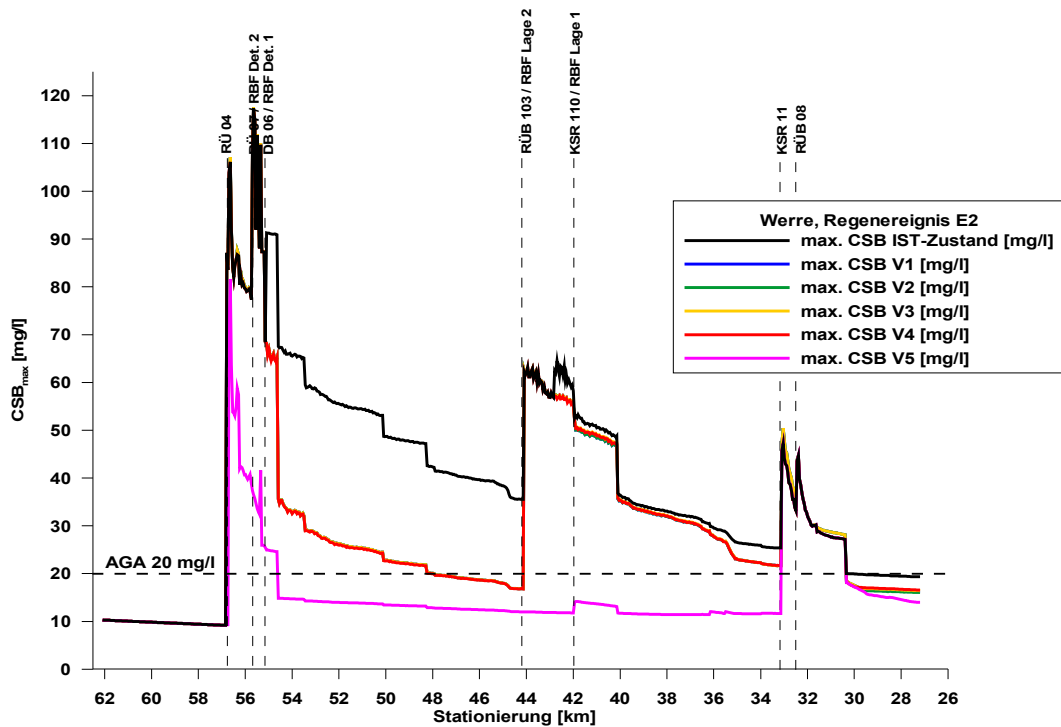


Abbildung 11: CSB E2, Werre, Maximalwerte

Die Abbildung 12 zeigt eine Auswertung der Überschreitungsdauer für den Grenzwert 20 mg/l. Dargestellt sind die Überschreitungsstunden für den gesamten Simulationszeitraum von 5 Tagen für das Ereignis E2 (30 min). In dieser Darstellung wird die Wirksamkeit der Retentionsbodenfilter sehr deutlich. Zwar kann der Grenzwert bei keiner Variante eingehalten werden, die Dauer der Überschreitungen sinkt aber deutlich ab. Es lässt sich folglich eine wesentliche Verbesserung für Gewässerergüte in der Werre erreichen.

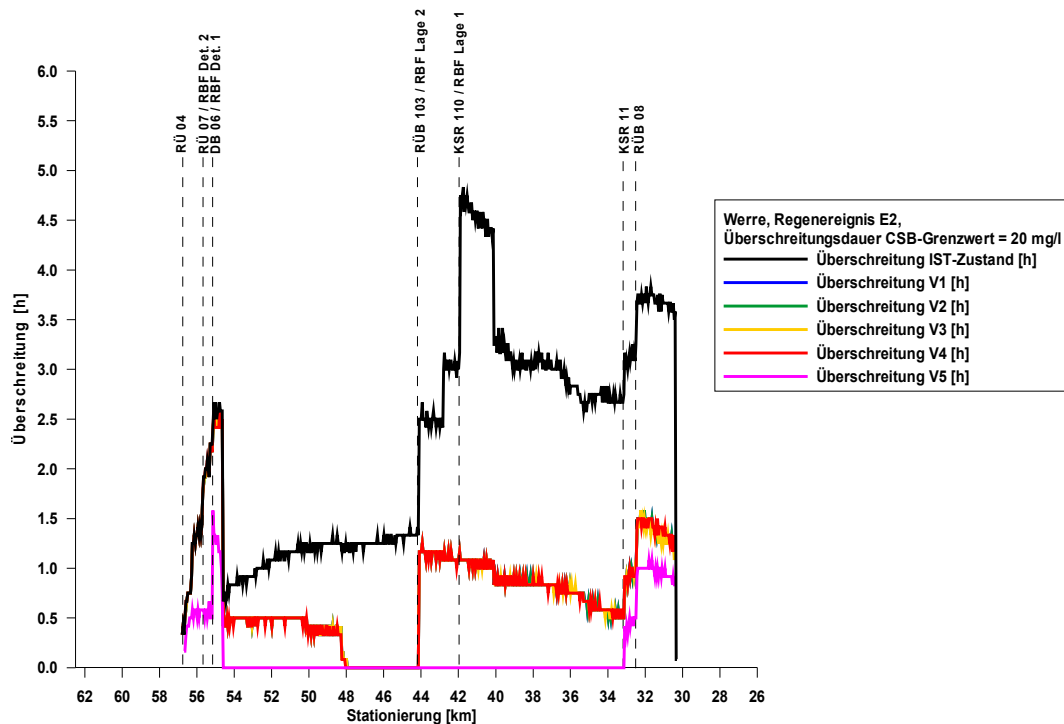


Abbildung 12: CSB E2, Werre, Überschreitung Grenzwert 20 mg/l

Die Abbildung 13 zeigt die CSB-Konzentrationen der Bega am Kilometer 18,0, unterhalb des Modellstarts. Beim Regenereignis E2 (30 min) zeigen die Ganglinien das in Abhängigkeit von der Größe der Retentionsbodenfilter der jeweiligen Variante zu erwartende Bild. Beim Ist-Zustand steigt der CSB auf bis zu 80 mg/l an. Die größte Reduzierung ergibt sich bei den deckungsgleichen Varianten 2 und 5. Diese Varianten verhindern eine zusätzliche CSB-Belastung des Gewässers, da der Retentionsbodenfilter Lemgo IIb bei diesem Ereignis nicht überläuft. Die anderen Varianten liegen in ihren Ergebnissen dicht beieinander. Sie reduzieren den Scheitel von 85 mg/l im Ist-Zustand auf 40 bis 55 mg/l.

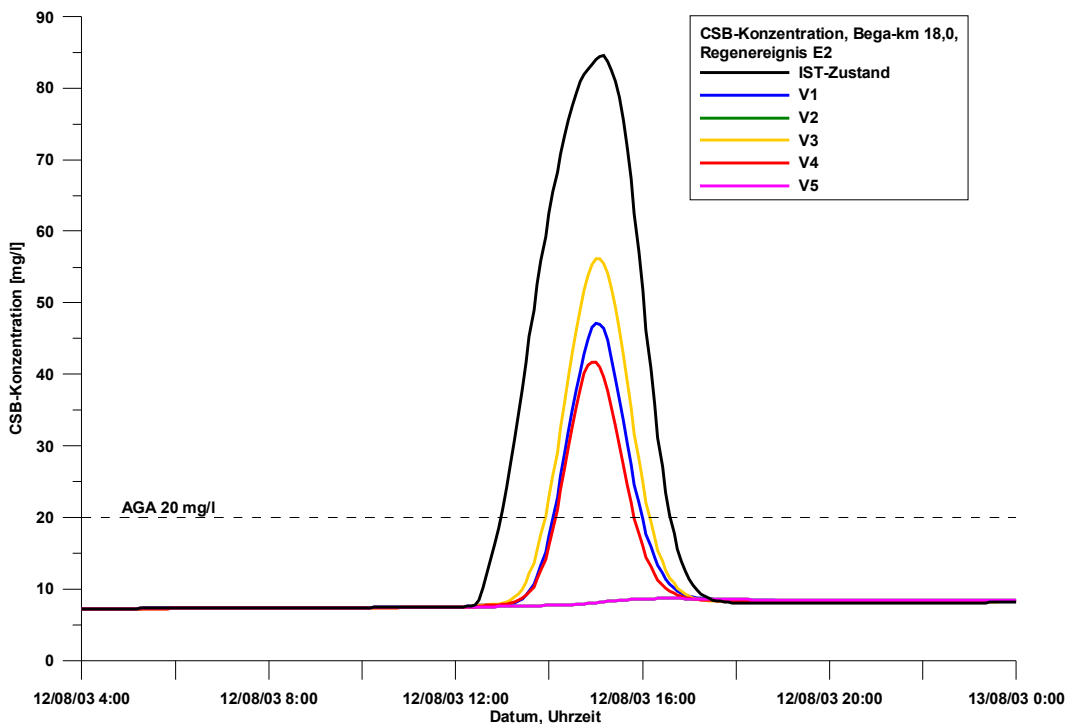


Abbildung 13: CSB E2, Bega-km 18,0

Die Abbildung 14 zeigt die CSB-Konzentrationen der Bega am Kilometer 14,3 ca. 1 km unterhalb der Kläranlage der Stadt Lemgo für das Regenerereignis E2 (30 min). Die Ganglinien zeigen mehrere Minima und Maxima. Der letzte Wellengipfel um ca. 20:00 Uhr wird von den Einleitungen am Start des Modells verursacht. Bei den früheren Wellen handelt es sich um Überlagerungen verschiedener Einleitungswellen. Der Alte Fluss und die Einleitungen B13 und B15 werden von keinem Retentionsbodenfilter der Varianten erfasst. Bei den Varianten 2 und 5 ist die CSB-Konzentration um 14:00 Uhr höher als im Ist-Zustand. Der hydraulische Stoss wird deutlich schneller durch das Gewässersystem transportiert als die Stofffrachten. Dies wird noch durch die Stauhaltungen in Lemgo verstärkt. Da bei den Varianten 2 und 5 ein großer Teil des Wassers im Retentionsbodenfilter Lemgo IIb zurückgehalten wird, trifft die Entlastung B13B unterhalb auf eine geringere Wasserführung im Gewässer als im Ist-Zustand. Durch das schlechtere Mischungsverhältnis ist die CSB-Konzentration höher als im Ist-Zustand. Solche Phänomene sind sehr stark vom zeitlichen Verlauf eines Regenerereignisses und den unterschiedlichen Laufzeiten im Kanalnetz und dem Gewässer abhängig. Wenn auch die Spitzenkonzentrationen nicht bei allen Varianten unter den Werten des Ist-Zustandes liegen, so werden im Gegensatz hierzu durch den Bau von Retentionsbodenfiltern die Frachten deutlich reduziert.

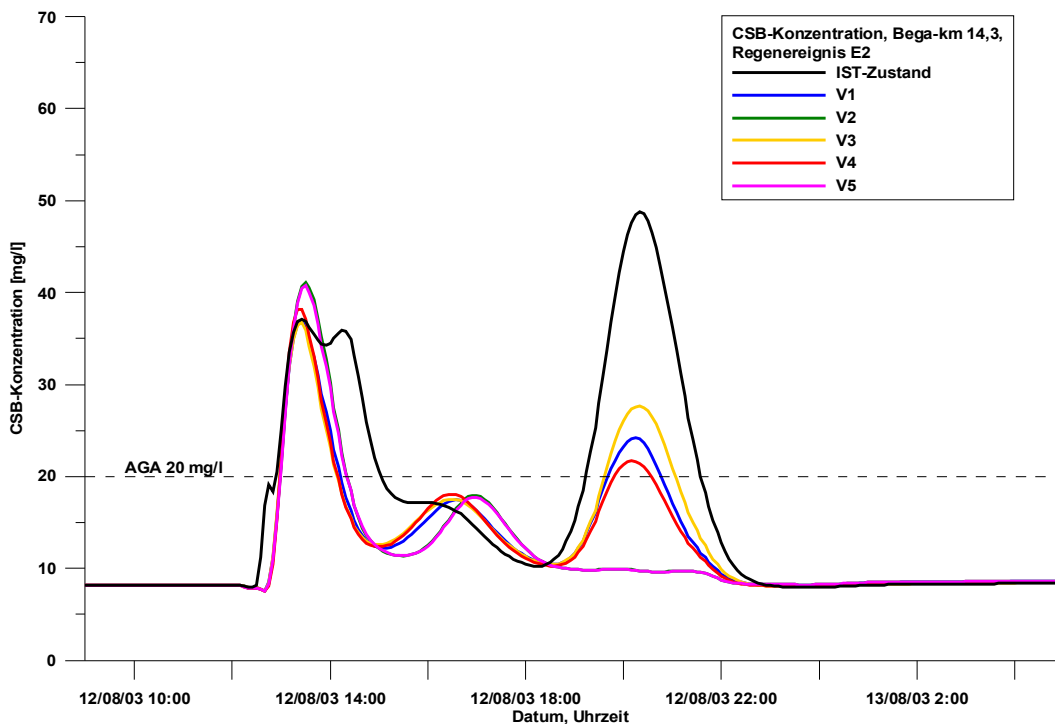


Abbildung 14: CSB E2, Bega-km 14,3

Die Abbildung 15 zeigt die Maximalwerte entlang der Bega für das Ereignis E2 (30 min). Die Einleitungen B13, B15 und der Alter Fluss werden von keinem Retentionsbodenfilter der Varianten erfasst. Daher treten hier jeweils deutliche Belastungsspitzen des CSB im Gewässer auf. Beim Ereignis E2 (30 min) fallen vor allem die Ganglinien der Varianten 2 und 5 auf. Da der Retentionsbodenfilter Lemgo IIb bei diesem Ereignis nicht überläuft, reduziert sich der CSB auf dem Abschnitt zwischen dem Bodenfilter und der Einleitung B13 auf einen Wert um 10 mg/l. An der Einleitungsstelle B13 steigt der CSB schlagartig geringfügig über den Wert des Ist-Zustandes an. Dies wird durch die an dieser Stelle nicht mehr gewährleistete Verdünnung des Einleitungswassers in der Bega verursacht, wie dies bereits weiter oben beschrieben wurde.

Der Einfluss der Retentionsbodenfilter führt auf der gesamten Fließstrecke unterhalb der Kläranlage Lemgo zu reduzierten CSB-Konzentrationen. Ab ca. Bega-km 7 wird bei einigen Varianten der AGA-Richtwert von 20 mg/l erreicht. Im Ist-Zustand wird der AGA-Richtwert bis zur Mündung in die Werre überschritten.

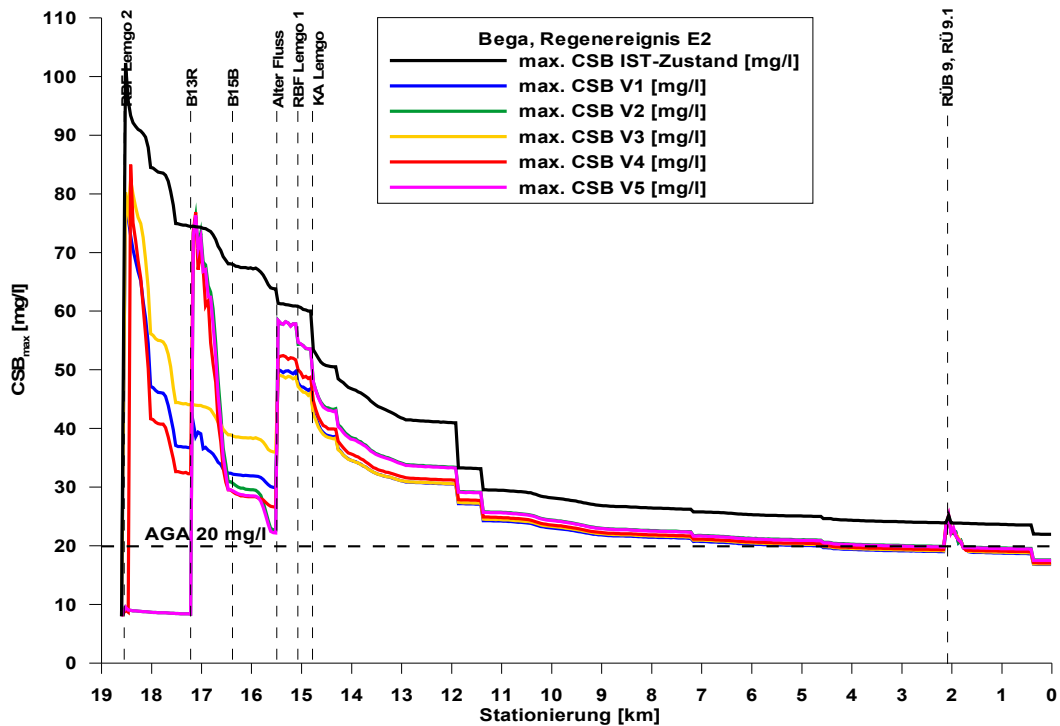


Abbildung 15: CSB E2, Bega, Maximalwerte

Die Abbildung 16 zeigt die Auswertung für die Dauer der Überschreitung des CSB-Richtwerts von 20 mg/l entlang der Bega für das Ereignis E2 (30 min).

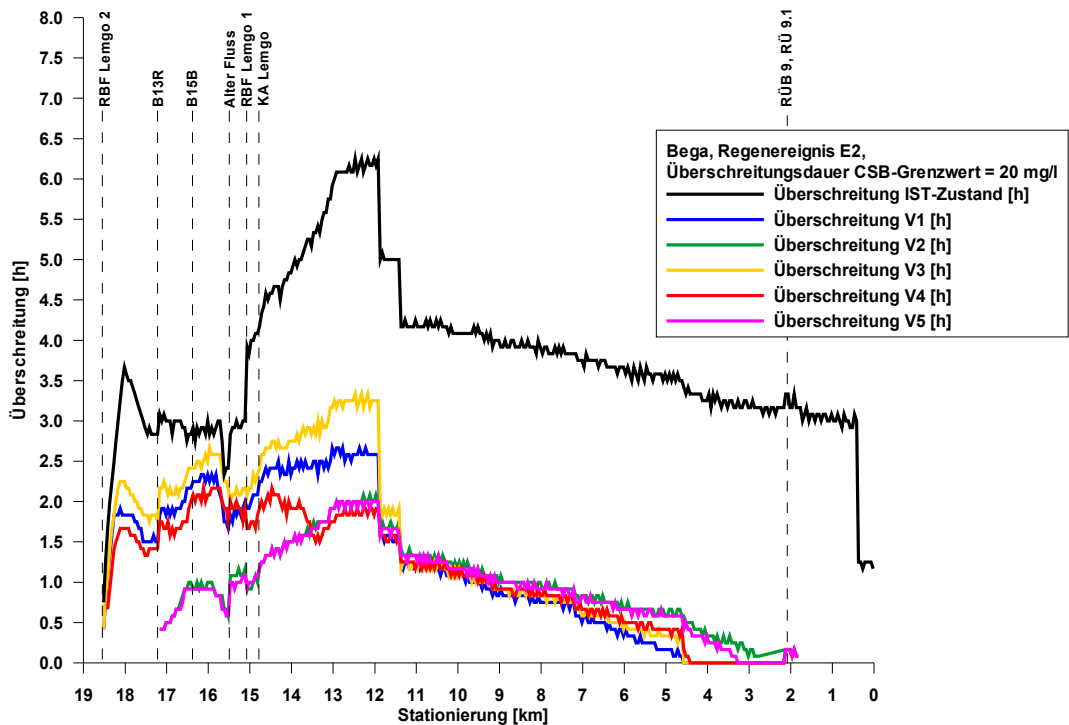


Abbildung 16: CSB E2, Bega, berschreitung Grenzwert 20 mg/l

Beim Regenereignis E2 (30 min) erreichen die Varianten 2 und 5 im Bereich km 18 bis 12 km Reduzierungen der Überschreitungsdauern um mehr als 50 Prozent. Unterhalb von km 12 sind die Reduktionen bei allen Varianten sehr ähnlich und liegen bei ca. 75 %.

Die Simulationsergebnisse für die Parameter BSB₅, Ammonium und Phosphat verhalten sich ähnlich wie für die CSB-Konzentration beschrieben. Der Parameter Nitrat bildet eine Ausnahme. Durch die starke Nitrifizierung der Stickstoffverbindungen in den Retentionsbodenfiltern kommt es zu einem Anstieg der Nitratbelastung in Werre und Bega. Wie groß die Denitrifikationsleistung von Retentionsbodenfiltern ist, kann derzeit nur sehr unsicher angegeben werden. Daher wurde bei den bisher diskutierten Varianten V1 bis V5 kein Nitratabbau durch eine Denitrifikation berücksichtigt. Um die mögliche Auswirkung von Denitrifikationsvorgängen auf die Berechnungsergebnisse darzustellen, wurde bei der Variante 6 pauschal ein Nitratabbau von 20 % angenommen.

Dies führte jedoch nur zu geringfügig niedrigeren Nitratwerten in Werre und Bega. Abbildung 17 zeigt die maximalen Nitratkonzentrationen für das Ereignis E1 (60 min) einschließlich der Variante 6.

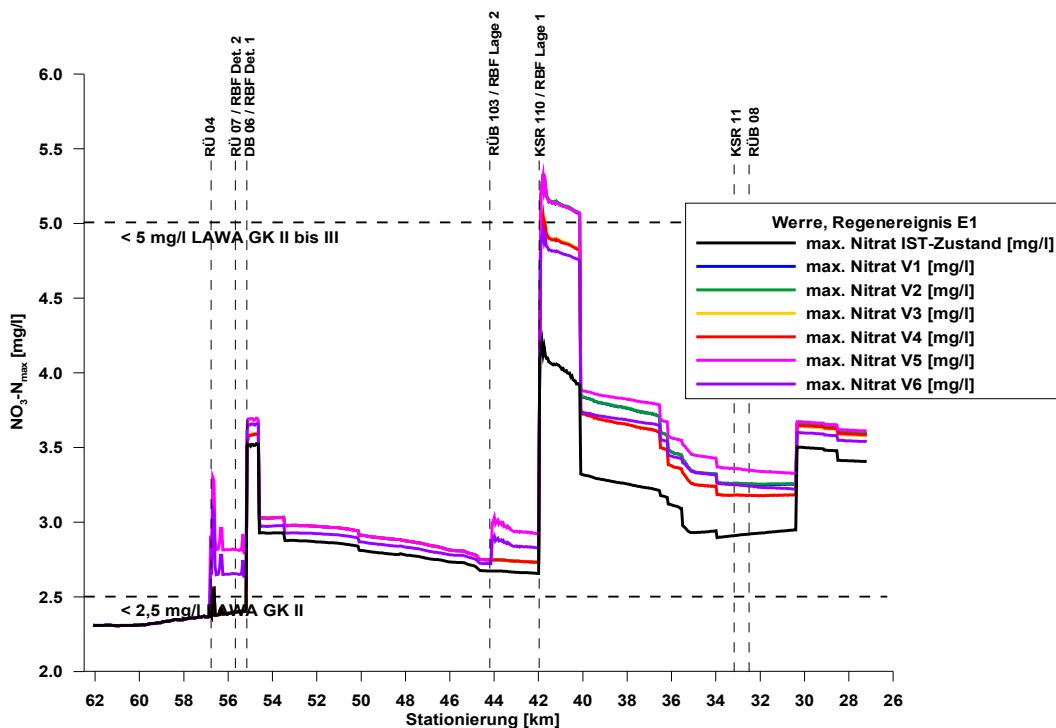


Abbildung 17: Nitrat E1, Werre, Maximalwerte

Die Sauerstoffgehalte werden durch den Bau von Retentionsbodenfiltern bei allen Varianten verbessert. Durch die hohen Fließgeschwindigkeiten und die große Turbulenz

ist der Sauerstoffgehalt in frei fließenden Gewässerabschnitten hoch. In Stauhaltungen kommt es dagegen durch Abbauprozesse und den fehlenden Austausch zu niedrigen Sauerstoffgehalten, die aber auch dort nicht kritisch sind. Der pH-Wert ist insgesamt unkritisch.

1.2.10 Bewertungen und Empfehlung als Ergebnis der Projektphase III

Allgemeine Bewertungen

Die Untersuchungen beziehen sich auf die Betrachtung von Extremsituationen im Gewässer. Rahmenbedingungen für die Berechnungen waren eine absolute Niedrigwassersituation im Hochsommer in Kombination mit einer Belastung mit vergleichsweise seltenen und intensiven Niederschlagsereignissen, wie sie aber gerade im Hochsommer infolge von Gewitterereignissen durchaus vorkommen können. Die betrachteten Belastungssituationen entsprechen somit im Grundsatz "Worst-Case"-Szenarien. Wünschenswert wären Untersuchungen bzw. Berechnungen statistisch auswertbarer Ereignisse, wie es z. B. bei den Schmutzfrachtsimulationen im Kanalnetzbereich üblich ist. Die Betrachtung eines längeren Kontinuums von Regenereignissen oder von Starkregenereignissen ist derzeit aus mehreren Gründen nicht möglich:

- Für die Durchführung der Gütesimulationen sind für jedes Ereignis eine Vielzahl von Ganglinien an den zufließenden Gewässern notwendig. In Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Regenereignisses ist die Wasserführung im zu betrachtenden Gewässer einzustellen, für die Zuflüsse sind jeweils Ganglinien der Wassermenge sowie der einzelnen Gewässergüteparameter zu entwickeln. Diese Eingangsdaten bzw. Ganglinien liegen nicht vor, könnten aber z. B. mithilfe anderer Simulationsmodelle erzeugt werden. Der Aufwand hierfür ist beträchtlich. Wie in den vorherigen Projektphasen gezeigt wurde, reichen einfache Bilanzwerkzeuge wie MOBINEG dafür nicht aus.
- Das ATV-Gütemodell ist in seiner derzeitigen Form nicht für die Simulation sehr langer Zeitreihen ausgelegt. Die für die Gewässergüte maßgeblichen Belastungssituationen entstehen gerade bei kleinen Gewässern aus den kurzzeitig auftretenden Belastungsspitzen z. B. aus dem Kanalnetz. Diese erfordern sehr kurze Berechnungszeitschritte, da sonst die Belastungsspitzen nicht numerisch abgebildet werden können. Hierdurch steigt die Rechenzeit stark an. Auf dem für die vorliegenden Untersuchungen verwendeten PC (1700 Mhz CPU-Takt) dauert ein Simulationslauf für einen Zeitraum von 7 Tagen mit einem Zeitschritt von fünf Minuten ca. 45 Minuten. Wird von einer Verdoppelung der Rechengeschwindigkeit

und einem Simulationszeitraum von wünschenswerten 10 Jahren ausgegangen, würde dies eine Rechenzeit von ca. 8 Tagen pro Simulationslauf bedeuten.

- Die Ergebnisse einer Langzeitsimulation über mehrere Jahre übersteigen in ihrer Masse die Grenze der sinnvollen Verwaltbarkeit. Die von der Gütesimulation mit dem ATV-Modell errechneten Ergebnisse für einen Rechenlauf (7 Tage Simulationszeitraum, Zeitschritt fünf Minuten) erfordern einen Speicherplatz von ca. 1,2 GB. Bei einer Langzeitsimulation über 10 Jahre würde dies einen Bedarf an Speicherplatz von ca. 620 GB pro Simulationslauf bedeuten. Die für die Auswertung notwendige Rechnerkapazität läge im Bereich von Großrechenanlagen. Da das ATV-Gütemodell nur unter DOS bzw. unter Windows95/98 lauffähig ist, besteht zudem eine Begrenzung in der maximalen Dateigröße von 2 GB (DOS/FAT16) oder 4 GB (Windows98/FAT32).

Aus den dargestellten Gründen bleibt derzeit nur die Möglichkeit, einige wenige maßgebliche Szenarien zu untersuchen. Der sinnvollen Auswahl kommt dabei eine besonders hohe Bedeutung zu. Der Bewertungsmaßstab muss an die angewandte Methode angepasst sein. Die Bewertung von Gewässergüteparametern selbst kann unterschiedliche Fragestellungen verfolgen. Dabei ist grundsätzlich nicht wichtig, ob es sich um Messwerte oder durch numerische Simulationen gewonnene Werte handelt. Eine reine Frachtbetrachtung ist für schnell fließende Gewässer wie die Werre und die Bega alleine nicht zielführend. Allerdings ist für das Ende des Fließweges, in diesem Fall die Nordsee, die Frachtbetrachtung dagegen wiederum das wahrscheinlich wichtigste Ergebnis. Die Betrachtung der Spitzenkonzentrationen alleine stellt auch kein umfassendes Mittel zur Bewertung unterschiedlicher Belastungssituationen der Gewässer dar. Die Dauer einer Belastungsspitze ist oftmals entscheidender als die absolute Höhe der Belastung. Es bietet sich daher die Bewertung nach dem Dosis-Wirkungs-Prinzip an. Damit können sowohl Schäden durch langanhaltend geringere Schadstoffkonzentrationen wie auch Schäden durch hohe Spitzenkonzentrationen sinnvoll bewertet werden. Der Fähigkeit vieler Organismen, kurzzeitige Spitzenbelastungen zu überdauern, wird damit Rechnung getragen, ohne grundsätzlich hohe Konzentrationen an Schadstoffen zu verharmlosen. In BWK [4] sind erste Ansätze der Bewertung nach dem Dosis-Wirkungs-Prinzip, bezogen auf die Parameter Ammoniak und Sauerstoff, enthalten. Es wäre wünschenswert, wenn deutlich mehr Richtwerte nach dem Dosis-Wirkungs-Prinzip Eingang in Regelwerke finden würden.

Die Ergebnisse der Berechnungen in diesem Projekt müssen vor dem Hintergrund der o. a. Einschränkungen betrachtet werden. Sie zeigen die Wirksamkeit der untersuchten Retentionsbodenfilter im Untersuchungsgebiet auf die Gewässergüte. Sie zeigen aber auch, dass bei einer reinen Betrachtung von Spitzenbelastungen im Gewässer eine einzige Entlastung lokal zu einer hohen, kurzzeitigen Grenzwertüberschreitung führen

kann. In Detmold ist dies an den Entlastungen RÜ 04 und RÜ 07, in Lage am RÜB 103 und in Lemgo am Alten Fluss und an anderen Stellen in den Simulationsergebnissen deutlich zu erkennen. Wenn das Ziel die vollständige Verhinderung auch von lokalen, kurzzeitigen Belastungsspitzen wäre, so müsste nahezu jede Mischwassereinleitungsstelle mit einer weitergehenden Behandlungsanlage ausgestattet werden. Dies widerspricht den neueren Verfahren zur Bewertung von Mischwassereinleitungen auf der Basis z. B. der immissionsorientierten Vorgehensweise beim BWK M3 [2]. Danach wird gerade die Betrachtung zusammenhängender Gewässer in sogenannten „geschlossenen Siedlungsgebieten“ vorgeschrieben. Es wird die Belastung von Gewässerabschnitten untersucht, nicht primär von einzelnen Punkten im Gewässer. Natürlich müssen auch an den konkreten Einleitungsstellen Mindestvoraussetzungen erfüllt werden. Es darf z. B. nicht zu einer massiven Sohlerosion an einer Einleitungsstelle kommen. Ziel ist allerdings die Bewirtschaftung von zusammenhängenden Gewässern bzw. Gewässerabschnitten. Maßnahmen sollen dort durchgeführt werden, wo sie sowohl aus fachlicher wie auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll sind. Sind von solchen Maßnahmen mehrere unterschiedliche Träger betroffen, ist ein Interessenausgleich notwendig, da Kosten und Nutzen der Maßnahmen durchaus nicht bei denselben Trägern anfallen müssen. Im konkret vorliegenden Fall verursachen die Mischwassereinleitungen der Stadt Detmold unter anderem deshalb eine größere Störung in der Werre, weil die Werre dort in ihrem Oberlauf eine sehr geringe Wasserführung hat. Die gleiche Einleitung in Bad Salzuflen würde einen wesentlich geringeren Schaden verursachen.

Wichtig bei der Bewertung der Ergebnisse ist, dass lediglich seltene Regenereignisse ($n = 1$) untersucht wurden. Hierbei laufen einige der Retentionsbodenfilter über. Die größte Wirkung entfalten Retentionsbodenfilter, wenn sie nicht überlaufen, was bei den überwiegenden Niederschlagsereignissen innerhalb eines Jahres der Fall ist. Abbildung 18 zeigt ein Ergebnis für den Parameter Ammonium aus der Projektphase II, bei dem der Retentionsbodenfilter Detmold I gerade voll ausgelastet ist.

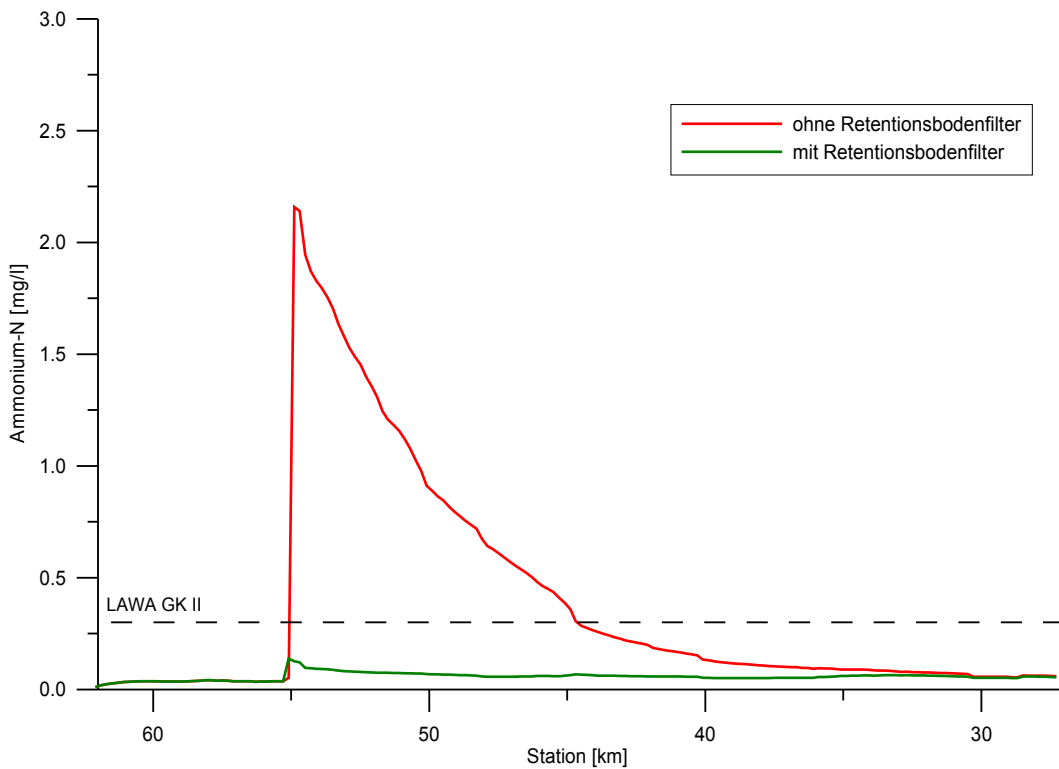


Abbildung 18: Ergebnisse der Varianten 1a und 1b, Projektphase II, Maximalwerte Ammonium, aus [6]

Ziel der Untersuchung war nicht die konkrete Dimensionierung von einzelnen Anlagen. Sie soll vielmehr das Wirkungsgefüge unterschiedlicher Maßnahmen in ihrem komplexen Zusammenspiel zeigen und Lösungsansätze zur Verbesserung der Gewässergüte der Werre und der Bega liefern. Die konkrete Dimensionierung von z. B. Retentionsbodenfiltern kann im Nachgang auf der Grundlage der hier erarbeiteten Ergebnisse durchgeführt werden.

Es wurden Empfehlungen für die einzelnen Städte erarbeitet. Der Bau von Retentionsbodenfiltern ist sicherlich ein wirksames Mittel zur Reduktion von schädlichen Mischwassereinleitungen, oft fehlt aber der Platz zum Bau der Anlagen oder der Bau ist aus wirtschaftlichen Erwägungen nicht sinnvoll. Bei allen Städten stellt sich daher die Frage, ob nicht auf der Kanalnetzseite Möglichkeiten der besseren Auslastung der Netzkapazitäten bestehen. Es ist zu prüfen, ob auch durch eine verstärkte Weiterleitung von Mischwasser zur Kläranlage oder die Aktivierung bisher ungenutzten Stauraumes, z. B. durch eine Abflusssteuerung, vergleichbare oder auch zusätzliche Verbesserungen für die Gewässer erreicht werden können.

1.2.11 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Erfahrungen in den Projektbearbeitungsstufen I bis III haben gezeigt, dass die Gewässergütesimulation ein sehr mächtiges und wertvolles Werkzeug zur Analyse komplexer wasserwirtschaftlicher Fragestellungen im Hinblick auf die Bewertung der Gewässergüte ist.

Im Zusammenspiel mit verschiedenen numerischen Modellen konnte dargestellt werden, in welchem Umfang die infolge eines Regenereignisses auftretenden Mischwassereinleitungen in ihrer Überlagerung und ihrer gegenseitigen Beeinflussung auf die Gewässergüte der oberen Werre und der Bega einwirken. Die Belastungsschwerpunkte konnten identifiziert und Lösungsansätze zur Verbesserung der Gewässergüte erarbeitet werden. Die vorliegende Untersuchung stellt damit eine Arbeitsgrundlage für die konkrete Umsetzung einzelner Maßnahmen im Untersuchungsgebiet dar. Aufgrund der dargestellten Ergebnisse können sinnvolle Maßnahmenkombinationen im Einzugsgebiet der Werre und der Bega ermittelt und umgesetzt werden. Durch die sehr sorgfältige Grundlagenerhebung wurden weiterhin Defizite im Bereich der vorhandenen Grundlagendaten und der vorhandenen Modelldatensätze aufgezeigt.

Die wünschenswerte Durchführung von Langzeit- oder Starkregensimulationen für z. B. einen Zeitraum von 10 Jahren ist mit der derzeit vorhandenen Hard- und Software noch nicht durchführbar (s.o.). Das ATV-Gütemodell wird zurzeit überarbeitet, so dass eventuell in naher Zukunft entsprechende Gewässergütesimulationen mit modernen Betriebssystemen möglich sein werden. Damit wird eine der Beschränkungen, die Begrenzung der Größe der Ergebnisdatei auf 2 bis 4 GB, in Zukunft keine Rolle mehr spielen. Auch die Rechengeschwindigkeit moderner PCs steigt ständig weiter an, so dass in absehbarer Zeit durchaus Langzeitsimulationen mit vertretbarem Zeitaufwand möglich sein werden. Das Problem der Generierung der erforderlichen Eingangsdaten für entsprechende Simulationszeiträume bleibt weiterhin bestehen. Die Verwendung von Einzugsgebietsmodellen für den Niederschlag und den Stofftransport könnte ein sehr gutes Hilfsmittel darstellen, um für die Einleitung von Nebengewässer in das mit einem detaillierten Gütemodell zu simulierende Hauptgewässer die erforderlichen Ganglinien zu gewinnen. Der Zusatznutzen bei der Aufstellung und Verknüpfung solcher Modelle sollte nicht unterschätzt werden. Durch das Zusammentragen und Verknüpfen der Eingangsdaten aus den verschiedenen Quellen und dem Dialog der unterschiedlichen Fachgebiete entsteht ein sehr tiefgehendes Verständnis der Zusammenhänge im gesamten Einzugsgebiet einschließlich der Gewässergüte. Der Einsatz solcher gekoppelten Simulationswerkzeuge erfordert aber eine möglichst standardisierte Vorhaltung der notwendigen Daten in Datenbanken. Erst damit können die Einzugsgebietsmodelle schnell und effektiv aufgebaut werden.

Die im Rahmen der Forschungsprojekte aufgestellten Modelle sollten in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden. Dann kann auch bei zukünftigen Fragestellungen das aufgebaute Instrumentarium mit geringerem Aufwand zur Beantwortung der Fragestellungen eingesetzt werden. Wenn das Modell nicht regelmäßig den aktuellen Gegebenheiten angepasst wird, wird die investierte Arbeit nach einigen Jahren keinen aktuellen Nutzen mehr erbringen können. Es stellt sich daher die Frage, wie die dauerhafte Nutzbarkeit und die Aktualität der Datensätze sichergestellt und organisiert werden können. Ein weiteres Thema ist dabei das zukünftige Vorgehen bei der Durchführung von Güteüberwachungsmessungen. Wünschenswert wäre es, wenn diese Messungen in der Zukunft unter Berücksichtigung der Vorgehensweise, die in der Projektphase II erarbeitet und vorgeschlagen wurde, durchgeführt würden. Dann könnten die so gewonnen Messwerte direkt für numerische Gütesimulationen verwendet werden. Dies würde lediglich eine andere Organisation der Messungen erfordern, ohne dass höhere Kosten entstehen; der Nutzen der gewonnen Daten würde sich dagegen vervielfachen.

Bei vielen Kanalnetzen ist die Ausnutzung des bestehenden Netzvolumens nicht optimal. Oft kann durch bauliche Eingriffe oder den Einsatz von Abflusssteuerungen die Nutzung des vorhandenen Kanalnetzvolumens verbessert werden. Auch bei den Städten im Untersuchungsgebiet stellt sich diese Frage. Es kann durchaus möglich sein, dass es gelingt, durch eine optimierte Steuerung den Bau von Rückhaltevolumen einzusparen oder ein wegen der örtlichen Verhältnisse z.B. nicht zur Verfügung stehendes Retentionsbodenfiltervolumen durch die Aktivierung eines entsprechenden Kanalnetzvolumens zu ersetzen. Einen ersten Hinweis darauf, ob grundsätzlich der Einsatz einer Kanalnetzsteuerung für ein Entwässerungssystem sinnvoll sein kann, lässt sich durch die Anwendung der „Planungshilfe Abflusssteuerung in Kanalnetzen“ der ATV-DVWK [1] gewinnen. Eine überschlägliche Auswertung z. B. für das Kanalnetz der Stadt Lemgo hat gezeigt, dass es sinnvoll ist, weitergehende Untersuchungen im Hinblick auf die Anwendung der Kanalnetzsteuerung durchzuführen. Diese ersten Auswertungen lassen vermuten, dass ein nicht unerhebliches Potential zur Anwendung der Abflusssteuerung für dieses Kanalnetz vorhanden ist. Im Zusammenhang mit der Untersuchung zum Einsatz einer Abflusssteuerung kann durch die Anwendung des ATV-Gewässergütemodells darüber hinaus die Effektivität von Kanalnetzsteuerungsmaßnahmen auf die Gewässergüte von Werre und Bega nachgewiesen werden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass das ATV-Gewässergütemodell hervorragend geeignet ist, die Auswirkungen möglicher Maßnahmen auf die Gewässergüte nachzuweisen, wie dies beim Vollzug sowie der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) erforderlich ist.

2 Zielstellung der Projektphase IV

Im Zusammenhang mit der Diskussion der Bearbeitungsergebnisse der Projektphase III unter Beteiligung der Projektpartner StAfUA-OWL (heute Bezirksregierung Detmold), der Bezirksregierung Detmold sowie der Fachhochschule mit den beteiligten Städten ergab sich die Fragestellung, in welchem Umfang und mit welchen Auswirkungen sich die Gewässergüte durch den Einsatz einer Kanalnetzsteuerung im Vergleich oder in Kombination mit anderen Maßnahmen verbessern lässt.

Einen ersten Hinweis darauf, ob aufgrund der örtlichen Verhältnisse eine Kanalnetzsteuerung für ein Entwässerungssystem sinnvoll sein könnte, ließ sich durch die Anwendung der „Planungshilfe Abflusssteuerung in Kanalnetzen“ der DWA gewinnen. Es zeigte sich, dass es sinnvoll war, weitergehende Untersuchungen im Hinblick auf die Steuerungswürdigkeit dieses Netzes vorzunehmen, da erste Auswertungen vermuten liessen, dass ein nicht unerhebliches Potential zur Anwendung der Abflusssteuerung für dieses Kanalnetz vorhanden ist (siehe Kapitel 1.2.11).

Als Erweiterung oder Fortführung der bisherigen Projekte sowie unter Nutzung der in der Projektphase III erstellten Datensätze des Gewässergütemodells für die Bega sollte im Rahmen des Projektes untersucht werden, in welchem Umfang durch eine Kanalnetzsteuerung vorhandene Retentionsvolumina aktiviert werden können, um die Gewässerbelastung zu reduzieren und damit die Gewässergüte der Bega zu verbessern. Die Untersuchungen zur Kanalnetzsteuerung sollten sich dabei weitgehend an dem Merkblatt DWA-M 180 „Handlungsempfehlungen zur Planung der Abflusssteuerung in Kanalnetzen“ orientieren. Der Nachweis der Gewässergüteverbesserung infolge von Maßnahmen zur Kanalnetzsteuerung sollte (wie in der Projektphase III für Retentionsbodenfilter) durch die Anwendung des DWA-Gewässergütemodells vorgenommen werden.

3 Aufstellen des Kanalnetzmodells

3.1 Allgemeine Projektgrundlagen

Primäres Ziel der Datenübernahme war es, für alle Bauwerke und Kanäle der öffentlichen Ortsentwässerung vollständige, aktuelle und fehlerfreie Datensätze für die hydrodynamische Berechnung mit dem Programmpaket HYSTEM-EXTRAN zu erhalten.

Darüber hinaus sollten zusätzlich vorliegende Daten, die für eine Kanalnetzberechnung nicht zwingend erforderlich sind, ebenfalls in das System HYSTEM-EXTRAN/GIPS übernommen werden, um die graphische Darstellung zu ermöglichen oder zu verbessern oder auch mit dem Ziel, alle verfügbaren Informationen zu bündeln.

3.2 Kanalnetzdaten

3.2.1 Schachtdaten

Die Schachtdaten wurden aus der Kanalnetzdatenbank der Stadt Lemgo übernommen. Grundsätzlich enthält die Datenbank für jeden Schacht die Höhen für die Sohle, den Deckel und (in der Regel identisch mit dem Deckel) das Gelände. Das von der Stadt verwendete Datenbanksystem berücksichtigt in seiner Datenstruktur einige Sonderfälle des Netzes nicht. Aufgrund von Sanierungsmaßnahmen kann es z. B. innerhalb einer Haltung zu einem Wechsel des Materials und auch des Durchmessers kommen. Die Datenbank kennt aber keine Teilbereiche von Haltungen, sondern nur komplette Haltungen. Um das Kanalnetz dennoch korrekt abzubilden, wird in solchen Fällen die Haltung in zwei neue Haltungen mit einem fiktiven Schacht aufgeteilt. Für diesen fiktiven Schacht liegt dann keine reale Deckelhöhe vor. Dort wurden von der Stadt fiktive Höhen (häufig 1 m über der Rohroberkante) angesetzt. Ein anderer Spezialfall liegt vor, wenn sich mehrere parallele Haltungen dieselben Schächte teilen. Dies kommt in Lemgo mehrfach vor. In diesem Fall wurden die Schächte für die Datenbank verdoppelt und dann jeweils einer Haltung zugeordnet. Für diese Schächte liegen aber dennoch korrekte Höhen aus der Vermessung vor. Das Datenbanksystem kennt keine Haltungen ohne Schächte. Im Netz gibt es aber durchaus Haltungen, die nur an einem Ende einen Schacht besitzen. Dies ist z. B. häufig an den Einmündungen in Gewässer der Fall. Dort wurde von der Stadt in der Regel ein fiktiver Schacht mit einer fiktiven Deckelhöhe (häufig Rohroberkante + 1 m) eingesetzt.

Bei der Kontrolle der Deckelhöhen traten an einigen Stellen Unstimmigkeiten auf. Die Kontrolle wurde in der Regel über eine Darstellung der Haltungen im Längsschnitt durchgeführt. Hierbei und bei einem Vergleich der Höhen des Laserscan-DGM¹ im 1 m-Raster stellte sich heraus, dass vor allem bei den fiktiven Schächten Probleme auftraten. Dies ist auch nachvollziehbar, da hier in der Regel den Höhenangaben keine Vermessungsdaten zugrunde lagen.

In der Datenbank der Stadt tragen alle Schächte ein Kürzel für die Schachtart. Dort gibt es auch Attribute für fiktive Schächte. Es wurde daher beschlossen, die Deckelhöhen für einige Gruppen der fiktiven Schächte aus dem Laserscan-DGM zu bestimmen. Z. B. für fiktive Endschächte an Gewässereinläufen wurde die fiktive Deckelhöhe aus der Datenbank übernommen. Diese Schätzung ist dort oft besser als die Höhe aus dem DGM, die sich bei einem Einlauf ja auf die Gewässersohle beziehen kann. Damit würde dort der Schachtdeckel unter Umständen unter der Rohroberkante liegen. Für fiktive

¹ Ein auf der Basis einer flugzeuggestützten Abtastung der Erdoberfläche mit einem Laserstrahl erstelltes digitales Geländemodell.

Schächte an Querschnittswechseln in den Haltungen wurden dagegen die Höhen aus dem Laserscan-DGM übernommen.

3.2.2 Haltungsdaten

Die Haltungsdaten wurden ebenfalls aus der Kanaldatenbank der Stadt Lemgo übernommen. Dort sind für jede Haltung die Sohlhöhen am Beginn und am Ende der Haltung und die Koordinaten der Haltungsenden eingetragen. Die Haltungen besitzen in der Datenbank keine eigene Bezeichnung, sondern werden nur durch die Kombination aus oberem und unterem Schacht definiert. Da für das Programm Hystem-Extran eindeutige Haltungsnamen erforderlich sind, wurde jeder Haltung ein eindeutiger Haltungsname zugeordnet. Dabei wurde in der Regel die Bezeichnung des oberen Schachts in den Namen einbezogen.

Neben den Daten für die Haltungslänge und die begrenzenden Schächte liegen in der Datenbank auch Angaben zum Querschnitt der Haltungen vor. Der weitaus größte Teil des Netzes besteht aus Kreisquerschnitten. Es kommen aber auch Kastenprofile und Eiprofile vor. Jeder Haltung wurde die entsprechende Querschnittsform in Hystem-Extran zugewiesen.

3.2.3 Sonderbauwerke

Für die Abbildung der Sonderbauwerke in Hystem-Extran wurden unterschiedliche Unterlagen verwendet. Die erste Quelle ist eine Bauwerksdatenbank der Stadt Lemgo. In dieser Microsoft-Access-Datenbank sind für alle Sonderbauwerke Informationen wie die technische Ausrüstung, die Pump- und Drosselleistung oder bei Wehren die Wehrschwelle vorhanden. Sie enthält aber nur textliche Beschreibungen. In einigen Fällen fehlen in der Bauwerksdatenbank notwendige Werte. Die zweite Quelle waren vorhandene Bauwerkszeichnungen und Fotos. Diese wurden von der Stadt zur Verfügung gestellt. Die dritte Quelle ist das Bauwerksbuch aus der Fortschreibung des Generalentwässerungsplans (GEP) von 1997. Diese Daten wurden nur in Ausnahmefällen verwendet.

Parallel zum Modellaufbau wurden von der Stadt Lemgo einige Bauwerke nachvermessen. Diese Daten wurden ebenfalls einbezogen.

Die meisten Mischwasserentlastungen im Stadtgebiet sind mit Rechen für den Mischwasserüberlauf ausgestattet. Dabei handelt es sich in der Regel um Rechen mit waagerechten Lamellen. Die Bauwerke besitzen zwar eine definierte Überlaufschwelle (in der Regel eine Blechkante hinter dem Rechen), aber die genaue Bemessung der Höhe des Druckverlustes durch den Widerstand bei der Durchströmung der Rechen war

nicht bekannt. Aus diesem Grund wurde für die Überfälle mit einem Poleni-Beiwert von 0,5 ein eher geringer Überfalleiwert angesetzt.

3.2.4 Schmutzwassernetz

Das Schmutzwassernetz war nicht direkt Gegenstand der Betrachtung. Für die Simulation der Schmutzfrachten sollte die Fracht aus den in das Mischwassernetz entwässernden Schmutzwassernetzen dennoch berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde das Schmutzwassernetz über fiktive Haltungen abgebildet, die jeweils ein größeres Einzugsgebiet mit Trennentwässerung repräsentieren. Die zugehörigen Daten konnten aus der parallel zum Projekt durchgeführten Erarbeitung des Generalentwässerungsplans entnommen werden. Gleiches gilt auch für die Bereiche mit einer Druckentwässerung.

3.2.5 Regenwassernetz

Das Regenwassernetz wurde nur insoweit betrachtet, wie es in Verbindung zum Mischwassernetz von Bedeutung ist. Es bestehen in Lemgo Regenetze, die in das Mischwassersystem einmünden und an einigen Stellen sind Abschlüge aus dem Mischwassernetz in das Regenetz vorhanden. Die davon betroffenen Teile des Regenetzes wurden analog zum Mischwassernetz mit in das Modell aufgenommen.

3.3 Einzugsgebietsdaten

3.3.1 Luftbildbefliegung

Im Auftrag der Stadt Lemgo wurde im Frühjahr 2009 für den GEP eine Luftbildbefliegung für das gesamte Stadtgebiet durchgeführt. Ziel der Befliegung war die Ermittlung der versiegelten Flächen. Diese Daten dienen als Grundlage der numerischen Kanalnetzsimulation. Sie sollen in einem späteren Schritt auch bei der Überprüfung der Flächen für die Regenwassergebühr Verwendung finden.

Die Ermittlung der versiegelten Flächen anhand der Luftbilder erfolgte durch eine darauf spezialisierte Firma¹ auf der Basis einer Stereophotoauswertung.

Ableich digitalisierter Flächen vor Ort

Zur Überprüfung der Güte der von der Auswertungsfirma gelieferten Daten wurde im Rahmen des GEP eine Testzone (Wohngebiet am Biesterberg) festgelegt, in der eine

¹ Phoenics Dienstleistungsgesellschaft für digitale Photogrammetrie und GIS mbH, Gartenstraße 12, 30926 Seelze

detaillierte Gegenkontrolle der Auswertungsergebnisse erfolgt. Das Testgebiet und die ermittelten Fehlflächen sind in Abbildung 19 dargestellt.

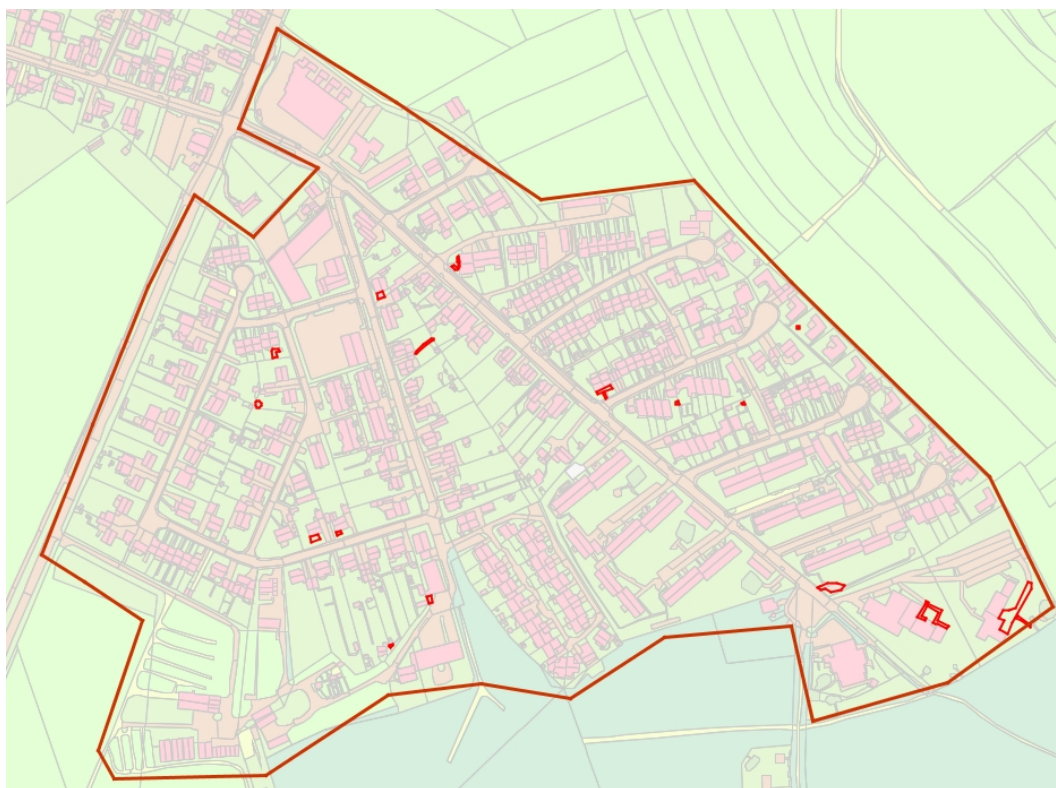


Abbildung 19: Kontrollfläche für die Luftbildbefliegung

Die fehlerhafte Auswertung im Osten der Kontrollfläche im Bereich der beiden Hochhäuser ist wahrscheinlich auf den Aufnahmewinkel bei der Befliegung zurückzuführen. Durch die große Höhe der Gebäude werden bei einer Schrägaufnahme (bzw. mit zunehmendem Abstand vom Bildzentrum bei einer Senkrechtaufnahme) Teile der Flächen durch das Gebäude verdeckt. Dies scheint bei den Hochhäusern der Fall gewesen zu sein. Bei den anderen Flächen handelt es sich zum Teil um schlecht einsehbare Flächen, bei denen die Beurteilung anhand der Luftbilder nicht eindeutig ist. Bei einem kleinen Teil der Flächen liegt eine eindeutige Fehlbeurteilung vor.

Insgesamt wurde eine Kontrollfläche von 26 ha untersucht. Der Anteil an fehlerhaften Flächen (nicht als versiegelt angesetzt) lag dabei mit ca. 700 m² bei ca. 0,3 % der Fläche. Die Hälfte dieser Flächen betrifft die bereits angesprochenen Bereiche neben den beiden Hochhäusern. Insgesamt wurde bei der Auswertung der Befliegung eine hohe Qualität erreicht. Es liegen damit sehr umfassende Informationen zu den versiegelten Flächen vor. Der Anteil der tatsächlich an das Kanalnetz angeschlossenen Flächen ist durch eine Luftbildbefliegung nicht ermittelbar. Daher war dieser Anteil einer der Kalibrierparameter bei den Modellrechnungen. Parallel zur Bearbeitung des Forschungsprojekts hat die Stadt Lemgo eine Bürgerbefragung zu den versiegelten

Flächen gestartet. Auf diesem Weg wird die Datenbasis in Zukunft noch weiter verbessert.

Für die Modellierung wurden die vom Beflieger ermittelten Flächen mit dem in Tabelle 5 angegebenen Prozentsatz als an das Kanalnetz angeschlossen angesetzt, da die Erhebung bei den Bürgern noch nicht abgeschlossen war.

Flächenart	Anschlussgrad
Dach	100%
versiegelt Flächen	85%
Teilversiegelt	50%

Tabelle 5: Anschlussgrad versiegelter Flächen

3.3.2 Einzugsgebiete der Haltungen

Bei der Kanalnetzberechnung müssen den Kanalhaltungen Einzugsgebiete zugewiesen werden. Die korrekte Zuweisung stellt dabei eine große Herausforderung dar. Für die Stadt Lemgo wurden als generelle Einzugsgebietseinheit jeweils die Flurstücke verwendet. Das heißt, das nach Möglichkeit jedes Flurstück als Ganzes dem Einzugsgebiet einer Kanalhaltung zugeordnet wurde. In der Regel liefert dieses Vorgehen für den weitaus überwiegenden Teil der Flächen gute Ergebnisse.

Bei sehr großen Flurstücken liegen dagegen oft mehrere Einleitungsstellen in das öffentliche Kanalnetz vor. Dies betrifft z. B. das Krankenhaus von Lemgo. Der gesamte Gebäudekomplex befindet sich auf einem zusammenhängenden Flurstück. Da für diese Fläche ein Plan über das Entwässerungssystem auf dem Gelände vorlag, wurden die durch die Luftbilddauswertung gebildeten Teilflächen den jeweiligen Zuleitungspunkten des öffentlichen Kanalnetzes zugeordnet. Das Entwässerungsnetz auf dem Grundstück wurde dabei vereinfacht über einige fiktive Haltungen abgebildet.

Verkehrsflächen lassen sich in der Regel nicht über die Flurstücke dem Kanalnetz zuordnen. Die betreffenden Flurstücke sind häufig sehr lang. Die Entwässerung erfolgt in der Regel abschnittsweise, da in vielen Verkehrsflächen Kanalhaltungen liegen. Durch die Auswertungsfirma für die Luftbilder wurden die Verkehrsflächen daher in Abschnitte mit einer Länge von ca. 50 m unterteilt. Diese Flächen wurden dann unabhängig von der Zugehörigkeit zu einem Flurstück den betreffenden Kanalhaltungen zugewiesen.

Die Zuweisung der Flächen erfolgte in einem ersten Schritt über einen automatischen Algorithmus. Dieser berücksichtigt die folgenden Kriterien für die Zuweisung:

1. Lage der Haltung ganz oder teilweise im betrachteten Flurstück
2. Entfernung des Flächenschwerpunkts vom Schwerpunkt der Haltung
3. Abstand des Flächenrandes zur Haltung
4. Abstand des Lotes von der Haltung auf den Flächenschwerpunkt
5. Anzahl der Flächen zwischen der Haltung und dem Flächenschwerpunkt

Der Algorithmus liefert für den weitaus überwiegenden Teil der Flächen plausible Zuordnungen. Die Ergebnisse wurden von Hand überprüft und wo notwendig korrigiert.

Das Ergebnis Flächenauswertung nach der Befliegung sind Teilflächen unterschiedlicher Versiegelungsgrade, die durch die Grenzen der Flurstücke beschnitten sind. Damit liegt jede Teilfläche immer vollständig in einem Flurstück. Durch die Zuordnung der Flurstücke zu den Haltungen wurden die Teilflächen innerhalb jedes Flurstücks der entsprechenden Haltung zugeordnet. Lediglich bei den Straßen wurden die Teilflächen direkt den Haltungen zugewiesen. Abbildung 20 stellt das Ergebnis der Zuweisung für einen Ausschnitt dar. Die grünen Linien zeigen die Zuordnung des jeweiligen Flurstücks zur entsprechenden Haltung (orange).

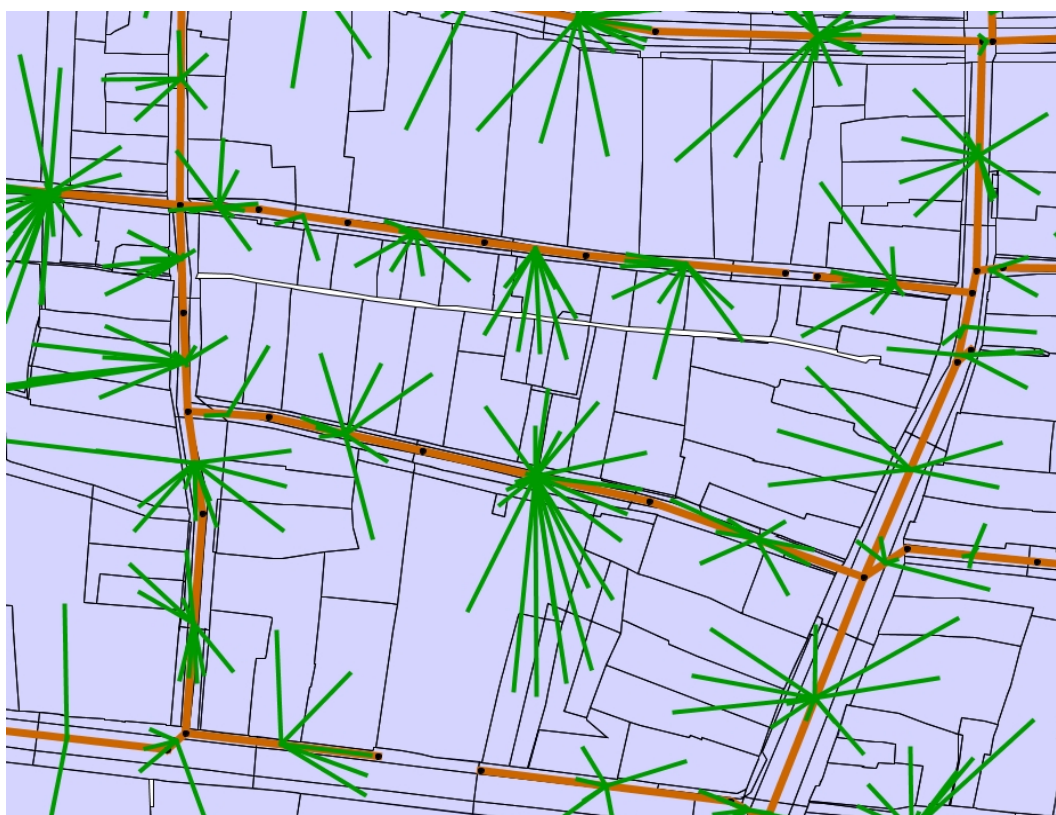


Abbildung 20: Zuweisung von Flurstücken an Kanalhaltungen (grün: Verbindung zwischen dem Schwerpunkt des Flurstücks mit dem Mittelpunkt der zugehörigen Haltung)

Bei Außengebieten wurde ein anderes Vorgehen gewählt. Hier konnte als Bezugsfläche nicht auf die Flurstücke zurückgegriffen werden, da die Einzugsgebietsgrenzen stark von den Flurstücksgrenzen abweichen. In den Außengebieten kommen häufig sehr große oder auch sehr lange und schmale Flurstücke vor. Aus diesem Grund wurden die Flächen aus der Luftbildbefliegung mit den Grenzen der Einzugsgebiete der Außengebiete in einem Geoinformationssystem (GIS) verschnitten. Die so entstandenen Flächen wurden dann der Einleitungshaltung des betroffenen Einzugsgebiets zugewiesen. Die Einzugsgebiete wurden alleine anhand der Höhenlinien des Geländereiefs festgelegt. Daher kam es in der Nähe der bebauten Ortslagen zum Teil zu Überschneidungen mit den schon dem Kanalnetz zugewiesenen Flächen. Die betroffenen Flächen wurden vor der Zuweisung über die Einzugsgebiete in diesem Datensatz gelöscht, da sie ansonsten doppelt berücksichtigt worden wären.

Zuordnung der Neigungsklassen

Für die Zuordnung der Neigungsklassen wurde eine Auswertung des digitalen Geländemodells im 10m-Raster des Landesvermessungsamtes durchgeführt. Über das Programm Surfer wurde die Neigung im Mittelpunkt jeder Rasterzelle ermittelt. Die sich ergebende Neigung wurde in die 5 Neigungsklassen für Hystem überführt. Über eine GIS-Abfrage wurden alle Neigungspunkte im Einzugsgebiet jeder Haltung ermittelt. Es wurde jeweils der Mittelwert der Neigungsklassen berechnet und die entsprechende Klasse der Haltung zugewiesen. Auf diese Weise wurden ca. 5000 Haltungen die entsprechenden Neigungsklassen zugeordnet. Bei ca. 200 Haltungen führte dieses Verfahren nicht zum Ziel. Ursache dafür sind die diesen Haltungen zugeordneten sehr kleinen Einzugsgebiete. Wie beschrieben, basiert das Zuweisungsverfahren auf den Punktdaten des DGM10. Bei den fraglichen Haltungen sind die Einzugsgebiete aber so klein, dass kein Punkt des DGM10 innerhalb der Einzugsgebietsfläche liegt. Damit schlug hier die Zuweisung fehl. Da es sich um sehr kleine Einzugsgebiete und nur sehr wenige Haltungen handelt, wurde diesen Haltungen die Neigungsklasse 2 zugewiesen.

3.4 Zuordnung Regenschreiber

Im Stadtgebiet von Lemgo betreibt die Stadt die folgenden fünf Regenschreiber:

1. Kläranlage
2. Luherheide
3. Pagenhelle (mittelfristig als Ersatz für Geschwister-Scholl-Straße)
4. Geschwister-Scholl-Straße
5. Wahmbeck

Im Rahmen einer Messkampagne für den GEP wurde noch ein zusätzlicher Regenschreiber (Bezeichnung RM01-Nivus) für einige Monate betrieben.

Die Zuordnung der vorhandenen Regenschreiber erfolgte nach dem Thyssen-Polygon-Verfahren. Dabei wurden zunächst alle 6 Stationen berücksichtigt. Die Zuordnung der einzelnen Flächen ist in Abbildung 21 dargestellt.

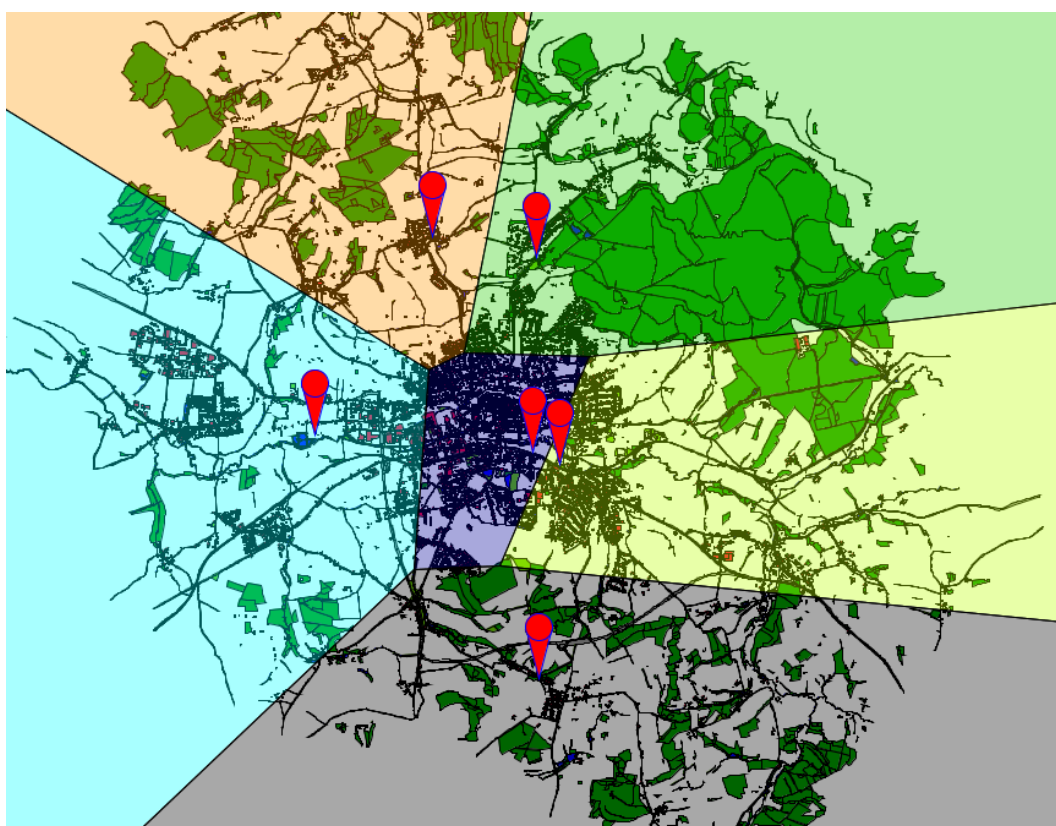


Abbildung 21: Zuordnung der Regenschreiber

Es lagen dabei nicht für alle Stationen über den gesamten Zeitraum Messdaten vor. Die Station RM01-Nivus war Teil einer Messkampagne. Sie wurde nur im Zeitraum der Messkampagne betrieben und nach ihrem Abschluss wieder abgebaut. Die Messstelle Pagenhelle wurde erst Anfang 2009 installiert. Daher liegen für diese Stationen nur begrenzt Daten vor. Die Station Pagenhelle liegt in direkter Nachbarschaft der Station Geschwister-Scholl-Straße (Abstand Luftlinie 450 m). Die Station RM01-Nivus liegt in der Nähe der Station Luherheide. Der Abstand dieser Stationen beträgt Luftlinie ca. 1,5 km. Beide Stationen liegen nördlich der Kernstadt. Für die Zeiten, für die bei den Stationen RM01-Nivus und die Station Pagenhelle keine Messdaten vorlagen, wurden daher die Niederschläge der Stationen Luherheide bzw. Geschwister-Scholl-Straße verwendet.

3.5 Trockenwetterabfluss

3.5.1 Wasserverbrauch/Schmutzwasser

Die Ermittlung der angeschlossenen Einwohner sollte über eine Datenbank mit den Meldedaten für jede Adresse erfolgen. Da die Daten jedoch nicht vollständig zur Verfügung standen, wurde die Zuordnung der angeschlossenen Anwohner abgebrochen. Stattdessen wurde nur der Wasserverbrauch berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Wasserverbrauchs wurden zunächst unterschiedliche Datenquellen ausgewertet. Dies waren zunächst eine Liste mit Verbrauchsdaten des Wasserwerks und eine aufbereitete Liste der Stadt Lemgo, die zum Teil auch die Personenanzahl enthielt. Im Laufe der Bearbeitung stellte sich heraus, dass besser geeignete Daten beim Steueramt der Stadt vorlagen. So wurden letztlich die Grundlagendaten für die Berechnung der Abwassergebühren der Verbrauchsstellen verwendet. In diesen Daten sind neben den Frischwasserverbräuchen auch die Verbräuche an Regenwasser (Regenwasser aus Zisternen) enthalten. Da diese Daten für das Jahr 2009 vorlagen, bildeten sie die Grundlage der Auswertungen. Für neue Verbrauchsstellen (Neubauten usw.) wurde der Jahresverbrauch aus dem Verbrauch des Abrechnungszeitraums hochgerechnet.

3.5.2 Ermittlung Industrierwasseranfall

Für den Industrierwasseranfall standen zusätzlich zu den Daten des Steueramtes Verbrauchsdaten in Form einer Tabelle der Stadt Lemgo zur Verfügung. Anhand dieser Daten erfolgte die Zuweisung der Abwassermengen.

3.5.3 Zuweisung der Schmutzwasserdaten zu den Kanalhaltungen

Die Daten des Steueramtes lagen in Form von Tabellen mit dem Verbrauch und der Postanschrift der Verbrauchsstelle vor. Über die Postanschrift der Gebäude, die auch in den NAS-Daten (Austauschformat für Liegenschaftsdaten) enthalten sind, konnten die Daten jeweils geographisch zugeordnet werden.

Die Daten des Steueramtes wurden über die postalische Adresse der Verbrauchsstelle mit einer GIS-Funktion den Gebäuden aus den NAS-Daten zugewiesen. Dies erforderte umfangreiche Nachbearbeitungen, da die Adressdaten des Steueramtes in ihrer Schreibweise in vielen Fällen nicht den Adressen im NAS-Datensatz entsprachen. Neben einfachen Korrekturen, die weitgehend automatisch durchgeführt wurden, wie die Änderung von Umlauten (ä statt ae) mussten auch komplexere Korrekturen

durchgeführt werden. Dies war z. B. die unterschiedliche Getrennt- bzw. Zusammenschreibweise von Straßennamen oder die Verwendung von Bindestrichen. Diese Korrekturen erforderten das händische Eingreifen. Nach den Korrekturen der Adressdaten verblieb ein Restdatensatz an nicht zuweisbaren Verbrauchsdaten. Bei diesen wurde in Absprache mit dem Auftraggeber ein Schwellenwert von 200 m³/a als Bagatellgrenze festgelegt. Für die Datensätze, deren Verbrauch oberhalb der genannten Grenze lag, wurden Nachforschungen angestellt. Letztlich konnte so 9970 Gebäuden/Gebäudekomplexen ein Schmutzwasseranfall von 1.873.100 m³ für das Jahr 2009 zugewiesen werden. Lediglich für ca. 200 Verbrauchsstellen (Zuweisung nicht direkt möglich, siehe oben) unterhalb der Bagatellgrenze erfolgte keine Zuweisung. Damit wurde ein Volumen von ca. 13.000 m³/a (weniger als 1 %) nicht erfasst. Von den den Gebäuden zugewiesenen Verbräuchen wurden letztlich 1.815.219 m³ dem Kanalnetz zugewiesen. Das restliche Abwasser wird dem Kanalnetz aus unterschiedlichen Gründen nicht zugeführt (Kleinkläranlagen, Lage außerhalb des Netzeinzugsgebiets usw.)

Gegenüber der allgemein verbreiteten Zuweisung des Schmutzwassers lediglich über eine Einwohnerdichte konnten im vorliegenden Fall die realen Verbrauchswerte mit ihrer räumlichen Zuordnung verwendet werden. Dies stellt gegenüber den üblicherweise angewendeten Verfahren der pauschalen Zuordnung eine deutliche Verbesserung dar.

Sonderfall Eben-Ezer

Einen Sonderfall stellt das zusammenhängende Gebiet der Stiftung Eben-Ezer in der Luherheide dar. Hierbei handelt es sich um ein privates Rohrleitungsnetz. Der Betreiber hat dafür eine eigene hydraulische Berechnung durchführen lassen. Die Netzdaten wurden uns zur Verfügung gestellt. Darin enthalten war der Trockenwetterabfluss in Form eines festen Zuflusses für jede Haltung. Auf Nachfrage wurde uns mitgeteilt, wie der Trockenwetterabfluss zustande gekommen ist. Dort wurde vom Frischwasserverbrauch der einzelnen Gebäude für das Jahr 2009 ausgegangen. Daraus wurde ein mittlerer Abfluss $Q_{s,24}$ berechnet. Da mit einem Fremdwasserzuschlag von 100 % gerechnet wurde, entspricht dieser Wert (Tagessumme umgerechnet in einen mittleren Abfluss in l/s) dem Fremdwasser Q_f . Für den Schmutzwasserabfluss wurde ein Spitzenabfluss berechnet, indem die Tagessumme an Schmutzwasser durch 10 geteilt wurde. Dieser Wert wurde als Stundenspitze interpretiert und in die Einheit Liter/Sekunde umgerechnet.

Nachdem uns diese Vorgehensweise mitgeteilt wurde, konnte aus den angegebenen Trockenwetterabflüssen die Tagesschmutzwassersumme für jede Haltung berechnet werden. Daraus wurden entsprechend der für den Rest des Gebietes angewendeten

Methodik der mittlere Schmutzwasserabfluss und der Spitzenschmutzwasserabfluss ermittelt. Die Umrechnung ergab für die Tagesschmutzwassersumme [m³] einen Umrechnungsfaktor von 25,41, ausgehend von den angegebenen Trockenwetterwerten [l/s]. Für drei Beispielhaltungen, für die die Grundlagendaten für Eben-Ezer bekannt waren, konnte damit der Schmutzwasserabfluss zurückgerechnet werden. Durch die sehr kleinen Abflusswerte ergaben sich allerdings Rundungsungenauigkeiten, die bei Verwendung der vorhandenen Daten unvermeidbar sind.

Damit ergibt sich für das Gebiet ein mittlerer täglicher Schmutzwasseranfall von 247,5 m³, ein mittlerer Schmutzwasserabfluss von 2,9 l/s und ein Spitzenschmutzwasserabfluss von 2,9 l/s *3,3 = 9,57 l/s. Der Jährliche Schmutzwasseranfall des Gebiets beträgt 365 x 247,5 = 90.337,5 m³. Der Abfluss aus dem Gebiet wurde den Haltungen direkt zugewiesen, da die Zuordnung aus der Kanalnetzrechnung des Betreibers übernommen wurde.

3.5.4 Fremdwasser

Nach Definition der DWA [9] kann Fremdwasser als das in Abwasseranlagen abfließende Wasser bezeichnet werden, welches weder durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften verändert noch bei Niederschlägen von bebauten oder befestigten Flächen gezielt gesammelt und eingeleitet wurde.

Für die vorliegenden Auswertungen wurde nur der Fremdwasserabfluss bei Trockenwetter berücksichtigt.

Die Auswertung des Fremdwasseranfalls wurde nur für den Kläranlagenzufluss durchgeführt. Damit wurde die Gesamtsumme des Fremdwassers erfasst. Aufgrund der großen Anzahl der von der Stadt betriebenen Durchflussmessstellen ist auch eine sehr viel detailliertere Untersuchung der Fremdwassersituation möglich. Dies soll im Rahmen einer eigenen Fremdwasseruntersuchung erfolgen, die zurzeit bearbeitet wird. Für die im Rahmen des Projekts durchgeführten Berechnungen wurden die Ergebnisse für die Kläranlage auf das gesamte Gebiet übertragen.

Zur Ermittlung des Fremdwasserabflusses wurde die Methode der Untersuchung des Nachtminimums angewendet. Dabei wird davon ausgegangen, dass nachts zwischen 2 Uhr und 4 Uhr nahezu kein Schmutzwasser mehr in der Kanalisation fließt, soweit keine größeren Industriebetriebe mit nächtlicher Produktion im Untersuchungsgebiet vorhanden sind.

Je nach der Herkunft des Fremdwassers unterliegt dieses auch jahreszeitlichen Schwankungen. Liegen undichte Kanalrohre innerhalb der Grundwasserwechselzone

kommt es bei hohen Grundwasserständen, die in der Regel im späten Winter oder im Frühjahr erreicht werden, zu erhöhten Fremdwasserabflüssen.

Für die Kläranlage wurden für das Jahr 2009 die Daten von 23 Tagen ausgewertet. Um Nachlaufeffekte auszuschließen, durften auch die Tage vor den Trockenwettertagen keinen Niederschlag aufweisen. Die Tage wurden nach Möglichkeit gleichmäßig über das Jahr verteilt gewählt. Von den 23 Tagen wurden zwei bei den weiteren Betrachtungen als Ausreißer ausgeschlossen, da die Messwerte deutlich aus dem Rahmen fielen. Für die übrigen Tage wurden die Tagesabflusssumme, der mittlere Abfluss, der Spitzenabfluss, der Minimalabfluss und der Abfluss, der an 15 Minuten des Tages unterschritten wurde (Q_{T15Min}), berechnet. Als Fremdwasserabfluss wurde für jeden Tag der Q_{T15Min} angesetzt, da er wesentlich weniger schwankt als der absolute Minimalwert. Die Werte schwankten für die untersuchten Tage zwischen 39 und 147 l/s. Der Mittelwert liegt bei 70 l/s.

3.5.5 Kläranlagenzufluss bei Trockenwetter

Der Trockenwetterzufluss der Kläranlage ergibt sich aus der Summe des Schmutzwassers und des Fremdwassers. Der Schmutzwasserzufluss ergibt sich dabei aus der Abrechnungsgrundlage der Schmutzwassergebühren (siehe Kapitel 3.5.1).

Der mittlere Schmutzwasseranfall berechnet sich mit den angegebenen Werten zu

$$\begin{aligned} & 1.815.219 \text{ m}^3 + 90.337,5 \text{ m}^3 / (365 \text{ Tage} \times 24 \text{ Stunden} \times 3600 \text{ Sekunden}) \\ & = 60 \text{ l/s} \end{aligned}$$

Mit dem mittleren Fremdwasserabfluss (siehe oben) ergibt sich ein erwarteter mittlerer Trockenwetterabfluss von

$$Q_{\text{erwartet}} = 60 \text{ l/s} + 70,0 \text{ l/s} = 130 \text{ l/s}$$

Die Auswertung des Kläranlagenzuflusses ergibt aber einen mittleren Kläranlagenzufluss von 146 l/s. In der Bilanz fehlt folglich ein Trockenwetterabfluss von 16 l/s. Die Herkunft dieses Wassers ist bisher ungeklärt. Denkbar wäre z. B. eine nicht erfasste Nutzung von Grund- oder Oberflächenwasser im Produktionsprozess einer Firma oder Ähnliches. Dies soll im Rahmen der Fremdwasseruntersuchung geklärt werden. Für die hier vorliegenden Betrachtungen wird dieser Anteil dem Fremdwasser

zugeschlagen. Damit ergibt sich ein Fremdwasserzufluss von 86 l/s und entsprechend ein Fremdwasserzuschlag von

$$(86 / 60) \times 100 = 143 \%$$

Zur Kalibrierung wurde der mittlere Schmutzwasseranfall berücksichtigt. Für die Langzeit-Seriensimulation wurde dagegen der Spitzenabfluss angesetzt. Dieser wurde aus den Tagesschmutzwasserganglinien der untersuchten Trockentage ermittelt. Dazu wurden jeweils das Nachtminimum (99 % Unterschreitungsdauer), der Tagesmittelwert und der Spitzenabfluss ermittelt. Dann wurde das Verhältnis Spitzenabfluss/ (Tagesmittel-Nachtminimum) ermittelt. Der Mittelwert dieses Faktors ergab sich zu 3,3 und wurde als Spitzenfaktor für den Schmutzwasseranfall (nicht für das Fremdwasser) angesetzt. Mit diesem Faktor wurde der jährliche mittlere Schmutzwasserabfluss multipliziert, um den Spitzenschmutzwasserabfluss zu erhalten.

3.5.6 Außengebiete und Gewässer

Die Außengebiete wurden anhand einer Auswertung des Geländereiefs ermittelt. Dazu wurde für jeden bekannten Einleitungspunkt in das Kanalnetz das natürliche Einzugsgebiet anhand des digitalen Geländemodells bzw. der Höhenlinien bestimmt. Die so ermittelten Einzugsgebiete wurden dann der Stadt Lemgo zur Kontrolle übergeben. Die Probleme bei der Festlegung der Einzugsgebiete ergeben sich vorwiegend durch die vorhandenen Wegeseitengräben. Anhand des DGM (in der Regel Punktabstand 10 bis 15 m) und der daraus abgeleiteten Höhenlinien sind diese nicht zu identifizieren. Sie führen aber häufig zu einer großen Veränderung der Einzugsgebiete da Teile der Gebiete über die Gräben anderen Einleitungspunkten zugeführt werden. Die Auswertung der Einzugsgebiete in dieser Hinsicht war nicht Gegenstand der Beauftragung und wurde daher durch die Stadt Lemgo durchgeführt.

Abbildung 22 zeigt ein anhand der Höhenlinien digitalisiertes natürliches Einzugsgebiet.

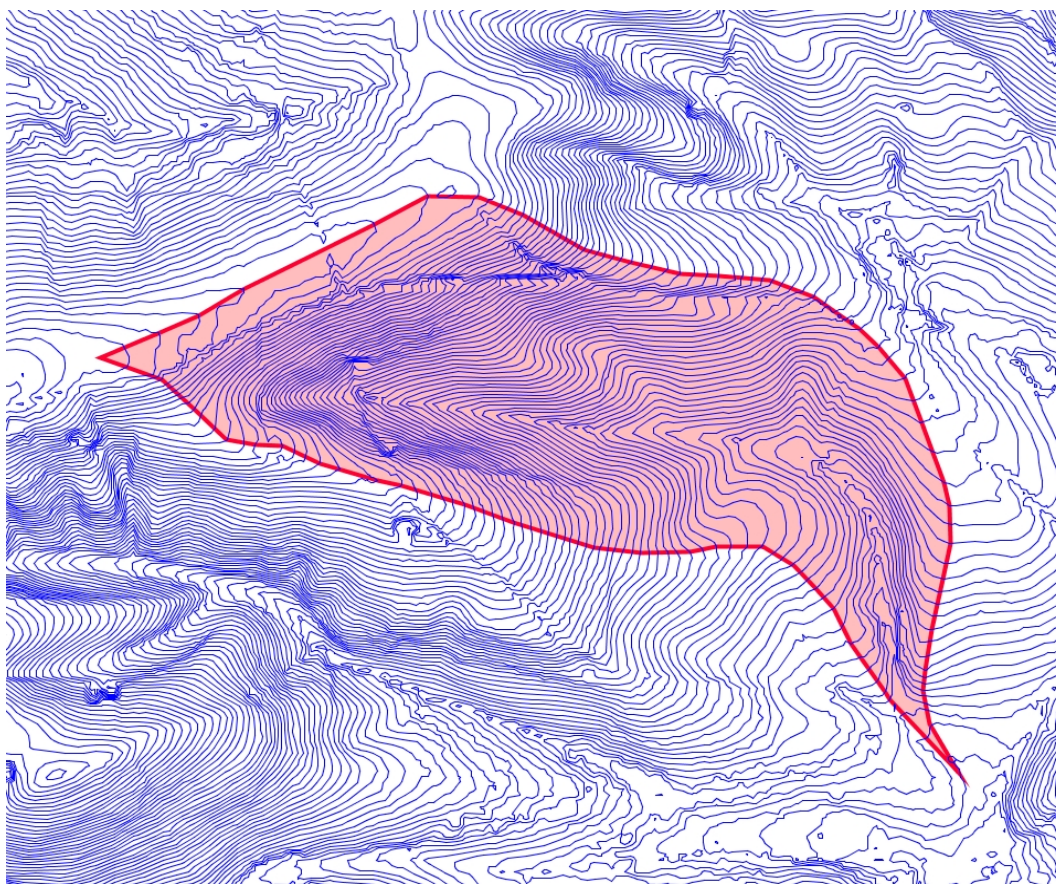


Abbildung 22: Natürliches Einzugsgebiet, Beispiel

3.6 Schmutzfrachten

3.6.1 Trockenwetterabfluss

Die Schmutzfrachten für die Kläranlage wurden aus dem vorherigen Forschungs- und Entwicklungsprojekt [8], übernommen. Dort wurde die Schmutzfracht anhand der Zuflussganglinie und der Frachten für das Jahr 2003 berechnet. Bei der Übernahme für das aktuelle Projekt wurde von der Annahme ausgegangen, dass sich die Wassermengen zwar durch das veränderte Verhalten der Nutzer ändert (insgesamt wird heute weniger Wasser verbraucht als früher), dass sich die Schmutzfracht aber nicht oder nur geringfügig verändert. Damit steigen bei sinkendem Wasserverbrauch also die Konzentrationen an. Dies bedeutet, dass die Gesamtfracht aus dem vorherigen Projekt auf den aktuellen Trockenwetterabfluss umgerechnet werden muss. Für das Jahr 2003 wurde der Trockenwetterabfluss mit 163 l/s angesetzt, während die Auswertungen für das Jahr 2009 einen Trockenwetterabfluss von nur noch 146 l/s ergaben.

In der vorherigen Projektphase wurden unterschiedliche Frachten je Einwohnergleichwert für das häusliche und das gewerbliche Schmutzwasser angesetzt. Diese Vorgehensweise wurde hier nicht weiter verfolgt, da auch in der letzten Projektphase die Fracht, die auf den Messwerten der Kläranlage basiert, nur nach einer Annahme auf die beiden Quellen verteilt wurde. Hier werden jetzt einheitliche Verschmutzungen angesetzt. Tabelle 6 zeigt die verwendeten Werte im Vergleich.

Q_t Werre III [l/s]	163
Q_t Werre IV [l/s]	146

Parameter	Fracht/Tag Werre III [g/d]	Konzentration Werre III [mg/l]	Konzentration Werre IV [mg/l]
CSB	5.859.624	417,6	464,5
BSB ₅	2.828.878	201,6	224,3
AFS	4.281.563	304,6	339,4
P _{ges}	105.816	7,5	8,4
NH ₄ -N	272.797	19,4	21,6
N _{org}	272.797	19,4	21,6

Tabelle 6: Trockenwetterkonzentrationen

3.6.2 Regenbelastung

Die Regenwasserkonzentration wurde aus der vorherigen Projektphase [8] übernommen. In Anlehnung an BWK-M3 [3, 4] wurde dort mit ereignisspezifischen Regenwasserkonzentrationen gearbeitet. Tabelle 7 zeigt die verwendeten Konzentrationen.

Regen	CSB [mg/l]	BSB₅ [mg/l]	AFS [mg/l]	P_{ges} [mg/l]	NH₄-N [mg/l]	N_{org} [mg/l]	NO₃-N [mg/l]
D = 30 min, n = 1 a	85,6	20,0	114,0	0,3	0,9	3,4	1,0
D = 60 min, n = 1 a	76,9	17,1	102,5	0,3	0,9	3,4	1,0

Tabelle 7: Regenwasserkonzentrationen

3.7 Modellkalibrierung

Die Stadt Lemgo betreibt eine Vielzahl an Durchflussmessungen im Kanalnetz. Diese Daten konnten zur hydraulischen Kalibrierung des Netzes verwendet werden. Üblicherweise wird die Kalibrierung für Starkregenereignisse durchgeführt. Am besten sind dafür Ereignisse geeignet, die eine möglichst gleichmäßige Überregnung des Gebiets aufweisen. Für die Kalibrierung wurde eine Vorauswahl an Ereignissen getroffen, aus denen dann drei Ereignisse als besonders geeignet ausgewählt wurden:

1. Ereignis am 3.7.2008, Dauer 3 Stunden, Regensumme 15 mm (E2)
2. Ereignis am 7.10.2009, Dauer 13 Stunden, Regensumme 60 mm (E7)
3. Ereignis am 9.6.2010, Dauer 9 Stunden, Regensumme 20 mm (E10)

Verändert wurde bei der Kalibrierung ausschließlich der Endabflussbeiwert. Die Abbildungen 23 und 24 zeigen beispielhaft die berechneten Ganglinien im Vergleich zu den gemessenen. An Stellen mit deutlicheren Abweichungen konnten diese in der Regel geklärt werden. So zeigen die Messwerte bei Abbildung 24 einen Maximalwert, der in der Berechnung deutlich überschritten wird. Es stellte sich heraus, dass in der lokalen Messwerterfassung an der betreffenden Messstelle der Messbereich zu gering definiert war. Bei anderen Messstellen lagen bei einzelnen Ereignissen deutlichere Abweichungen vor. Dies liegt wahrscheinlich an einer ungleichmäßigen Überregnung des Einzugsgebiets.

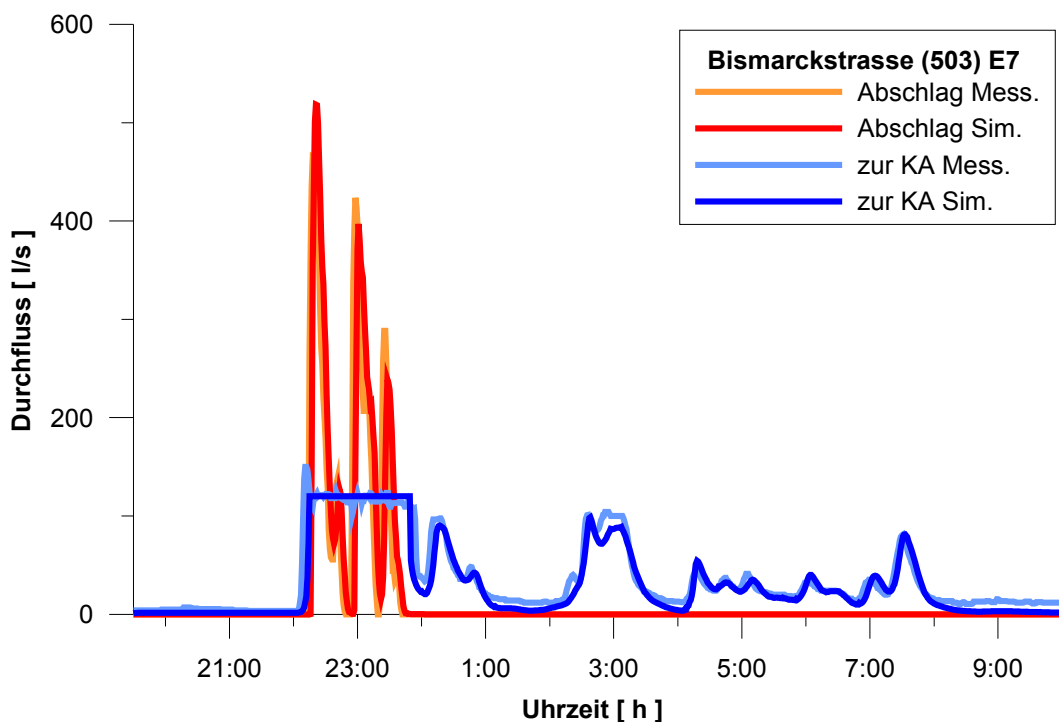


Abbildung 23: Vergleich berechneter und gemessener Abfluss, RÜ Bismarckstraße, Ereignis 7

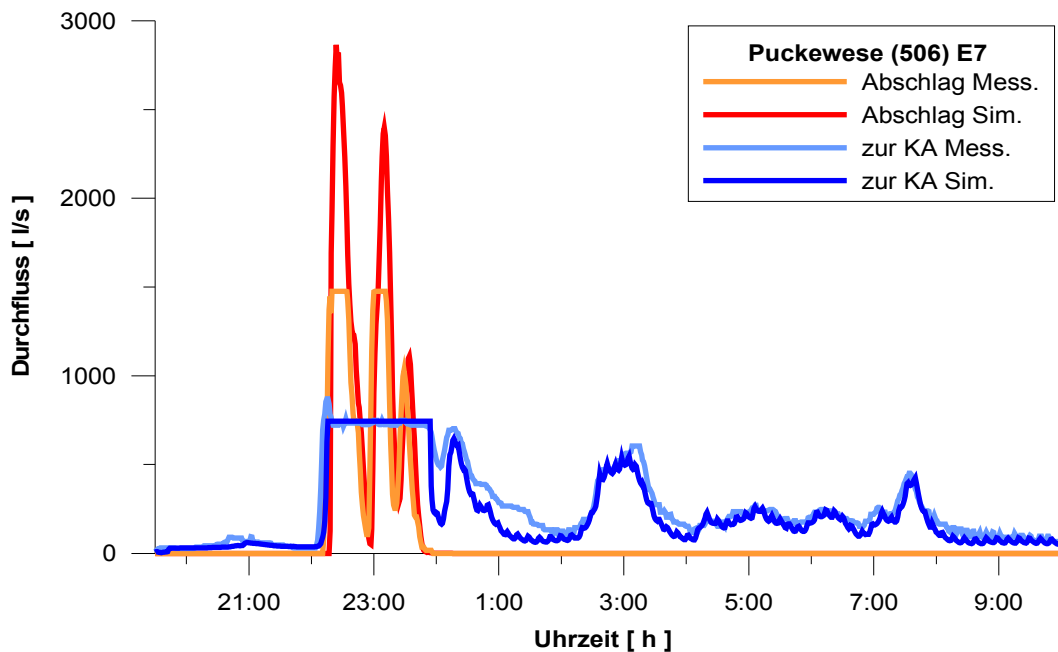


Abbildung 24: Vergleich berechneter und gemessener Abfluss, RÜ Puckewese, Ereignis 7

Insgesamt konnte eine sehr hohe Übereinstimmung der Ergebnisse der Simulation mit den Messwerten erreicht werden.

4 Kanalnetzsteuerung

Generell können mit der Steuerung des Kanalnetzes unterschiedliche Strategien verfolgt werden. Es besteht die Möglichkeit, im Netz zeitweise nicht genutztes Stauvolumen zu aktivieren. Dazu wird ein Kanalstrang über eine steuerbare Drossel bis zu einem vorgegebenen Stauziel eingestaut. Es ergibt sich hierdurch ein Rückhalt im Netz. Eine andere Strategie kann die koordinierte Ansteuerung von vorhandenen Stauräumen sein. Dabei werden Stauräume nach einem, unter Umständen situationspezifischen, Fahrplan geflutet und entleert. Eine weitere Strategie besteht im Ausnutzen von Netzmaschen – also in der temporären Umleitung von Teilströmen in weniger ausgelastete Netzbereiche. Alle Strategien können in beliebigen Kombinationen vereint werden.

Die Wirkung der Steuerung hinsichtlich der Reduzierung des Entlastungsvolumens ist generell bei häufigen Regenereignissen stärker als bei seltenen Ereignissen. Bei Starkregenereignissen ist der Unterschied im Entlastungsvolumen zwischen einem gesteuerten und einem ungesteuerten Kanalnetz in der Regel gering. Bei den häufigen, weniger intensiven Regenereignissen ergeben sich dagegen durch die Steuerung des Kanalnetzes häufig deutliche Reduzierungen beim Entlastungsvolumen.

Die Abbildung 25 (aus [15]) zeigt den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der Regenereignisse und der Wirksamkeit einer Kanalnetzsteuerung.

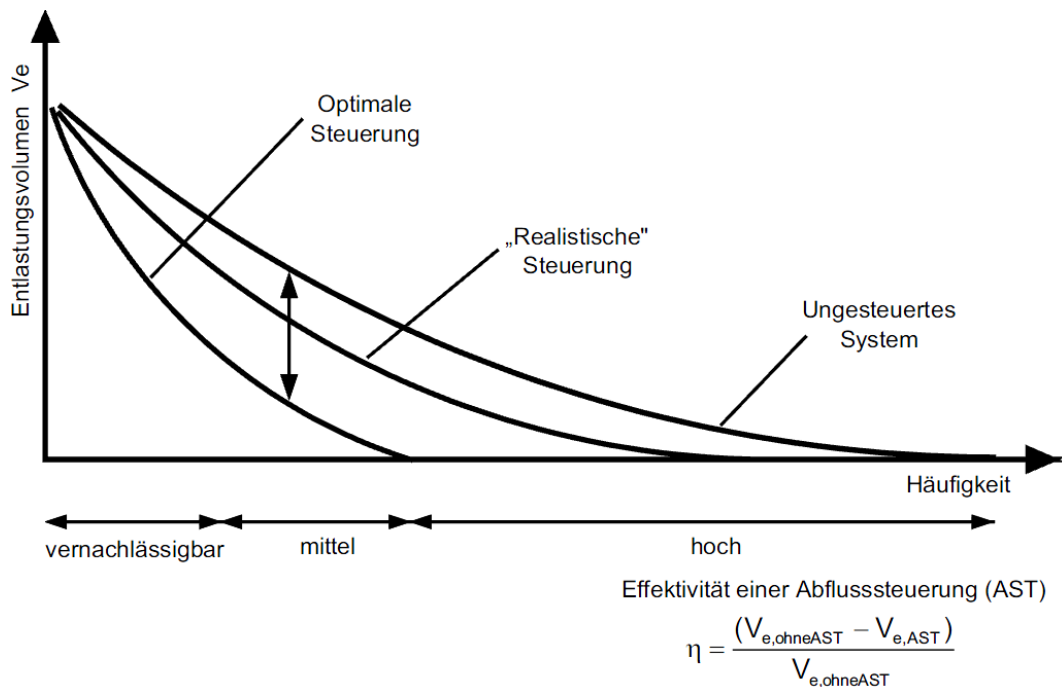


Abbildung 25: Wirksamkeit der Abflusssteuerung in Abhängigkeit von der Häufigkeit der Niederschlagsereignisse [15]

In einem ersten Schritt wurde für das Mischwassernetz der Stadt Lemgo eine Analyse des aktivierbaren Stauvolumens für das Kanalnetz durchgeführt.

4.1 Ermittlung von aktivierbarem Kanalstauvolumen

Für die Ermittlung des aktivierbaren Stauvolumens wurde das Programm VOLUME des itwh verwendet. VOLUME setzt im Abstand von 0,05 m waagerechte Wasserstände im Kanalnetz an und ermittelt für bestimmte Bezugspunkte im Netz das zugehörige Netzvolumen. Das Programm teilt das Netz dabei auch in Teilnetze auf. Das Volumen wird für den Wasserspiegel ausgegeben, der gerade nicht zum Überstau des untersten Schachtdeckels im betrachteten Teilnetz führt. Abbildung 26 zeigt als Ergebnis die wesentlichen im Netz der Stadt Lemgo mit VOLUME ermittelten Kanalstauräume.

Beim Stauraum Pagenhelle handelt es sich um einen schon genutzten Staukanal. Dort kann also kein zusätzliches Volumen aktiviert werden. Beim Stauraum Puckewese handelt es sich um einen Bereich mit schon vergleichsweise steilen Haltungen. Daher wäre dort auch nur ein sehr geringes Volumen aktivierbar. Aus diesem Grund wurde dieser Stauraum nicht weiter untersucht.

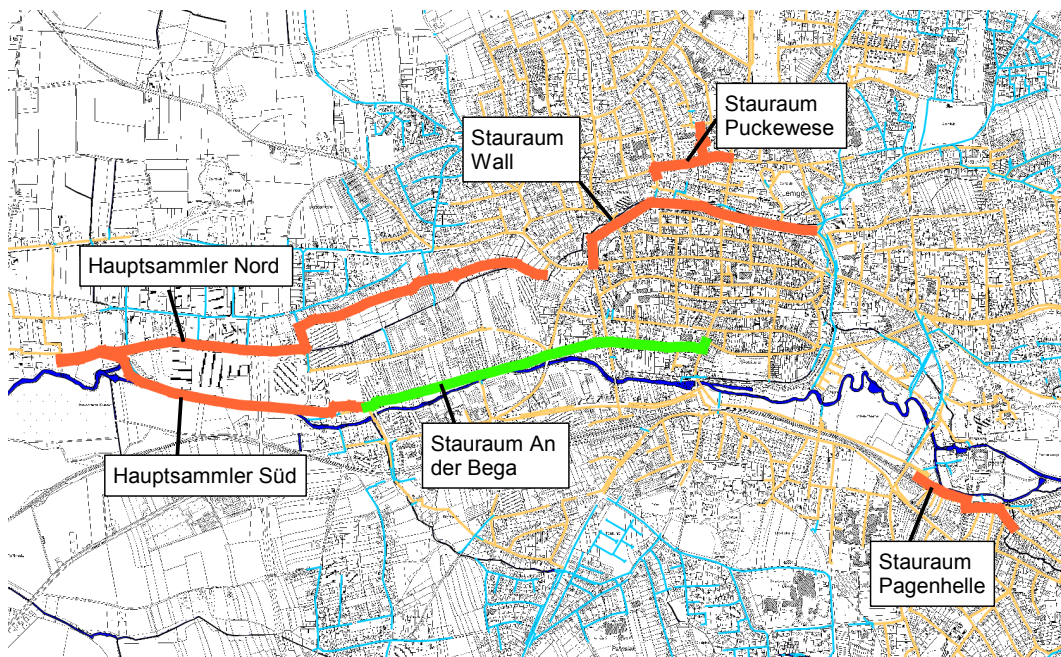


Abbildung 26: mit VOLUME ermittelte aktivierbare Kanalaräume (rote und grüne Linien)

Für die übrigen Stauräume ergeben sich die in Tabelle 8 dargestellten Volumina (Betrachtung bis zum Schachtdeckel am tiefsten Schacht).

Stauraum	theoretisches Volumen [m³]
Sammler Nord	1825
Sammler Süd	1000
Stauraum Wall	1430
Stauraum An der Bega	4400

Tabelle 8: Volumen der im Netz vorhandenen aktivierbaren Stauräume

Bei den angegebenen Volumina handelt es sich um das gesamte Volumen unterhalb des Bezugswasserstandes. Durch den normalen Trockenwetterabfluss wird ein Teil des vorhandenen Volumens in Anspruch genommen. Die Werte sind daher nicht direkt mit z. B. einem Beckenvolumen vergleichbar, dass vor dem Einstau in der Regel komplett leer ist.

Die Analyse zeigt, dass sich im Netz ca. 8.000 m³ Stauvolumen aktivieren lassen.

4.2 Schaffung von Netzmaschen

Das Kanalnetz weist im Istzustand einige kleinere Vermaschungen auf. Diese eignen sich aufgrund der geringen Querschnitte oder der Lage im Gesamtnetz nicht für größer

Umleitungen von Mischwasserströmen. An zwei Stellen im Netz könnten aber durch den Bau von kurzen Haltungen neue Verbindungen geschaffen werden. Dies betrifft einen Punkt in der Straße Grevenmarsch und den Steinweg. Abbildung 27 zeigt diese beiden möglichen Verbindungen.

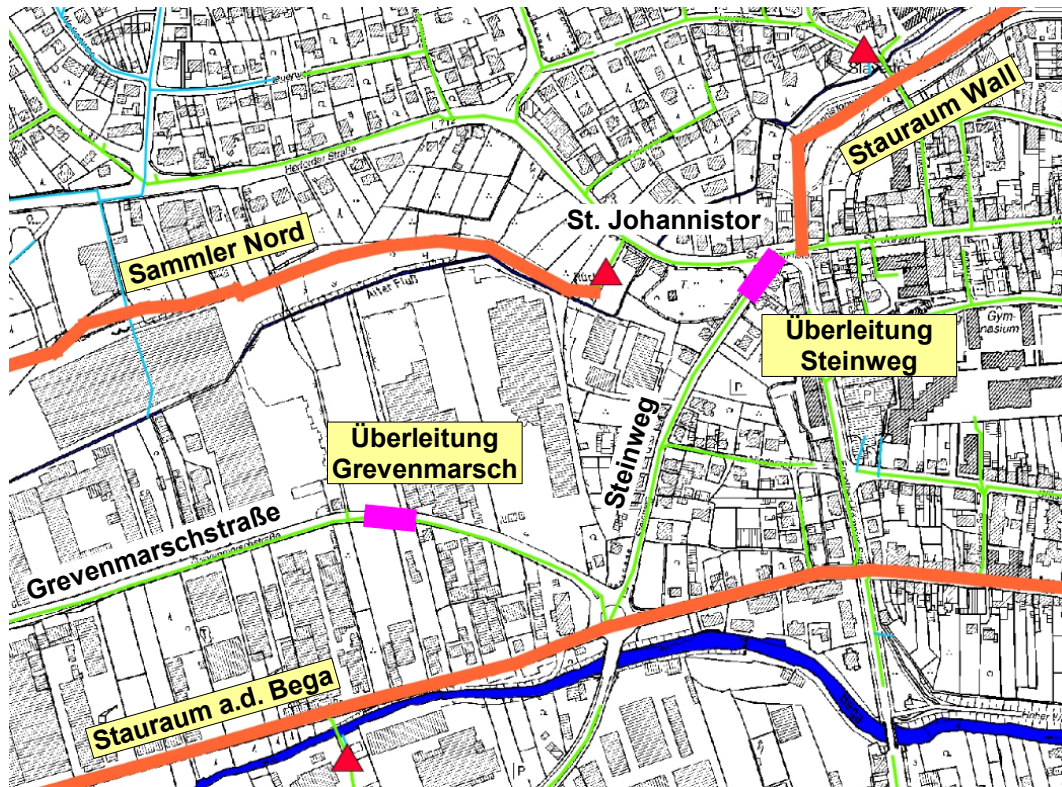


Abbildung 27: Zusätzliche Verbindungsmöglichkeiten im Netz (magenta: zusätzliche Verbindungen, orange: aktivierbare Stauräume, rote Dreiecke: Entlastungsbauwerke)

In der Grevenmarschstraße handelt es sich auch eher um eine kleinere Verbindung (Kreisquerschnitt, DN 500). Hier könnte Wasser aus dem Bereich des südlichen Hauptsammlers in Richtung zum vorhandenen Stauraumkanal Grevenmarschstraße umgeleitet werden. Aufgrund der Gefällesituation würde diese Überleitung nur bei hohen Wasserständen im Netz aktiv werden, da das Netzgefälle entgegen der Richtung der Überleitung verläuft.

Bei der potentiellen Verbindung im Bereich der Kreuzung Steinweg/St. Johannistor handelt es sich um eine Verbindung zwischen großen Sammlern. Im Steinweg verläuft der ehemalige Hauptsammler des Netzes. Es handelt sich dort um großformatige Eiprofile (1200/800 mm). Der Nordsammler in der Straße am St. Johannistor weist einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser DN 1400 auf.

4.3 Analyse der Beckenausnutzung

Die Abbildung 28 zeigt die im Netz der Kernstadt vorhandenen Regenüberlaufbecken und Stauraumkanäle. Insgesamt beträgt das Volumen 14.800 m³

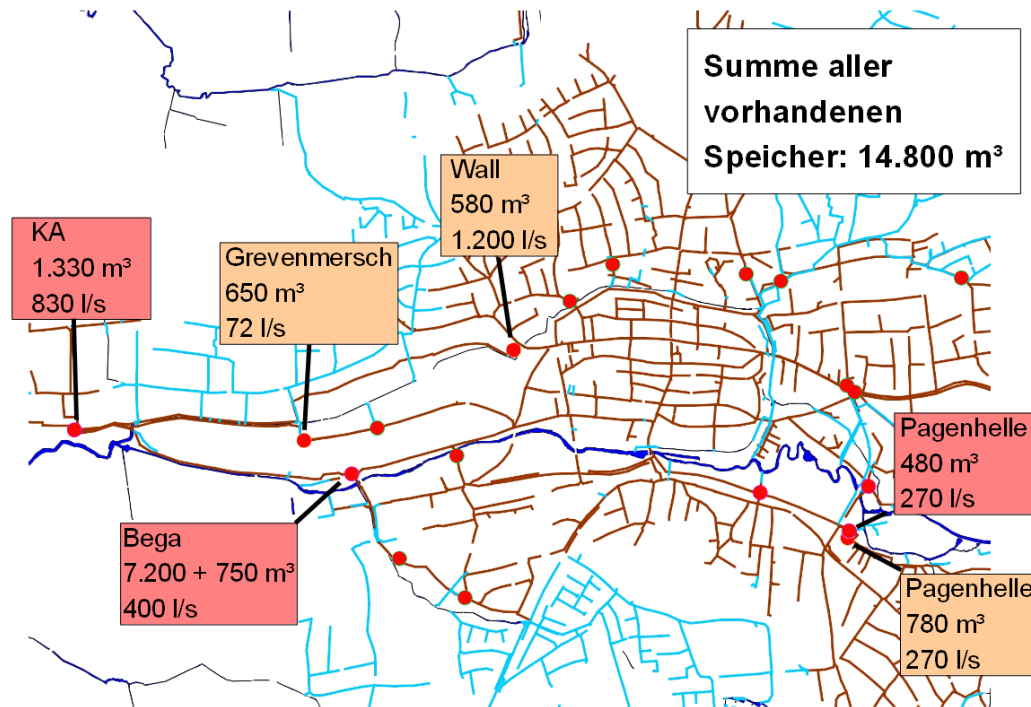


Abbildung 28: Im Netz aktuell betriebene Rückhalteräume (Volumen und Drosselabfluss, orange: Becken, lachsfarben: Staukanäle, rote Punkte: Entlastungsbauwerke)

Eine erste Langzeitseriensimulation (90 Ereignisse aus den Jahren 1995 bis 1999, Niederschlagsstation Detmold) mit dem zum Zeitpunkt der Durchführung noch unkalibrierten Netz ergab, dass die meisten vorhandenen Rückhaltebecken gut ausgelastet werden. Lediglich das RÜB Becken a.d. Bega und der Stauraumkanal Grevenmarsch stellen hierbei Ausnahmen dar.

Das Becken a.d. Bega entlastet in den Berechnungen nur sehr selten. Dies deckt sich auch mit den Erfahrungen des Betriebspersonals, nach dessen Aussage dieses Becken nur ca. ein bis zwei Mal im Jahr abschlägt. Dies ist vor allem bei sehr langen Regenereignissen der Fall. Da es sich beim RÜB Becken a.d. Bega mit ca. 8.000 m³ Speichervolumen um das bei Weitem größte Becken im Netz handelt, besteht hier ein bisher nur teilweise ausgenutztes Speicherpotential.

Der Stauraumkanal Grevenmarsch entlastet nach den Berechnungen ebenfalls nur selten. Durch das mit 650 m³ nur geringe Volumen ergibt sich an dieser Stelle lediglich ein geringes Potential für die Netzsteuerung.

4.4 Aufstellen eines ersten Steuerkonzepts

4.4.1 Einführung in den Fuzzy-Regelinterpreter CONTROL

Das Steuerungskonzept besteht aus Regeln, die im Fuzzy-Interpreter CONTROL, einem Softwareprodukt des itwh, hinterlegt werden. In diesen Regeln wird dann z.B. festgelegt, dass eine Entlastungspumpe ab einem bestimmten Wasserstand an einer Messstelle aktiviert wird. In diesem Abschnitt wird kurz die Funktionsweise des Fuzzy-Systems beschrieben. Details können der Modellbeschreibung [10] sowie Lehrbüchern zur Fuzzy-Logik [11] entnommen werden.

Fuzzy-Sets

Die Fuzzy-Logik erlaubt die Nachbildung von verbal formulierten Zusammenhängen im Computer und die Umsetzung in scharfe Entscheidungen. Dazu werden Bereiche definiert, die den Zusammenhang zwischen realer Messgröße und verbalem Ausdruck herstellen.

Die in Abbildung 29 dargestellte Funktion definiert die Zugehörigkeit verschiedener Werte der Messgröße Wasserstand zum Bereich „niedrig“ und wird auch als Fuzzy-Set bezeichnet. Der Zugehörigkeitsgrad (μ) bewegt sich im Bereich zwischen 0 und 1. Ein Wasserstand von 0,1 m würde demnach "vollständig niedrig" sein ($\mu=1,0$), der Wasserstand 0,3 m "etwas niedrig" ($\mu=0,6$) und ein Wasserstand von 0,6 m ($\mu=0$) wird als "nicht niedrig" ($\mu=0,6$) bezeichnet. Üblicherweise werden für die Zugehörigkeitsfunktionen einfache Dreiecke oder Trapeze definiert.

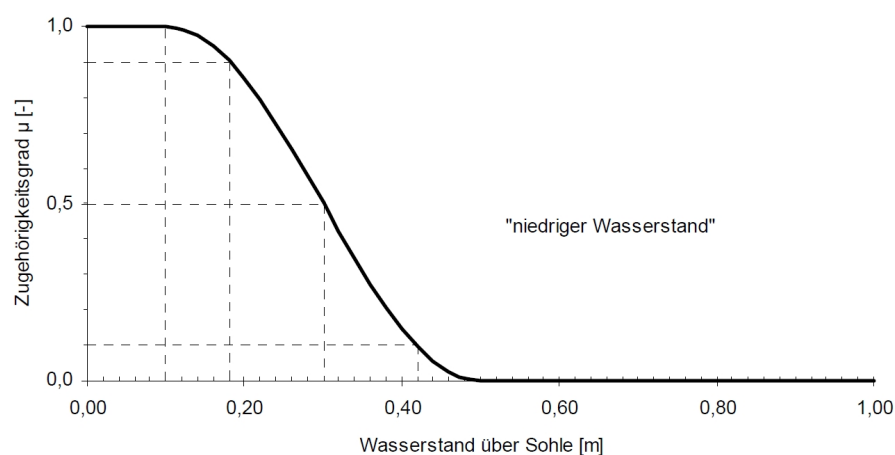


Abbildung 29: Beispiel für eine Zugehörigkeitsfunktion der Messgröße Wasserstand (aus [10])

In gleicher Form kann ein Fuzzy-Set z.B. für die Ausgangsgröße Durchfluss definiert werden. In einer Regel wird dann z.B. festgelegt, dass bei niedrigem Wasserstand der Durchfluss niedrig gehalten werden soll. Damit wird der Fuzzy-Menge der Eingangsgröße eine entsprechende Ausgangs-Fuzzy-Menge zugeordnet.

Interferenz

Ein Wasserstand kann jedoch sowohl zu den Bereichen „niedrig“ als auch „mittel“ gehören. Wird in diesem Fall einem niedrigen Wasserstand ein niedriger Durchfluss zugeordnet und einem mittleren Wasserstand ein mittlerer Durchfluss, so überlagern sich zwei Regeln. In diesem Fall wird ermittelt, zu welchem Grad der Wenn-Teil beider Regeln erfüllt ist. Diese Erfüllungsgrade werden auf die jeweiligen Ausgangs-Fuzzy-Sets übertragen, d.h. die Zugehörigkeitsfunktion der Ausgangsgröße wird in der Höhe des entsprechenden Zugehörigkeitsgrades abgeschnitten. Anschließend werden beiden Ausgangs-Sets überlagert. Das Ergebnis ist in Abbildung 30 dargestellt. Die scharfe Ausgangsgröße Durchfluss ergibt sich aus dem Schwerpunkt der resultierenden Fuzzy-Fläche.

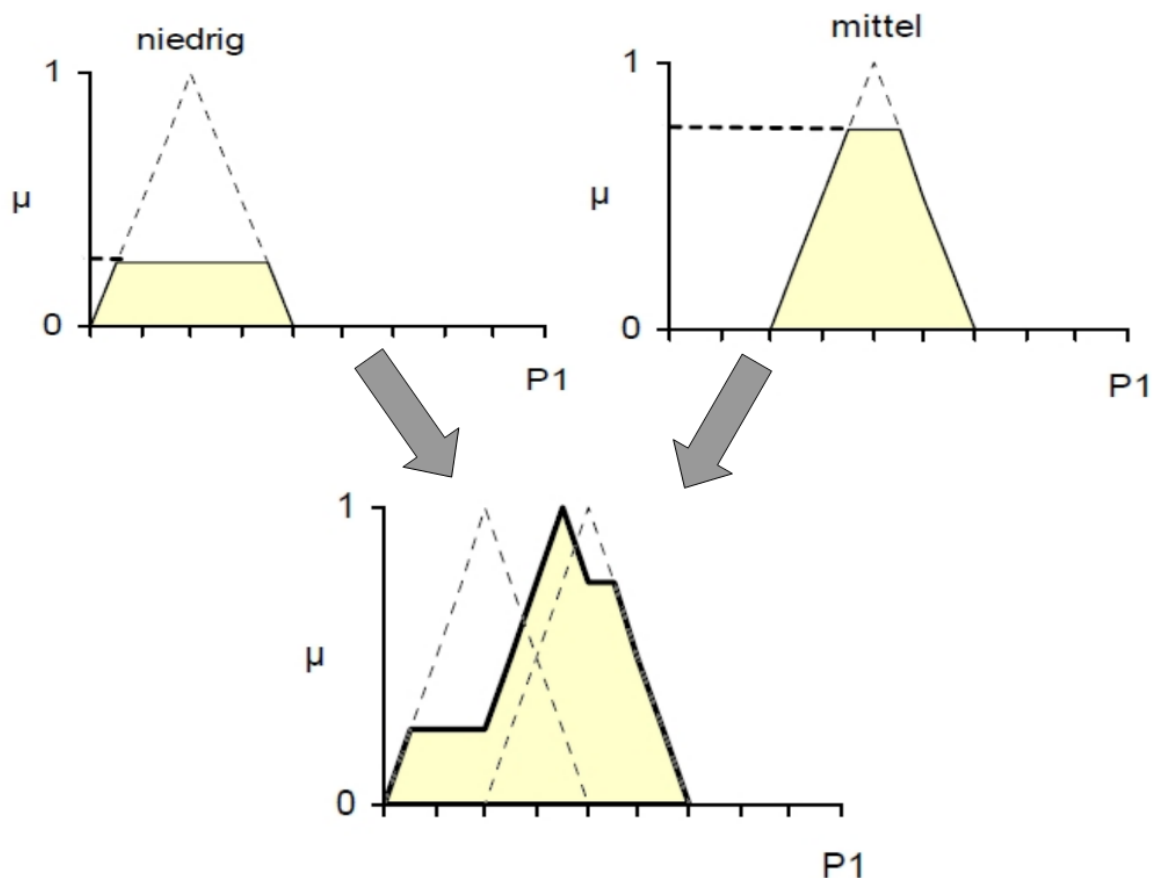


Abbildung 30: Bestimmung des Ausgangs-Fuzzy-Sets (aus [10])

Und-Verknüpfung

Wird im Wenn-Teil einer Regel eine UND-Verknüpfung definiert, dann wird diese in dieser Arbeit mit dem Minimums-Operator ausgewertet. Das bedeutet, dass der Erfüllungsgrad der Regel gleich der kleinsten Zugehörigkeit der einzelnen Terme ist. Damit ist sichergestellt, dass die Regel nicht zutrifft, wenn eine der beiden Bedingungen nicht erfüllt ist. Das gelbe Dreieck in Abbildung 31 zeigt an einem Beispiel die Erfüllungsgrade, die die Regel mit der Bedingung Wasserstand = niedrig UND mittel annehmen kann.

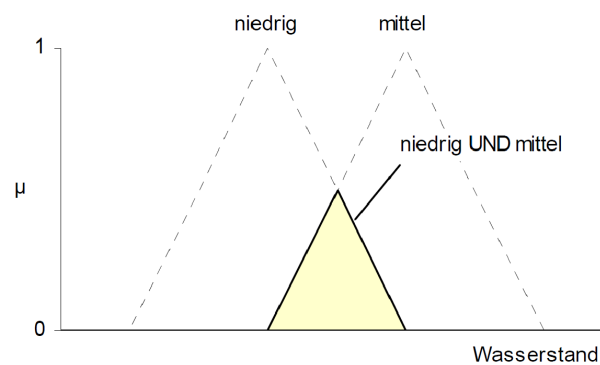


Abbildung 31: Fuzzy-UND-Verknüpfung mit dem Minimums-Operator

Aufbau einer Regelbasis

Das übliche Vorgehen zur Erstellung einer regelbasierten Steuerstrategie fasst Abbildung 32 zusammen.

Wichtig ist, dass die Ziele, die mit der Steuerung erreicht werden sollen, im Vorfeld klar definiert werden. Dann können Steuerstrategien entwickelt und nach dem in Abbildung 32 dargestellten Ablauf optimiert werden.

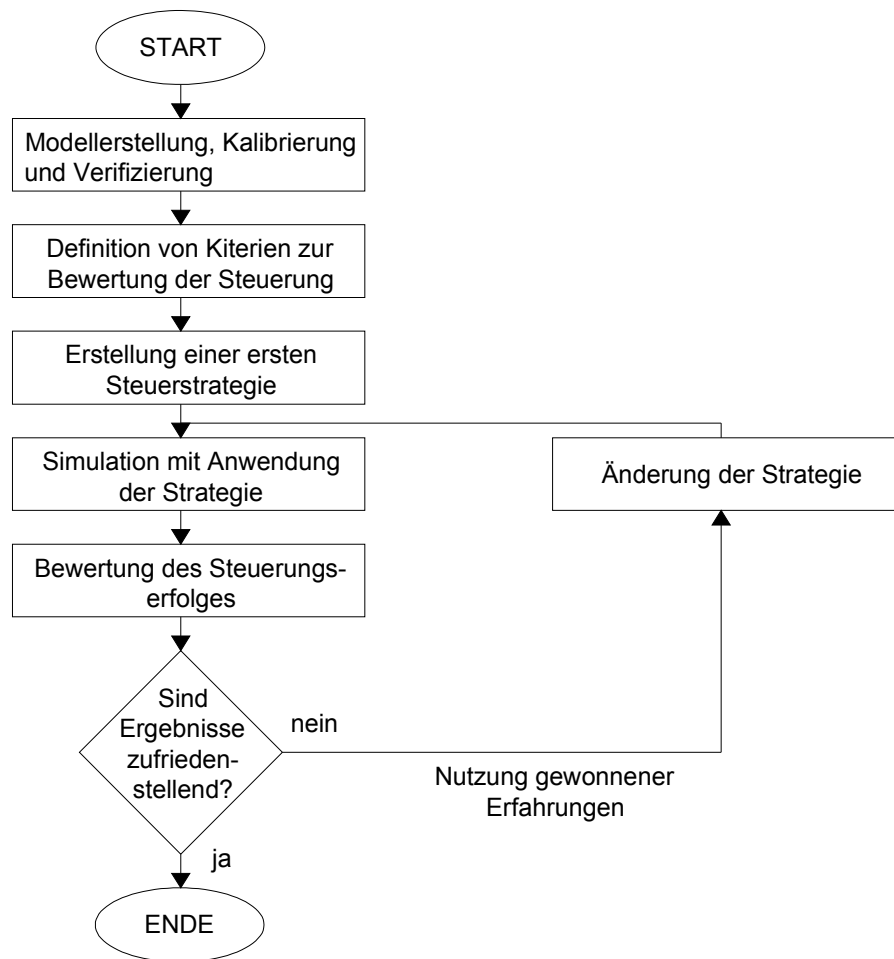


Abbildung 32: Vorgehen zur Entwicklung einer regelbasierten Steuerstrategie nach Schütze [12]

4.4.2 Zielsetzung der Steuerung

Die Steuerung erreicht im Allgemeinen eine Verringerung der Entlastungsmengen durch eine verstärkte Auslastung im Kanalnetz, die mit einer Anhebung der Wasserspiegel im Kanalnetz verbunden ist. Die höheren Wasserstände bergen prinzipiell das Risiko einer vergrößerten Überstauneigung des Systems. Daher ist sicherzustellen, dass keine Verschlechterung der Überstaunsituation eintritt.

Für das Netz der Stadt Lemgo wurden in Abstimmung mit der Stadtverwaltung und der Bezirksregierung Detmold folgende Ziele definiert:

1. Reduzierung des Entlastungsvolumens (vor allem für häufige Ereignisse)
2. Verlagerung von Entlastungsvolumen auf Einleitungsstellen unterhalb der Staustufen in der Bega

4.4.3 Aufstellen erster Steuerregeln

Nach der Analyse des Istzustands des Netzes wurden die angedachten zusätzlichen Netzvermaschungen und die für die modelltechnische Implementation der anderen Steuerstellen notwendigen Elemente in das Berechnungsnetz eingefügt.

Die Abbildung 33 zeigt alle im ersten Steuerungskonzept berücksichtigten Steuerstellen.

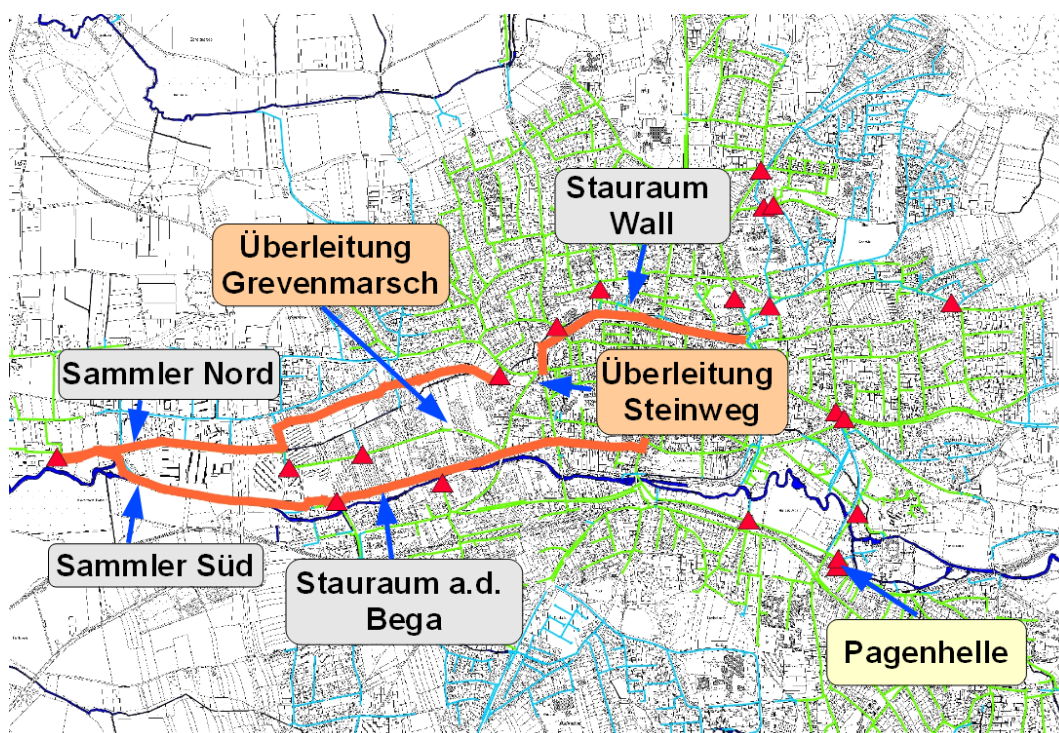


Abbildung 33: Steuerstellen im Netz (orange: Überleitungen, grau: Kanalstauräume, gelb: Erhöhung Drosselabfluss, rote Dreiecke: Sonderbauwerke)

An den dargestellten Positionen im Netz wurden die in Tabelle 9 beschriebenen Steuerungsmöglichkeiten implementiert.

Steuerstelle	Art der Steuerung
Sammler Nord	Durchfluss und maximaler Wasserstand
Sammler Süd	Durchfluss und maximaler Wasserstand
Stauraum Wall	Durchfluss und maximaler Wasserstand
Becken a.d. Bega	Wasserstand
Pagenhelle	Erhöhung Drosselabfluss, statisch
Steinweg	Überleitung, Durchfluss
Grevenmarsch	Überleitung, Durchfluss

Tabelle 9: Grundsätzlich implementierte Steuerungsmöglichkeiten

Als Grenze für den maximal durch die Steuerung zulässigen Wasserspiegel in den aktivierten Stauräumen wurde jeweils die Höhe des Schachts mit der niedrigsten absoluten Deckelhöhe minus 0,5 m angesetzt.

Im Modell wurden die Steuerungen folgendermaßen umgesetzt:

Durchfluss und maximaler Wasserstand

Betroffene Steuerstellen: Sammler Nord, Sammler Süd und Stauraum Wall

Abbildung über eine Haltung mit steuerbarer Durchflussleistung am unteren Ende des einzustauenden Kanalabschnitts und ein sehr langes Wehr, dessen Überlaufschwelle auf die Höhe des Zielwasserstands gelegt wurde.

Überleitung, Durchfluss

Betroffene Steuerstellen: Steinweg und Grevenmarsch

Abbildung über eine neue, im Durchfluss regelbare Haltung.

Wasserspiegel

Betroffene Steuerstelle: Becken an der Bega

Umwandlung der vorhandenen Einlaufschwelle in ein verfahrbares Wehr. Einrichten einer Messstelle im Einstaubereich des Netzes.

Erhöhung Drosselabfluss, statisch

Betroffene Steuerstelle: Pagenhelle

Dauerhafte Erhöhung des am Drosselorgan eingestellten maximalen Abflusses.

Die Abbildung 34 zeigt eine vereinfachte Skizze mit den wichtigsten Systemelementen.

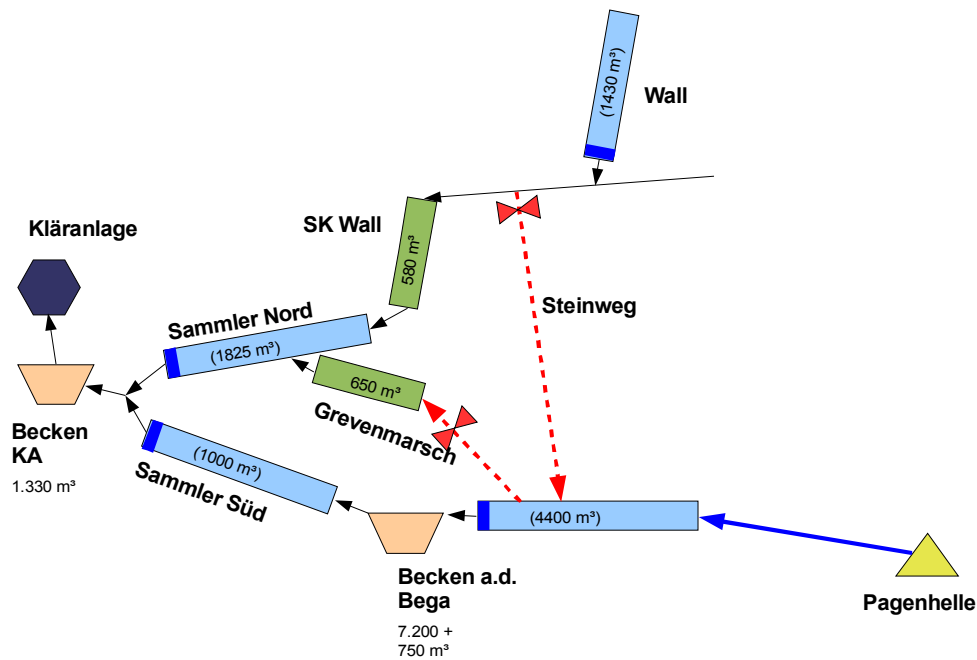


Abbildung 34: Systemskizze für die Steuerung (blau: gesteuerte Kanalstauräume, grün: vorhandene Staukanäle, orange: vorhandene Becken, rot: steuerbare Verbindungen)

4.5 Anwendung und Optimierung der Steuerregeln für ein Einzelereignis

4.5.1 Beschreibung der Regeln

In einem ersten Schritt wurden Regeln für die Steuerungsorgane definiert. Diese Regeln wurden in den Regelinterpreter CONTROL überführt. Über die vom Anwender definierten Einstellungen für die Simulation wird ein Steuerzeitschritt definiert. Hystem-Extran und CONTROL kommunizieren im Takt des vorgegebenen Steuerzeitschritts miteinander. Dabei liefert Hystem-Extran für die Mess- und Steuerorgane den aktuellen Zustand. CONTROL wertet diese Daten im Hinblick auf die Steuerregeln aus und übermittelt Hystem-Extran die für den nächsten Simulationszyklus gültigen Einstellungen für die Regelorgane.

Die für die ersten Steuerungsberechnungen gewählten Regeln führen meistens nicht zum gewünschten Erfolg. Die Optimierung der Steuerregeln ist ein iterativer Prozess, bei dem diese sukzessive verbessert werden.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde für die ersten Tests und die anschließende Optimierung ein eher seltenes Ereignis verwendet. Der Grund dafür liegt im großen Volumen des Beckens a.d. Bega. Die Steuerung lässt sich nur sinnvoll testen und optimieren, wenn das Abflussvolumen im System ausreichend groß ist, um das Becken zumindest komplett zu füllen. Gleichzeitig sollte das Ereignis kurz sein, da sonst der Rechenlauf sehr lange braucht. Aus diesen Erwägungen heraus wurde ein 10-jährlicher Modellregen (KOSTRA) mit einer Dauer von 30 Minuten und einer Niederschlagshöhe von 22 mm verwendet. Für den betrachteten Regen ergaben sich als Ergebnis der Optimierung die nachfolgenden Steuerregeln.

Sammler Nord

- Einstau bis maximal 89,90 m+NN
- Drosselabfluss bis maximal 400 l/s

Sammler Süd

- Einstau bis maximal 89,35 m+NN
- Drosselabfluss bis maximal 210 l/s

Stauraum Wall

- Einstau bis maximal 96,20 m+NN
- Drosselabfluss bis maximal 600 l/s

Zuflusswehr Becken an der Bega

- Startposition der verfahrbaren Wehrschwelle: 91,20 m+NN (maximale Stauhöhe)
- Beginn des Absenkens der Wehrschwelle auf 90,90 m+NN ab der Überschreitung eines Wasserspiegels von 90,90 m+NN in den oberhalb liegenden Haltungen

Überleitung Steinweg

- Startzustand: geöffnet (bis 0,5 m Wassertiefe wird nicht übergeleitet)
- maximaler Durchfluss: 800 l/s
- Schließen der Überleitung, sobald das Becken a.d. Bega gefüllt ist

Grevenmarsch

- Startzustand: geschlossen
- maximaler Durchfluss: 500 l/s
- nur geöffnet, wenn das Becken a.d. Bega gefüllt ist und der SK Grevenmarsch noch nicht gefüllt ist

Die Summe der Drosselabflüsse der Stauräume Sammler Nord und Süd muss auf den Gesamtzufluss der Kläranlage abgestimmt sein. Hierzu zählt neben Zuflüssen aus anderen Netzteilen auch die über Pumpen erfolgende Entleerung des RÜB an der Kläranlage.

Eine Überleitung von Mischwasser aus dem nördlichen Entwässerungssystem in das südliche Netz über die neue Verbindung am Steinweg ist nur sinnvoll, wenn das übergeleitete Wasser nicht zu einem Abschlagen in die Bega führt. Diese Bedingung ist gegeben, wenn das Becken a.d. Bega noch Kapazitäten frei hat. Durch die Steuerung der Zulaufweherschwelle wird sichergestellt, dass vor dem Einstau des Beckens zuerst das Kanalstauvolumen ausgenutzt wird. Es ist daher für die Steuerung der Überleitung im Steinweg ausreichend, nur den Füllstand des Beckens a.d. Bega zu berücksichtigen. Zusätzlich hat die Steuerstrategie erst den Kanalstauraum auszunutzen den Vorteil, dass das Becken weniger häufig gereinigt werden muss, da es seltener mit Mischwasser beaufschlagt wird. Durch die begrenzte Breite der Überlaufschwelle ist die Leistungsfähigkeit bei einem sehr großen Zufluss zum Becken nicht mehr ausreichend. Dies führte in den Simulationen zu höheren Wasserständen im Einstaubereich als gewollt. Um dennoch bei geringeren Zuflüssen den Kanalstauraum möglichst weitgehend ausnutzen zu können, wurde die Zulaufschwelle nicht generell abgesenkt, sondern es wurde eine Regel definiert, die zu einer Absenkung der Überlaufschwelle ab der Überschreitung eines kritischen Wasserstandes im Rückstaubereich führt.

4.5.2 Darstellung der Simulationsergebnisse für das Einzelereignis

Die Abbildung 35 zeigt die Volumenkurve für den RÜ Pagenhelle. Dort wurde als einzige Veränderung gegenüber dem Istzustand der Drosselabfluss zur Kläranlage von 270 l/s auf 500 l/s erhöht. Diese Maßnahme reduziert die Abflussspitze (Ganglinie siehe Anlage) zwar nur unwesentlich, das in die Bega abgeschlagene Volumen reduziert sich aber um ca. 500 m³.

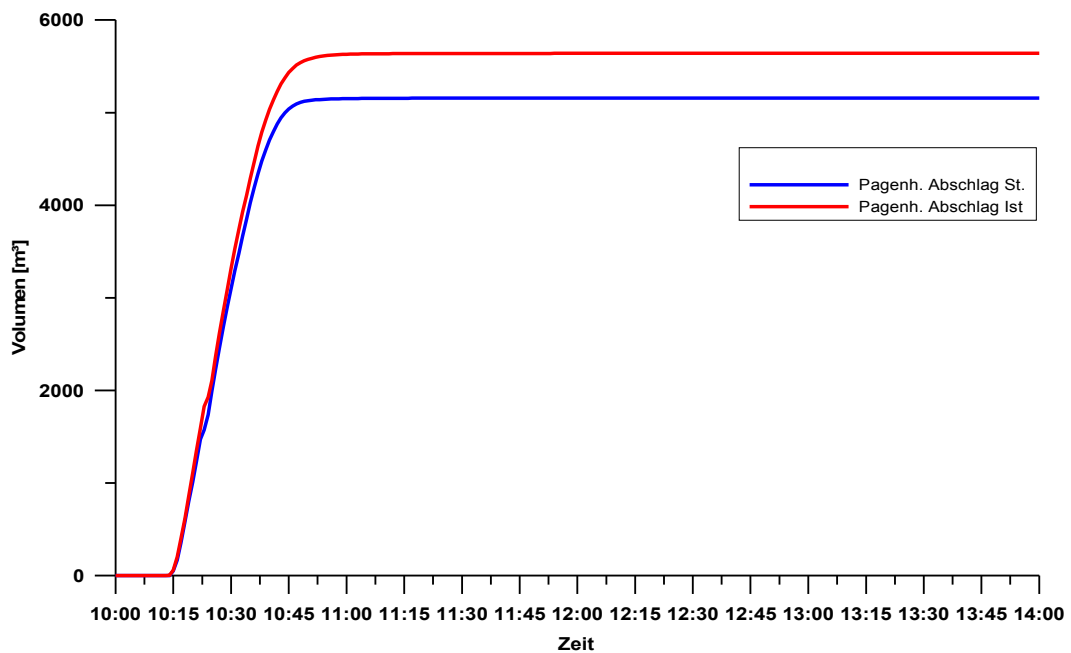


Abbildung 35: Abschlagsvolumenkurve, Abschlag Pagenhelle, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

Die Abbildung 36 stellt die Abflussganglinien für den Istzustand und die optimierte Steuerung unterhalb des Steuerorgans am Wall dar. Die Ganglinien zeigen deutlich die zwischenspeichernde Wirkung der Steuerung. Der Abflussscheitel wird deutlich reduziert und große Teile des Volumens werden erst verzögert abgegeben.

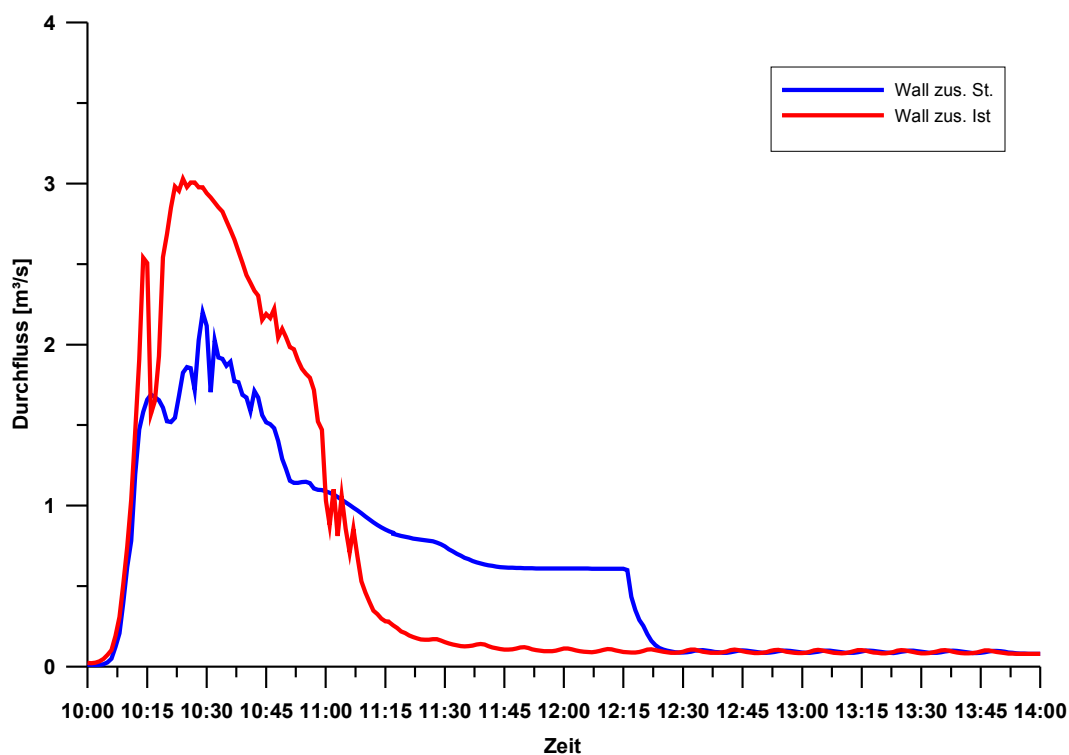


Abbildung 36: Durchfluss unterhalb der Drossel am Stauraum Wall, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

Die Abbildung 37 zeigt die Durchflussganglinie der Überleitung (Steinweg) für den gesteuerten Zustand in dem Wasser aus dem nördlichen in den südlichen Teil des Entwässerungsnetzes abgeleitet wird. Über einen Zeitraum von mehr als 30 Minuten wird die maximale Wassermenge übergeleitet. Insgesamt beträgt das Überleitungsvolumen ca. 2000 m³.

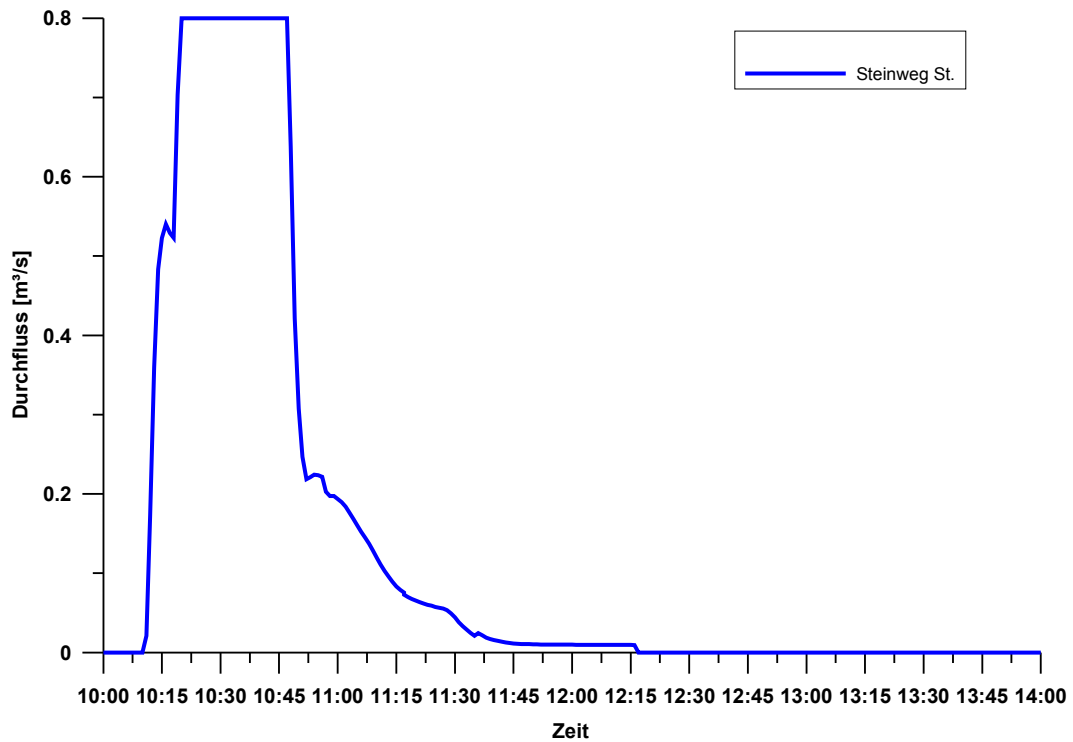


Abbildung 37: Überleitung Steinweg, Abfluss, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

Die Abbildung 38 gibt den Vergleich der Abflussganglinien am Abschlag des Staukanals Wall zum Alten Fluss hin wieder. Infolge der Dämpfung der Welle durch den neuen Kanalrückhalteraum Wall und die Überleitung in den südlichen Netzbereich wird der Staukanal Wall deutlich weniger beaufschlagt. Es zeigt sich eine deutliche Reduzierung sowohl der Abflussspitze (500 l/s gegenüber 2200 l/s) als auch des Abschlagvolumens (200 m³ gegenüber 3600 m³, siehe Anlage).

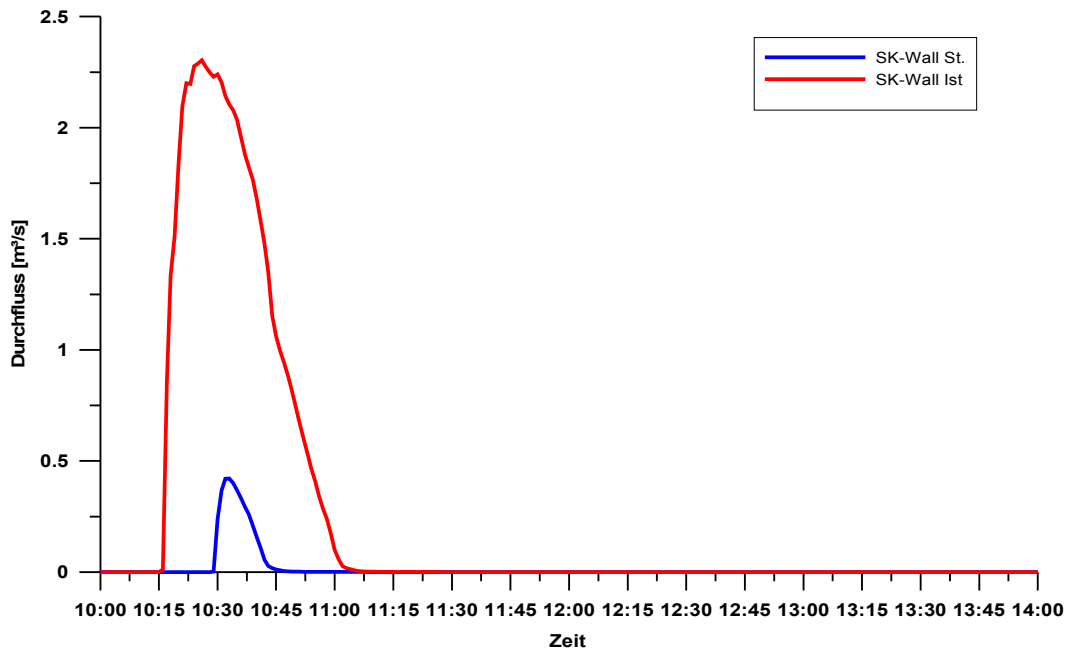


Abbildung 38: Abflussganglinie Abschlag Staukanal Wall, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

Die Abbildung 39 zeigt einen Vergleich der Zufusganglinien zum Becken a.d. Bega für den Istzustand und für die optimierte Steuerung. Die Zuflussganglinien sind in weiten Teilen nahezu deckungsgleich. Hierbei ist zu beachten, dass durch die Überleitung am Steinweg ca. 2000 m³ mehr Mischwasser in den südlichen Netzbereich eingeleitet werden. Dieses Volumen wird nahezu komplett im neuen Stauraum oberhalb des Beckens zwischengepuffert. Das Becken a.d. Bega wird bei dem Ereignis nahezu komplett gefüllt, es kommt aber nicht zu einem Abschlagen in die Bega.

Die Überleitung Grevenmarsch kommt bei diesem Ereignis nicht zum Tragen, da das Becken a.d. Bega nicht abschlägt. Erst in diesem Fall wäre die Überleitung angesprungen. Aufgrund der Größe des SK Grevenmarsch (651 m³) und des Füllstandes des Beckens wäre eine Überleitung auch bei einem Anspringen nur in geringem Umfang wirksam geworden.

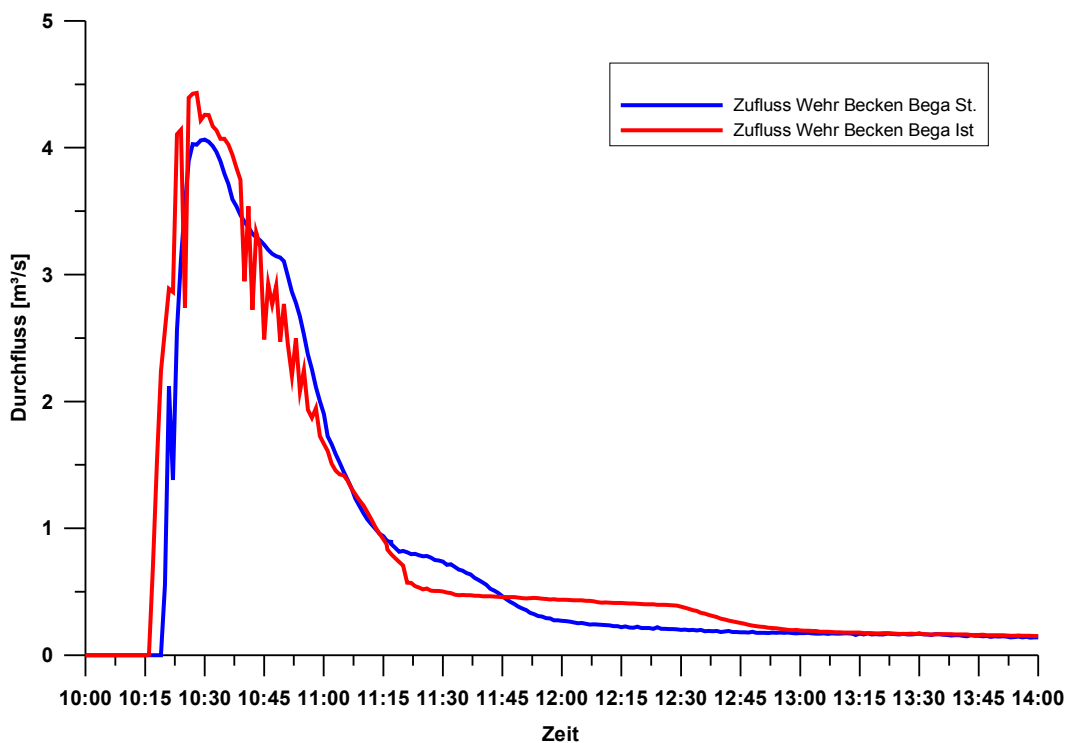


Abbildung 39: Abflussganglinie des Zuflusswehrs zum Becken a.d. Bega, KOSTRA-Regen
Dauer 30 Min, 22 mm

Aus der Abbildung 40 ist der Abfluss unterhalb des Steuerungsorgans am Sammler Süd erkennbar. Der unruhige Verlauf der Abflussganglinie wird durch den periodischen Pumpbetrieb im Istzustand (Steuerung der Pumpe) in Hystem-Extran verursacht. Für die Steuerung wurde dieser Pumpbetrieb vergleichmäßiggt. Die Ganglinien zeigen dennoch deutlich die Abflussdämpfende Wirkung des neu aktivierten Kanalstauraumes. Der im hinteren Teil der Kurven nahezu konstant bei 400 l/s liegende Abfluss wird durch die Entleerung des Beckens a.d. Bega verursacht. Es werden maximal 400 l/s zur Kläranlage über den südlichen Sammler abgeleitet.

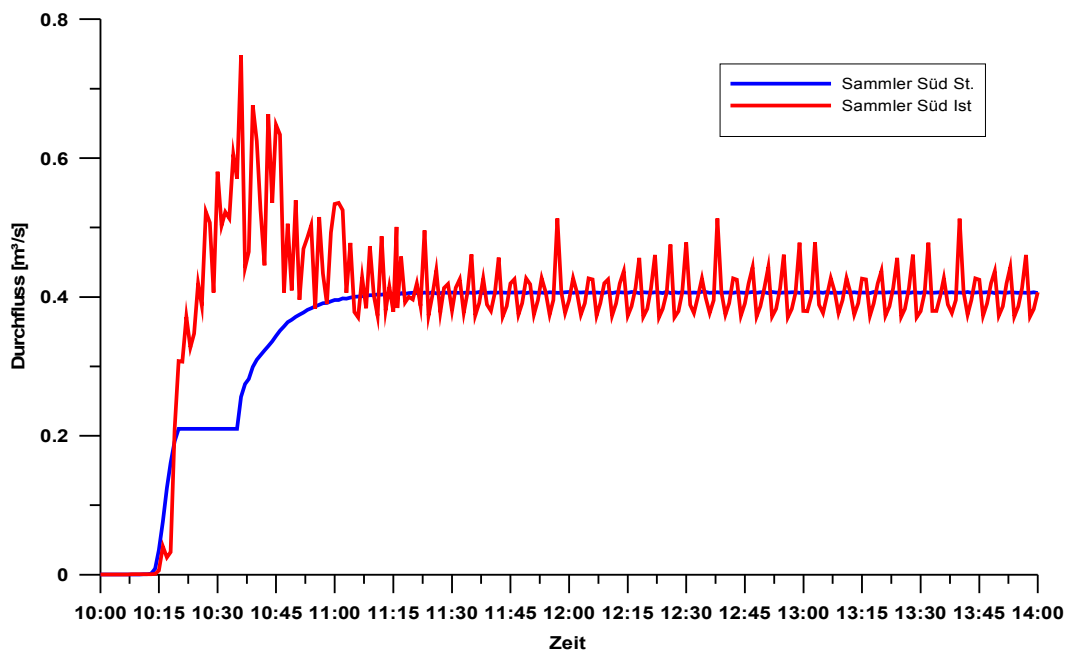


Abbildung 40: Abflussganglinie unterhalb der Steuerung am Sammler Süd, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

Die Abbildung 41 zeigt den Abfluss unterhalb des neuen Steuerungsorgans am Sammler Nord. Auch hier wird der schwankende Abfluss im Istzustand durch den alternierenden Pumpbetrieb am Sammler Süd hervorgerufen. Das Wasser wird von dort auf das Niveau des Sammlers Nord gehoben und zusammengeführt. Daher kommt es beim modelltechnischen Anspringen der Pumpe unter Umständen zu einer Fließumkehr im Auslauf des Sammlers Nord. Trotz dieser Einschränkung zeigt die Abbildung, dass auch der neu aktivierte Kanalstauraum im Sammler Nord eine dämpfende, abflussverzögernde Wirkung hat.

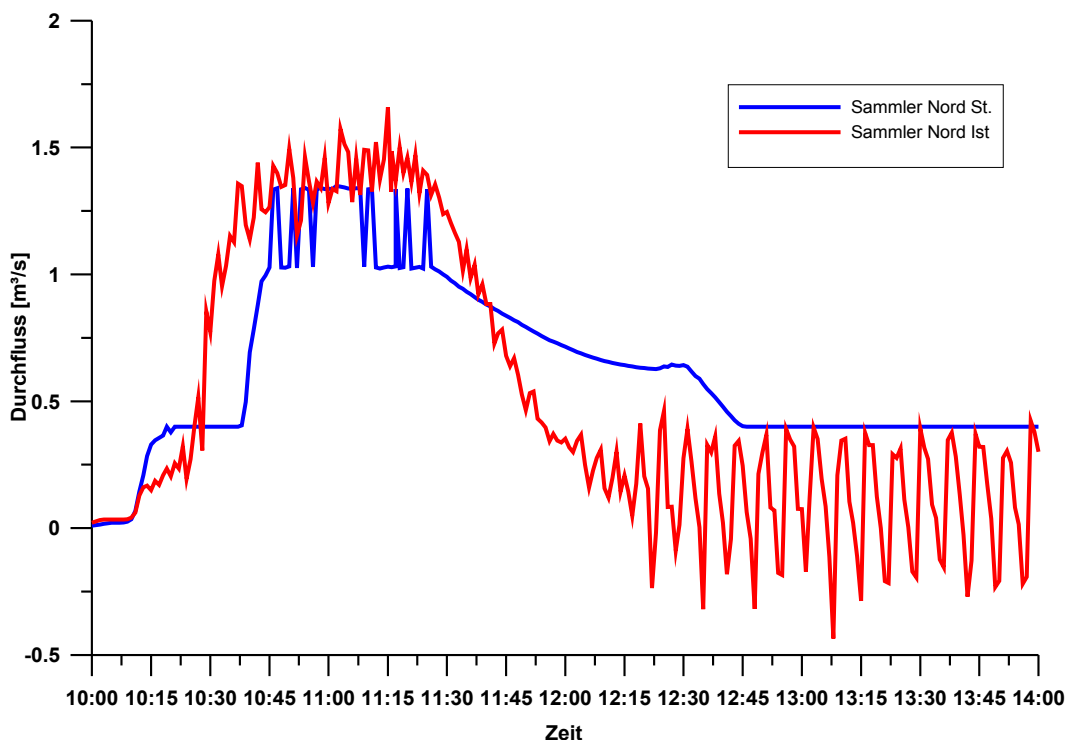


Abbildung 41: Abflussganglinie unterhalb des neuen Steuerungsorgans am Sammler Nord, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

Die Abbildung 42 gibt die Ganglinie für den Abschlag des Beckens an der Kläranlage in die Bega wieder. Der Abschlag wird durch die Steuermaßnahmen deutlich verzögert. Auch der Scheitel der Abschlagswelle wird von 1.300 l/s auf 1.000 l/s reduziert. Die Abschlagswelle ist nicht so hoch, dafür aber länger. Das Abschlagsvolumen reduziert sich von ca. 3.500 m³ auf ca. 3.000 m³.

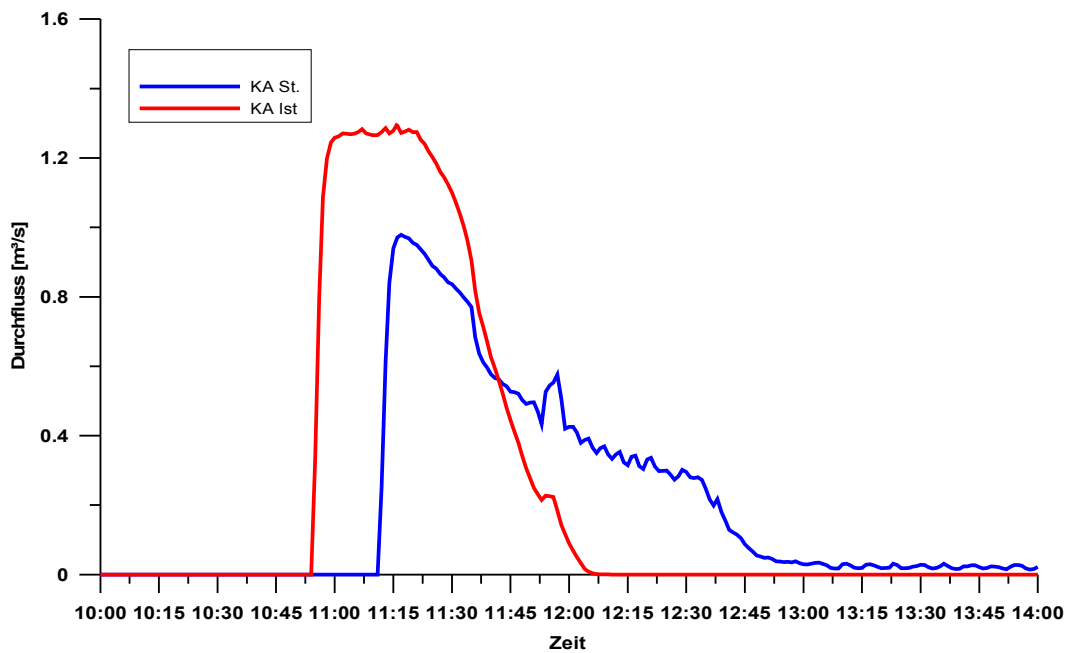


Abbildung 42: Abflussganglinie, Abschlag am Becken an der Kläranlage, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

4.5.3 Untersuchung weiterer Steuerungsvarianten

In Abstimmung mit der Bezirksregierung Detmold und der Stadt Lemgo wurden zwei weitere grundsätzliche Steuerungsvarianten untersucht.

Variante 1

Reduzierung des maximal in den aktivierten Stauräumen zulässigen Wasserstands auf die Höhenlage des niedrigsten Rohrscheitels im betreffenden Kanalbereich (sonst 0,5 m unter dem niedrigsten Kanaldeckel). Alle anderen Parameter wurden gleich belassen.

Variante 2

Beibehaltung der zulässigen Einstauhöhen und der anderen Steuerparameter wie für die optimierte Steuerung gewählt, bei einer Reduzierung des maximalen Kläranlagenzuflusses von derzeit dem dreifachen Trockenwetterzufluss (935 l/s) auf einen zweifachen Trockenwetterzufluss (620 l/s).

Für beide Varianten ergab sich, dass sie zu größeren Entlastungsvolumina führen. Die Abbildung 43 zeigt die Abflussganglinie für den Stauraum am Wall. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Stauraum kaum noch Auswirkungen auf die Abflusswelle hat.

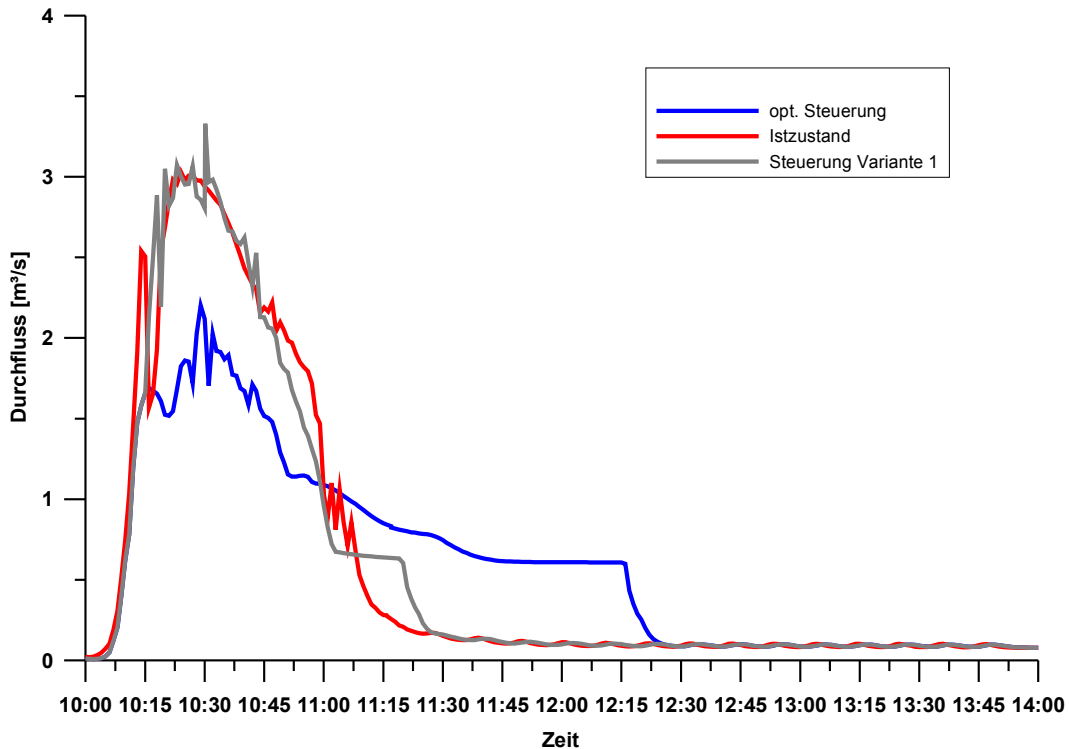


Abbildung 43: Abflussganglinie unterhalb des Steuerorgans am Stauraum Wall, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

Die Abbildung 44 zeigt die Abflussganglinien für den Abschlag am SK Wall. Hier wirkt sich durch die Reduzierung der Einstauhöhe am Stauraum Wall nur noch die Überleitung in den südlichen Kanalnetzbereich aus. Die Abschlagsmenge liegt damit deutlich höher als für die ursprüngliche Steuerung.

Die Abbildung 45 zeigt die Abschlagsganglinie am Becken an der Kläranlage. Die Steuerungsvariante 1 (Einstau bis Rohrscheitel) zeigt hier im Scheitel nur geringe Differenzen zur ursprünglichen Steuerung. Der Grund dafür liegt in den geringen Unterschieden zwischen den beiden Steuerungsstrategien für die Kanalstauräume Sammler Nord und Süd. Beide weisen nur ein sehr geringes Gefälle auf und liegen nicht sehr tief. Daher ist der Unterschied im Einstau nur sehr gering, da sich der maximal zulässige Wasserstand bei den Varianten kaum unterscheidet (Sammler Nord: Einstauwasserspiegel identisch, Sammler Süd: Einstauwasserspiegel bei Variante 1 0,17 m tiefer). Beim Stauraum am Wall, dort haben die Haltungen ein hohes Gefälle und sie liegen sehr tief, sind die Auswirkungen mit einer Differenz von 2,7 m deutlich größer.

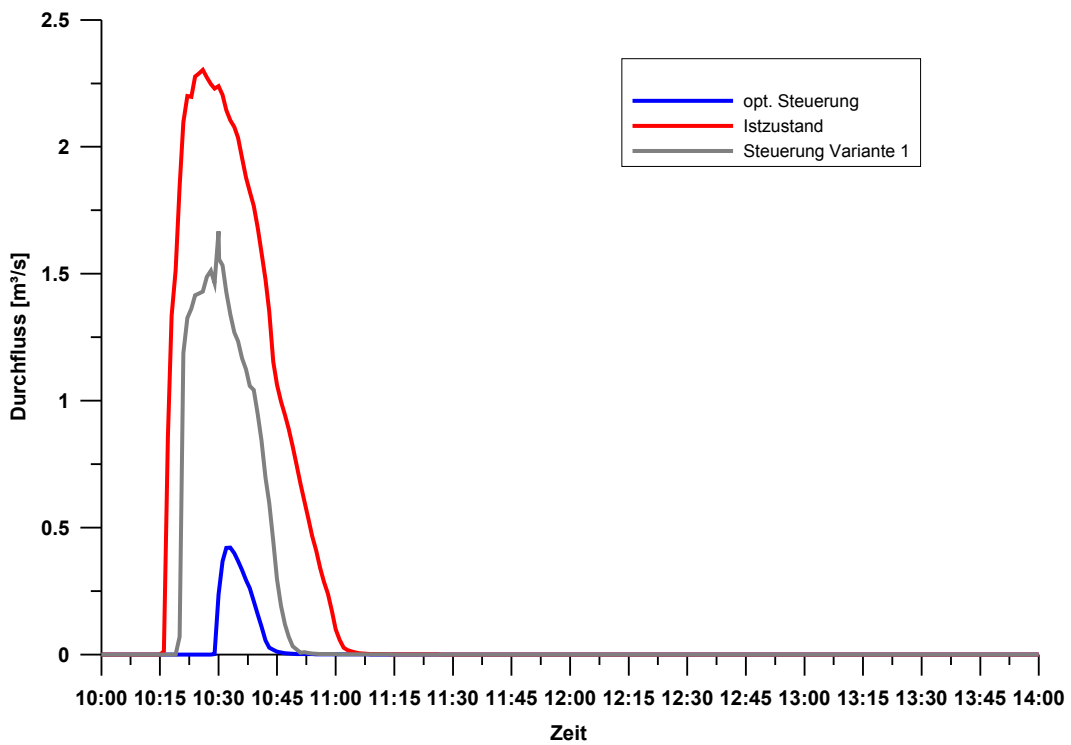


Abbildung 44: Abflussganglinien am Abschlag SK Wall, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

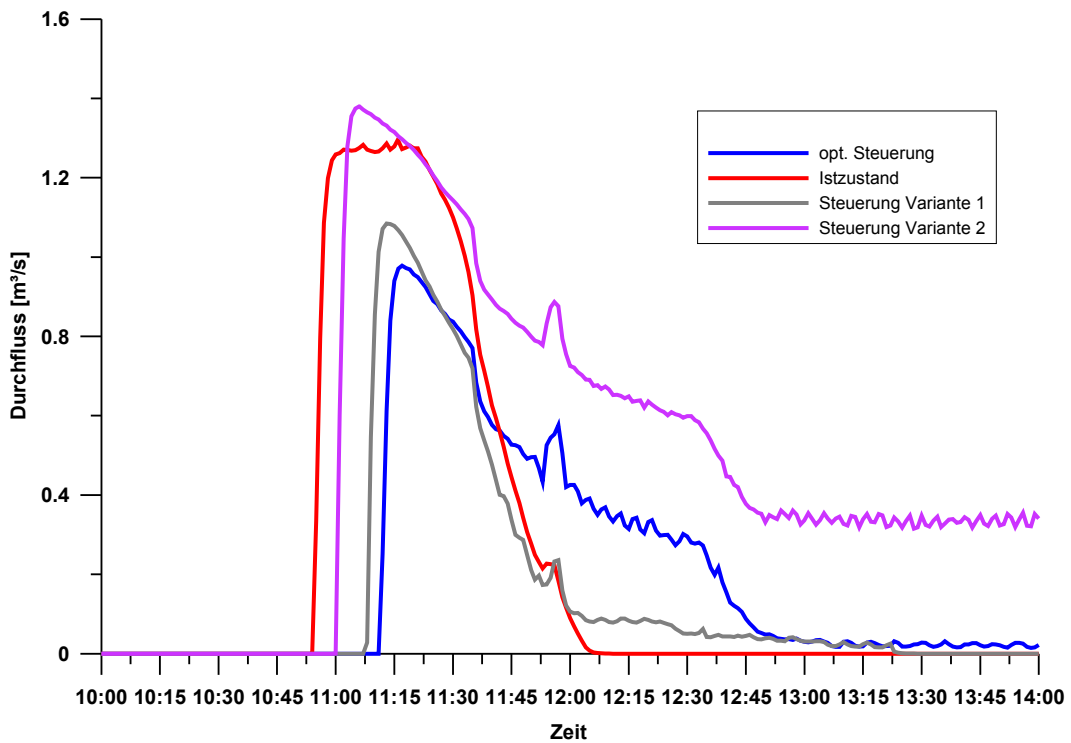


Abbildung 45: Abflussganglinie am Abschlag des Beckens Kläranlage, KOSTRA-Regen Dauer 30 Min, 22 mm

Im abfallenden Ast ergibt sich für die ursprüngliche Steuerung ein größerer Abschlag als bei Variante 1. Dies liegt an der höheren Weiterleitung zur Kläranlage aus dem Gesamtgebiet in der ursprünglichen Steuerung. Bei der Variante 1 werden Teile des Wassers vorher am SK Wall in den Alten Fluss abgeschlagen.

Die Absenkung des zulässigen Kläranlagenzuflusses (Variante 2) zeigt eine deutliche Wirkung. Dadurch erhöht sich die Abschlagswelle um die Differenz der Kläranlagenleistungsfähigkeit (ca. 300 l/s) zwischen der Steuerung und der Steuerung Variante 2. Dies führt neben der höheren Welle zu einem deutlich vergrößerten Abschlagsvolumen.

4.5.4 Ergebnisse der Seriensimulation

Bei der Optimierung wurde im ersten Schritt nur ein Einzelereignis betrachtet. Im nächsten Schritt wurden die Steuerregeln für eine Serie mit 26 Ereignissen aus den Jahren 2007 und 2008 angewendet. Die Regenereignisse wurden aus den Niederschlagsdaten der Stadt Detmold gewonnen. Es handelt sich dabei aufgrund der Kürze des betrachteten Zeitraums nicht um eine repräsentative Zeitreihe. Beide Jahre waren insgesamt sehr feucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich an allen betrachteten Abschlägen die Situation verbessert, indem eine geringere Abwassermenge in die Bega und den Alten Fluss eingeleitet wird.

Die Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse für die untersuchte Zeitreihe

Abschlag	Ist		Steuerung	
	Anzahl	abgeschl. Volumen	Anzahl	abgeschl. Volumen
Pagenhelle	24	63.400 m ³	21	34.300 m ³
SK-Wall	18	31.000 m ³	6	6.700 m ³
Becken a.d. Bega	12	109.000 m ³	12	104.300 m ³
Becken Kläranlage	25	202.000 m ³	12	169.000 m ³

Tabelle 10: Ergebnisse der Simulationen für die Serie mit 26 Ereignissen

Am Abschlag Pagenhelle reduziert sich das Abschlagvolumen (Summe über alle Ereignisse der gesamten Serie) um nahezu die Hälfte. Dies spricht dafür, dass in der Serie einige sehr langgezogene Ereignisse enthalten waren, bei denen sich die Erhöhung des Drosselabflusses wesentlich deutlicher auswirkt als bei dem zuvor betrachteten kurzen Starkregen (siehe Kapitel 4.5.2).

Am SK Wall reduziert sich das Abschlagvolumen noch deutlicher – nämlich um ca. 80 %. Hier zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie für den kurzen Starkregen (siehe Kapitel 4.5.2). Erwartungsgemäß treten mit der Steuerung insgesamt deutlich weniger Abschlagsereignisse auf (Reduzierung von 18 auf 6 Ereignisse).

Beim Becken a.d. Bega bleiben die Verhältnisse nahezu identisch. Damit zeigt sich hier ein ähnliches Ergebnis wie bei der Betrachtung des kurzen Starkregenereignisses (siehe Kapitel 4.5.2). Dies ist ein Erfolg für die Steuerstrategie, da wesentlich größere Wassermengen in den betreffenden Teil des Kanalnetzes umgeleitet werden. Das das Becken bei der untersuchten Serie sechs Mal in zwei Jahren abschlägt zeigt auch das es sich um zwei sehr feuchte Jahre gehandelt hat. Im Schnitt schlägt dieses Becken im Istzustand eher ein bis zwei Mal im Jahr ab. Das Ergebnis zeigt deutlich, dass das Überleiten in den südlichen Netzteil nicht zu einer Verschlechterung der Entlastungssituation an der Bega führt.

Für das Becken an der Kläranlage ergibt sich eine deutliche Reduzierung der Entlastungshäufigkeit (von 25 auf 12 Mal) und eine Reduzierung der Entlastungsmenge um ca. 15 %.

Die Überleitung in der Grevenmarschstraße führte praktisch nicht zu Verbesserungen im System, da sie unter den gegebenen Randbedingungen nur sehr selten, und dann auch nur sehr kurz, aktiv ist.

4.6 Auswahl der Steuerregeln

In einem Abstimmungstermin wurden den Vertretern der Stadt Lemgo und der Bezirksregierung die Ergebnisse der Simulationen vorgestellt. Ziel des Termins war die gemeinsame Festlegung der endgültig für die weiteren Simulationen (insbesondere die Gütesimulationen) anzuwendenden Steuerregeln.

Als Ergebnis der Besprechung wurde festgelegt, dass die optimierte Steuerung weiter untersucht werden sollte. Als einzige Einschränkung dazu sollte die Überleitung Grevenmarschstraße nicht weiter verfolgt werden. Gegen diese Überleitung spricht die geringe Wirksamkeit, die den notwendigen Aufwand für den Bau und den Betrieb der Überleitung nicht rechtfertigt.

5 Gütemodellierung

5.1 Untersuchte Systemzustände

Nach dem Arbeitsprogramm des Projekts war vorgesehen, nur die Steuerungsvarianten mit Hystem-Extran-Güte/Control und dem Gewässergütemodell neu zu simulieren.

Dabei wurde davon ausgegangen, dass das neu aufgestellte Hystem-Extran Modell mit dem bisherigen KOSIM-Modell vergleichbare Ergebnisse liefert. Das hätte zur Folge gehabt, dass der gleiche Netzzustand wie in der vorherigen Projektphase abgebildet worden wäre. Da die Stadt Lemgo weitgehend parallel zum Forschungsprojekt den GEP hat neu aufstellen lassen (dieser ist zurzeit noch in Bearbeitung) bot sich dagegen die Gelegenheit, den aktuellen Netzzustand in Verbindung mit einer sehr viel besseren Datengrundlage abzubilden. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, für die Ergebnisvergleiche auch die Simulationen für den Istzustand und den Vergleichszustand (d. h. mit Retentionsbodenfiltern) aus der vorherigen Projektphase neu durchzuführen. Da insbesondere mit dem neu aufgestellten Datensatz für das Kanalnetzmodell deutlich realitätsnähere Ergebnisse erzielt wurden, wurde dieser Weg gewählt. Auch wenn dies zur Folge hatte, dass letztlich nur eine Steuerungsvariante mit dem Gütemodell untersucht wurde. Die vorher angestellten Variantenuntersuchungen zeigten aber, dass das ausgewählte Steuerungskonzept grundsätzlich umsetzbar und wirksam ist. Weitere Varianten, deren Untersuchung lohnend erschienen wäre, waren nicht erkennbar.

Die Abbildung 46 zeigt einen Vergleich der aktuellen Ergebnisse der Gewässergüteberechnung für die Station 18,0 der Bega mit den Ergebnissen der Projektphase III (Variante 3, siehe Kapitel 1.2.8). Oberhalb dieser Gewässerstation münden einige Entlastungen in die Bega, die modelltechnisch zu einer gemeinsamen Entlastung zusammengefasst wurden.

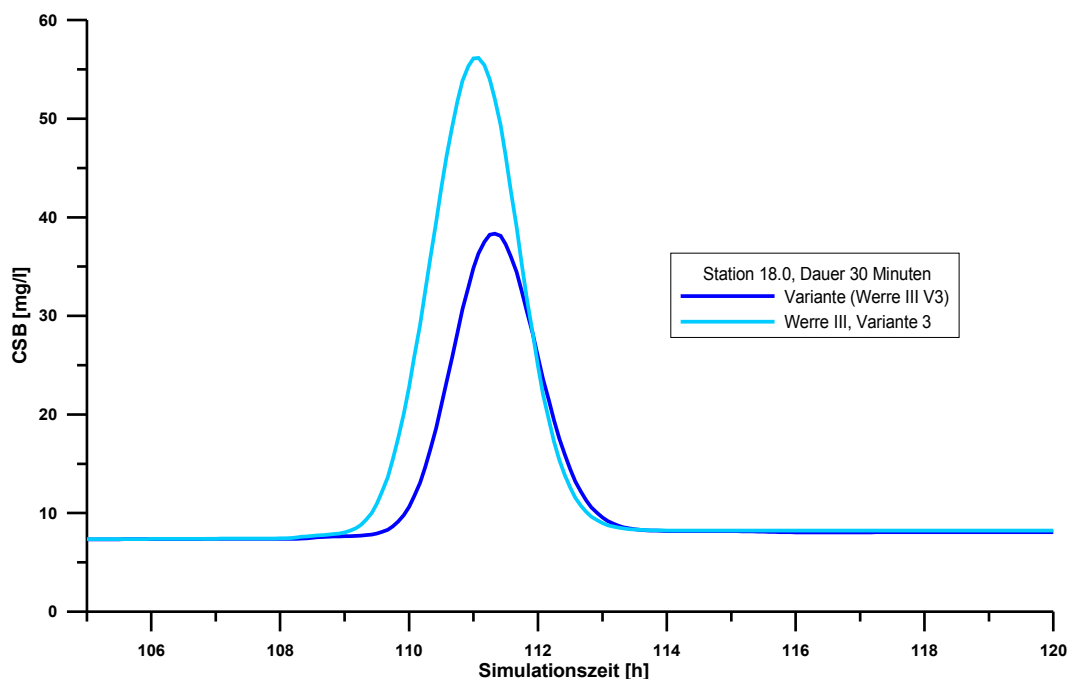


Abbildung 46: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der Projektphase III, Station 18,0

An den Ganglinien ist erkennbar, dass die Ergebnisse deutlich voneinander abweichen. Um die Vergleichbarkeit herzustellen, wurden daher neue Berechnungen mit Modell Hystem-Extran-Güte auch für den Istzustand und die Variante 3 entsprechend der Projektphase III durchgeführt.

In der Projektphase III wurden unterschiedliche Varianten mit Retentionsbodenfiltern für die Stadt Lemgo untersucht. Dabei wurde davon ausgegangen, dass an zwei Standorten Retentionsbodenfilter gebaut werden könnten. Der Retentionsbodenfilter RBF Lemgo I wurde an der Kläranlage Lemgo angeordnet. Für den zweiten Standort wurden zwei unterschiedliche Varianten untersucht. Der Standort wurde in der Nähe der Einleitung des RÜB Pagenhelle (Bezeichnung nach [8] B04) angenommen. Für den RBF Lemgo IIa wurden als Zufluss für den Bodenfilter nur der Überlauf des Stauraumkanals Pagenhelle (Bezeichnung nach [8] B03) und der Überlauf des RÜB Pagenhelle vorgesehen. Da beide Überläufe über dieselbe Einleitungsstelle in die Bega entlasten, ist dies naheliegend. Für eine zweite Variante wurde an dieser Stelle der Retentionsbodenfilter (RBF Lemgo IIb) erweitert, sodass weitere Entlastungen für den Zufluss zusammengefasst wurden. Es handelte sich dabei zusätzlich zu den für den RBF Lemgo IIa vorgesehenen Einleitungen um den Überlauf der Bauwerke RÜB Finkenpforte, RÜB Geschwister-Scholl-Straße, RÜ Siebenlinden, RÜ Bismarckstraße, RÜ Bruchweg, RÜ Gräferstraß, RÜ Vogelsang und den RÜ Heldmannskamp. Die Einleitungsstellen der Entlastungen dieser Bauwerke liegen über einen Abschnitt von ca. 1.000 m an der Bega verstreut. Zudem münden die Entlastungen von beiden Seiten in die Bega. Der bauliche Aufwand, um diese Entlastungen in einen gemeinsamen Bodenfilter einzuleiten, wäre daher erheblich (dies wurde auch in [8] schon so benannt). Neben dem Flächenbedarf für den Retentionsbodenfilter würde dies bedeuten, dass ein Sammler entlang der Bega gebaut werden müsste und das einige Zuleitungen unter der Bega gedükert werden müssten. Für die Befüllung des Bodenfilters wären für die gedükerten Zuflüsse leistungsfähige Pumpen zu installieren. Da eine Realisierung dieser Variante wirtschaftlich nicht sinnvoll erscheint, wurde sie nicht weiter verfolgt.

In der Projektphase III wurde für die Varianten vorausgesetzt, dass die Drosselabflüsse der Bauwerke pauschal verdoppelt werden können. Diese Annahme wurde vor dem Hintergrund getroffen, dass Entlastungsschwerpunkte geschaffen werden sollten. Bei den aktuellen Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass diese Erhöhung der Drosselabflüsse nicht realisierbar ist und das dies zum Teil auch kontraproduktiv wirken würde. So zeigte sich, dass die Erhöhung des Drosselabflusses vom RÜB Becken an der Bega nicht zweckmäßig wäre, da das Becken in der heutigen Situation nicht ausgelastet wird. Eine Erhöhung der Drosselleistung des Stauraumkanals Wall ist ebenfalls nicht sinnvoll, da der Drosselabfluss hier schon sehr hoch ist und eine Verdoppelung zu einer

Überlastung der Haltungen zur Kläranlage hin führen würde. Aus den genannten Gründen wurde auf eine Erhöhung der Drosselleistungen verzichtet.

Für die Bemessung der Retentionsbodenfilter wurden in [8] unterschiedliche Überlaufhäufigkeiten ($n = 2/\text{Jahr}$ und $n = 6/\text{Jahr}$) zugrunde gelegt. Für die vorliegenden Betrachtungen wurden die Bemessungsergebnisse für $n = 6$ übernommen. Für den RBF Lemgo I spielt dies nur eine geringe Rolle, da dieser Filter aufgrund der jährlichen Beschickungshöhe je Quadratmeter Fläche ein Volumen von 23.500 m^3 (inkl. des nutzbaren Porenvolumens des Filters) benötigt. Mit diesem Volumen ergab sich in [8] eine Überlaufhäufigkeit von $n = 2,4$. Damit entsprechen die Daten der Retentionsbodenfilter für Lemgo der Variante 3 nach [8].

Auf eine Anpassung der Bemessung der Retentionsbodenfilter wurde verzichtet, da dies den Rahmen der Projektbearbeitung überschritten hätte.

Tabelle 11 zeigt die Kenndaten der Retentionsbodenfilter für die untersuchte Variante.

Bezeichnung	Standort	Volumen inkl. nutzbares Porenvolumen	Drosselabfluss
RBF Lemgo I	Kläranlage	23.500 m ³	400 l/s
RBF Lemgo IIa	Pagenhelle (Brake)	3.100 m ³	50 l/s

Tabelle 11: Daten der untersuchten Retentionsbodenfilter

Die Untersuchungen wurden entsprechend der Vorgehensweise in der Projektphase III für zwei Regenereignisse durchgeführt (siehe Kapitel):

- Ereignis E1: Niederschlag mit der Dauer $D = 60 \text{ min}$ und der Häufigkeit $n = 1$
- Ereignis E2: Niederschlag mit der Dauer $D = 30 \text{ min}$ und der Häufigkeit $n = 1$

5.2 Gütemodellierung für das Kanalnetz

Die Gütemodellierung erfolgte, wie auch in den vorherigen Projektphasen I bis III, in zwei Stufen. In den Projektphasen I bis III wurden die Gütemodellierungen für das Kanalnetz jeweils mit KOSIM durchgeführt. Im aktuellen Projekt kam dafür Hystem-Extran mit einer Programmerweiterung zur Gütemodellierung (Hystem-Extran-Güte) zum Einsatz. Die Kanalnetzsteuerung wurde dabei in der Kombination Hystem-Extran-Güte/CONTROL simuliert.

Hystem-Extran-Güte ist ein detailliertes Schmutzfrachtmodell und basiert auf dem hydrodynamischen Kanalnetzmodell Extran. Neben den für eine rein mengenorientierte Berechnung notwendigen Angaben sind für eine Schmutzfrachtberechnung zusätzlich die Konzentrationen der gewünschten Inhaltsstoffe als Eingabe erforderlich.

Für diese Inhaltsstoffe sind die entsprechenden Konzentrationen sowohl für den Trockenwetterzufluss als auch für den Regenwasserzufluss erforderlich. Extran-Güte berücksichtigt bei der Berechnung unterschiedliche Konzentrationen für das häusliche und gewerbliche Abwasser und für das dem Kanalnetz von der Oberfläche zufließende Niederschlagswasser. Beide Konzentrationen werden während der Simulation als konstant angenommen. Für einzelne Einleitungen können darüber hinaus Zufluss- und Konzentrationsganglinien berücksichtigt werden.

Die Berechnung der Schmutzfrachten im Kanalnetz erfolgt mit Hilfe der eindimensionalen Konvektions-Dispersions-Massentransport Differentialgleichung.

Die örtliche und zeitschrittweise Unterteilung entspricht den Ansätzen des Modells Extran. Dies bedeutet, dass sich das Kanalnetz entsprechend den Haltungen in eine Anzahl von Kanalabschnitten, in denen eine vollständige Durchmischung der diesem Abschnitt zufließenden Schmutzfrachten stattfindet. Die zufließenden Schmutzfrachten setzen sich dabei zusammen aus den Zu- und Abflüssen der oberhalb bzw. unterhalb angeschlossenen Haltungen und den äußeren Zuflüssen wie dem Regenwasserzufluss von der Oberfläche. Die dem Abschnitt zu- und abfließenden Frachten werden zeitschrittweise entsprechend der gewählten zeitlichen Diskretisierung bilanziert und die neue Konzentration in den einzelnen Berechnungsabschnitten aus den Frachten und Wassermengen ermittelt (Lösung der Differentialgleichung). Entsprechend den ermittelten Zu- und Abflüssen erfolgt dann die örtliche Verteilung der Frachten bzw. Konzentrationen.

Die berechneten Ergebnisse werden sowohl als Ganglinien in ihrer zeitlichen Verteilung ausgegeben, als auch in den Ergebnislisten als Konzentrationen, Frachten und als Summenwerte (z.B. der Entlastungsfrachten) protokolliert.

Die verwendeten Belastungskonzentrationen sind in den Kapiteln 3.6.1 (Schmutzwasser) und 3.6.2 (Regenwasser) dargestellt.

Als Ergebnis der Modellierung mit Hystem-Extran-Güte\CONTROL wurden Ganglinien des Abflusses und der Konzentrationen der betrachteten Stoffe erzeugt. Diese Ganglinien wurden in mehreren Bearbeitungsschritten in eine für die Verwendung als Randbedingung für das DWA-Gewässergütemodell geeignete Form gebracht.

Für die beiden untersuchten Regenereignisse zeigt die Tabelle 12 einige wesentliche Ergebnisse der Kanalnetzberechnung für die folgenden Systemzustände:

- Istzustand
- optimierte Steuerung
- Retentionsbodenfilter (Variante 3 Projektphase III, siehe Kapitel 1.2.8)

Bauwerk	Istzustand		optimierte Steuerung		Retentionsbodenfilter	
	E1, 60 Min., Jährlichkeit 1	E2, 30 Min., Jährlichkeit 1	E1, 60 Min., Jährlichkeit 1	E2, 30 Min., Jährlichkeit 1	E1, 60 Min., Jährlichkeit 1	E2, 30 Min., Jährlichkeit 1
SK Wall	Entlastung	Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung	Entlastung	Entlastung
Becken a.d. Bega	keine Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung
Becken a.d. Kläranlage	Entl. 3.900 m ³ Spitze 1,3 m ³ /s	Entl. 2.800 m ³ Spitze 1,1 m ³ /s	Entl. 500 m ³ Spitze 0,4 m ³ /s	keine Entlastung	Einleitung in RBF I	Einleitung in RBF I
Abschlag Pagenhelle	Entlastung	Entlastung	reduzierte Entlastung	reduzierte Entlastung	Einleitung in RBF IIa	Einleitung in RBF IIa
Retentionsbodenfilter I (Kläranlage)	-	-	-	-	keine Entlastung	keine Entlastung
Retentionsbodenfilter IIa (Pagenhelle)	-	-	-	-	keine Entlastung	keine Entlastung

Tabelle 12: Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Kanalnetzrechnung für die Ereignisse E1 und E2 (grün hinterlegt: Verbesserungen gegenüber dem Istzustand)

5.3 Ergebnisse der Gütemodellierung für die Bega

Die Berechnungen der Gewässergüte wurden mit dem in den vorherigen Projektphasen aufgestellten Modelldatensatz für die Bega durchgeführt (siehe Kapitel 1.2.5 und 1.2.9). Im folgenden Text werden die Ergebnisse der Gewässergütemodellierung der aktuellen Untersuchung dargestellt. Hierbei wird vorwiegend auf das Regenereignis E2 Bezug genommen. Die Ganglinien und Längsschnitte werden im Wesentlichen für dieses Ereignis und dort vollständig nur für den Parameter Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) dargestellt. Im Anhang sind die Ergebnisse auch für das Ereignis E1 und die weiteren Parameter abgebildet.

Sauerstoff

Bei der Bega handelt es sich um ein prinzipiell gut belüftetes Gewässer (bis auf die Stauhaltungen). Das spiegelt sich darin wieder, dass trotz der Einleitungen keine deutlichen Sauerstoffdefizite (Sauerstoff unter 4 mg/l) vorliegen. Der in Abbildung 47 dargestellte Längsschnitt der minimalen Sauerstoffkonzentration zeigt aber deutlich den Einfluss der Stauhaltungen. Gerade der Stau bei Station 17.5 führt zu einer deutlichen Sauerstoffzehrung, die erst mit der Belüftung durch den Überfall am Stauwehr endet.

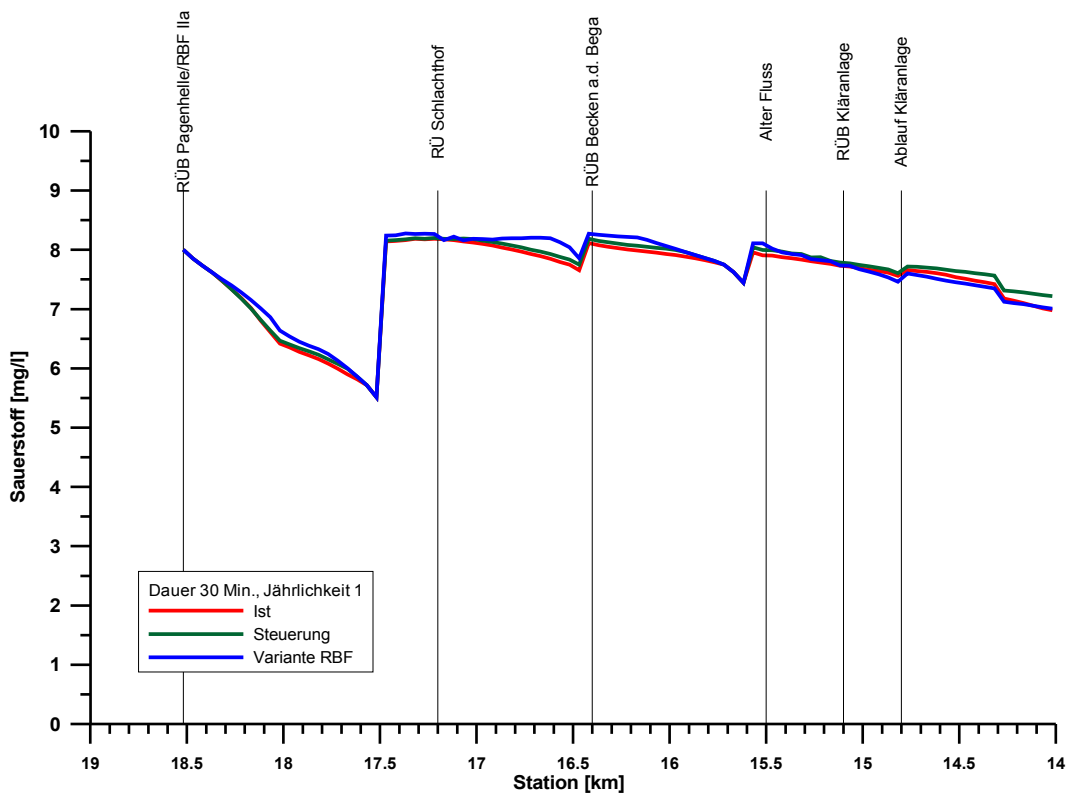


Abbildung 47: Längsschnitt minimaler Sauerstoff, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1

Chemischer Sauerstoffbedarf

Der in Abbildung 48 dargestellte Längsschnitt für die maximale während des gesamten Simulationszeitraums aufgetretene CSB-Konzentration zeigt, dass der Retentionsbodenfilter II zu einer deutlichen Reduzierung der maximalen Konzentration dieses Parameters führt. Die Darstellung sagt aber nichts über die Dauer der erhöhten Konzentration aus. Hierzu liefern die folgenden Abbildungen weitere Informationen.

Die minimale CSB-Konzentration liegt mit ca. 8 mg/l deutlich unter dem AGA-Empfehlungswert von 20 mg/l. Durch die Einleitungen wird dieser Wert überall deutlich überschritten.

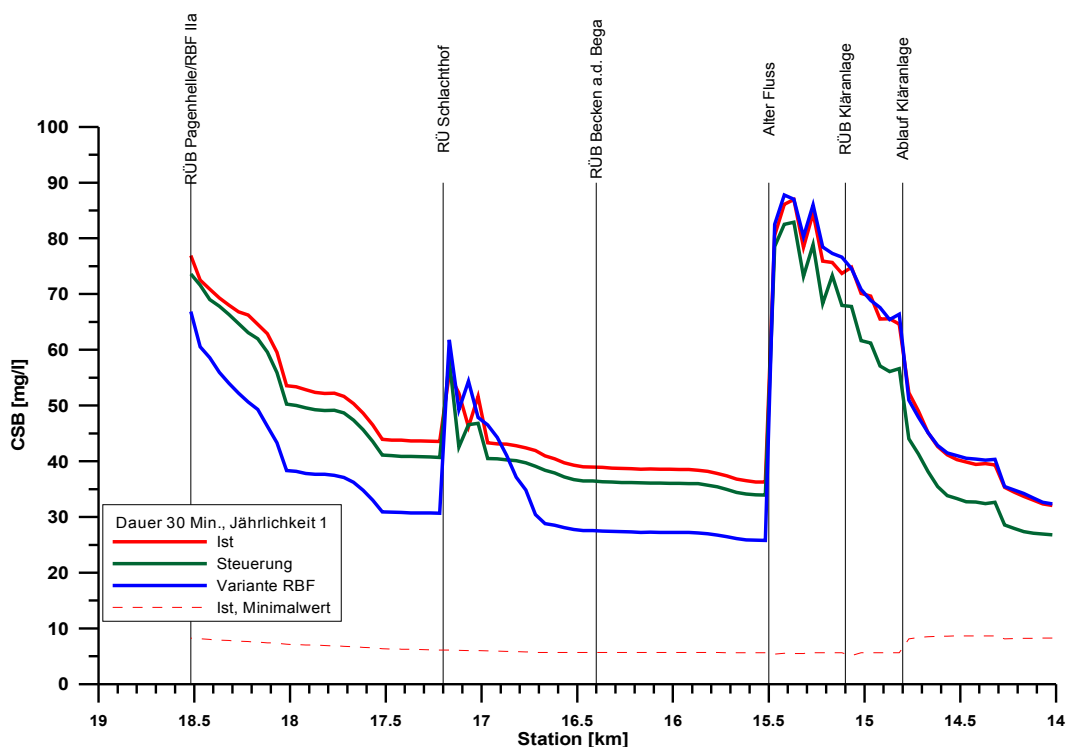


Abbildung 48: Längsschnitt maximale Konzentration CSB, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1

Die Abbildungen 49 und 50 zeigen die Konzentrationsganglinie für den Parameter CSB an den Stationen 18.0 – unterhalb der Einleitungen im Bereich Pagenhelle – und 14.3 – unterhalb der Einleitung der Kläranlage. Die an Station 18.0 erkennbare Reduzierung in der CSB-Konzentration für die Steuerung wird durch die Erhöhung des Drosselabflusses am Bauwerk Pagenhelle hervorgerufen. An dieser Stelle zeigt die Variante mit dem Retentionsbodenfilter die besten Werte. Da hier der Abschlag Pagenhelle komplett vom Retentionsbodenfilter IIa aufgenommen wird, reduziert sich dort die CSB-Konzentration deutlich. Die verbleibende CSB-Fracht wird durch die weiteren Einleitungen oberhalb des Betrachtungspunktes verursacht.

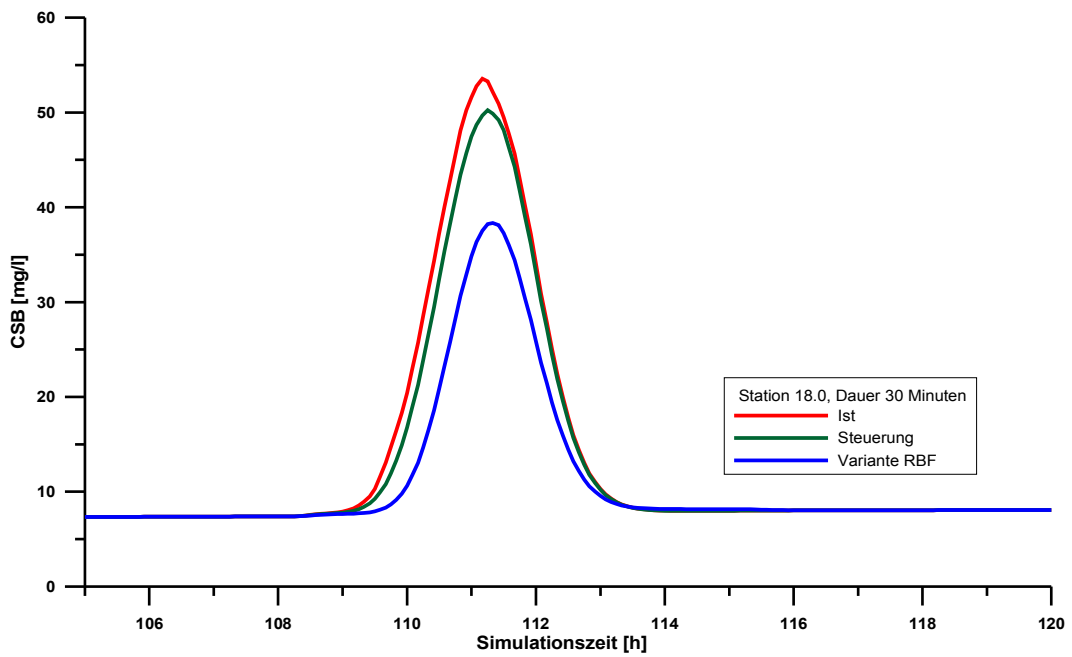


Abbildung 49: Station 18.0, Konzentrationsganglinie Parameter CSB, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1

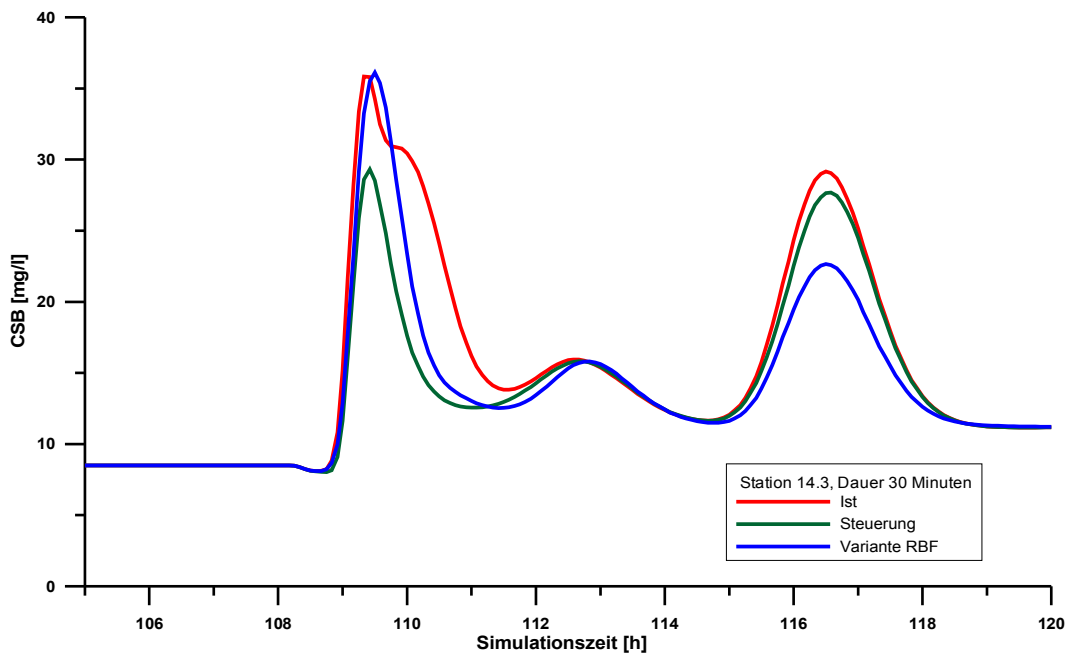


Abbildung 50: Station 14.3, Konzentrationsganglinie Parameter CSB, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1

Die Konzentrationspeaks bei Station 14,3 im hinteren Bereich des Simulationsbereichs (116 Stunden und später) zeigen die weiter transportierten Schmutzfrachten der Einleitungen im Umfeld der Einleitung Pagenhelle. Durch Vermischungsvorgänge sinkt die Konzentration und die Welle wird breiter. Die mittleren, deutlich kleineren, Peaks werden durch die Einleitung RÜ Schlachthof verursacht. Bei den ersten Peaks überlagern sich die Einleitungen vom Alten Fluss und vom Becken an der Kläranlage. Die Spitze der Peaks wird durch die Einleitung des Alten Flusses verursacht. Hier zeigen der Istzustand und die Variante Retentionsbodenfilter einen identischen Peak. Die Steuerungsvariante zeigt einen deutlich geringeren Peak, da der SK Wall hier nicht in den Alten Fluss abschlägt.

Die rote Linie des Istzustands zeigt im hinteren Teil der ersten Welle einen Buckel. Dieser wird durch das Abschlagen des Beckens an der Kläranlage verursacht. Da der Retentionsbodenfilter I bei der Bodenfiltervariante nicht abschlägt, tritt dieser Buckel dort nicht auf. Bei der Steuerungsvariante kommt es am Becken an der Kläranlage nicht zu einem Abschlag ins Gewässer. Daher ist bei der Ganglinie dort ebenfalls keine erhöhte Konzentration zu finden.

Die Abbildung 51 stellt die Frachtganglinie des Parameters CSB für die Station 14.3 der Bega dar. Der Verlauf entspricht weitgehend dem Konzentrationsverlauf.

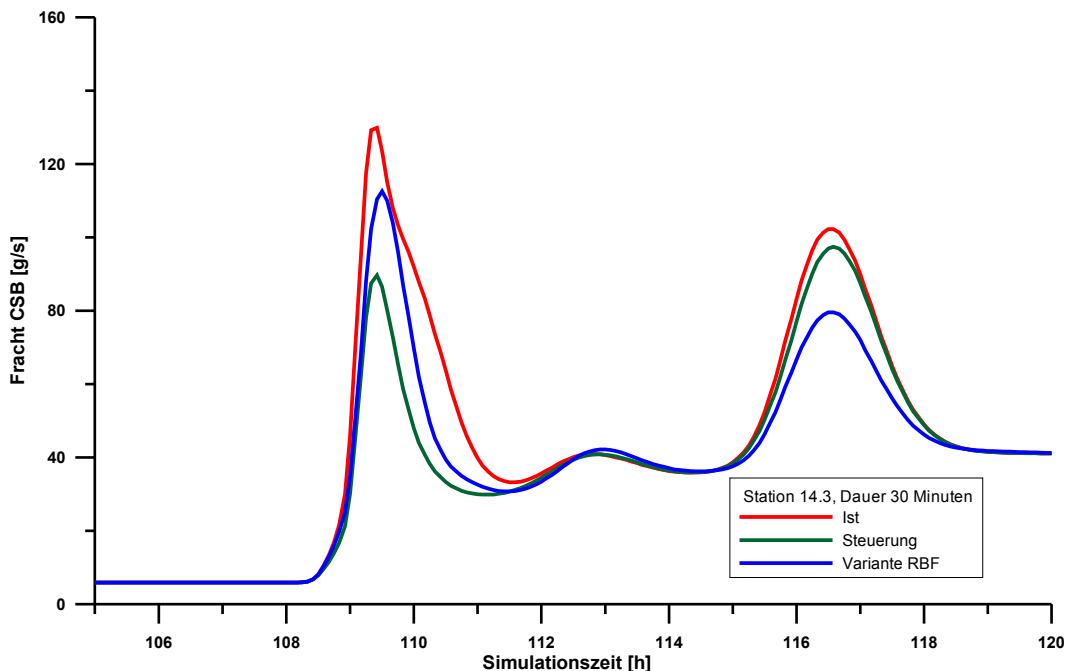


Abbildung 51: Station 14.3, Frachtganglinie Parameter CSB, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1

Die Abbildung 52 zeigt einen Längsschnitt mit der Überschreitungszeit für den AGA-Maximalwert von 20 mg CSB/l.

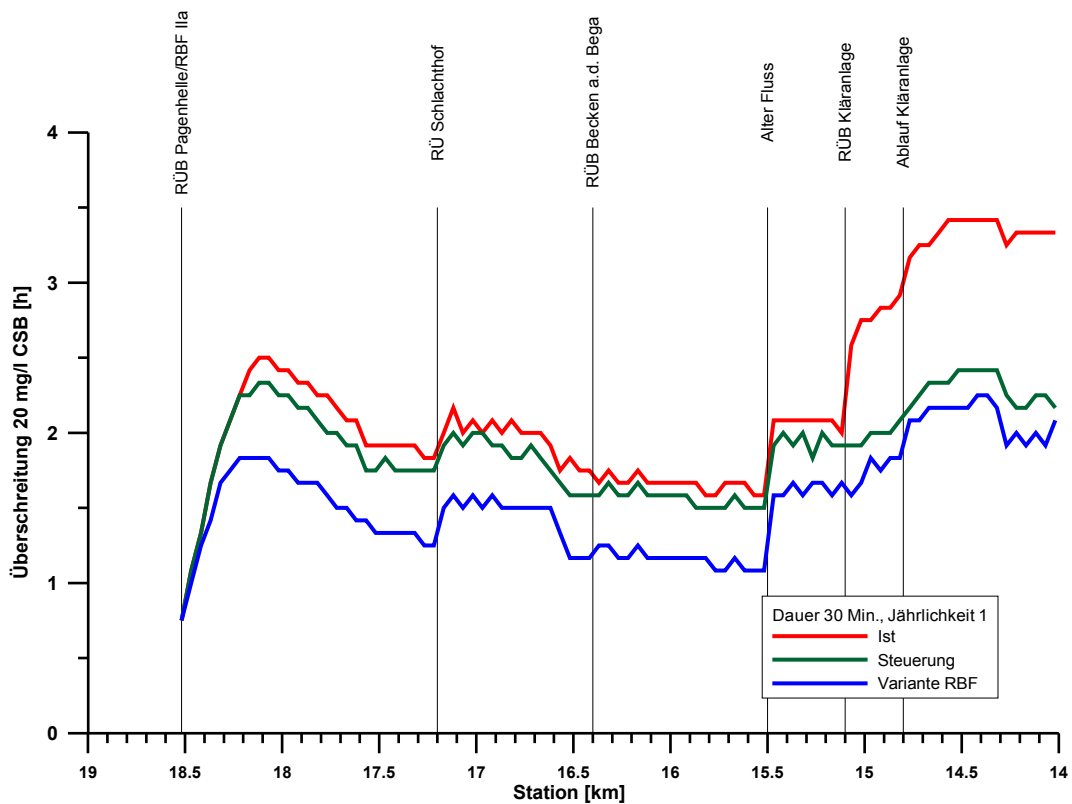


Abbildung 52: Längsschnitt Überschreitungsdauer 20 mg/l CSB, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1

Der Retentionsbodenfilter Ila reduziert die Überschreitungsdauer für den CSB für den Abschnitt bis zur Einleitung des Alten Flusses deutlich. In diesem Bereich ist die Steuerung nicht so wirksam, da hier lediglich der Drosselabfluss am Abschlag Pagenhelle erhöht wurde. Ab der Einleitung des Alten Flusses liegen die Steuerung und die Retentionsbodenfiltervariante aber nahezu gleichauf. Hier kommt zum Tragen, dass bei der Steuerungsvariante der SK Wall nicht in den Alten Fluss abschlägt. Da bei beiden Varianten kein Abschlag am Becken an der Kläranlage auftritt, sind die beiden Varianten in diesem Abschnitt im Grundsatz gleichwertig.

Ammonium

Ammonium ist für ein Gewässer an sich relativ unkritisch. Problematisch ist hingegen, dass sich Ammonium im Wasser in einem Gleichgewichtszustand mit dem fischgiftigen Ammoniak befindet. Bei niedriger Temperatur und niedrigem pH-Wert liegt im Wasser nahezu nur Ammonium vor. Mit steigender Temperatur und steigendem pH-Wert verschiebt sich das Verhältnis hin zum Ammoniak.

In den Abbildungen 53 und 54 sind die Konzentrationsganglinie und der Längsschnitt der maximalen Konzentration für das Ammonium dargestellt.

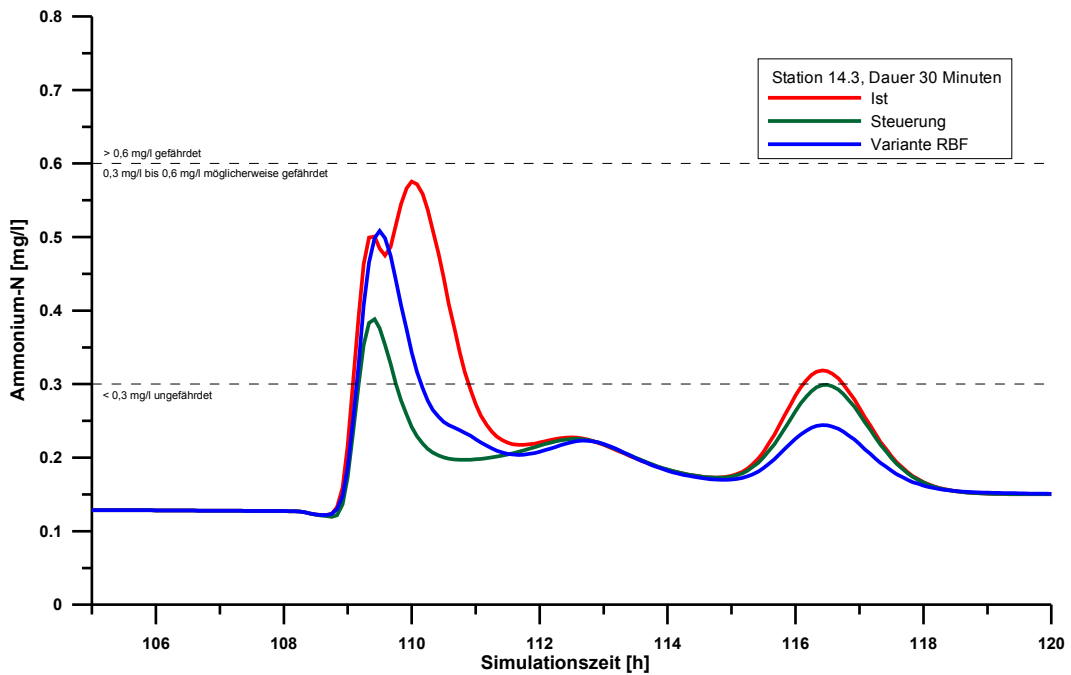


Abbildung 53: Station 14.3, Konzentrationsganglinie Parameter Ammonium-N, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1 (Grenzwerte nach [13])

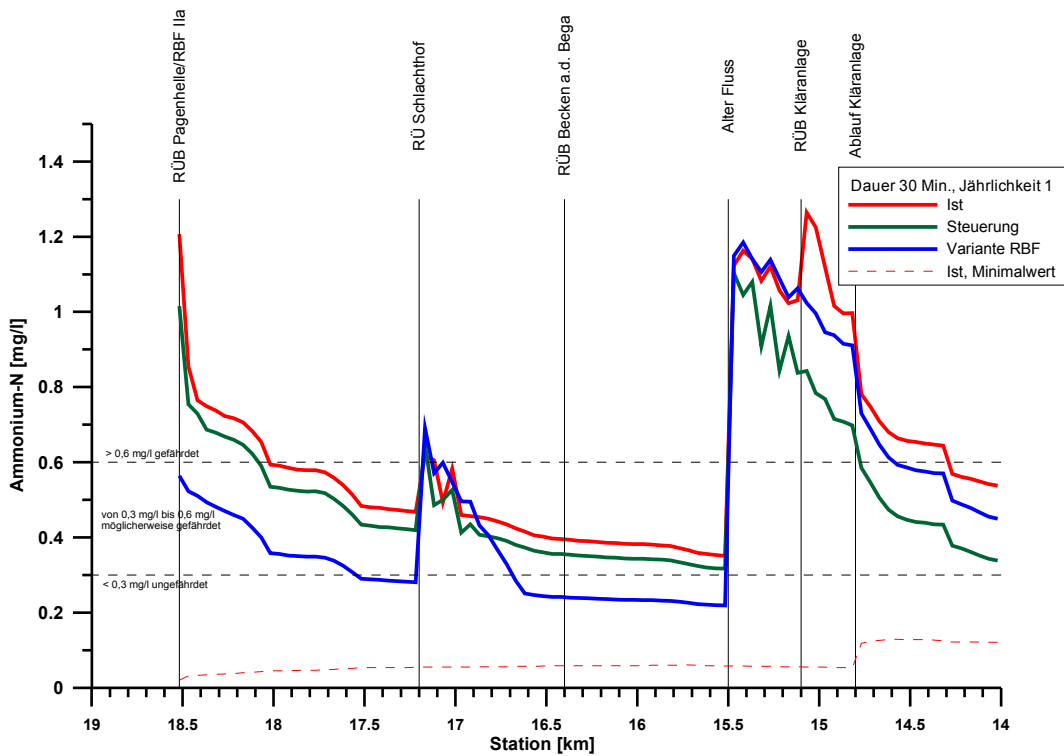


Abbildung 54: Längsschnitt maximale Konzentration Ammonium-N, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1 (Grenzwerte nach [13])

Der Verlauf der Linien ähnelt dem Verlauf für den CSB und die zum CSB getroffenen Aussagen gelten auch für das Ammonium-N.

Der Vergleich mit den Grenzwerten aus [13] ergibt zumindest abschnittsweise unterhalb der größeren Einleitungen eine Gefährdung. Da der pH-Wert der Bega selten sehr hoch ist, liegt dennoch keine größere Gefahr der Ammoniakbildung vor. Dies wäre bei erhöhten Algenaktivitäten der Fall, die bei der Bega aber nicht zu erwarten sind.

Nitrat

Nitrat wird durch die Einleitungen nur in geringem Maß in die Bega eingetragen. Das Regenwasser besitzt einen Nitratgehalt, der geringer ist als der Nitratgehalt der Bega. Regenwasser wirkt an den Einleitungen also bezogen auf den Nitratgehalt eher verdünnend. Dies ist an der Konzentrationsganglinie für die Station 14,3 und an dem Längsschnitt der maximalen Nitratkonzentration gut zu erkennen, die auf den Abbildungen 55 und 56 dargestellt sind.

Abwasser enthält kaum Nitrat. Das Abwasser enthält mit seinen hohen Frachten an organischem Stickstoff und an Ammonium aber Stoffe, die im Verlauf des biologischen Abbaus zu Nitrat umgebaut werden. Für das Gewässer stellt Nitrat in den an der Bega vorkommenden Konzentrationen keine akute Gefährdung dar. Die maximalen Nitratkonzentrationen liegen im Bereich der Grenze zwischen den Güteklassen (chemisch) II und II bis III.

Durch die biologischen Abbauprozesse in der Kläranlage enthält das dort behandelte Abwasser deutlich geringere Nitratkonzentrationen als der normale Abfluss der Bega. Bei geringen Abflüssen in der Bega (wie sie hier als Sommerniedrigwasser angesetzt wurden) wirkt sie ebenso wie die Regewassereinleitungen verdünnend.

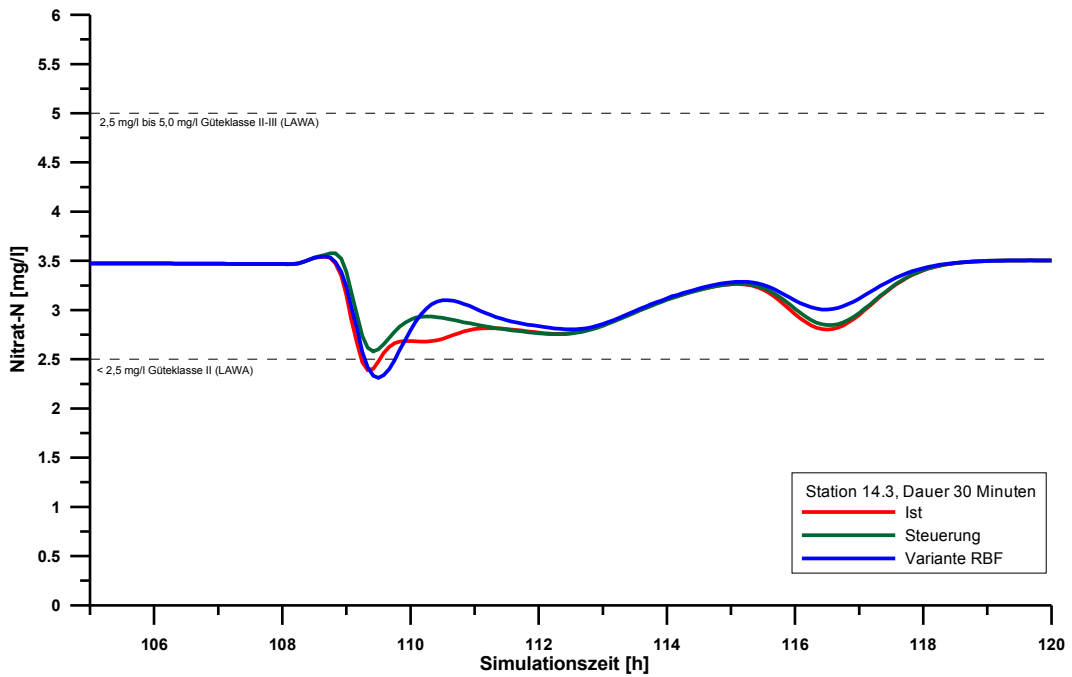


Abbildung 55: Station 14.3, Konzentrationsganglinie Parameter Nitrat-N, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1 (Grenzwerte nach [14])

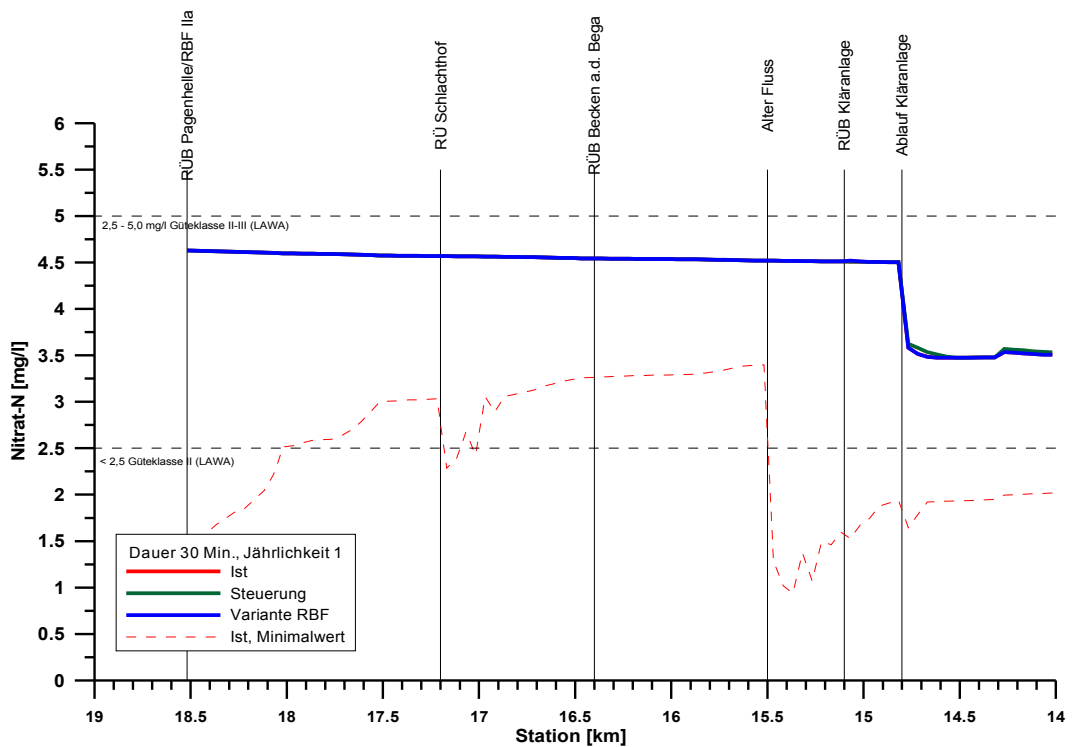


Abbildung 56: Längsschnitt maximale Konzentration Nitrat-N, Ereignis 2, Dauer 30 Min, Jährlichkeit 1 (Grenzwerte nach [14])

6 Schlussbetrachtung und Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit der Diskussion der Bearbeitungsergebnisse der Projektphase III unter Beteiligung der Projektpartner StAfUA-OWL (heute Bezirksregierung Detmold), der Bezirksregierung Detmold sowie der Fachhochschule mit den beteiligten Städten ergab sich die Fragestellung, in welchem Umfang und mit welchen Auswirkungen sich die Gewässergüte durch den Einsatz einer Kanalnetzsteuerung im Vergleich oder in Kombination mit anderen Maßnahmen verbessern lässt.

Als Erweiterung oder Fortführung der bisherigen Projekte sowie unter Nutzung der in der Projektphase III erstellten Datensätze des Gewässergütemodells für die Bega sollte im Rahmen des Projektes untersucht werden, in welchem Umfang durch eine Kanalnetzsteuerung vorhandene Retentionsvolumina aktiviert werden können, um die Gewässerbelastung zu reduzieren und damit die Gewässergüte der Bega zu verbessern.

Der Nachweis der Gewässergüteverbesserung infolge von Maßnahmen zur Kanalnetzsteuerung sollte (wie in der Projektphase III für Retentionsbodenfilter) durch die Anwendung des DWA-Gewässergütemodells vorgenommen werden.

Für die Projektbearbeitung wurde das Kanalnetz der Stadt Lemgo mit dem hydrodynamischen Kanalnetzmodell Hystem-Extran mit einer Erweiterung für die Berechnung von Güteparametern verwendet. Da für die Erstellung des neuen Generalentwässerungsplans die versiegelten Flächen über eine Luftbildbefliegung neu erhoben wurden, konnten diese Daten in die Modellierung einbezogen werden. Auch bei den Wasserverbrauchsdaten wurde auf sehr aktuelle Daten zurückgegriffen. So konnte der Wasserverbrauch im Modell haltungsscharf zugewiesen werden.

Die Schächte und Haltungen des Kanalnetzes lagen in der Form einer Datenbank vor, aus der die Daten in das Simulationsmodell übertragen werden konnten. Die Sonderbauwerke wurden anhand von Bestandsplänen und auch z. T. anhand von durch die Stadt neu erhobene Vermessungsdaten im Modell abgebildet.

Die Schmutzfrachten für das Schmutzwasser und das Regenwasser konnten aus der vorherigen Projektphase übernommen werden.

Die Kalibrierung des Kanalnetzmodells wurde anhand von aktuellen Messreihen durchgeführt werden. Es zeigte sich dabei eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messwerten.

Für die Erstellung des Steuerungskonzepts wurde das Kanalnetz analysiert. Ziel war dabei die Identifikation von Netzreserven (aktivierbares Stauvolumen, nicht ausgelastete Becken) und von möglicherweise neu zu schaffenden Netzverknüpfungen.

Diese Analysen ergaben, dass durch Steuerungsmaßnahmen an vier Netzabschnitten ca. 8.000 m³ zusätzliches Kanalstauvolumen aktivierbar sind. Daneben wurde festgestellt,

dass im Steinweg die Möglichkeit besteht, mit geringem Aufwand eine steuerbare Verbindung zwischen dem nördlichen und dem südlichen Kanalnetzbereich zu schaffen. Damit könnte das Kanalnetz insgesamt gleichmäßiger ausgenutzt werden.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen wurden in das Modell integriert und zuerst anhand eines Einzelereignisses auf ihre Wirksamkeit hin untersucht und anschließend optimiert. Dabei wurden einige Maßnahmen wieder verworfen, da sie im Vergleich zum notwendigen Aufwand nur einen geringen Nutzen erwarten ließen (z. B. Überleitung Grevenmarschstraße).

Es wurden auch weitere Optionen für den Netzbetrieb, wie z. B. die Reduzierung des maximal zulässigen Zuflusses zur Kläranlage oder eine reduzierte Einstauhöhe in den aktivierbaren Stauräumen, untersucht. Letztlich wurde in Kooperation mit der Stadt Lemgo und der Bezirksregierung Lemgo ein Steuerkonzept festgelegt, das für die Gütemodellierungen weiter verfolgt wurde.

Es ergab sich die Notwendigkeit, für die Ergebnisvergleiche auch die Simulationen für den Istzustand und den Vergleichszustand (d. h. mit Retentionsbodenfiltern) aus der vorherigen Projektphase neu durchzuführen. Da insbesondere mit dem neu aufgestellten Datensatz für das Kanalnetzmodell deutlich realitätsnähere Ergebnisse erzielt wurden, wurde dieser Weg, entgegen der ursprünglich vorgesehenen Bearbeitungsweise, gewählt.

Die Untersuchungen wurden entsprechend der Vorgehensweise in der Projektphase III für die zwei folgenden Regenereignisse durchgeführt:

- Ereignis E1: Niederschlag mit der Dauer $D = 60$ min und der Häufigkeit $n = 1$
- Ereignis E2: Niederschlag mit der Dauer $D = 30$ min und der Häufigkeit $n = 1$

Die Gütemodellierung erfolgte, wie auch in den vorherigen Projektphasen I bis III, in zwei Stufen. In den Projektphasen I bis III wurden die Gütemodellierungen für das Kanalnetz jeweils mit KOSIM durchgeführt. Im aktuellen Projekt kam dafür Hystem-Extran mit einer Programmerweiterung zur Gütemodellierung (Hystem-Extran-Güte) zum Einsatz. Die Kanalnetzsteuerung wurde dabei in der Kombination Hystem-Extran-Güte/CONTROL simuliert.

Die durchgeführten Untersuchungen erlauben die Aussage, dass das Entlastungsverhalten des Kanalnetzes der Stadt Lemgo auch ohne den Bau von zusätzlichen Speicherräumen oder Retentionsbodenfiltern deutlich verbessert werden kann. Das im Projekt aufgebaute Steuerungssystem führt zu einer wesentlich effektiveren Ausnutzung der im Netz vorhandenen erheblichen Speicherkapazitäten, was sowohl für die Staukanäle (z. B. SK Wall) als auch für die Becken (z. B. Becken a. d. Bega) gilt. Dabei wurden im Netz nur Steuerungsmaßnahmen berücksichtigt, die mit

überschaubarem Aufwand realisiert werden können – auch wenn dies im Detail noch weiter zu prüfen ist.

Die Tabelle 13 zeigt einige wesentliche Ergebnisse des Vergleichs der Modellberechnungen.

Bauwerk	Istzustand		optimierte Steuerung		Retentionsbodenfilter	
	E1, 60 Min., Jährlichkeit 1	E2, 30 Min., Jährlichkeit 1	E1, 60 Min., Jährlichkeit 1	E2, 30 Min., Jährlichkeit 1	E1, 60 Min., Jährlichkeit 1	E2, 30 Min., Jährlichkeit 1
SK Wall	Entlastung	Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung	Entlastung	Entlastung
Becken a.d. Bega	keine Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung	keine Entlastung
Becken a.d. Kläranlage	Entl. 3.900 m ³ Spitze 1,3 m ³ /s	Entl. 2.800 m ³ Spitze 1,1 m ³ /s	Entl. 500 m ³ Spitze 0,4 m ³ /s	keine Entlastung	Einleitung in RBF I	Einleitung in RBF I
Abschlag Pagenhelle	Entlastung	Entlastung	reduzierte Entlastung	reduzierte Entlastung	Einleitung in RBF IIa	Einleitung in RBF IIa
Retentionsbodenfilter I (Kläranlage)	-	-	-	-	keine Entlastung	keine Entlastung
Retentionsbodenfilter IIa (Pagenhelle)	-	-	-	-	keine Entlastung	keine Entlastung

Tabelle 13: Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Kanalnetzberechnung für die Ereignisse E1 und E2 (grün hinterlegt: Verbesserungen gegenüber dem Istzustand)

Durch das vorgeschlagene Steuerungssystem lassen sich (wie auch durch die Vergleichslösung mit den Retentionsbodenfiltern I (Kläranlage) und IIa (Pagenhelle)) Mischwasserentlastungen in den staubeeinflussten Bereichen der Bega nicht gänzlich verhindern. Das wäre nur mit der "großen Lösung" aus der Projektphase III möglich. Der dort untersuchte Retentionsbodenfilter IIb, der sämtliche Einleitungen im Bereich Pagenhelle und 1 km unterhalb aufnehmen würde, wäre bautechnisch ausgesprochen aufwändig (ca. 1 km neuer Sammler, Unterquerung der Bega, Pumpwerk) und damit sehr teuer. Es ist zu erwarten, dass der Aufwand in keinem sinnvollen Verhältnis zum Nutzen stehen würde.

Nach den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen ist es in jedem Fall sinnvoll, den Drosselabfluss am RÜ Pagenhelle von 270 l/s auf 500 l/s zu erhöhen. Damit würde in vielen Fällen das Abschlagen an dieser Stelle verhindert. Die zweite, große Einleitung in diesem Abschnitt fasst die Abschlüsse der Bauwerke RÜ Gräferstraße, RÜ Vogelsang und RÜ Bruchweg zusammen. Durch die Steuerung können diese RÜ nicht beeinflusst werden.

An der Kläranlage wurde in der Projektphase III ein sehr großer Retentionsbodenfilter (ca. 24.000 m³ Volumen) vorgeschlagen. Als Ergebnis der Untersuchungen wäre dieser Retentionsbodenfilter bei einer Nutzung der Steuerungsmöglichkeiten nicht notwendig. Durch die Zwischenspeicherung im Kanalnetz wird der Zufluss zur Kläranlage so stark abgedämpft, dass es selbst bei den für die Gütemodellierung untersuchten Ereignissen der Jährlichkeit 1 mit ihren hohen Intensitäten nicht (30 Minuten Regen) oder nur in

sehr geringem Umfang (60 Minuten Regen) zu einem Abschlagen des Beckens an der Kläranlage kommen würde. Dies ist allerdings nur zutreffend, solange die Kläranlage in der Lage ist, die bisher mögliche maximale Zuflussleistung von 935 l/s (3Q₊) zu behandeln. Bei der anstehenden Nachrechnung und Überplanung der Kläranlage ist dieser Gesichtspunkt mit zu berücksichtigen.

Die Schaffung der Verbindung zwischen dem nördlichen und dem südlichen Netzbereich bringt erheblich Vorteile mit sich. Dadurch lässt sich das Becken an der Bega deutlich besser auslasten. Zudem sind in diesem Netzbereich auch weitere, große aktivierbare Kanalstauräume vorhanden. Für den Bau der Verbindung ist lediglich ein kurzes Stück Kanal (unter 50 m) neu zu verlegen. Zusätzlich ist dort ein Regelungsbauwerk vorzusehen. Der Aufwand dafür bleibt überschaubar.

Die Schaffung der Verbindung im Steinweg hat zudem den Vorteil, dass eventuell in der Zukunft auch ereignisbezogen (z. B. ungleichmäßige Überregnung) oder auch aus Gründen des Netzbetriebs (Sanierungsarbeiten, Bauarbeiten) Teile des Wassers umgeleitet werden könnten.

Die Nutzung des aktivierbaren Kanalstauraums oberhalb des Beckens an der Bega ist ebenfalls sehr vielversprechend. Die Regelung könnte über das (dann umzubauende) Zuflusswehr zum Becken an der Bega erfolgen. Durch die dort schon vorhandene Mess- und Regeltechnik ist die notwendige Infrastruktur bereits vorhanden. Hier ist jedoch zu prüfen, welche Auswirkungen der dann wesentlich häufiger auftretende Einstau des Kanalnetzes auf die umgebende Bebauung haben würde (dies gilt für alle zu aktivierenden Kanalstauräume).

Die Kanalstauräume Sammler Nord und Sammler Süd ließen sich voraussichtlich ebenfalls mit überschaubarem Aufwand realisieren. Die Regelungsbauwerke würden in unmittelbarer Nähe zur Kläranlage liegen – es würde folglich nur ein geringer Aufwand für die Vernetzung der Mess- und Regeltechnik anfallen. Auch hier wären die Rückstauauswirkungen auf umliegende Gebäude zu prüfen.

Auch beim Kanalstauraum Wall sind zum jetzigen Stand der Kenntnisse keine offensichtlich zu großen Hindernisse ersichtlich, die der Realisierung der entsprechenden Planung entgegen stehen würden. Hier ist jedoch zu verhindern, dass rückgestautes Wasser über die Haltungen in der Primkerstraße abfließt.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen entfalten ihre volle Leistungsfähigkeit zwar erst im Verbund aller Maßnahmen, es würde aber auch die Realisierung von einzelnen Maßnahmen schon zu deutlichen Verbesserungen führen. Es kann daher ein Stufenplan für die Realisierung aufgestellt werden, der sukzessive entsprechend den technischen und finanziellen Möglichkeiten umgesetzt wird. Dabei können einfache Maßnahmen (wie die Erhöhung des Drosselabflusses am RÜ Pagenhelle) zeitnah realisiert werden.

Mittelfristig sollte zusätzlich über eine integrierte Steuerung des Kanalnetzes im Verbund mit der Kläranlage nachgedacht werden. Die Voraussetzungen für eine solche integrierte Steuerung wären mit der Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen ebenfalls gegeben.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass durch die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Netzsteuerung zwar der Bereich der Bega im Umfeld der Einleitung Pagenhelle und darunter nicht so wirksam entlastet werden würde wie bei den in der Projektphase III untersuchten Bodenfiltern. Im Bereich der Kläranlage sind die Verbesserungen für die Bega mit dem gesteuerten Netz und mit der Retentionsbodenfiltervariante der Projektphase III in etwa gleich, wobei bei der Variante Kanalnetzsteuerung der immerhin 24.000 m³ große Retentionsbodenfilter I entfallen kann. Darüber hinaus würde der Alte Fluss (und damit auch die Bega) bei einer Realisierung der vorgeschlagenen Steuerungsmaßnahmen deutlich weniger mit Mischwasser belastet. Zudem würden sich Verbesserungen sowie eine erhöhte Flexibilität im Netzbetrieb ergeben und es würden die Voraussetzungen für eine eventuell zukünftig zu realisierende integrierte Steuerung Kläranlage/Kanalnetz geschaffen.

Durch die Installation der Kanalnetzsteuerung lässt es sich nicht vermeiden, dass die Wasserspiegellage in verschiedenen Bereichen angehoben werden wird. Es ist zu prüfen, ob diese Anhebung des Wasserspiegels und die damit vorhandenen Rückstauerscheinungen im Netz toleriert werden können. Dies zu betrachten war nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens. Für eine Realisierung der Steuerung sind daher weitere Untersuchungen und Planungen erforderlich.

Quellenverzeichnis:

- [1] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL (ATV-DVWK): „Planungshilfe Abflusssteuerung in Kanalnetzen“, Essen
- [2] BUND DER INGENIEURURE FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABFALLWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (BWK): „BWK Merkblatt 3, Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagseinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse“, BWK, Düsseldorf
- [3] BUND DER INGENIEURURE FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABFALLWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (BWK): „Begleitband zu dem BWK-Merkblatt 3; Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagseinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse“, BWK, Düsseldorf
- [4] BUND DER INGENIEURURE FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABFALLWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (BWK): „Leitfaden zur detaillierten Nachweisführung immissionsorientierter Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen gemäß BWK-Merkblatt 3“, BWK, Kassel
- [5] MEON, G., MIETHE, M., OTTE-WITTE, K., SCHNEIDER, C., STÖFFLER, U.: „Durchführung von Pilotuntersuchungen zur Simulation von Stoffeinträgen und Gewässergüte des oberen Werre bis zum Pegel Ahmsen“, Abschlussbericht der Projektphase 1, FH Lippe und Höxter in Kooperation mit dem Westfälischen Umweltzentrum (WUZ) Höxter, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, April 2002
- [6] MEON, G., MIETHE, M., OTTE-WITTE, K., SCHNEIDER, C., STÖFFLER, U.: „Weiterführung von Pilotuntersuchungen zur Simulation von Stoffeinträgen und Gewässergüte des oberen Werre bis zum Pegel Ahmsen“, Abschlussbericht der Projektphase 2, FH Lippe und Höxter in Kooperation mit dem Westfälischen Umweltzentrum (WUZ) Höxter, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, Oktober 2002
- [7] MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (MUNLV): „Retentionsbodenfilter, Handbuch für Planung, Bau und Betrieb“, Düsseldorf, 2003
- [8] AULICH, M., MEON, G., MIETHE, M., OTTE-WITTE, K., PICK, V.: „Modellierung der Gewässergüte der Bega und der oberen Werre infolge Schmutzfrachtreduktion durch Retentionsbodenfilter“, Abschlussbericht der Projektphase 3, FH Lippe und Höxter in Kooperation mit dem Westfälischen Umweltzentrum (WUZ) Höxter und der IWUD - Ingenieure für Wasser, Umwelt und Datenverarbeitung GmbH

- (IWUD), im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, November 2004
- [9] ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG (ATV): „Fremdwassersituation in Deutschland“ Entwurf, Stand 25.1.2001
- [10] INSTITUT FÜR TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHE HYDROLOGIE (itwh): „Abflusssteuerung – CONTROL – Modellbeschreibung“, Hannover 2005
- [11] KAHLERT, F.: „Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control“, 2. Auflage, Vieweg, Hamm/Verl 1994
- [12] SCHÜTZE, BUTLER, BECK: „Modelling, Simulation an Control of Urban Wastewater Systems“, Springer-Verlag, London 2002
- [13] MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (MUNLV): „Leitfaden zur Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie in NRW“, Düsseldorf 2003
- [14] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA): „Beurteilung der Wasserbeschaffenheit von Fliegewässern in der Bundesrepublik Deutschland – Chemische Gewässergüteklassifikation“, Kulturbuchverlag Berlin 1998
- [15] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL (DWA): „Merkblatt DWA-M 180, Handlungsrahmen zur Planung der Abflusssteuerung in Kanalnetzen“, Hennef 2005

Anlagen

Anlage 1, Ergebnisse der Kanalnetzberechnung für ein Einzelereignis

Abbildung 1: Abschlag Pagenhelle, Abflussganglinien.....	3
Abbildung 2: Abschlag Pagenhelle, Volumenkurven.....	3
Abbildung 3: Stauraum Wall, Abflussganglinien unterhalb der Steuerstelle.....	4
Abbildung 4: Überleitung Steinweg, Abflussganglinie.....	5
Abbildung 5: Überleitung Steinweg, Abflussvolumenkurve.....	5
Abbildung 6: Abschlag Stauraumkanal Wall, Abflussganglinien.....	6
Abbildung 7: Abschlag Stauraumkanal Wall, Abflussvolumenkurven.....	6
Abbildung 8: Becken a. d. Bega, Zuflussganglinien Becken.....	7
Abbildung 9: Becken a. d. Bega, Zuflussvolumenkurven Becken.....	7
Abbildung 10: Sammler Süd, Durchflussganglinien unterhalb der Steuerstelle.....	8
Abbildung 11: Sammler Nord, Durchflussganglinien unterhalb der Steuerstelle.....	8
Abbildung 12: Abschlag Becken a. d. Kläranlage, Abflussganglinien.....	9
Abbildung 13: Abschlag Becken a. d. Kläranlage, Volumenkurven.....	9

Anlage 2, Ergebnisse der Gewässergüteberechnung für das Ereignis E1 (Jährlichkeit 1, Dauer 60 Minuten)

Abbildung 14: Parameter CSB, Maximalwerte, Längsschnitt.....	10
Abbildung 15: Parameter CSB, Überschreitungsdauer 20 mg/l, Längsschnitt	10
Abbildung 16: Parameter BSB5, Maximalwerte, Längsschnitt.....	11
Abbildung 17: Parameter Sauerstoff, Minimalwerte, Längsschnitt.....	11
Abbildung 18: Parameter Ammonium, Maximalwerte, Längsschnitt.....	12
Abbildung 19: Parameter Nitrat, Maximalwerte, Längsschnitt.....	12
Abbildung 20: Parameter CSB, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0.....	13
Abbildung 21: Parameter CSB, Frachtganglinie, Bega-Station 18,0.....	13
Abbildung 22: Parameter BSB5, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0.....	14
Abbildung 23: Parameter Ammonium, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0.....	14
Abbildung 24: Parameter Nitrat, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0.....	15
Abbildung 25: Parameter CSB, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3.....	16
Abbildung 26: Parameter CSB, Frachtganglinie, Bega-Station 14,3.....	16
Abbildung 27: Parameter BSB5, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3.....	17
Abbildung 28: Parameter Ammonium, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3.....	17

Anlage 3, Ergebnisse der Gewässergüteberechnung für das Ereignis E2 (Jährlichkeit 1, Dauer 30 Minuten)

Abbildung 29: Parameter Nitrat, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3.....	18
Abbildung 30: Parameter CSB, Maximalwerte, Längsschnitt.....	19
Abbildung 31: Parameter CSB, Überschreitung 20 mg/l, Längsschnitt.....	19
Abbildung 32: Parameter BSB5, Maximalwerte, Längsschnitt.....	20

Abbildung 33: Parameter Sauerstoff, Minimalwerte, Längsschnitt.....	20
Abbildung 34: Parameter Ammonium, Maximalwerte, Längsschnitt.....	21
Abbildung 35: Parameter Nitrat, Maximalwerte, Längsschnitt.....	21
Abbildung 36: Parameter CSB, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0.....	22
Abbildung 37: Parameter CSB, Frachtganglinie, Bega-Station 18,0.....	22
Abbildung 38: Parameter BSB5, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0.....	23
Abbildung 39: Parameter Ammonium, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0.....	23
Abbildung 40: Parameter Nitrat, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0.....	24
Abbildung 41: Parameter CSB, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 17,0.....	25
Abbildung 42: Parameter CSB, Frachtganglinie, Bega-Station 14,3.....	25
Abbildung 43: Parameter BSB5, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3.....	26
Abbildung 44: Parameter Ammonium, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3.....	26
Abbildung 45: Parameter Nitrat, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3.....	27

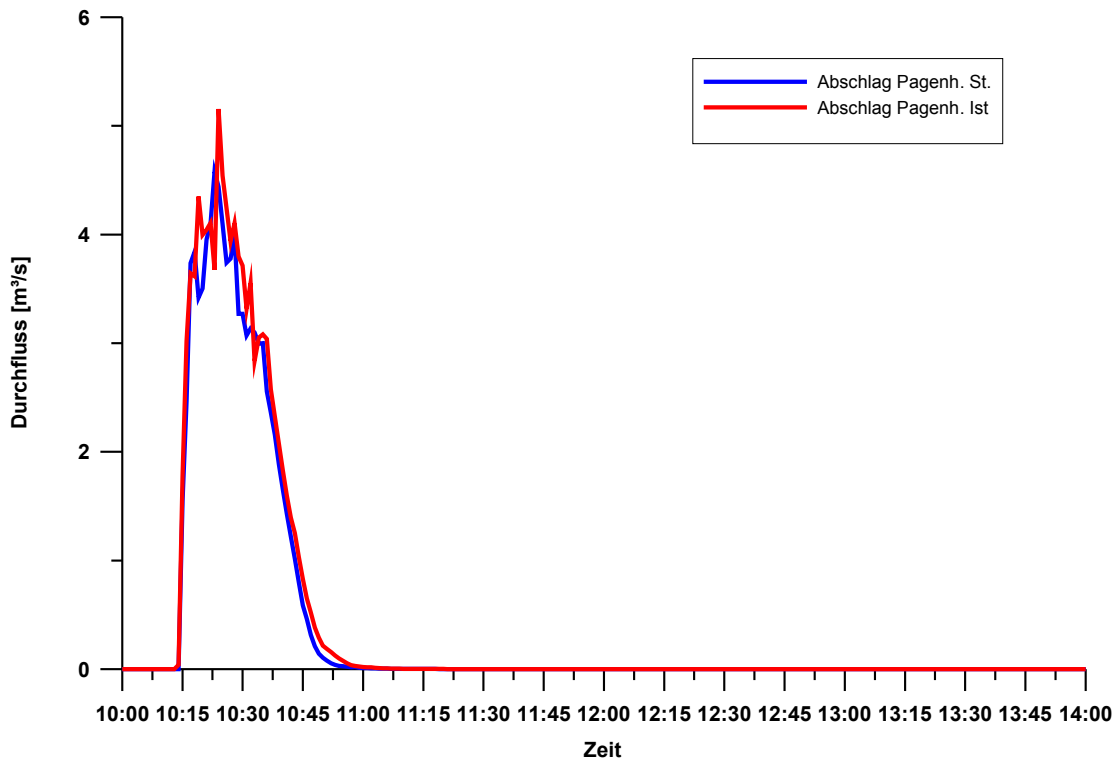


Abbildung 1: Abschlag Pagenhelle, Abflussganglinien

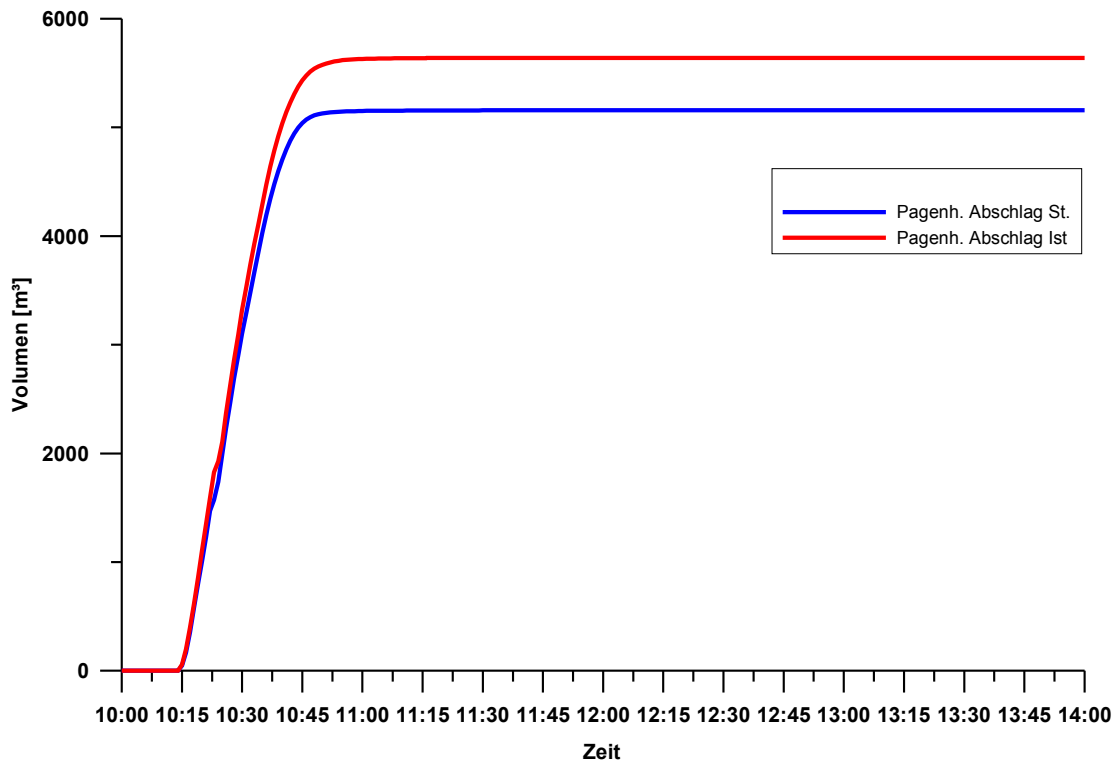


Abbildung 2: Abschlag Pagenhelle, Volumenkurven

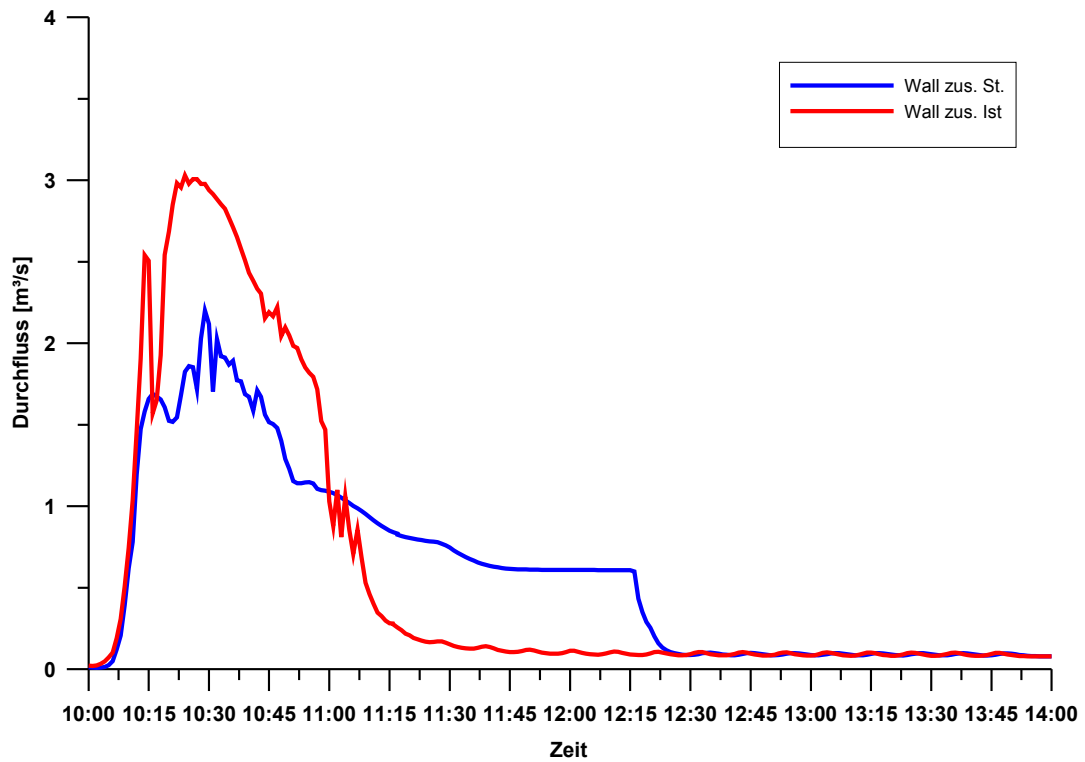


Abbildung 3: Stauraum Wall, Abflussganglinien unterhalb der Steuerstelle

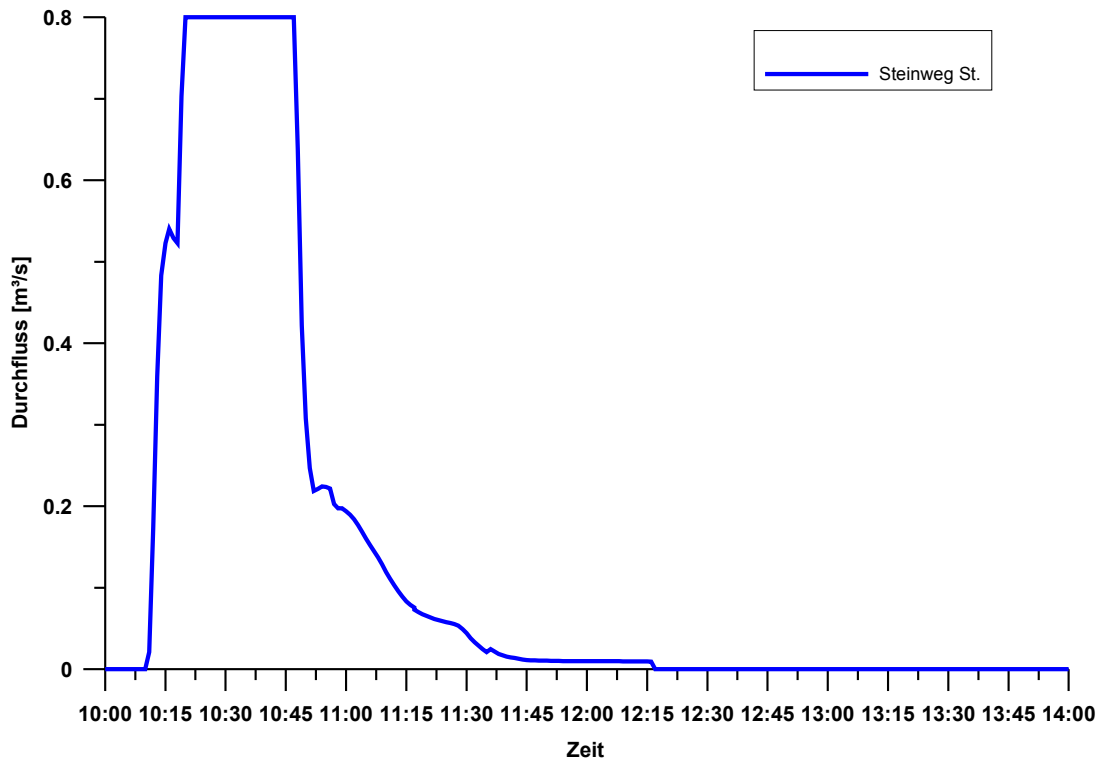


Abbildung 4: Überleitung Steinweg, Abflussganglinie

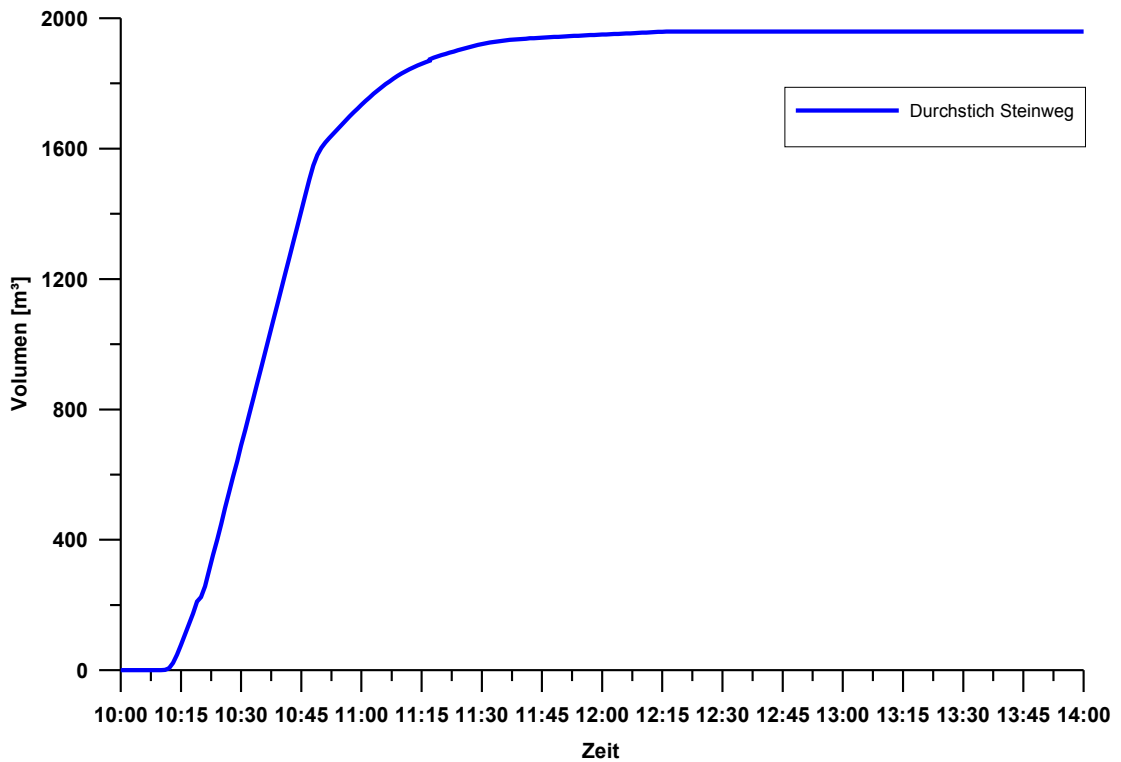


Abbildung 5: Überleitung Steinweg, Abflussvolumenkurve

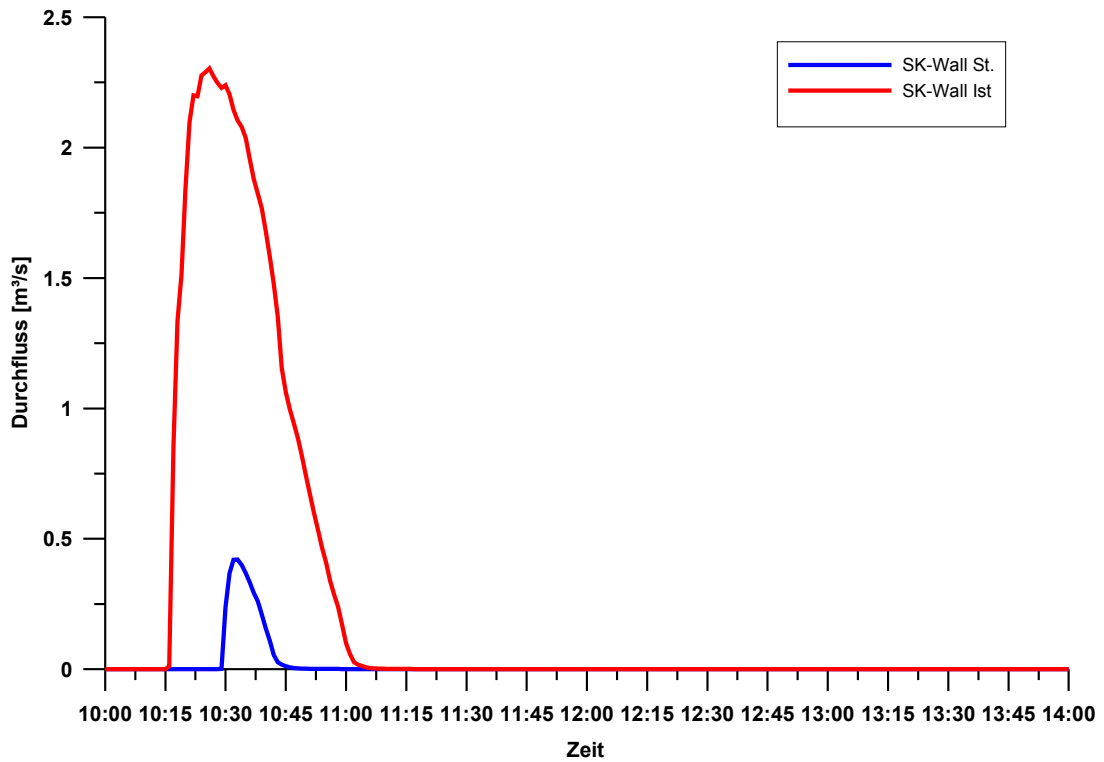


Abbildung 6: Abschlag Stauraumkanal Wall, Abflussganglinien

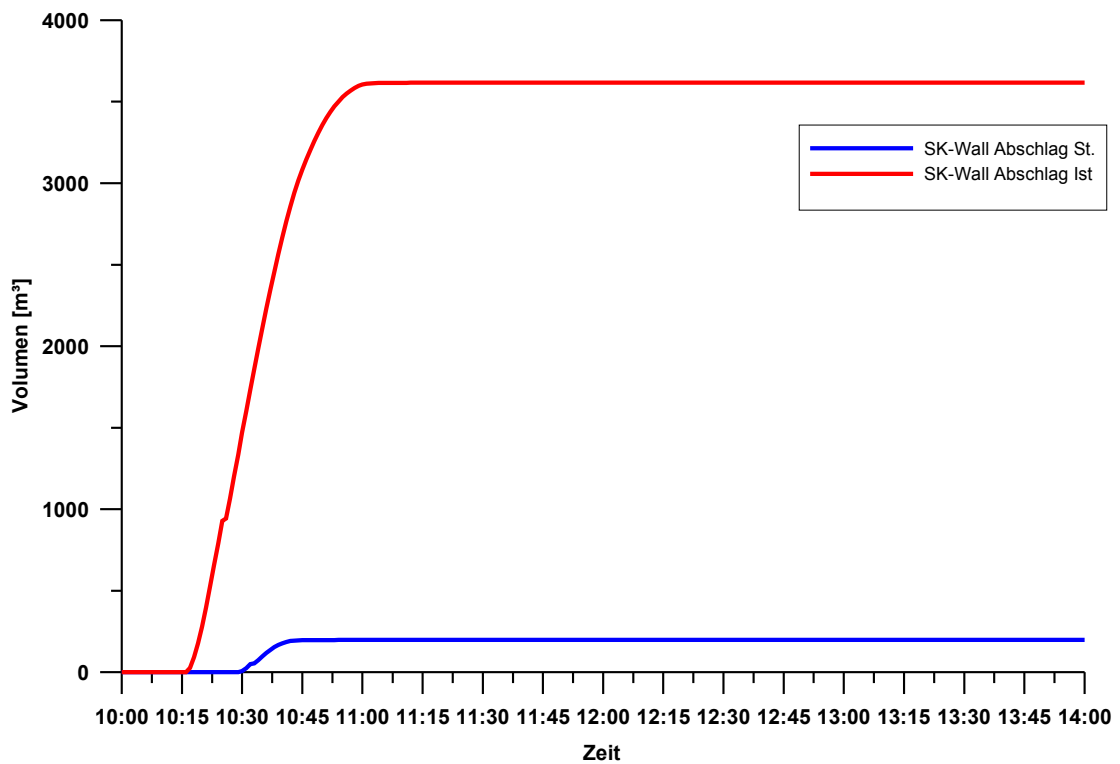


Abbildung 7: Abschlag Stauraumkanal Wall, Abflussvolumenkurven

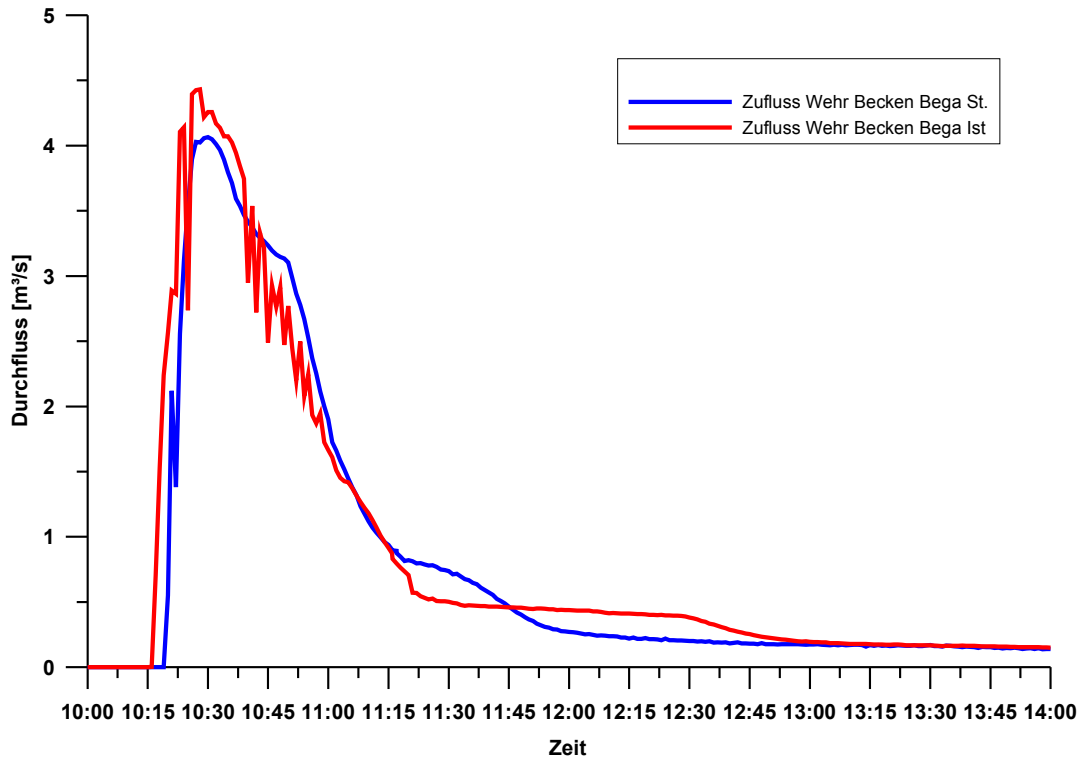


Abbildung 8: Becken a. d. Bega, Zuflussganglinien Becken

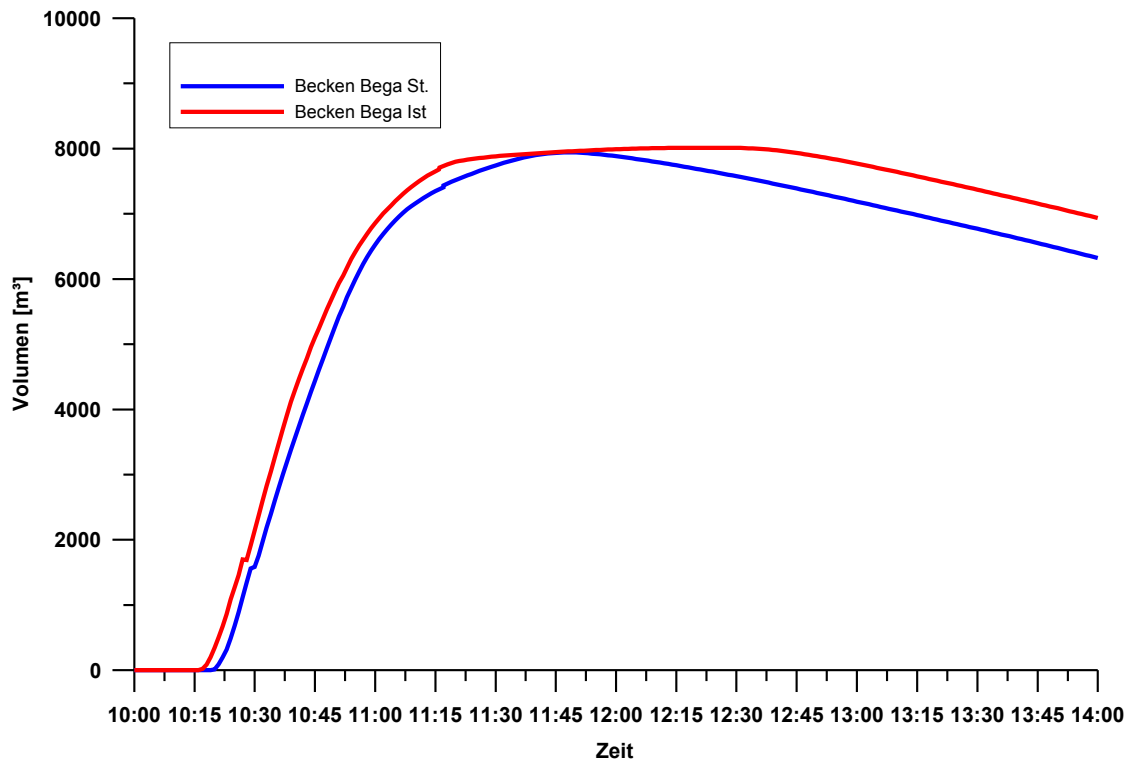


Abbildung 9: Becken a. d. Bega, Zuflussvolumenkurven Becken

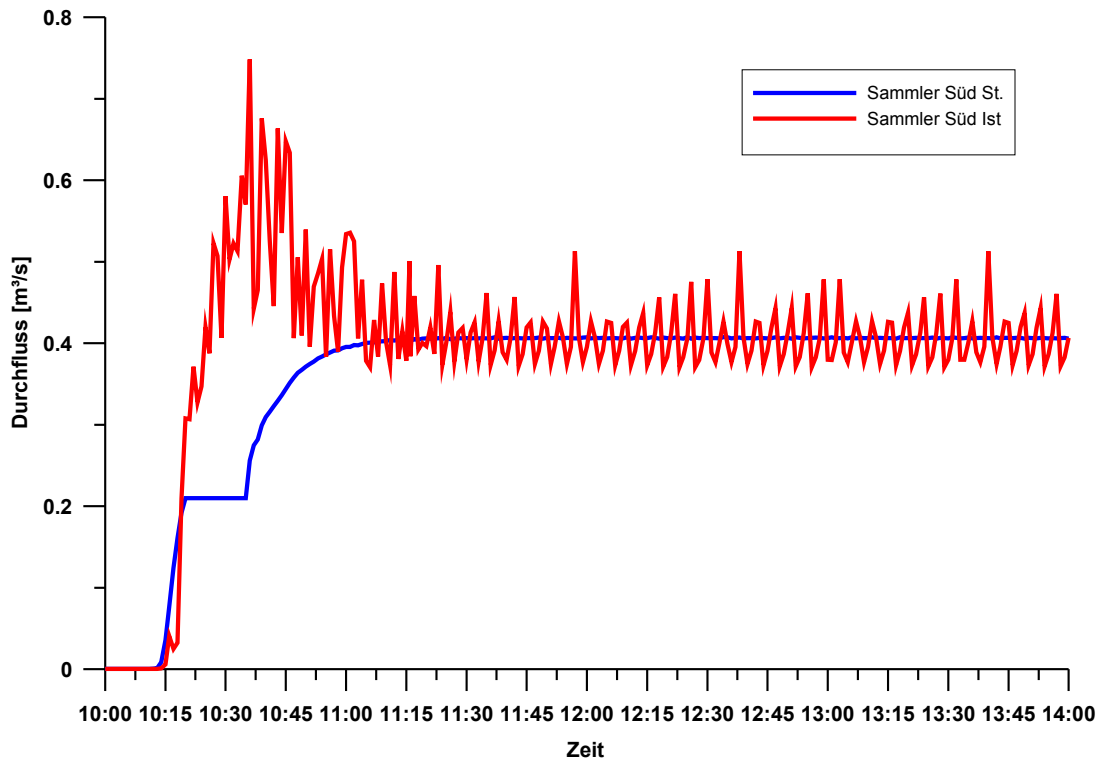


Abbildung 10: Sammler Süd, Durchflussganglinien unterhalb der Steuerstelle

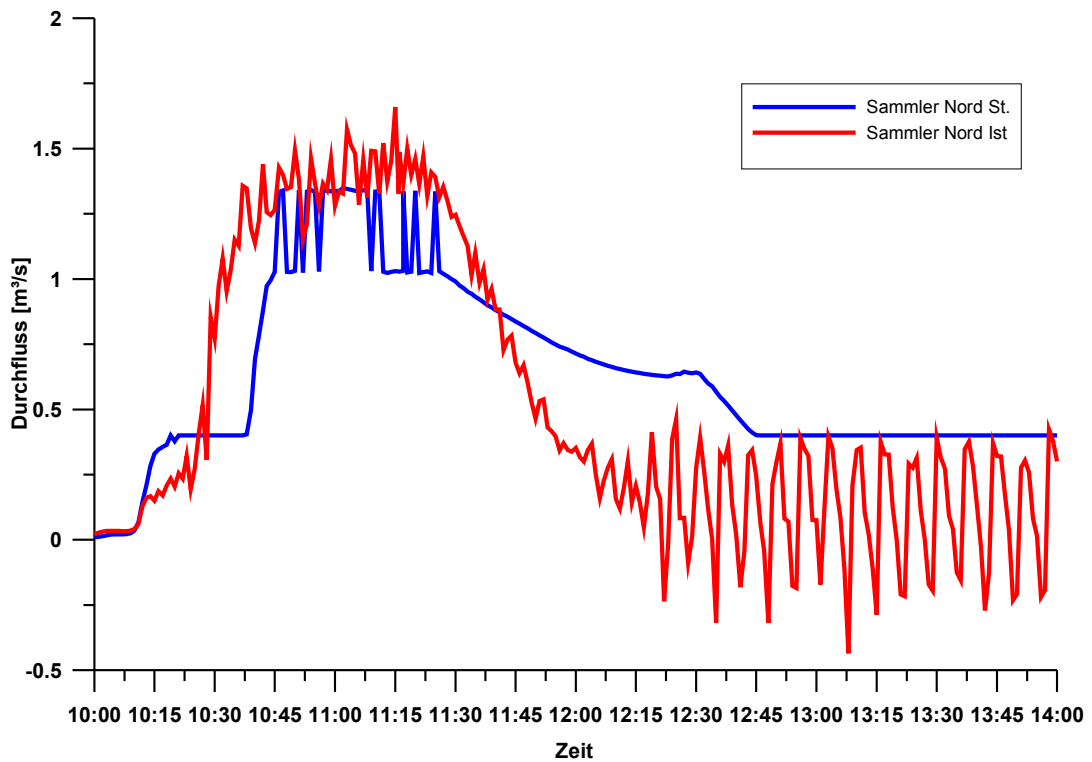


Abbildung 11: Sammler Nord, Durchflussganglinien unterhalb der Steuerstelle

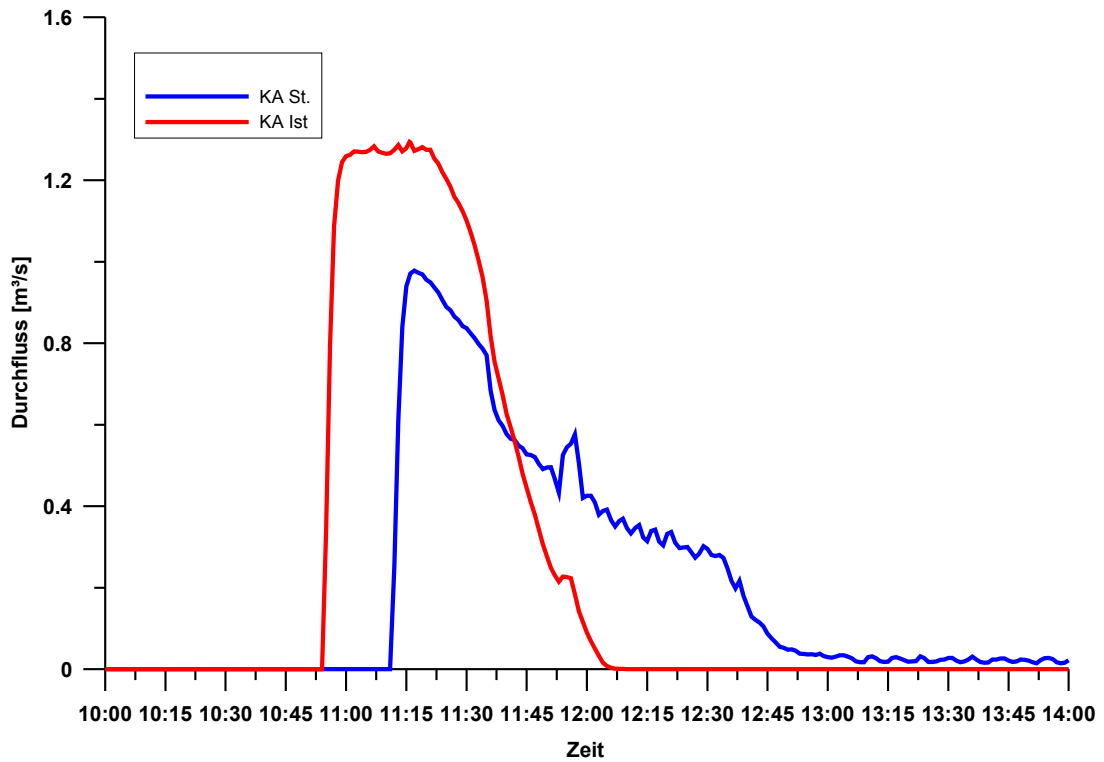


Abbildung 12: Abschlag Becken a. d. Kläranlage, Abflussganglinien

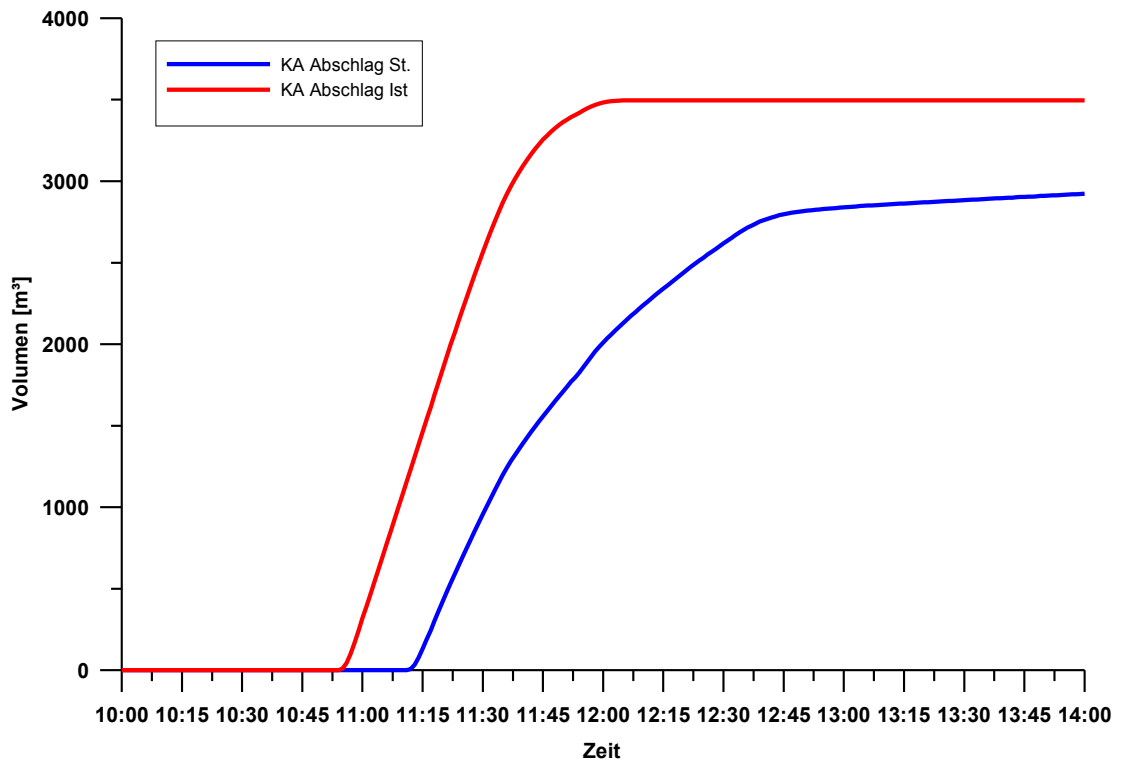


Abbildung 13: Abschlag Becken a. d. Kläranlage, Volumenkurven

Anlage 2, Ereignis E1 (Dauer 60 Minuten)

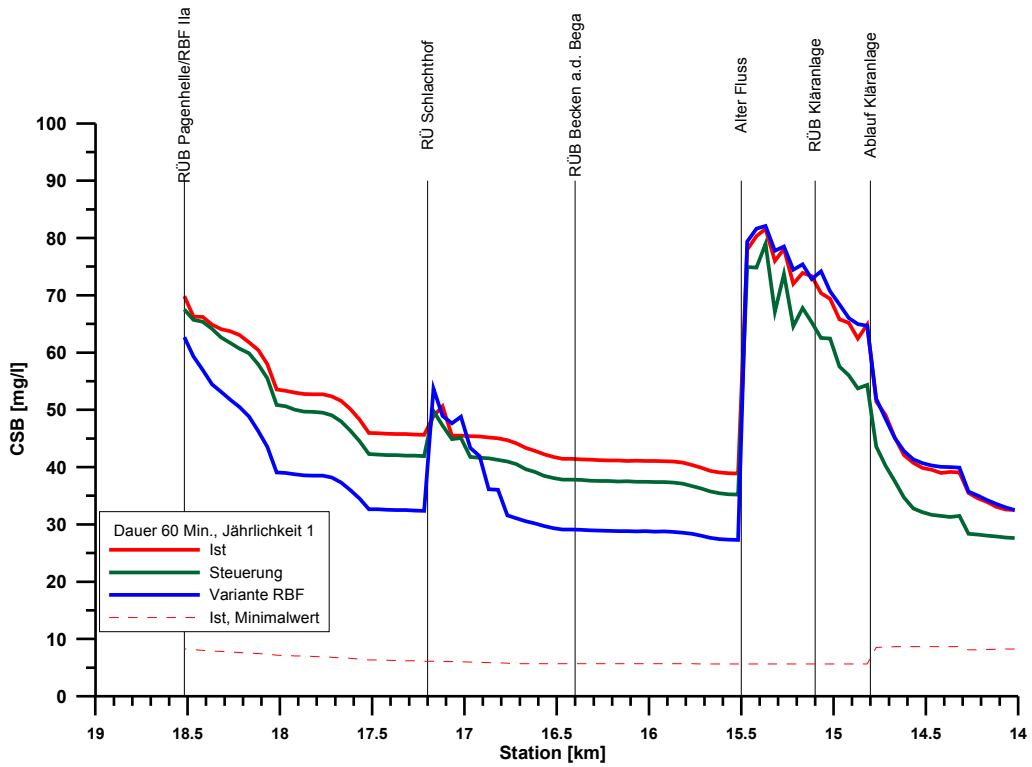


Abbildung 14: Parameter CSB, Maximalwerte, Längsschnitt

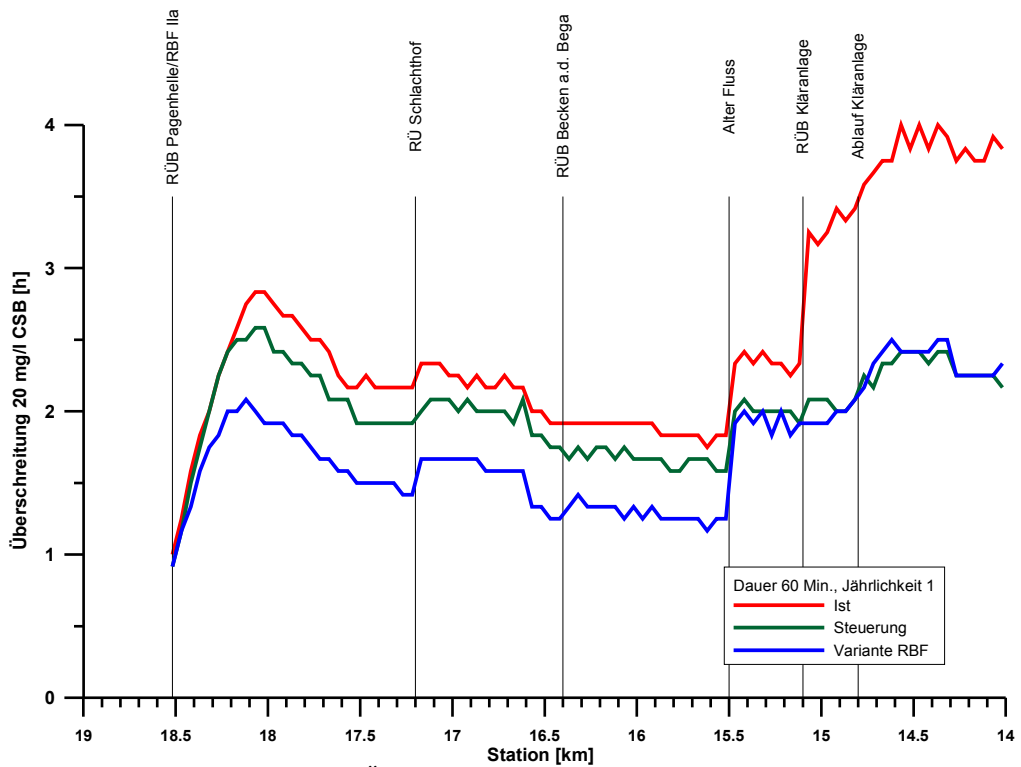


Abbildung 15: Parameter CSB, Überschreitungsdauer 20 mg/l, Längsschnitt

Anlage 2, Ereignis E1 (Dauer 60 Minuten)

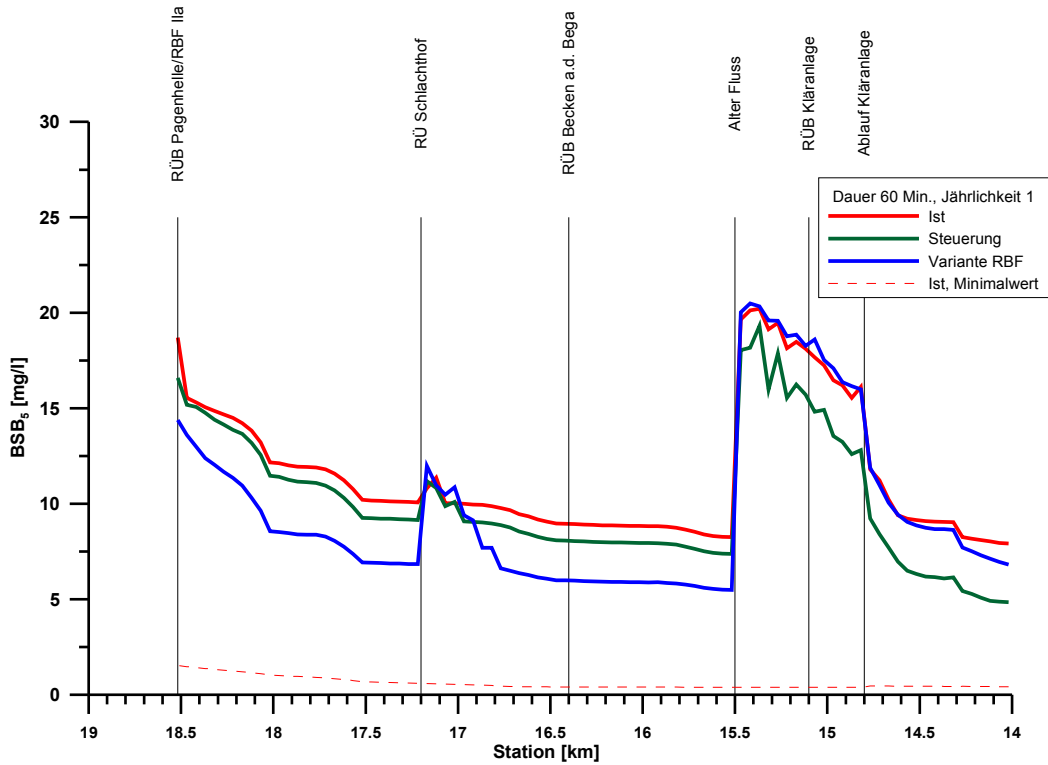


Abbildung 16: Parameter BSB₅, Maximalwerte, Längsschnitt

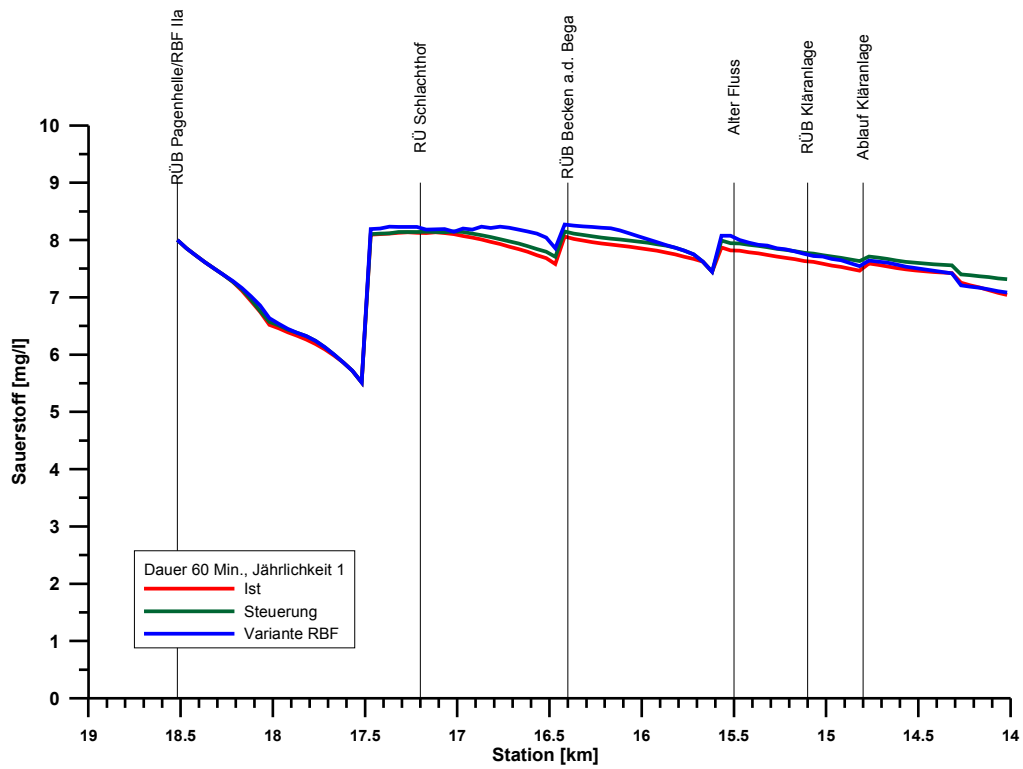


Abbildung 17: Parameter Sauerstoff, Minimalwerte, Längsschnitt

Anlage 2, Ereignis E1 (Dauer 60 Minuten)

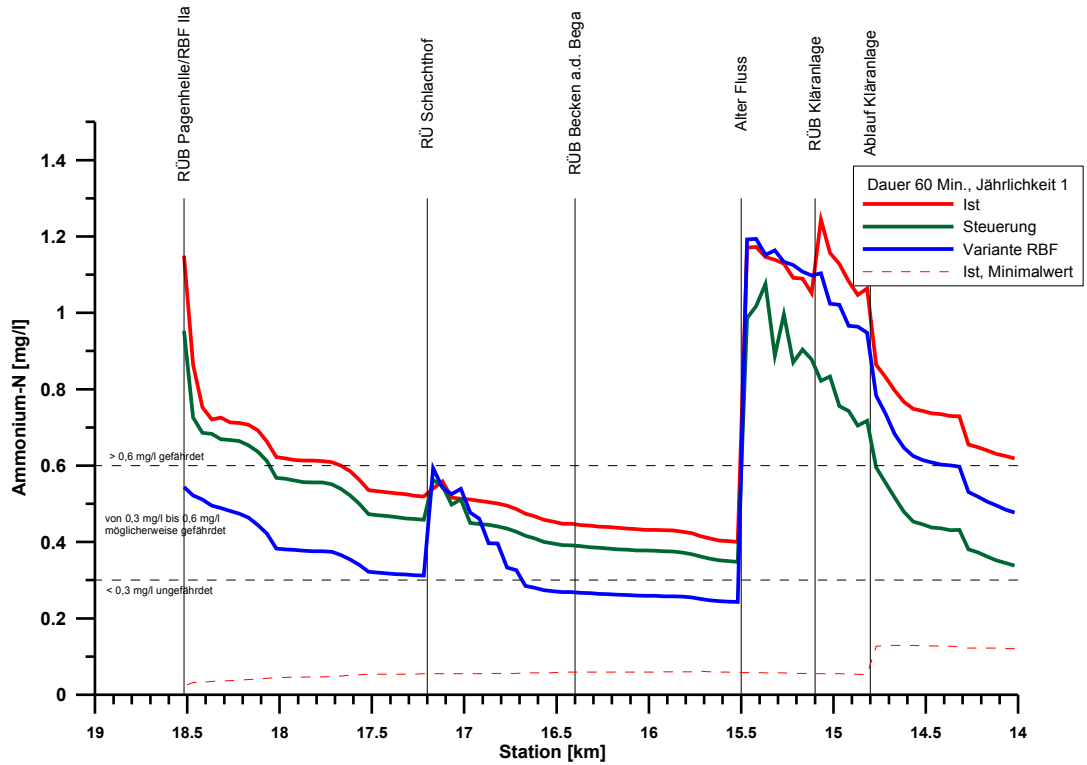


Abbildung 18: Parameter Ammonium, Maximalwerte, Längsschnitt

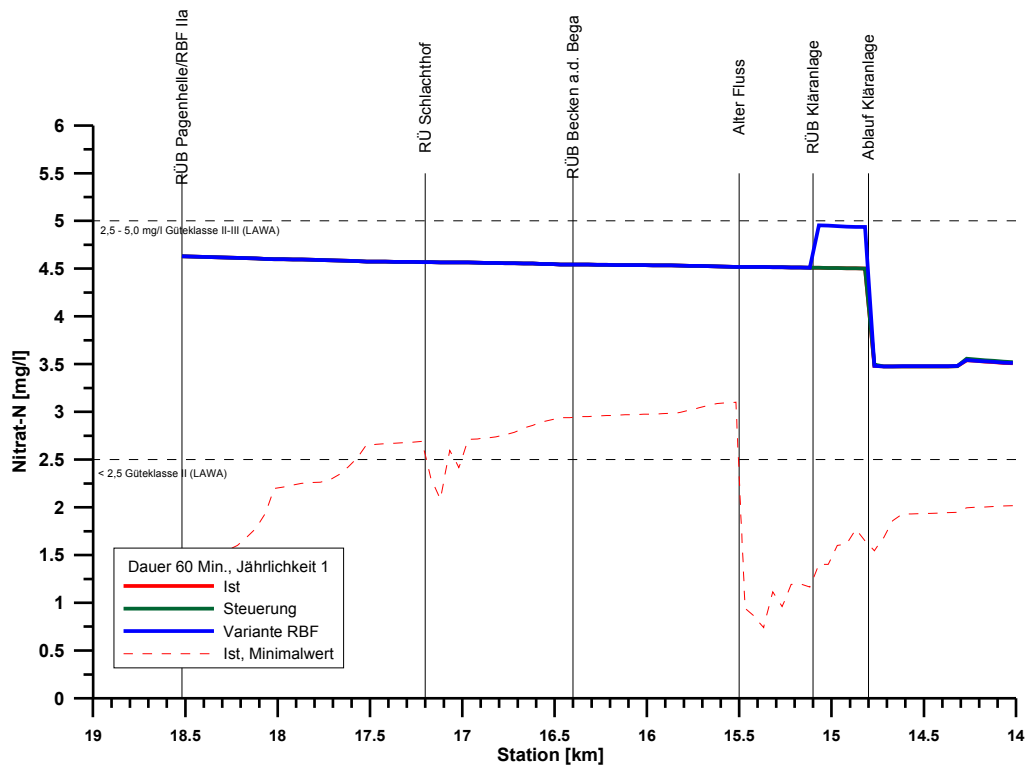


Abbildung 19: Parameter Nitrat, Maximalwerte, Längsschnitt

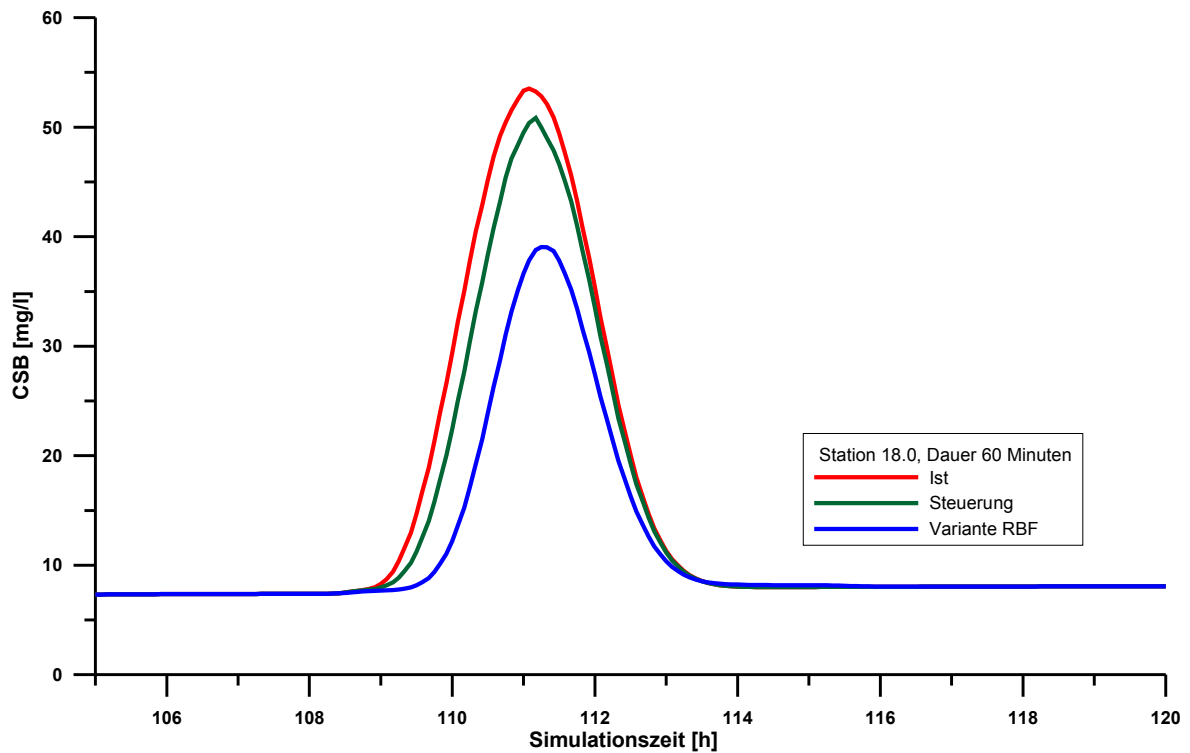


Abbildung 20: Parameter CSB, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0

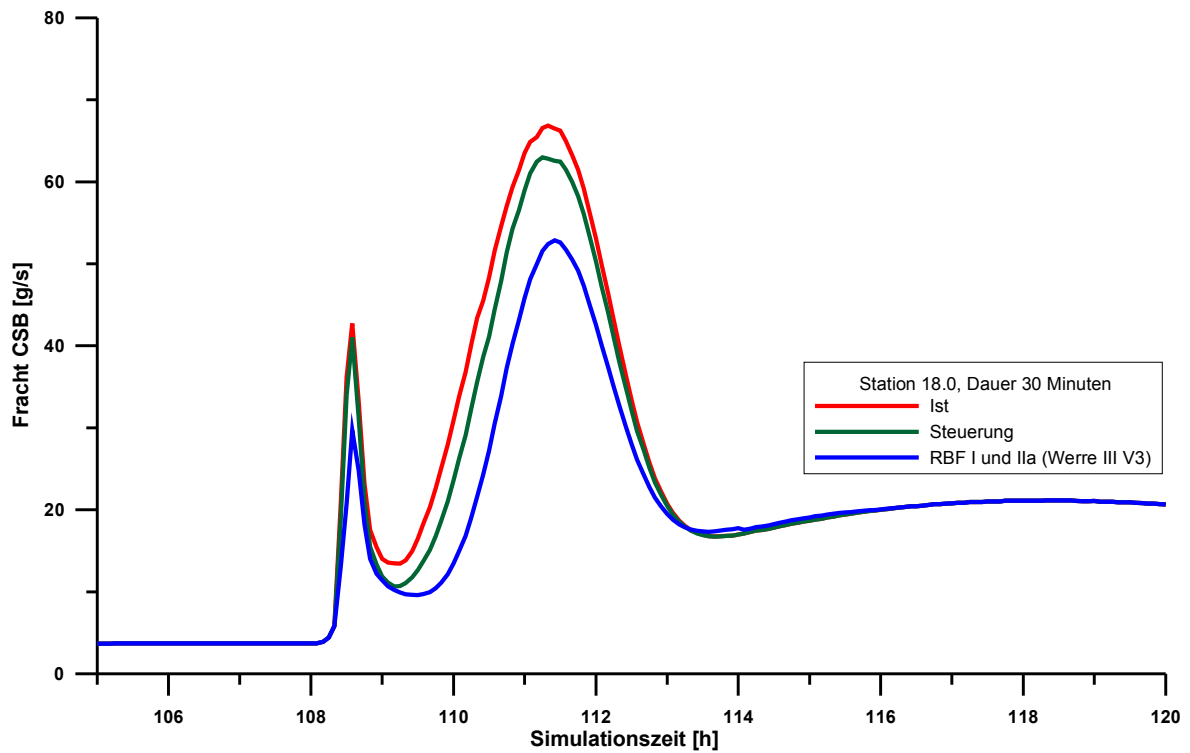


Abbildung 21: Parameter CSB, Frachtganglinie, Bega-Station 18,0

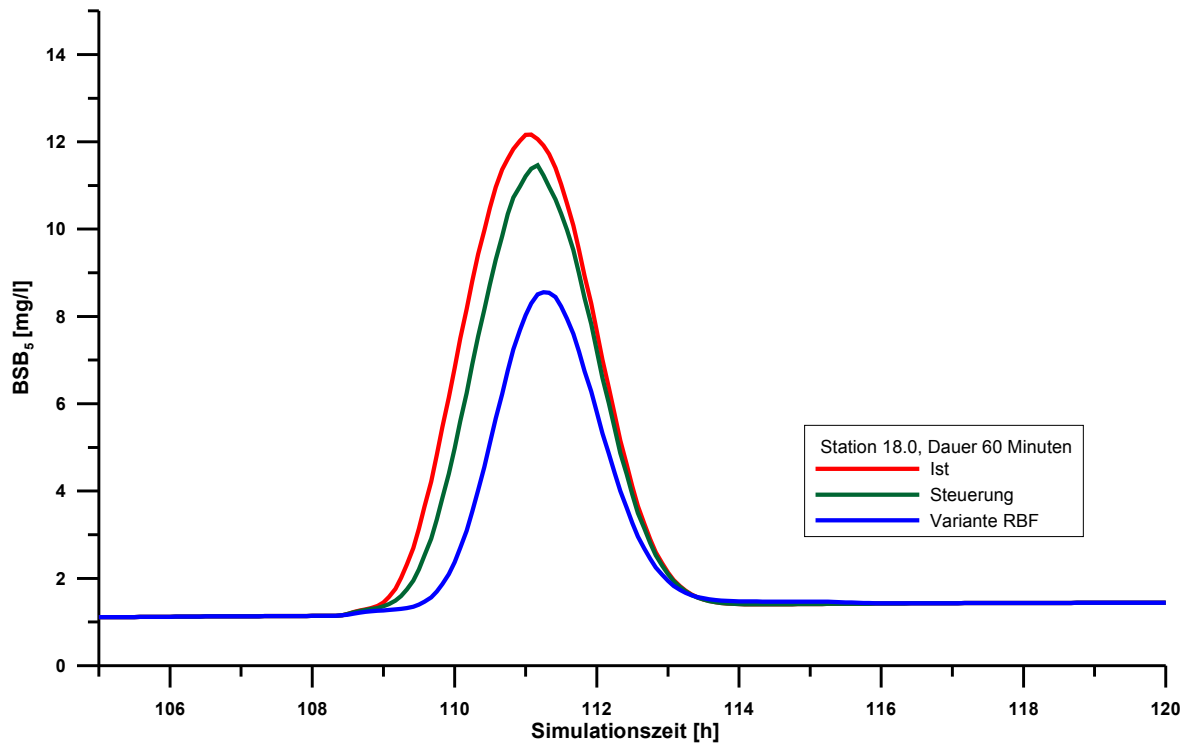


Abbildung 22: Parameter BSB₅, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0

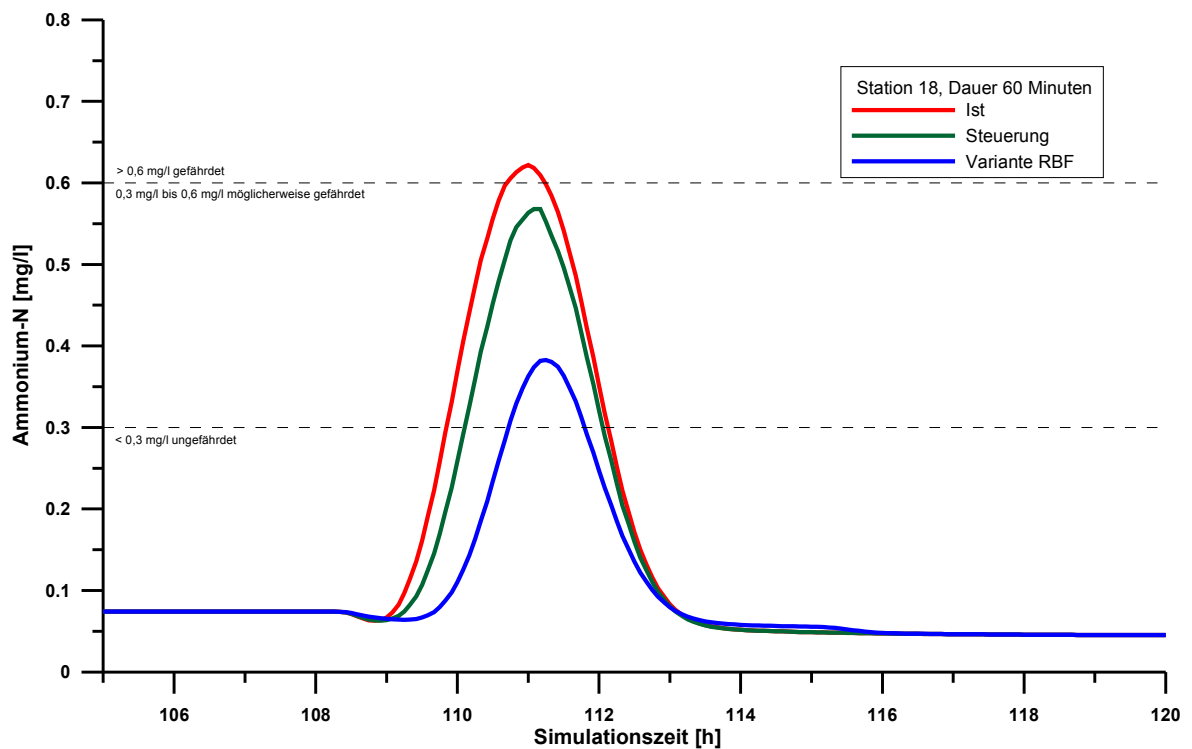


Abbildung 23: Parameter Ammonium, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0

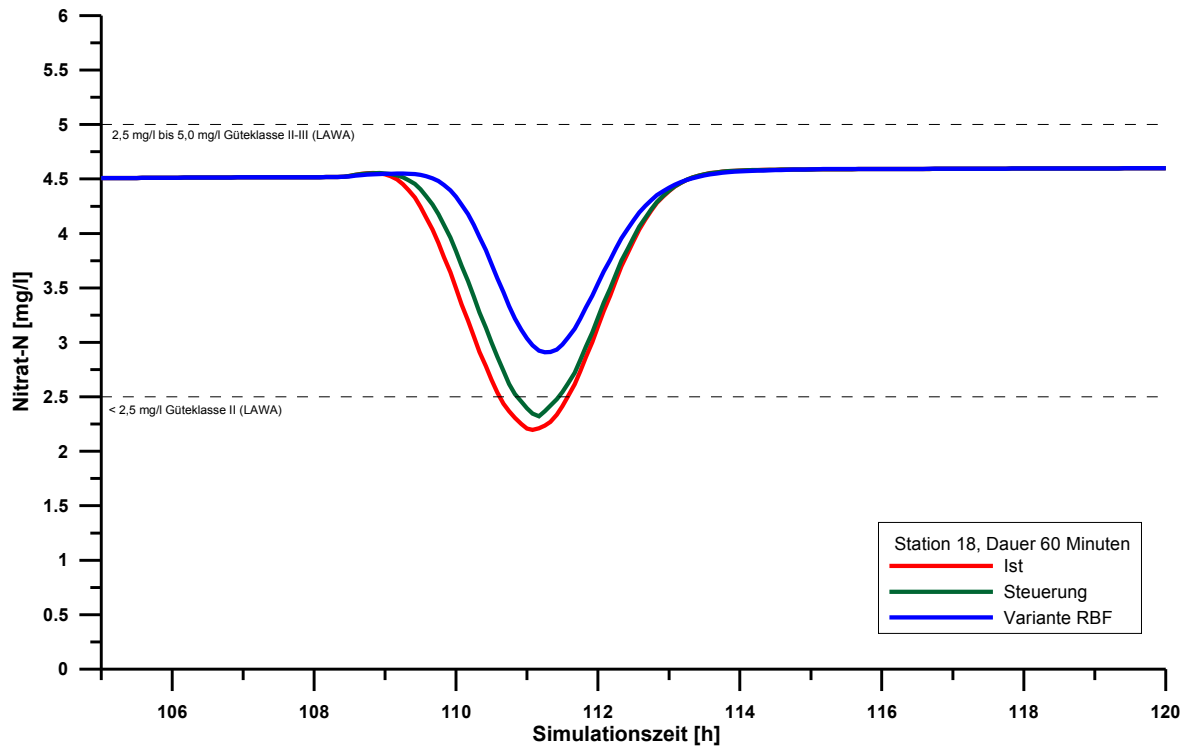


Abbildung 24: Parameter Nitrat, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0

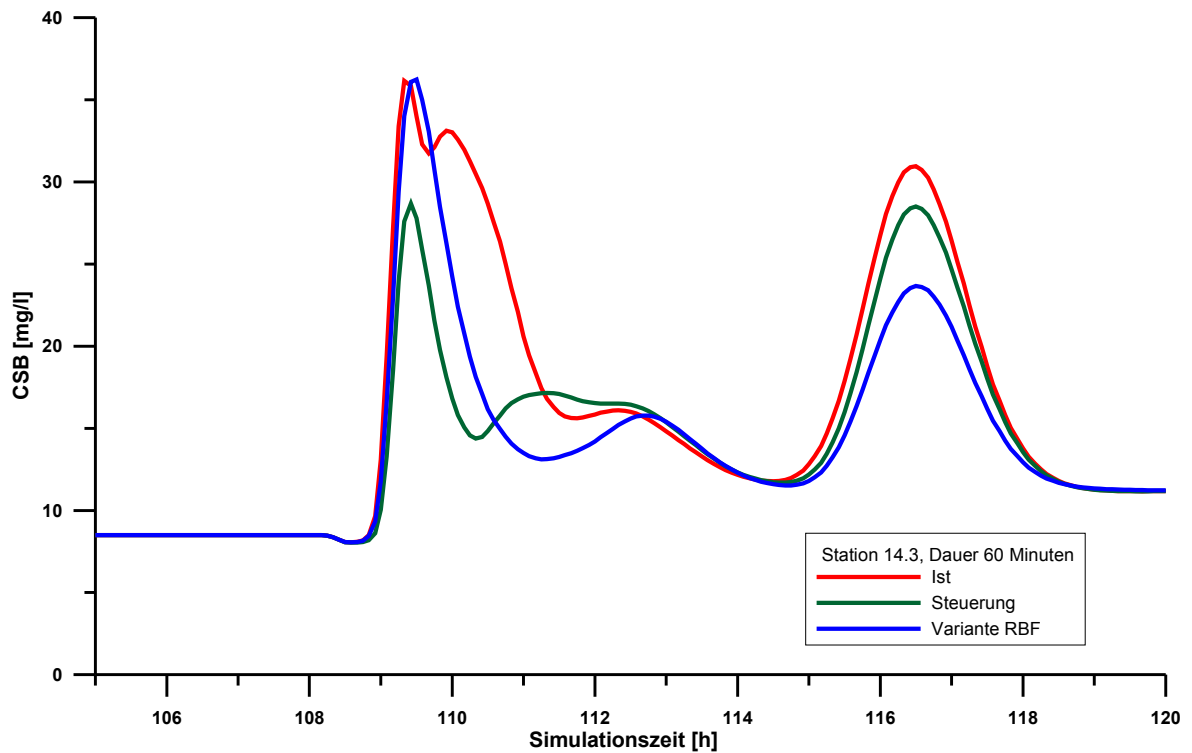


Abbildung 25: Parameter CSB, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3

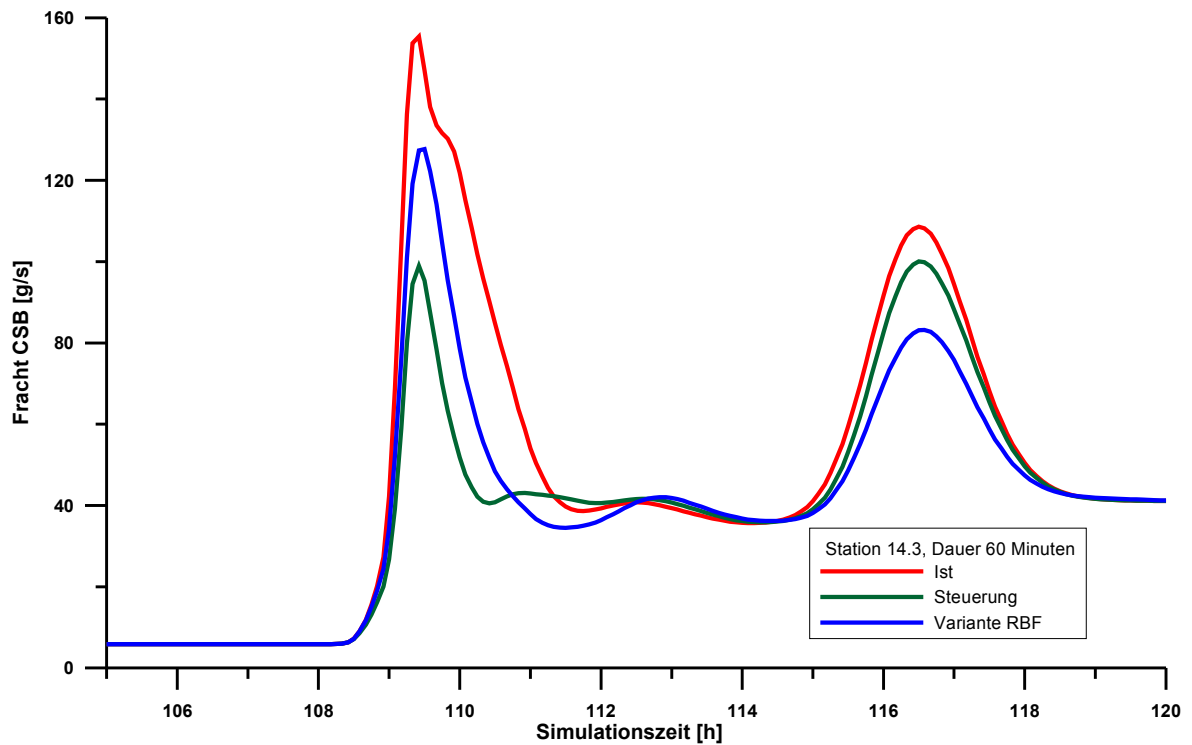


Abbildung 26: Parameter CSB, Frachtganglinie, Bega-Station 14,3

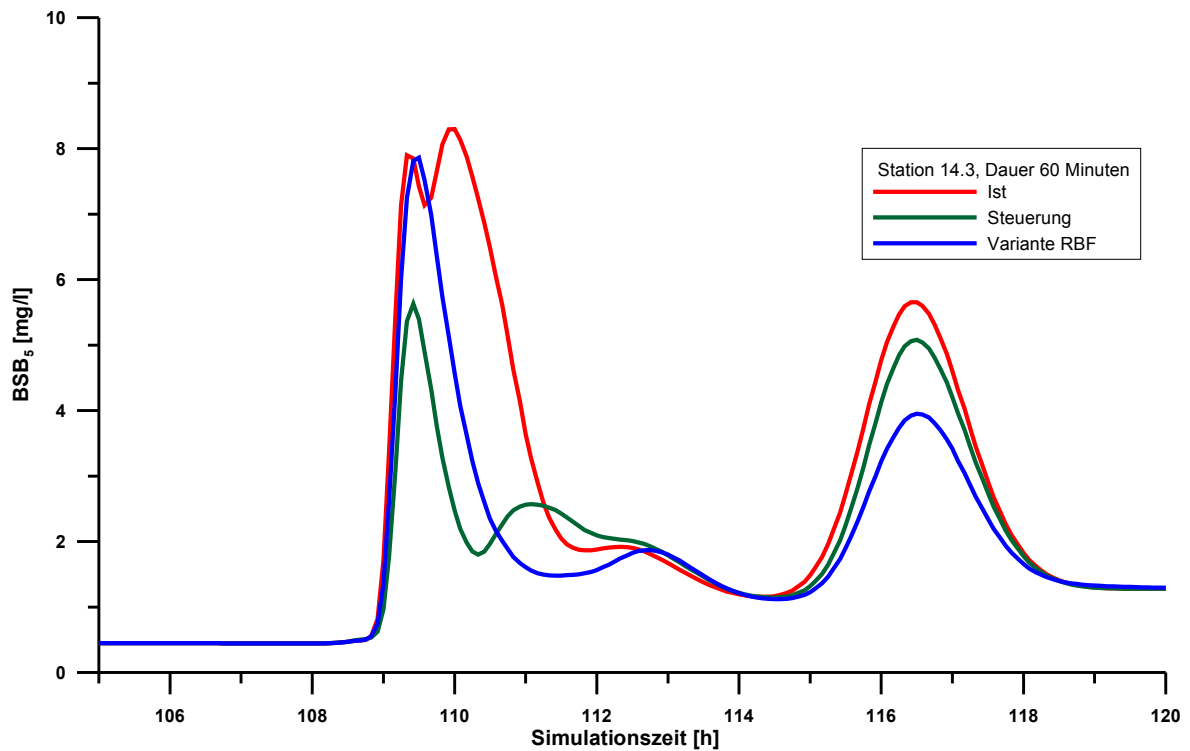


Abbildung 27: Parameter BSB_5 , Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3

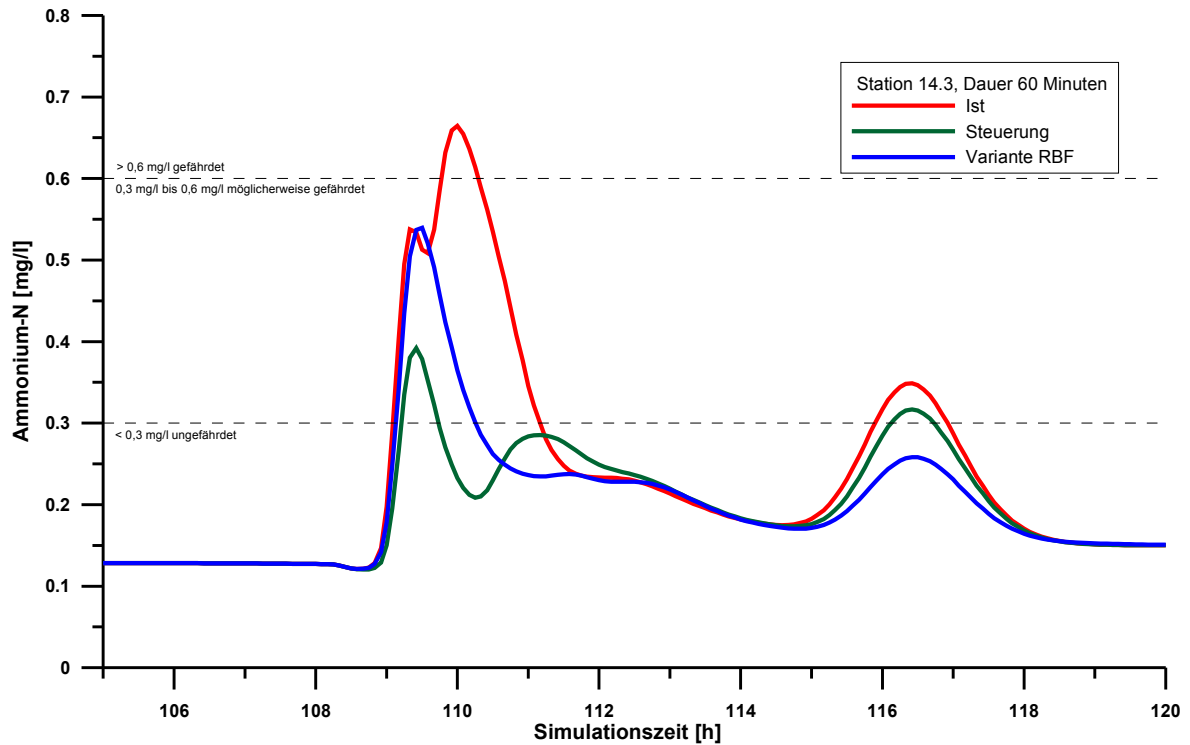


Abbildung 28: Parameter Ammonium, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3

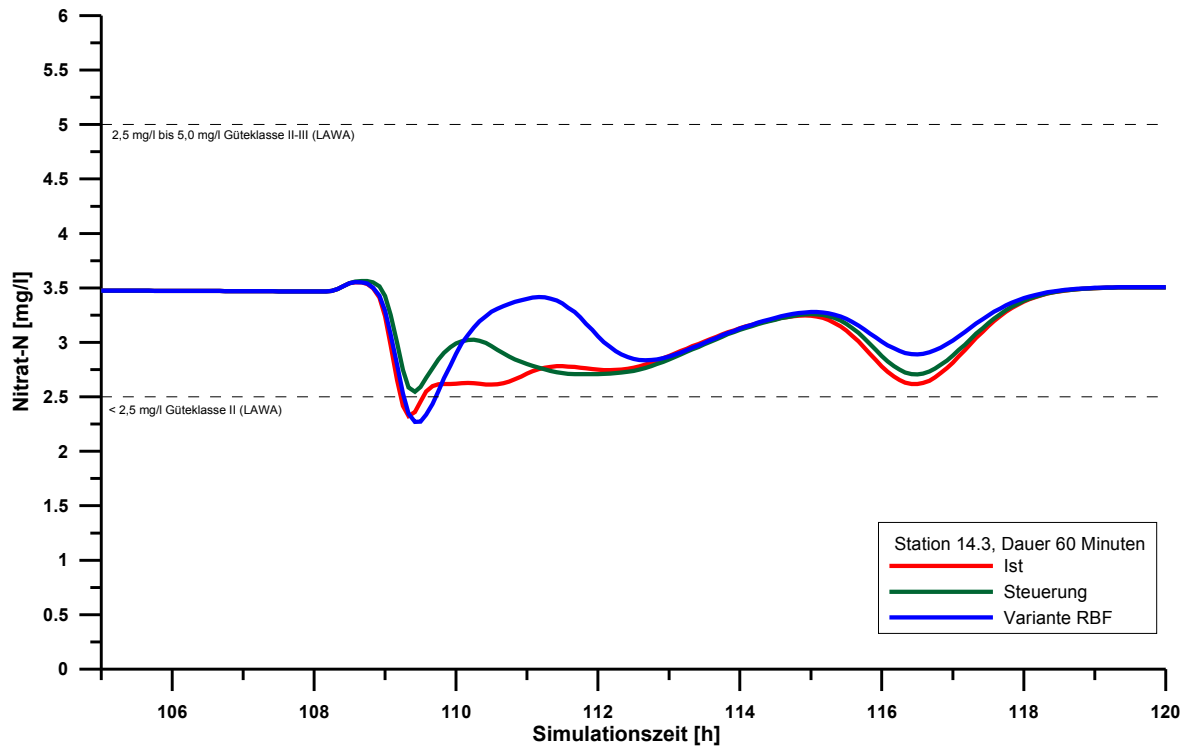


Abbildung 29: Parameter Nitrat, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3

Anlage 3, Ereignis E2 (Dauer 30 Minuten)

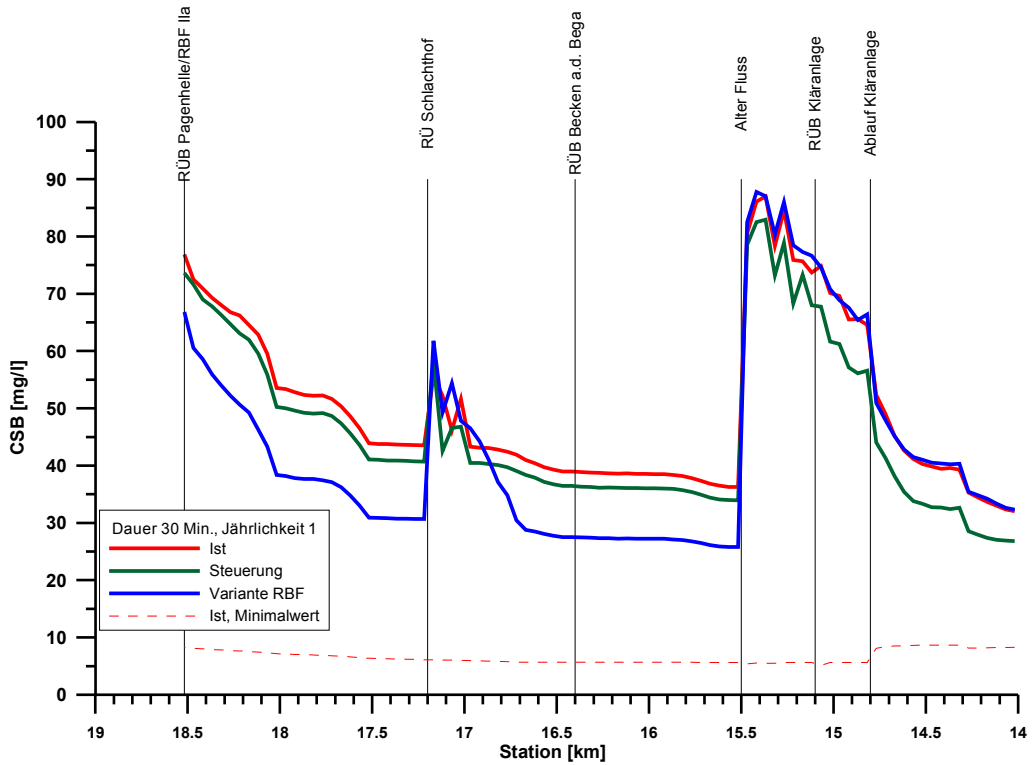


Abbildung 30: Parameter CSB, Maximalwerte, Längsschnitt

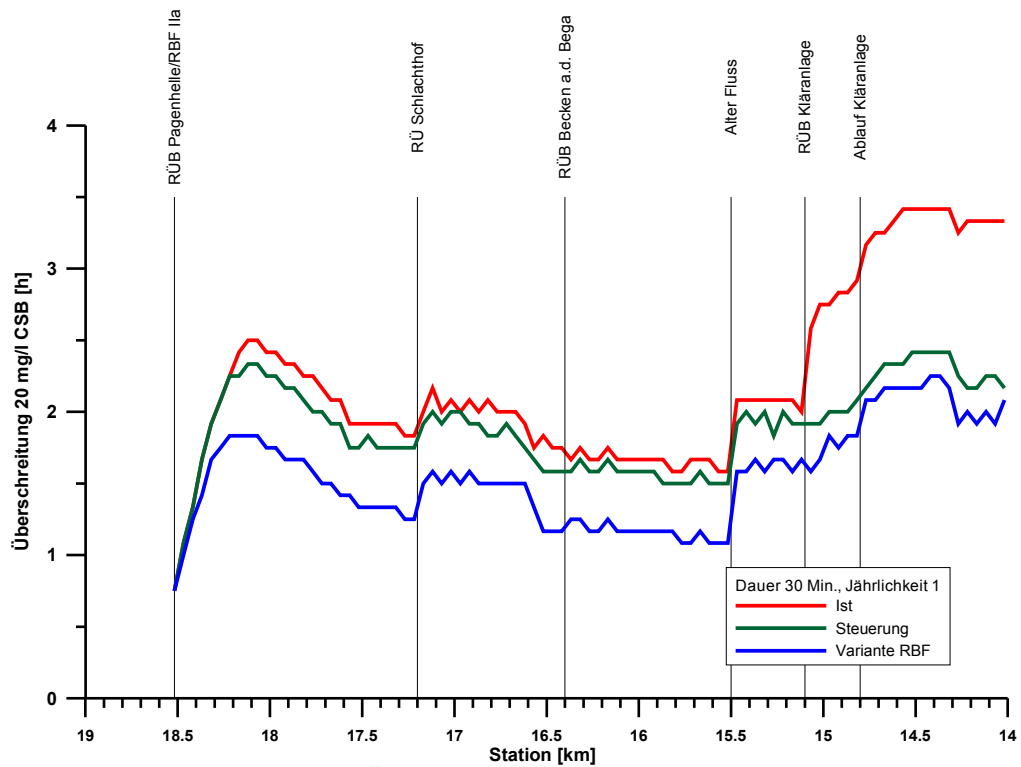


Abbildung 31: Parameter CSB, Überschreitung 20 mg/l, Längsschnitt

Anlage 3, Ereignis E2 (Dauer 30 Minuten)

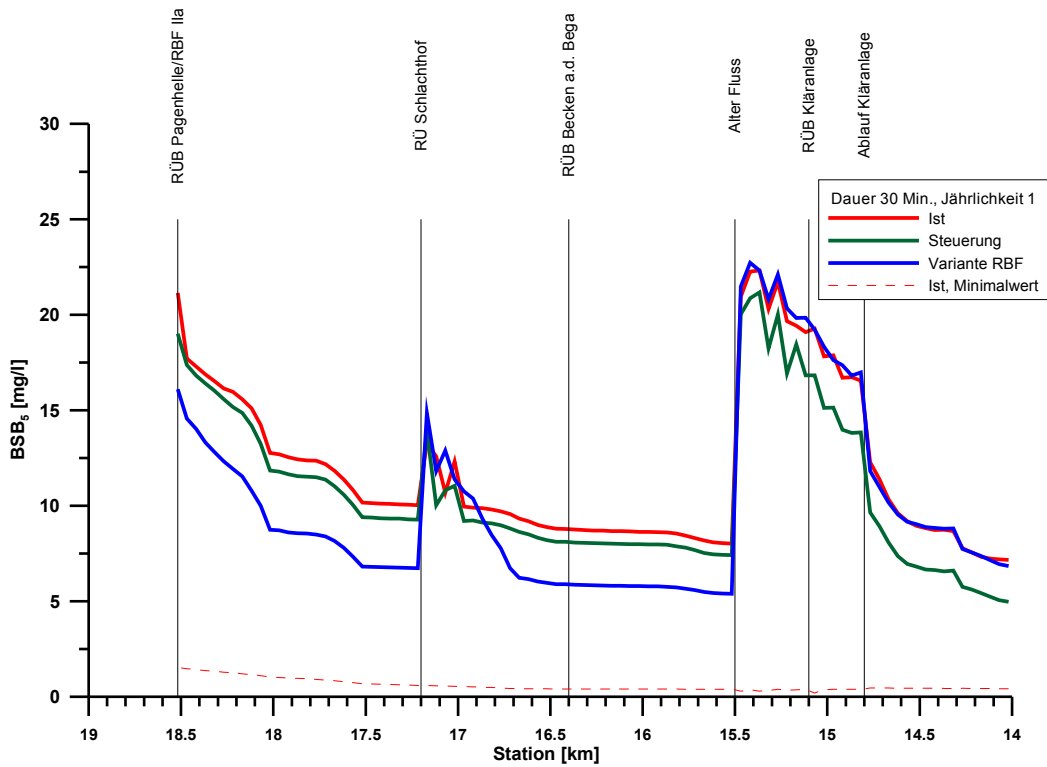


Abbildung 32: Parameter BSB_5 , Maximalwerte, Längsschnitt

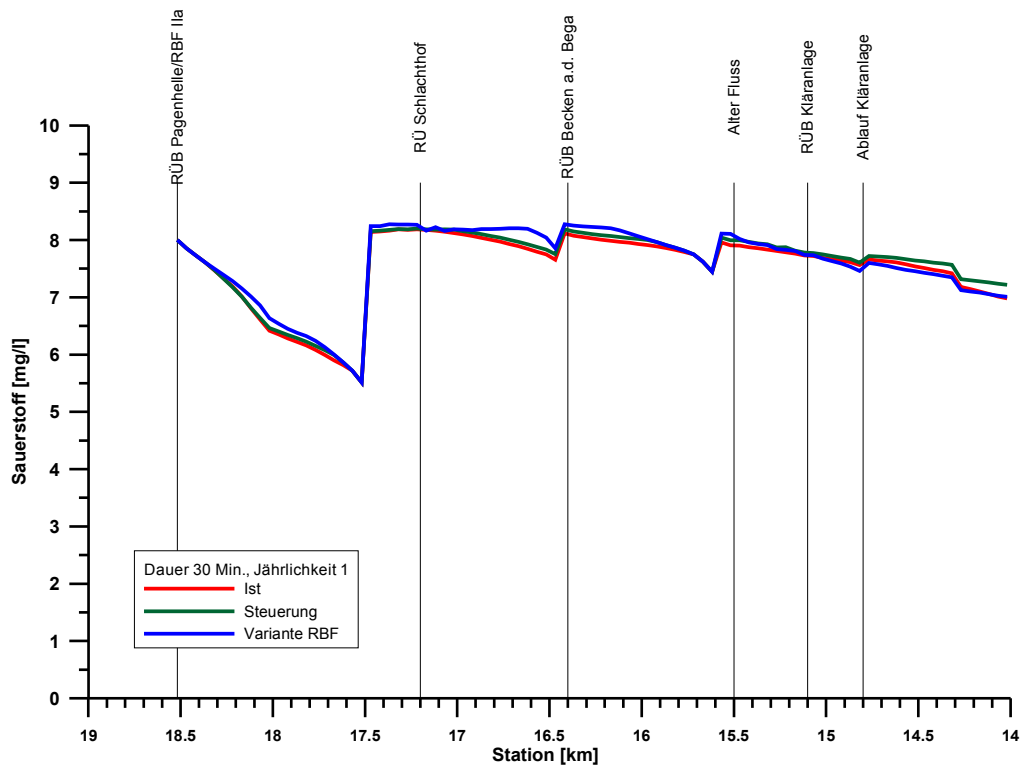


Abbildung 33: Parameter Sauerstoff, Minimalwerte, Längsschnitt

Anlage 3, Ereignis E2 (Dauer 30 Minuten)

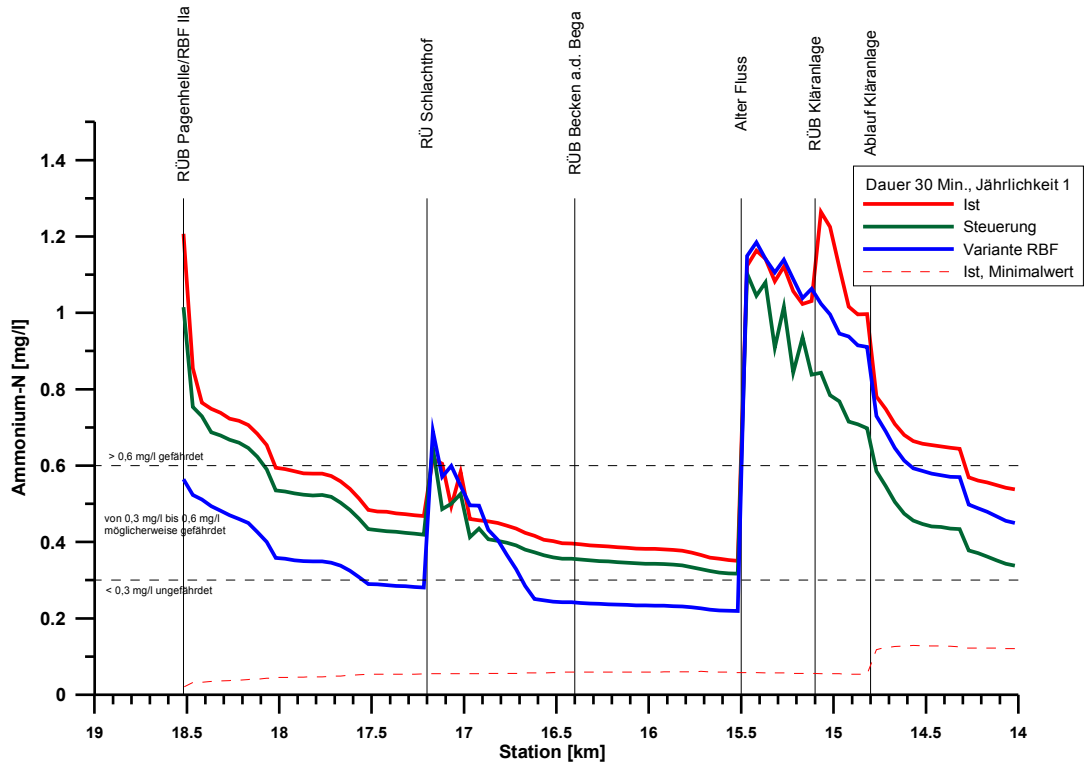


Abbildung 34: Parameter Ammonium, Maximalwerte, Längsschnitt

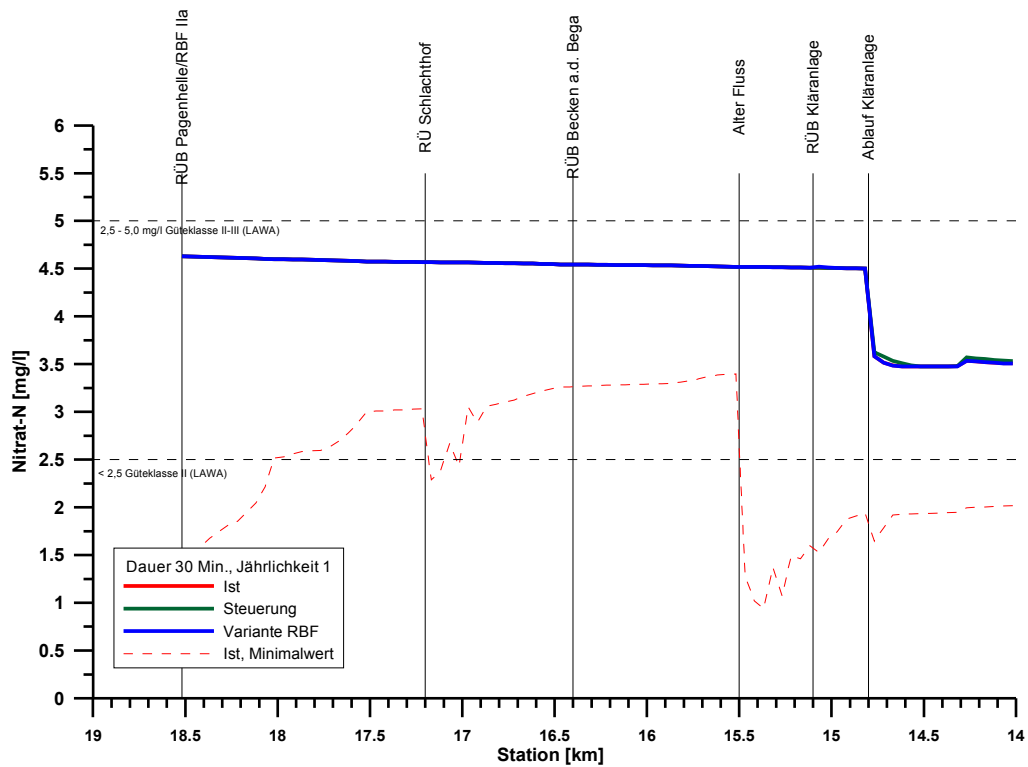


Abbildung 35: Parameter Nitrat, Maximalwerte, Längsschnitt

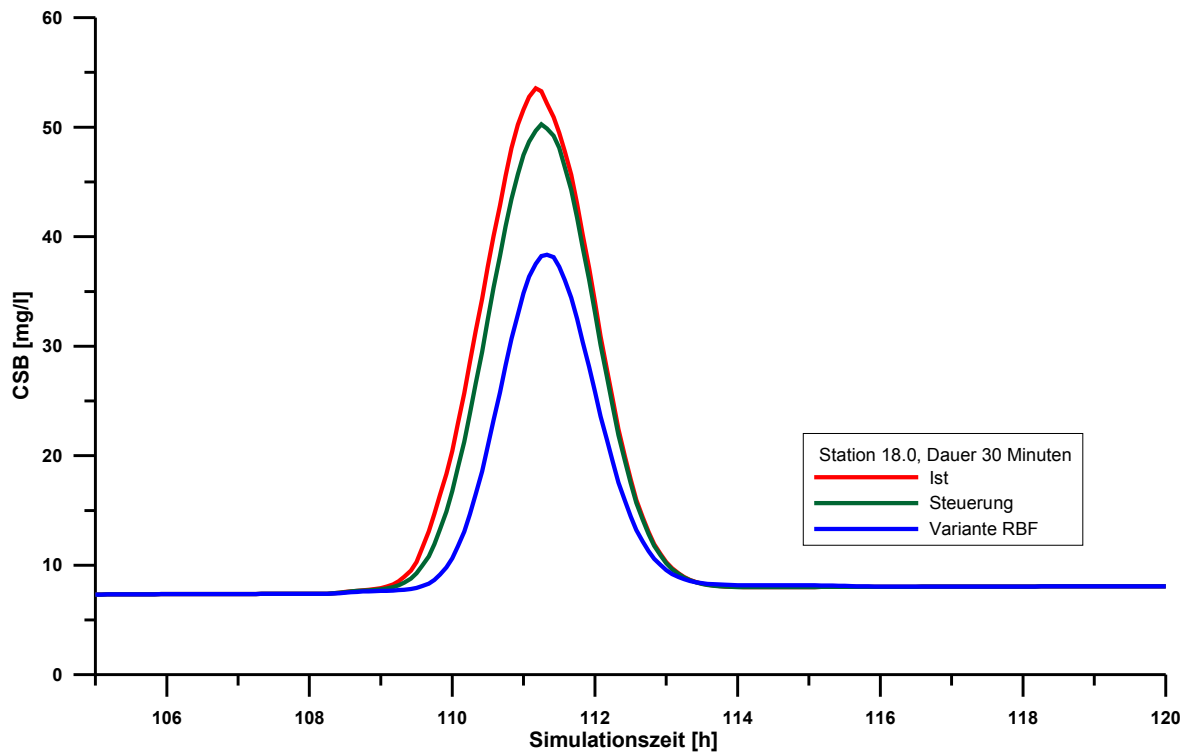


Abbildung 36: Parameter CSB, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0

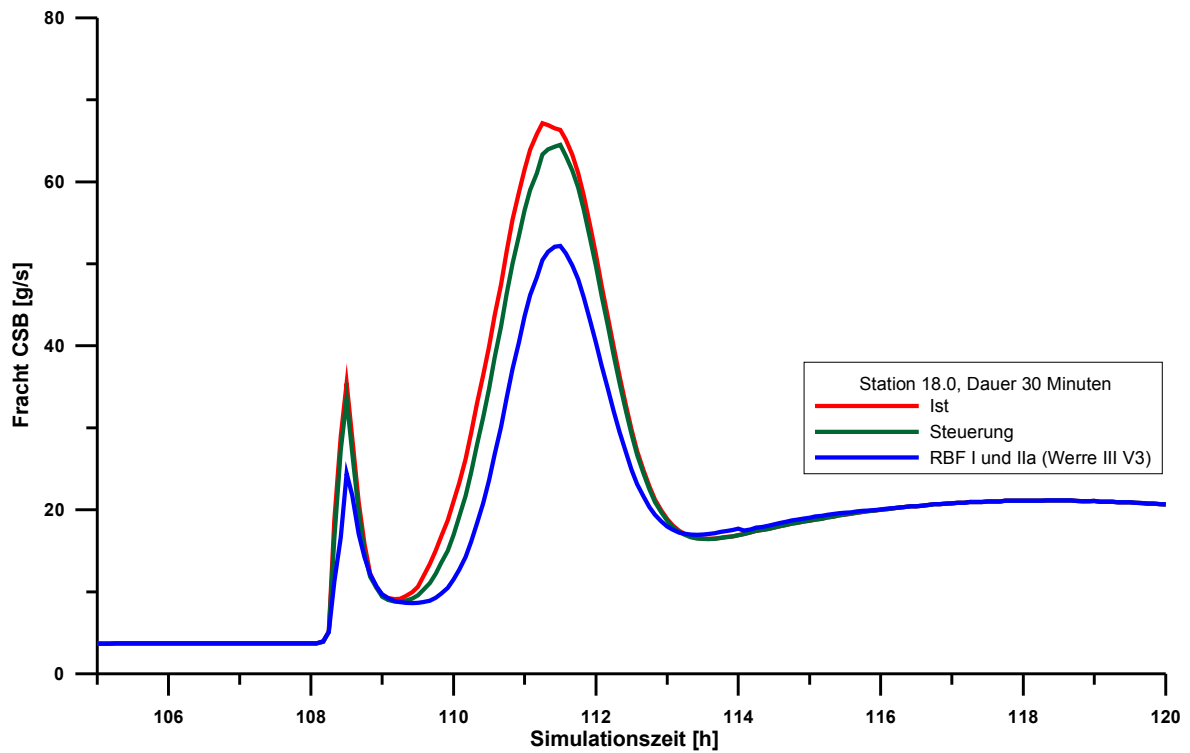


Abbildung 37: Parameter CSB, Frachtganglinie, Bega-Station 18,0

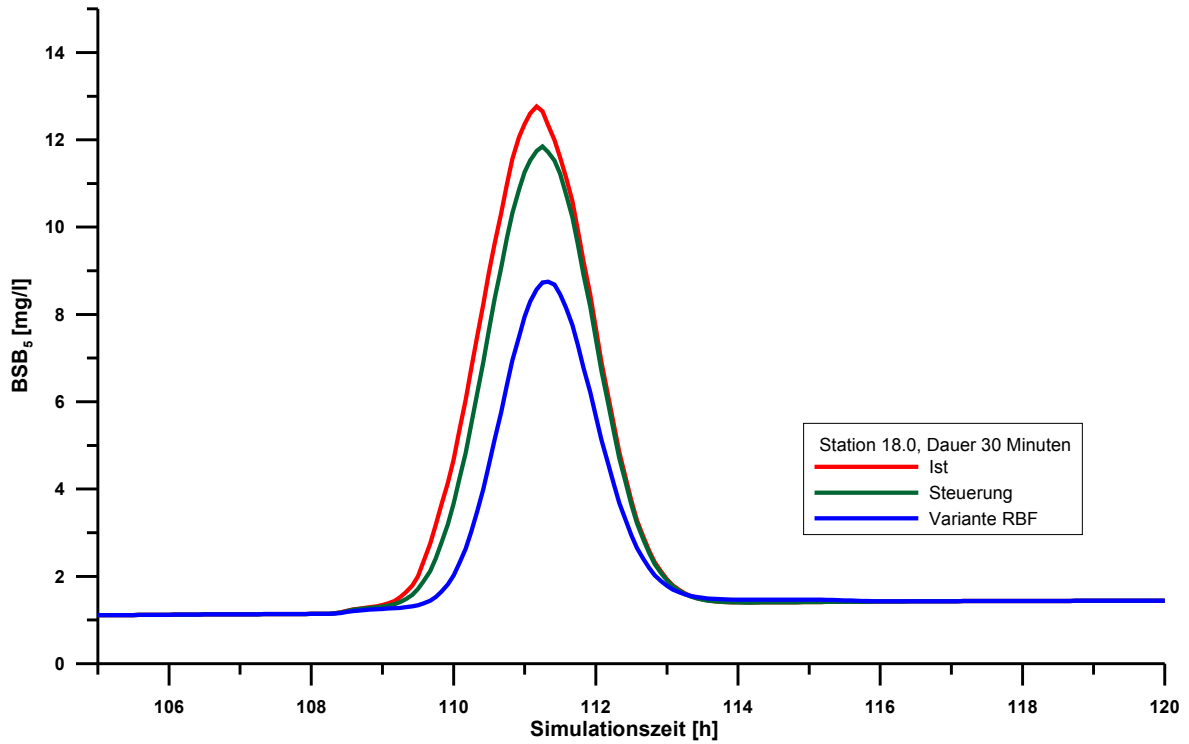


Abbildung 38: Parameter BSB_5 , Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0

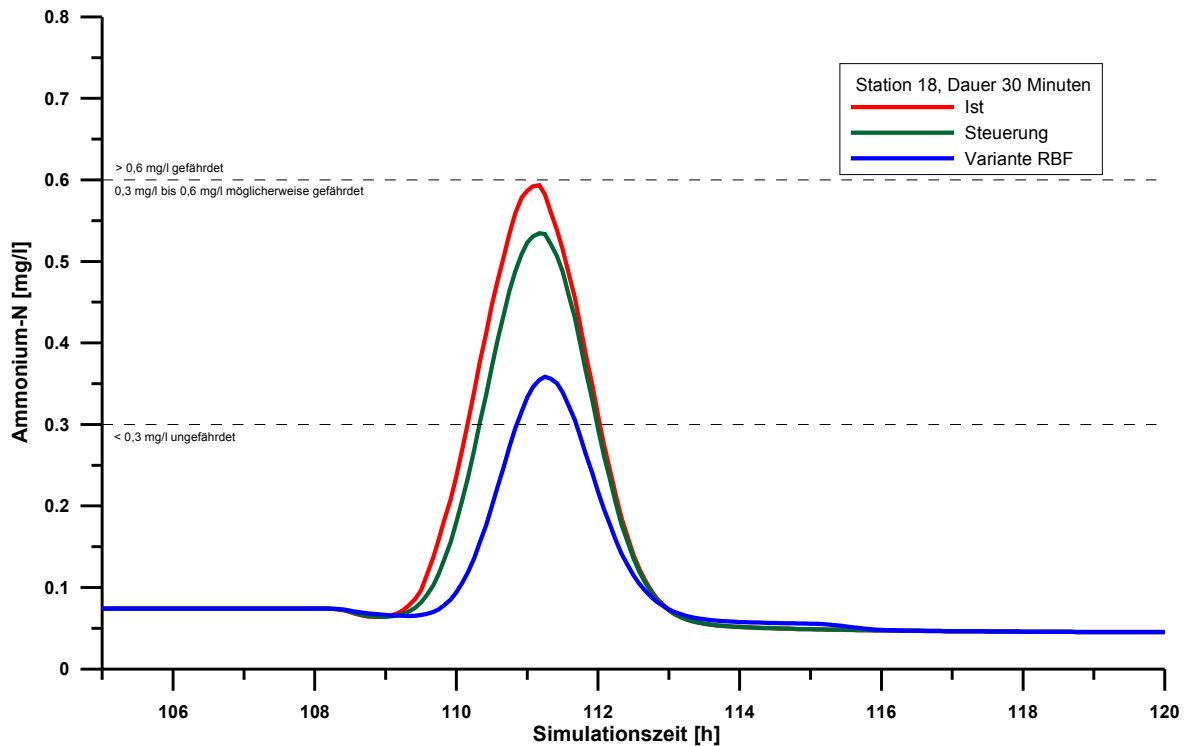


Abbildung 39: Parameter Ammonium, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0

Anlage 3, Ereignis E2 (Dauer 30 Minuten)

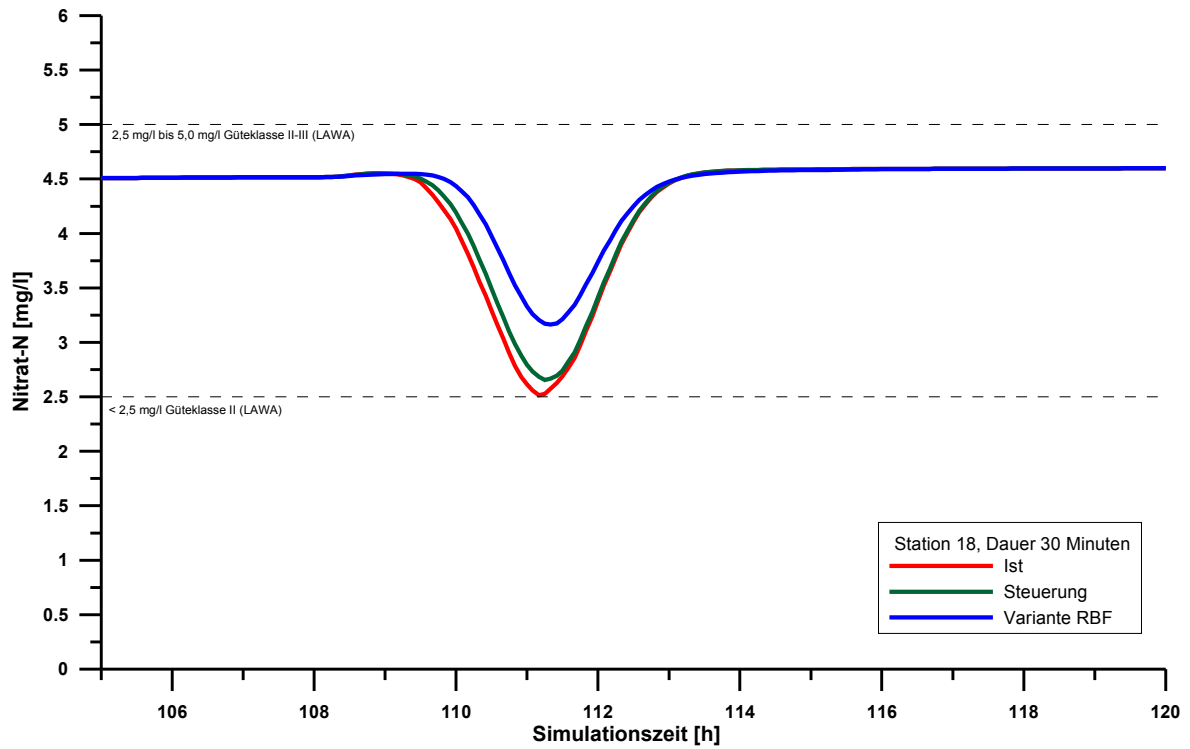


Abbildung 40: Parameter Nitrat, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 18,0

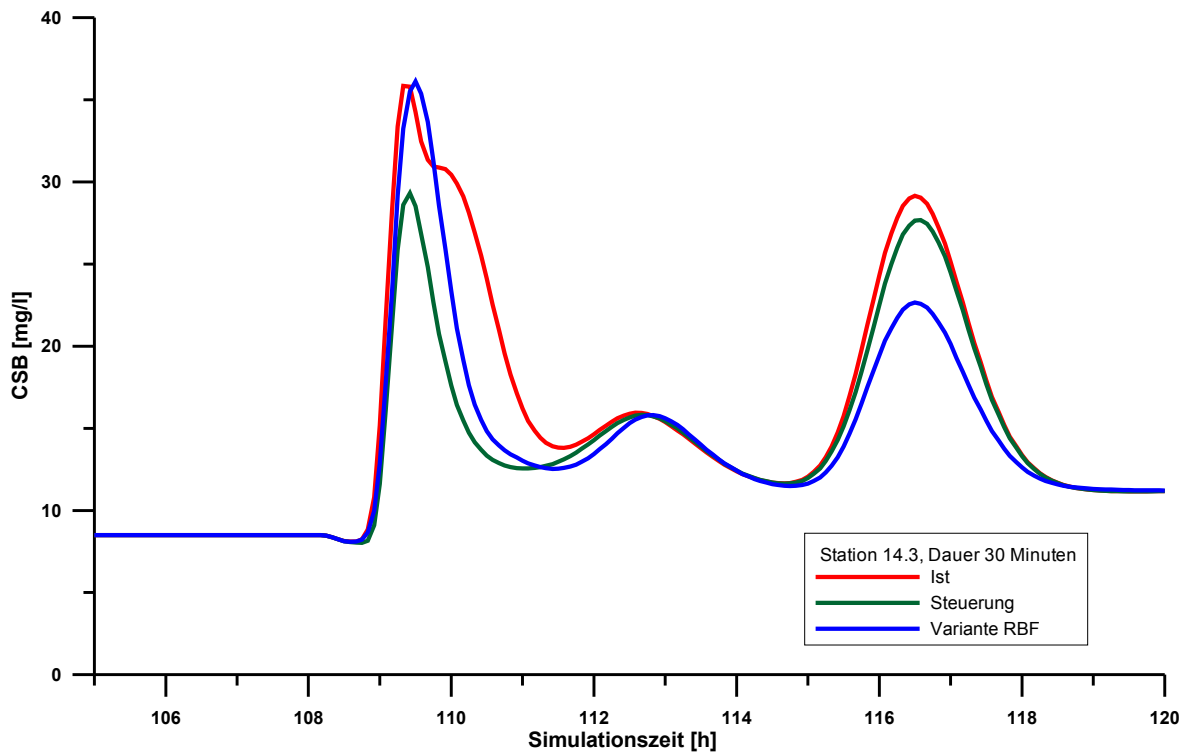


Abbildung 41: Parameter CSB, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 17,0

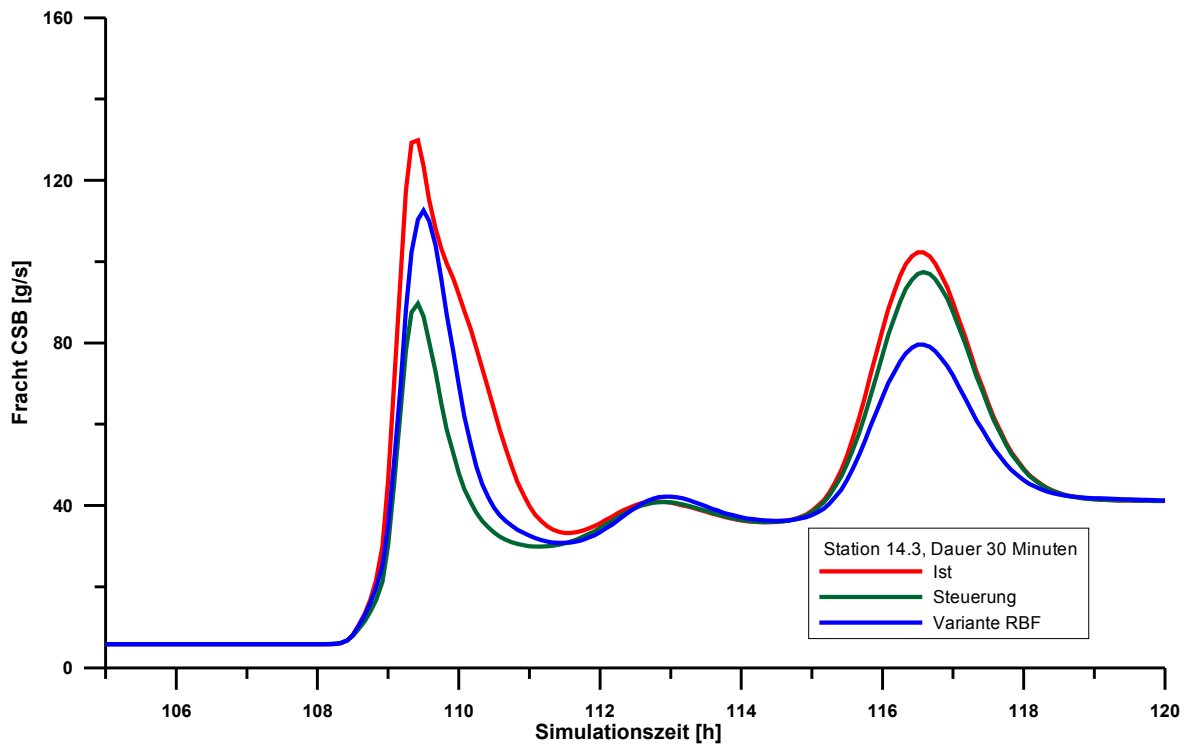


Abbildung 42: Parameter CSB, Frachtganglinie, Bega-Station 14,3

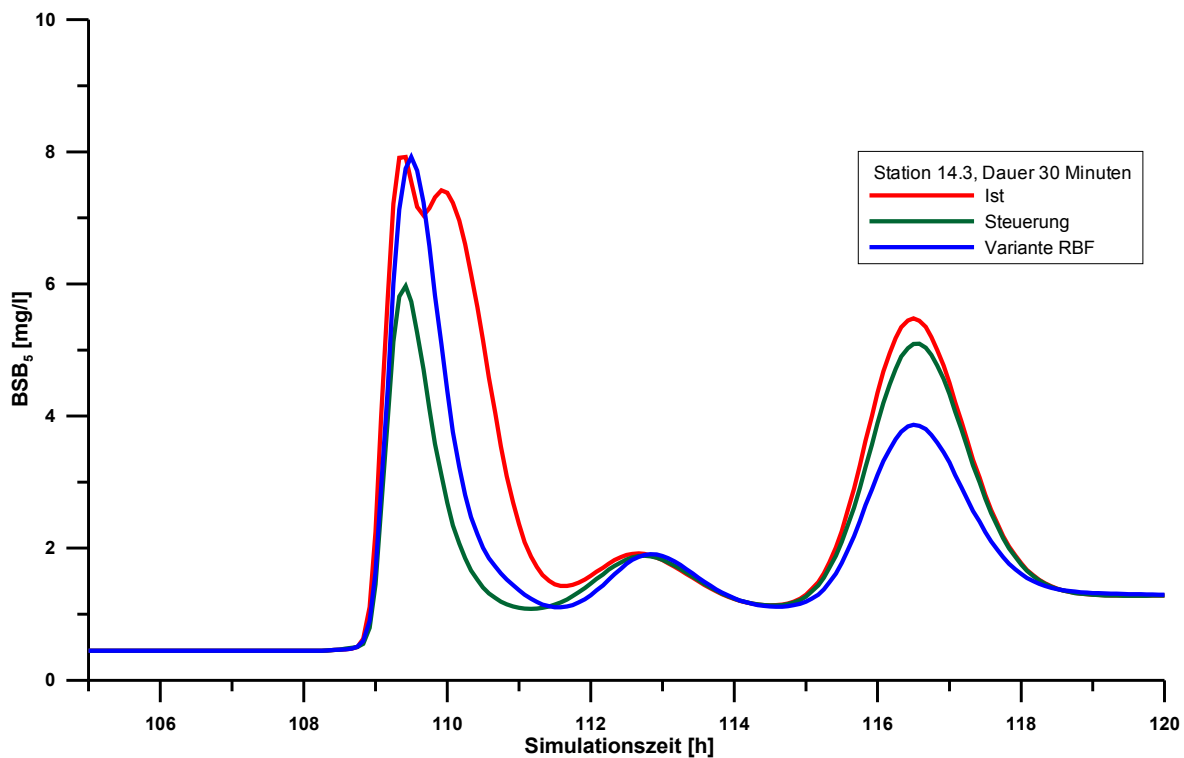


Abbildung 43: Parameter BSB_5 , Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3

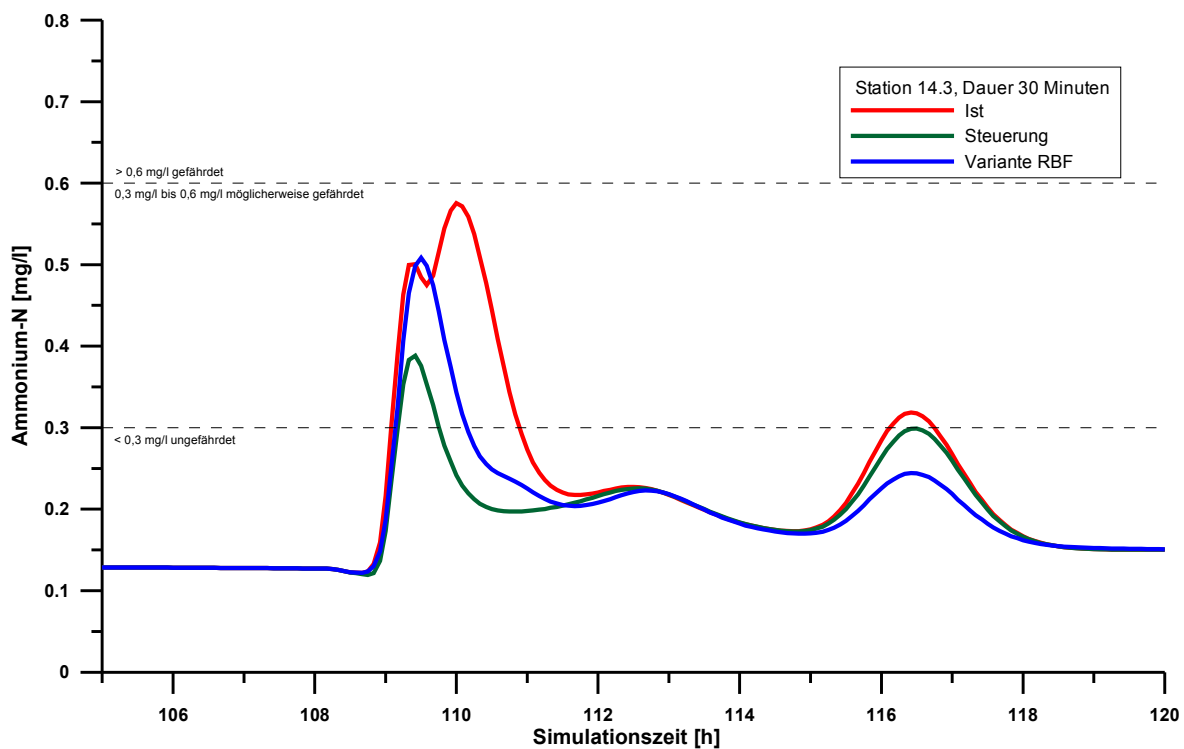


Abbildung 44: Parameter Ammonium, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3

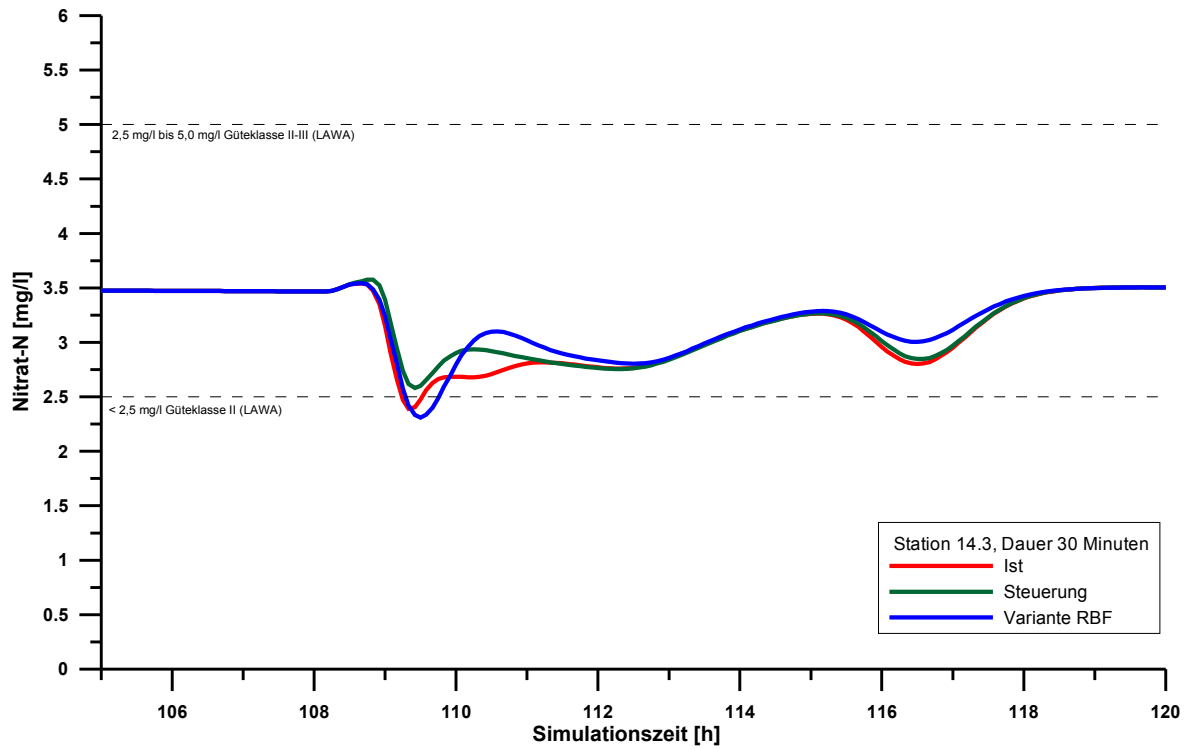


Abbildung 45: Parameter Nitrat, Konzentrationsganglinie, Bega-Station 14,3