

ABSCHLUSSBERICHT

Pilotprojekt MESSPLAN-EM¹_{SDETTE}N

Mehrwerte der messdatenbasierten Planung einer
Regenwasserbehandlungsanlage
in einem großen Trennsystem in Emsdetten

Stadt Emsdetten

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Veranlassung und Ausgangssituation	4
1.2	Aufgabenstellung und Ziele	5
1.3	Methodisches Vorgehen	5
2	Beschreibung des Projektgebiets	7
2.1	Einzugsgebiet	7
2.1.1	Beschreibung des Einzugsgebiets	7
2.1.2	Grundlagen zur Flächenermittlung	8
2.2	Erkenntnisse aus der vorangegangenen Messkampagne 2015-2016	9
3	Messkampagne	10
3.1	Ziele der Messkampagne	10
3.2	Aufbau und Betrieb der Messstelle	10
3.3	Eingesetzte Messtechnik	13
3.3.1	Durchflussmessung	13
3.3.2	Niederschlagsmessung	13
3.3.3	Online Partikelmessung	14
3.3.4	Probenahme	14
3.4	Probenahmemethodik und Laboranalysen	15
3.5	Beschreibung und Bewertung der Messdatenqualität	16
3.5.1	Füllstands- und Abflussmessung	16
3.5.2	Niederschlagsmessung	22
3.5.3	AFS- und AFSeq-Konzentration	23
3.5.4	Laboranalysen	27
3.5.5	Gegenüberstellung von Online-Spektrometermessung, Online Ultraschallmessung und Laboranalysen	30
3.6	Auswertung der Konzentrationsmessungen	32
4	Konzeption der Regenwasserbehandlung	35
4.1	Anforderungen nach DWA-A 102	35
4.2	Mögliche Behandlungskonzepte	36
4.2.1	Behandlung im RKB	36
4.3	Anforderungen nach Trennerlass NRW	38
4.3.1	Dezentrale Behandlungsmöglichkeiten	39
4.3.2	Messdatenbasierte Teilstrombehandlung	40
5	Hydrodynamische Schmutzfrachtmodellierung	42

5.1	Ziele der Modellierung und eingesetzte Modelltechnik	42
5.2	Modellaufbau	42
5.3	Qualitative und quantitative Modellkalibrierung	42
5.3.1	Niederschlagsereignisse	42
5.3.2	Anpassung der Modellparameter	44
5.3.3	Gütekriterien der Modellkalibrierung	44
5.3.4	Kalibrierung der Stoffkonzentration	45
5.4	Modelltechnische Bewertung	49
5.4.1	Modelltechnische Umsetzung	49
5.4.2	Verwendete Niederschlagsdaten	52
5.4.3	Ergebnisse der Modellierung	54
6	Empfehlung für ein Behandlungskonzept	55
6.1	Gegenüberstellung möglicher Behandlungskonzepte	55
6.1.1	Regenklärbecken	55
6.1.2	Teilstrombehandlung	56
6.2	Ökonomische Bewertung	56
6.2.1	Herstellungskosten	56
6.2.2	Betriebskosten	57
6.2.3	Datenbasierte Planung	59
6.2.4	Gesamtkosten	59
6.3	Fazit zum Behandlungskonzept	59
7	Diskussion der Projektergebnisse	60
8	Fazit und Ausblick	62
9	Literaturverzeichnis	63

1 Einleitung

1.1 Veranlassung und Ausgangssituation

Die Abwasserbehandlung und das Niederschlagswassermanagement haben die Qualität der Gewässer in den letzten 30 Jahren deutlich verbessert. Die zentrale Entsorgung des Schmutz- und Niederschlagswassers über Kanalnetze, Regenbecken und Kläranlagen stellt einen guten Entwässerungskomfort für Bemessungsregen sicher und garantiert einwandfreie hygienische Verhältnisse in unseren besiedelten Bereichen. Damit bildet die Siedlungsentwässerung einen Grundpfeiler unseres Wohlstands.

Dennoch werden die Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie hinsichtlich der Gewässerqualität nur an wenigen Gewässern vollumfänglich erreicht (Hartwein, 2017). In Nordrhein-Westfalen sind trotz eines sehr hohen Ausbaugrades der Abwasserentsorgung derzeit weniger als 10 Prozent der Oberflächengewässer in einem ökologisch guten Zustand. Umweltqualitätsziele werden vielfach nicht eingehalten. Für bestimmte Stoffgruppen, z.B. Schwermetalle (Kupfer, Zink usw.) und Biozide, gehören Einträge von Niederschlagswasser aus der Misch- und Trennkanalisation mit zu den wesentlichen Eintragspfaden (s.a. MKULNV NRW, 2015a; MULNV, 2020). Die wesentlichen Daten der aktuellsten Lageberichte für NRW werden zudem über ELWAS-WEB sowohl im Daten- als auch im Kartenbereich veröffentlicht (www.elwasweb.nrw.de).

In Deutschland greifen aktuelle Regelwerksentwicklungen sowohl im Bereich der Niederschlagswasserableitung, Überflutungs- und Starkregenvorsorge mit dem DWA-M 119 und DWA-A 118 (DWA, 2016; DWA, 2022) als auch der -behandlung mit dem DWA-A 102 (DWA, 2020) diese Themen auf. Die Anforderungen an die Niederschlagswasserbehandlung in NRW sind noch durch den Runderlass vom 26. Mai 2004 „Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren“ (sogenannter „Trennerlass“, 2004) als allgemein anerkannte Regeln der Technik festgelegt. Eine Anpassung des Erlasses an die Vorgaben des DWA-A 102 steht derzeit aus.

Für eine zukunftsfähige Planung sollte eine Regenwasserbehandlung allen Regelwerken entsprechen, ggf. flexibel an neue Erkenntnisse, Vorgaben und Bebauungssituationen anpassbar und dabei möglichst wirtschaftlich sein. Um an komplexen Entwässerungspunkten die genannten Kriterien zu erfüllen, ist eine belastbare Datengrundlage unabdingbar. Neuplanungen und Sanierungen und der Betrieb von Regenwasserbehandlungen sollten sich an den örtlich auftretenden Belastungen orientieren und nicht allein auf „Annahmen“ basieren.

Datenbasierte Planungs- und Betriebskonzepte sind aktuell dem Stand der Forschung zuzuordnen und werden auf internationalen Tagungen diskutiert (Rieckermann et al., 2017; Hoppe, 2017; Fricke et al. 2017).

1.2 Aufgabenstellung und Ziele

Die Stadt Emsdetten steht vor der Herausforderung eine Regenwasserbehandlung für ein großes, trennentwässertes Gebiet zu planen und umzusetzen. In dem Einzugsgebiet liegen Wohngebiete, Gewerbegebiete und Hauptverkehrsstraßen, die den unterschiedlichen Kategorien 1 bis 3 nach Trennerlass NRW zuzuordnen sind und damit einer Behandlung erfordern. Die Einleitung des Regenwassers erfolgt in die Ems an der Einleitungsstelle EM1 in unmittelbarer Nähe der Kläranlage Emsdetten.

Die Planung der erforderlichen Behandlungsanlage sollte sich im Rahmen des Pilotprojekts nicht nur auf „Literaturdaten“ zur Verschmutzung des Regenwassers stützen bzw. aus den Verschmutzungskategorien ableiten. Vielmehr sollten die örtlichen Verhältnisse über die tatsächliche Verschmutzung des Niederschlagswassers und deren zeitliche Dynamik berücksichtigt werden („datenbasierte Planung“). Dabei war zudem zu beachten, dass die Gebietsentwicklung der Wohn- und insbesondere der Gewerbeflächen noch nicht abgeschlossen ist. Änderungen können sich auch bei dem Anschluss von bereits vorhandenen Gewerbeflächen ergeben (Versickerung oder Einleitung). Das Planungskonzept bzw. die Anlagen zur Regenwasserbehandlung sollten auch auf zukünftige Veränderungen, die mit dem Klimawandel einhergehen, adaptierbar sein. Dabei galt es längere Trockenperioden und vermehrte Starkregenereignisse in den Blick zu nehmen, die eine höhere Dynamik der Verschmutzung des Regenwassers, durch Ablagerung und Remobilisierung von Schadstoffen, erwarten lassen.

1.3 Methodisches Vorgehen

Die Bearbeitung des Pilotprojekts war in drei Arbeitspakete und damit verbundene Meilensteine zum Projektcontrolling aufgeteilt. Bei der Planung und Umsetzung sind die erfassten Daten gemäß der Empfehlungen aus dem Projekt Regen 4.0 und dem DWA-M 151/181 in einem Messdatenmanagementsystem verwaltet worden. Hierzu wurde das Programm AquaZIS® verwendet. Die Einrichtung der Messstellen erfolgte ebenfalls unter Beachtung der genannten Empfehlungen und Regelwerke. Alles Messdaten wurden zeitnah geprüft und bei Bedarf anwendungsbezogen korrigiert.

Im ersten Arbeitspaket wurden die Messdaten der vorangegangenen Messkampagne durch ein erweitertes Messkonzept ergänzt und die erhobenen Messdaten detailliert zusammengestellt. Hierbei erfolgte eine Gegenüberstellung wiederkehrender und nicht wiederkehrender Ereignisse.

Die Messkampagne wurde zusätzlich durch Probenahmen ergänzt, um die kontinuierlichen online-Messdaten (AFSeq) zu verifizieren und Aussagen zum Parameter AFS63 treffen zu können.

Im zweiten Arbeitspaket wurden die Messdaten weiter ausgewertet und ein hydrodynamisches Kanalnetzmodell erstellt, das die Prozesse zum Stofftransport mit abbilden kann. Hierzu wurden insbesondere Masse-Volumen-Diagramme erstellt ($M(V)$), um Spülstoßcharakteristika zu identifizieren. Diese dienen als Grundlage für die Bewertung des hydrodynamischen Modells (Stofftransport/Schmutzfrachtmodell).

Das kalibrierte Kanalnetzmodell bildete die Grundlage zur Bewertung unterschiedlicher Reinigungsstrategien, z.B. um eine Teilstrombehandlung zu simulieren.

Im dritten Arbeitspaket erfolgte die Konzeption der Regenwasserbehandlung. In diesem Schritt standen die Anforderungen, die sich aus den aktuellen Regelwerken und der pauschalen Flächenkategorisierung ergeben, im Fokus. Dem gegenüber standen die Anforderungen, die sich aus der tatsächlichen Verschmutzung des Regenwassers – abgeleitet aus den Messdaten - ergeben haben. Sowohl eine Gegenüberstellung der technischen Möglichkeiten als auch betriebliche Herausforderungen, die sich bereits ableiten lassen (beispielsweise lange sehr gering belastete Nachläufe) wurden zusammengestellt.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine „datenbasierte Planung“ vervollständigte die o.g. Arbeitsschritte.

Die Erkenntnisse der einzelnen Projektschritte wurden hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit geprüft und allgemeine Empfehlungen abgeleitet.

2 Beschreibung des Projektgebiets

2.1 Einzugsgebiet

2.1.1 Beschreibung des Einzugsgebiets

Das Einzugsgebiet der Einleitstelle EM1 befindet sich im süd-östlichen Teil von Emsdetten. Es umfasst eine kanalisierte Gesamtfläche von ca. 236 ha, wovon ca. 140 ha befestigt sind.

Der südliche Teil zeichnet sich vor allem durch Gewerbegebiete aus, während der nördliche Teil aus Wohnbebauung und Grünflächen (Wald, Sportplatz, Friedhof) besteht. In nord-süd Richtung verläuft eine Hauptverkehrsstraße, die Bundesstraße B 481, durch das Einzugsgebiet (Bild 1).

Die Entwässerung des Einzugsgebiets erfolgt im Trennsystem. Über die in Summe 18,6 km langen Regenwasserkanäle wird das Niederschlagswasser derzeit noch ohne Behandlung in die Ems eingeleitet. Unmittelbar vor der Einleitstelle verläuft der Regenwasserkanal auf dem Gelände der Kläranlage. Auf diesem Gelände steht kein Platz für eine große Behandlungsanlage zur Verfügung und die an die Kläranlage angrenzenden Flächen sind nicht im Besitz der Stadt Emsdetten.

Auf dem Gelände der Kläranlage wird das Grundwasser abgesenkt. Im Zeitraum vom 01.01.2021 bis 10.03.2022 lag der maximale Grundwasserstand bei 35,86 mNN. Die Sohlhöhe des Regenwasserkanals im Bereich auf der Kläranlage liegt zwischen 35,50 und 36,90 mNN und damit zum Teil bereits im Grundwasser.

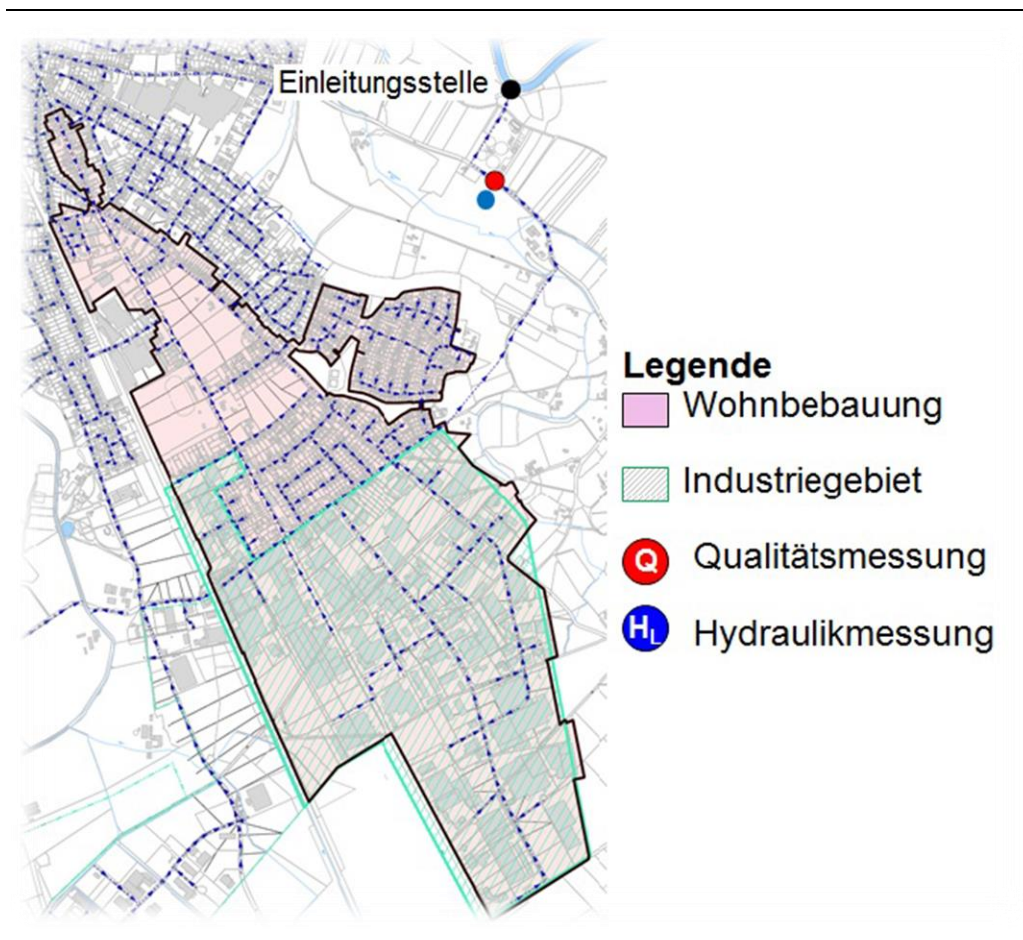


Bild 1 Übersicht des Einzugsgebiets der Einleitungsstelle EM1 in Emsdetten

2.1.2 Grundlagen zur Flächenermittlung

Die Ermittlung der Flächen beruht auf dem kalibrierten hydrodynamischen Kanalnetzmodell (DYNA-GeoCPM) aus dem GEP der Stadt Emsdetten aus dem Jahr 2016. Darin wurden die prozentualen, versiegelten Flächenanteile der Teileinzugsgebietsflächen über die Verschneidung der hydraulischen Einzugsflächen auf Grundlage des digitalen Versiegelungskataster ermittelt.

Für die Betrachtungen im Rahmen des Pilotprojekts wurden die Teileinzugsgebiete weiter verfeinert, um eine detaillierte Zuordnung von Teilflächen zu den Belastungskategorien

vornehmen zu können (Kap. 4.1). Dachflächen wurden von der Gesamtfläche des jeweiligen Grundstücks abgezogen. Der Versiegelungsgrad der Dachflächen wurde für diese Berechnung entsprechend des GEP mit 85 % angesetzt. Der Versiegelungsgrad der verbleibenden Grundstücksflächen wurde korrigiert, so dass die versiegelte Fläche je Grundstück inkl. Dachfläche dem ursprünglichen Versiegelungsgrad entspricht. Nach den vorgenommenen Anpassungen beträgt die kanalisierte Gesamtfläche 235,24 ha, wovon 118,79 ha befestigt sind.

2.2 Erkenntnisse aus der vorangegangenen Messkampagne 2015-2016

Im Zeitraum von Oktober 2015 bis Mitte November 2016 hat eine erste Messkampagne zur Bewertung der Verschmutzung des Niederschlagswassers aus dem Einzugsgebiet stattgefunden. Neben kontinuierlichen AFSeq- und Abflussmessungen, wurden drei Probenahmen durchgeführt. Im Labor wurden diese Proben auf folgende Parameter untersucht: AFS, TOC, TNb, CSB, Blei, Kupfer, Zink, Quecksilber, AOX und Kohlenwasserstoffe. Für die untersuchten Parameter lagen die Messergebnisse, verglichen mit Literaturwerten (Dierschke, 2014; Sommer, 2017; DWA-A 102, 2020; Holthuis, 2016; Wicke et. al., 2015), im geringen Konzentrationsbereich. Die Messergebnisse der Probenahmen und die Vergleichswerte aus der Literatur sind in tabellarischer Form in Anlage 1 dargestellt.

Die kontinuierlich gemessene AFSeq-Konzentration wurde für alle Ereignisse mit einem Füllstand von mehr als 0,4 m ausgewertet. Anlage 2 zeigt für diese Ereignisse die minimale, mittlere und maximale AFSeq-Konzentration. Dabei zeigt sich, dass es vereinzelt hohe Maximalwerte gibt (Ausreißer), die mittlere Konzentration jedoch bei keinem Ereignis 100 mg/l überschreitet.

Die kontinuierliche Messung mittels Spektrometersonde zeigte für den Parameter AFSeq eine hohe und charakteristische Dynamik in der Verschmutzung der Regenwasserabflüsse. Zu Beginn der Ereignisse kam es zu Verschmutzungsspitzen. Das Ende der Ereignisse war durch lange Nachläufe mit geringer Verschmutzung charakterisiert.

Zudem wurde ein dauerhafter Trockenwetterabfluss detektiert und Anzeichen für Fehleinleitungen im Einzugsgebiet beobachtet.

3 Messkampagne

3.1 Ziele der Messkampagne

Im Rahmen der Messkampagne sollten Konzentrationsverläufe der abfiltrierbaren Stoffe (AFS) im Zusammenhang mit dem Niederschlags-Abfluss-Geschehen untersucht werden. Hierbei erfolgte eine Gegenüberstellung wiederkehrender und nicht wiederkehrender Verschmutzungsspitzen/Phänomene.

Die mittels Spektrometermessung gemessenen online-Konzentrationen sollten mittels Laboranalysen plausibilisiert werden. Des Weiteren wurde im Labor der zukünftig maßgebende Parameter der Regenwasserbehandlung AFS63 bestimmt.

Die Messkampagne sollte darüber hinaus Hinweise zum praktischen Einsatz von Online-AFS/AFS63-Messtechnik und den Möglichkeiten der labortechnischen Untersuchung von AFS63 in der praktischen Anwendung liefern. Die Erfahrungen sollen zudem für die Umsetzung eines zeitlich begrenzten Monitoring-Programms bei einer späteren Realisierung des Vorhabens zum Tragen kommen.

Im zweiten Arbeitspaket, dem Aufbau des Schmutzfrachtmodells, dienten die während der Messkampagne erhobenen Daten zur Modellkalibrierung.

Die Messkampagne wurde zunächst für einen Zeitraum von 3 Monaten beauftragt. Da nach diesem Zeitraum witterungsbedingt noch keine ausreichende Anzahl von Probenahmeereignissen über den gesamten Konzentrationsbereich stattgefunden hat, wurden die Messungen um weitere 6 Monate verlängert. Darüber hinaus wurden einzelne Messgeräte nach Verfügbarkeit weiter betrieben.

3.2 Aufbau und Betrieb der Messstelle

Die Messstelle wurde ca. 200 m oberhalb der Einleitstelle EM1 im Regenwasserkanal (DN1400) auf dem Gelände der Kläranlage Austum (Bild 2) eingebaut.

Die Inbetriebnahme der Messgeräte erfolgte am 29.10.2020. Zu Beginn waren alle im Folgenden genannten Sondentypen im Einsatz. Das letzte Messgerät (zur Bestimmung der AFSeq-Konzentration) wurde am 08.01.2022 ausgebaut.

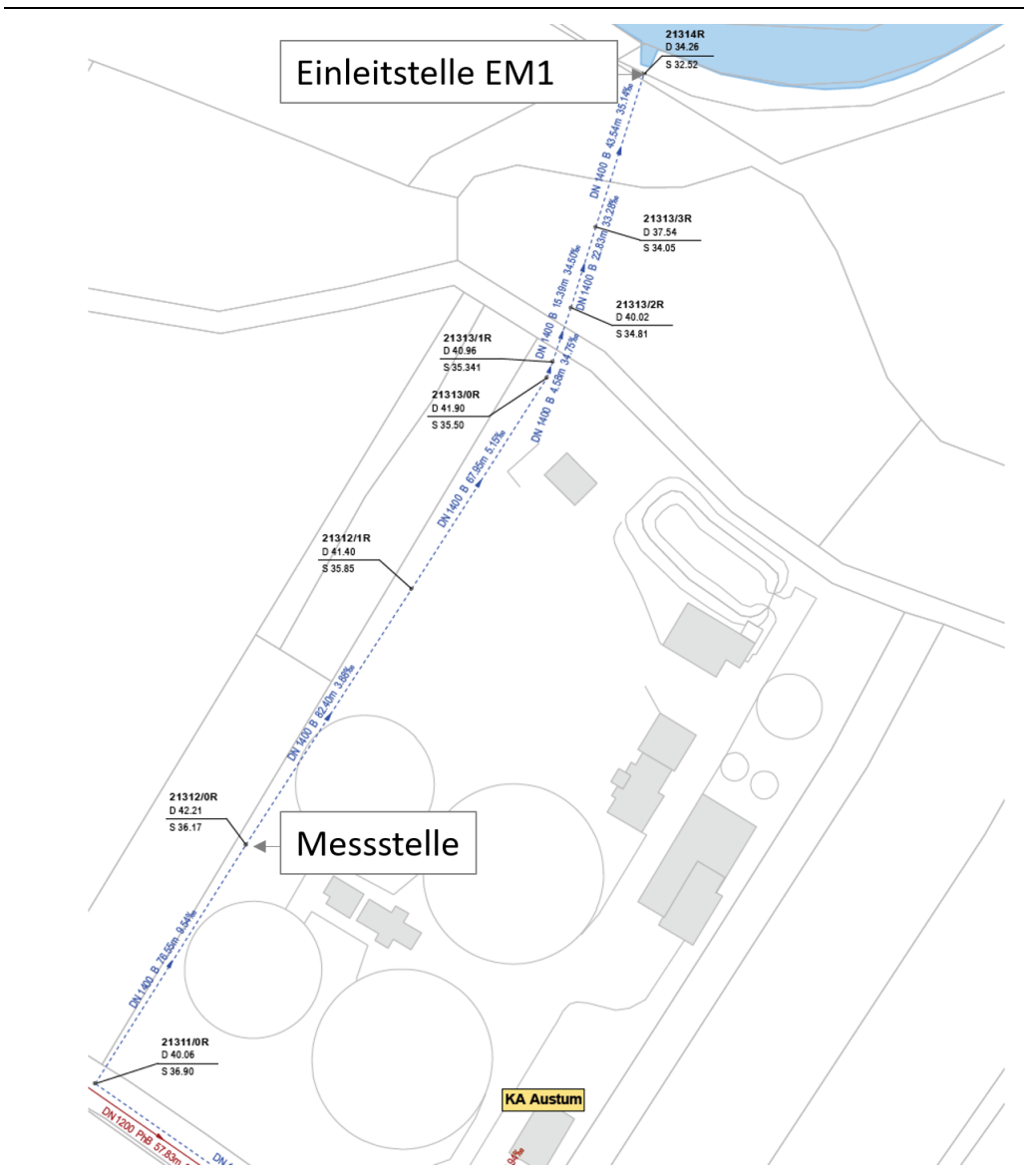


Bild 2 Lage der Messstelle zur Erfassung der Abflussvolumina und Abflussverschmutzung vor der Einleitungsstelle EM1 in die Ems

Die Einrichtung der Messstelle erfolgte unter Berücksichtigung folgender Anforderungen:

- Einhaltung der erforderlichen Betriebsbedingungen für jedes Messgerät
- Minimierung der Beeinflussung der Messgeräte untereinander
- Kontinuierliche Messung im Trocken- und Regenwetterfall

Der Aufbau der Messstelle ist in Bild 3 dargestellt.

Zur Vermeidung des „Trockenfallens“ der Sensoren und zur Erzeugung eines durchgehend ausreichenden Füllstands wurde eine Bodenschwelle (Wehr) im Gerinne montiert, in dessen Rückstaubereich die Messgeräte installiert wurden. Durch diese Maßnahme sind keine negativen Effekte auf die Messdaten zu erwarten. Eine Verschlämzung etc. wurde nicht beobachtet. Durch die Einbauten wurden im Gegenteil kontinuierlich zuverlässige Messdaten sichergestellt.

Einen halben Meter oberhalb des Wehres, wurden parallel zwei Spektrometersonden (s::can1 und s::can2) zur Bestimmung des Parameters AFSeq auf der Sohle installiert. Die Messwerterfassung findet jeweils punktuell im Messspalt der Sonden statt. Die zweite Sonde diente zur Plausibilisierung der ersten und wurde nach 5 Wochen Messbetrieb demontiert.

Die Kabelführungen der demontierten Sonde wurden anschließend als Führung für den Ansaugschlauch des Probennehmers verwendet. Das Schlauchende ist ca. 2 cm oberhalb der Sohle in unmittelbarer Nähe der ausgebauten Spektrometersonde befestigt worden.

Im Abstand von 1,35 m zum Messspalt der s::can-Sonden wurde, ebenfalls zur Bestimmung des Parameters „AFS“ bzw. AFSeq, eine Sonde die mittels Ultraschall arbeitet, mittig auf der Gerinnesohle installiert. Der Messbereich dieser Sonde befindet sich im Wasserkörper in Fließrichtung unterhalb der Sonde.

Direkt oberhalb der Ultraschall-Partikelmessung wurde außerdem eine Sonde zur Erfassung des Durchflusses installiert.

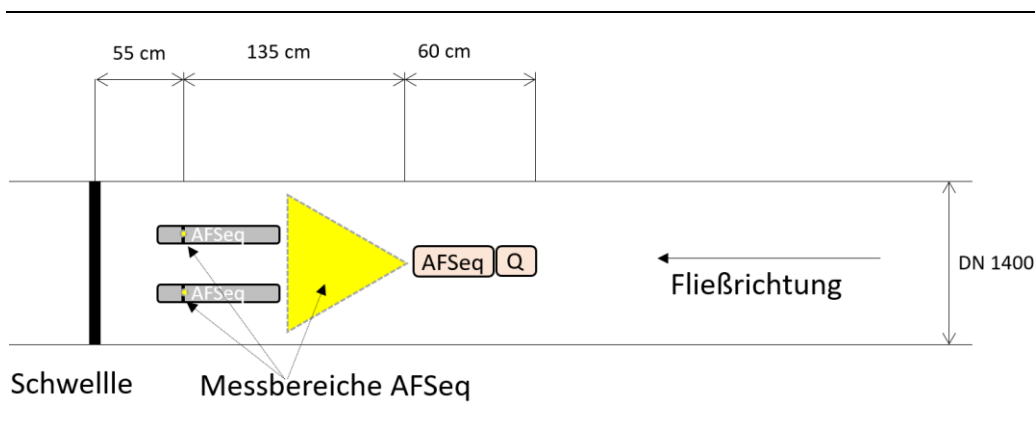


Bild 3 Aufbau der Messstelle EM1 (grau: zwei Spektrometernmessungen; beige PKM-Sonde und Durchflussmessung PCM Pro)

Zur Erfassung des Niederschlags wurde auf dem Gelände der Kläranlage Austum ein Regenschreiber in der Nähe der Messstelle EM1 aufgestellt. Somit befindet sich der Regenschreiber am nördlichen Rand des Einzugsgebiets.

3.3 Eingesetzte Messtechnik

3.3.1 Durchflussmessung

Zur Durchflussmessung wurde ein Messgerät des Typs PCM Pro der Fa. Nivus eingesetzt. Die Erfassung des Füllstands erfolgt bei diesem Gerätetyp redundant über eine im Messsensor (POA Korrelations-Keilsensor) integrierte Druckmesszelle und eine integrierte Wasser-Ultraschall-Messung. Die Erfassung der mittleren Fließgeschwindigkeit erfolgt je nach Füllstand durch Messung von bis zu 16 örtlich aufgelösten Fließgeschwindigkeiten mittels Ultraschall-Kreuzkorrelationsverfahren.

3.3.2 Niederschlagsmessung

Zur Niederschlagsmessung wurde ein Messgerät der Fa. Seba Hydrometrie (Typ RG-50) eingesetzt. Die Erfassung des Niederschlags erfolgt bei diesem Gerätetyp über eine Kippwaage, die nach Sammlung von je 0,1 mm Niederschlag über eine 200 cm² große Öffnung im Deckel des Gerätes umschlägt und dabei einen Impuls an den Datenlogger übermittelt. Die erfassten Messdaten werden mittels Datenfernübertragung an einen Server übermittelt. Auf diese Weise können die Daten regelmäßig geprüft werden. Die Aufstellung erfolgte freistehend (keine Hindernisse im seitlichen Strahlwinkel von 45°).

3.3.3 Online Partikelmessung

Zur Online Partikelmessung kamen zwei unterschiedliche Messgeräte mit verschiedenen Messprinzipien zum Einsatz.

Der spectro:lyser™ der Fa. s::can nutzt die UV-Vis Spektrometrie zur Messung verschiedener Parameter, u. a. AFSeq, CSBeq und NO3-Neq. Die Messung erfolgt in einer in der Sonde integrierten Messstrecke. Dort wird sichtbares Licht und UV-Strahlung durch das Messmedium geleitet und von den Inhaltsstoffen im Abwasser absorbiert. Innerhalb der Sonde wird ein zweiter Lichtstrahl über eine Vergleichsstrecke geführt, um instrumentell bedingte Einflüsse auf die Messqualität zu kompensieren. Jede Messung ergibt ein Absorptionsspektrum aus dem mehrere Parameter simultan bestimmt werden können. Je nach zu erwartender Abwasserzusammensetzung kann eine globale Kalibrierung ausgewählt werden. Für die Messung im Regenwasser bietet sich die Kalibrierung „EFFLUENT“ an. Diese ist besonders auf einen zu erwartenden Konzentrationsbereich von AFSeq zwischen 0 und 400 mg/l ausgelegt. Dennoch können auch Konzentrationen außerhalb dieses Bereichs erfasst werden.

Das Messprinzip des Partikelkonzentrationssensors PKM der Fa. Nivus basiert auf Rückstreuung und Dämpfung von Ultraschallwellen an Partikeln im Messmedium. Zur Messung werden akustische Impulse mit verschiedenen Frequenzen in das Medium gesendet und die Intensität der rückgestreuten Signale erfasst. Mit Hilfe komplexer mathematischer Gleichungen werden daraus die Partikelkonzentration und -größenverteilung berechnet.

3.3.4 Probenahme

Die Probenahme erfolgte über einen automatischen, ungekühlten Probenehmer vom Typ Liquiport 2000 Ex der Firma Endress+Hauser. Dieser entnimmt Proben mittels Schlauchpumpe und verteilt sie in bis zu 8 Probenbehälter im Unterteil des Probenehmers. Die Probenahme kann Zeit-, Mengen- oder Durchflussproportional erfolgen und wird in drei Schritten durchgeführt: Spülen, Ansaugen, Entleeren. Der Beginn einer Probenahme kann zu definierten Zeitpunkten oder durch ein externes Signal erfolgen.

Im Pilotprojekt erfolgte die Probenahme zeitproportional und wurde durch ein externes Signal ausgelöst. Das Signal wurde zu Beginn ab einem festgelegten Füllstand, gemessen am POA-Sensor, ausgegeben. Nach den ersten erfolgreichen Probenahmen wurde das Signal zur Ansteuerung des Probenehmers über die PKM-Sonde ab einer festgelegten AFSeq-Konzentration ausgegeben.

3.4 Probenahmemethodik und Laboranalysen

Ziel der Probenahme war es die AFS_{gesamt} - und AFS_{63} -Konzentrationen labortechnisch für repräsentative Abflussereignisse zu bestimmen. Aus der vorangegangenen Messkampagne und den Beobachtungen der ersten Messwochen war bekannt, dass der Füllstand und die Partikelkonzentration i.d.R. zu Beginn der Ereignisse rasch ansteigen und die höchsten Konzentrationen meist innerhalb der ersten halben Stunde auftreten. Diese Effekte sollten über die Probenahme erfasst werden.

Um die höchsten Konzentrationen während der Ereignisse zu beproben wurde das Gerät so eingestellt, dass die 8 Flaschen ohne Pause nacheinander mit je 1,5 L Probenvolumen befüllt wurden. Das Befüllen je Flasche und der Wechsel zur nächsten Position dauern in diesem Fall 3 bis 5 Minuten, so dass ein Probenahmeereignis im Mittel ca. 30 Minuten dauert.

Als Eingangssignal zum Start der Probenahme wurde zunächst ein Füllstand von 0,22 m gewählt, welcher knapp oberhalb der Schwellenhöhe liegt. Der Grenzwert wurde jedoch schrittweise erhöht, damit keine zu geringen Ereignisse beprobt wurden. Um weiterhin sicherzustellen, dass Ereignisse mit hohen AFS-Konzentrationen beprobt werden, wurde der Probenehmer nach den ersten 5 Probenahmen über einen Grenzwert an der PKM-Sonde angesteuert. Dieser lag zunächst bei einer AFSeq-Konzentration von 30 mg/l, dann bei 80 mg/l und zuletzt bei 150 mg/l.

Die Messdaten (Füllstand und AFSeq-Konzentration an der PKM Sonde) wurden mittels Datenfernübertragung regelmäßig bereitgestellt. So konnte zeitnah nachvollzogen werden, wann eine Probenahme stattgefunden hat und entsprechend eine Weitergabe an das Labor zur Analyse zeitnah veranlasst werden.

Aus organisatorischen Gründen wurden die Proben je nach Kapazität im Labor auf der Kläranlage Austum oder im Labor des IWARU der FH Münster untersucht.

Im Labor des IWARU der FH Münster wurde zur Bestimmung der AFS_{63} -Konzentration ein erweitertes Verfahren nach Dierschke und Welker (2015) angewendet. Jede Probe wurde durch Schütteln homogenisiert und über zwei Siebe mit den Maschenweiten 2 mm und 63 μ m gegeben. Feststoffe, die größer als 2 mm waren, wurden verworfen. Das zweite Sieb trennte AFS_{grob} von AFS_{63} . Für die Methode ist die Wahl des Filtermaterials zweitrangig. Hier wurde das aufgefängene Filtrat auf einen Glasfaserfilter mit Porenweite von 1 μ m gegeben.

Das Analyseverfahren im Labor der KA Austum zur Bestimmung der AFS_{63} -Konzentration orientierte sich an der vom LANUV NRW vorgeschlagenen „ISA-Methode“ (Sprenger, 2016). Bei dieser Methode erfolgt die Homogenisierung der Probe durch kräftiges Schütteln der Probenflasche. Die homogenisierte Probe wird anschließend über eine

kombinierte Filterapparatur, bestehend aus einer Ronde mit Maschenweite 63 µm und einem Glasfaserfilter gegeben. Die Verwendung von Glasfaserfiltern ist bei dieser Methode vorgegeben. Die Ronde und der Glasfaserfilter werden gemäß DIN EN 872 (2005) gewogen. Im Labor der Kläranlage wurde jedoch keine kombinierte Filterapparatur verwendet, sondern eine Filtration in zwei Schritten durchgeführt.

2018 hat die Hochschulgruppe Simulation (HSGSim) eine Studie zum aktuellen Stand der labortechnischen Bestimmung von AFS₆₃ veröffentlicht (Baum et. al., 2018). Diese beruht auf einer Umfrage und der Auswertung publizierter Studien. Die betrachteten Vorgehensweisen unterschieden sich bei der Dispergierung der Proben, der Homogenisierung, dem Filtermaterial und der Probenahme.

Hinweis: Im Rahmen des 2. Expertentreffens Partikelmessung der Dr. Pecher AG und der NIVUS GmbH am 11. Mai 2022 hat Frau Prof. Welker (Welker, 2022) den aktuellen Kenntnisstand zu den Einflussfaktoren (Filtermaterial, Siebmethode, etc.) vorgestellt und gezeigt, dass es je nach Methode zu Über- oder Minderbefunden von AFS₆₃ kommen kann. Im Rahmen dieses Expertentreffens und weiterer Termine wurde auch die Methodik des Pilotprojektes diskutiert.

Die in den Laboren der FH Münster und der KA Austum durchgeführten Methoden unterscheiden sich in den wesentlichen Punkten jedoch nicht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse vergleichbar sind.

Die Bestimmung von AFS_{gesamt} erfolgte nach DIN 38409 – H2 (1987).

3.5 Beschreibung und Bewertung der Messdatenqualität

3.5.1 Füllstands- und Abflussmessung

Der Füllstand wurde an der Messstelle mittels POA Sensor, als Grundlage zur Abflussberechnung, und zusätzlich über den Ultraschallsensor der PKM Sonde gemessen. Bild 4 zeigt die Füllstandsganglinien beider Sonden, die aufgrund der Einbaulage, einen um ca. 1 cm versetzten, parallelen Verlauf aufweisen.

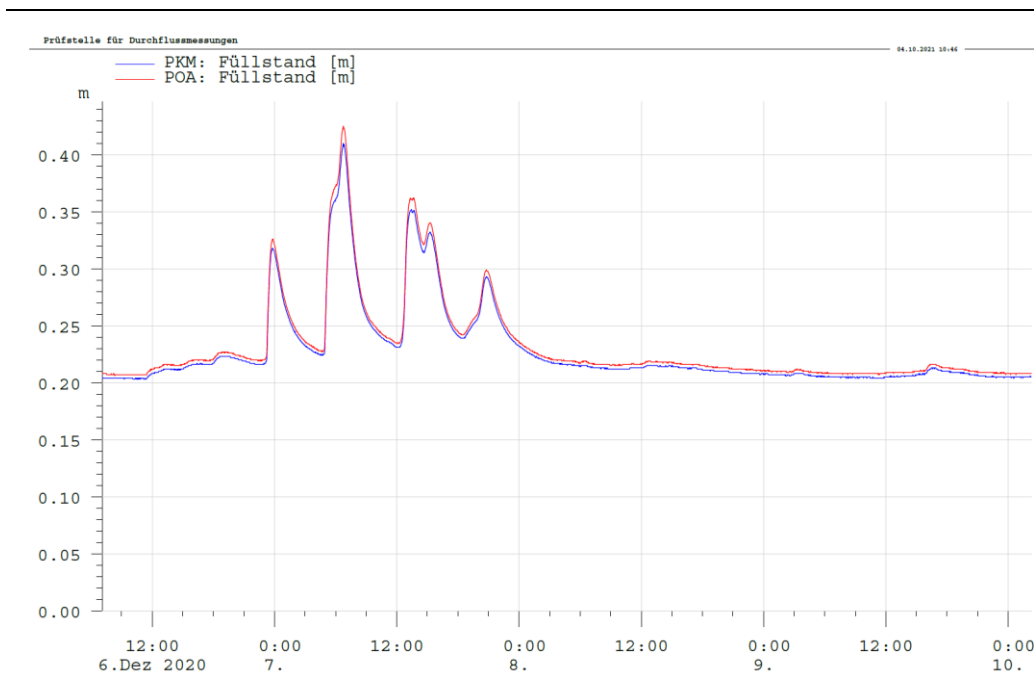


Bild 4 Füllstandsganglinien am POA und PKM Sensor für den Zeitraum 6.12. bis 10.12.2020 an der Messstelle EM1

Zur Ermittlung des Abflusses wurde neben dem Füllstand auch die Fließgeschwindigkeit an der Messstelle erfasst. Bild 5 zeigt die entsprechenden Ganglinien für das Abflussereignis vom 19.11.2020. Um eine Prüfung der erhobenen Daten vorzunehmen, wurde eine Korrelationsanalyse über die gesamte Messperiode durchgeführt (Bild 6). Dabei ist eine Abhängigkeit von Füllstand und Durchfluss zu erkennen, was durch einen Korrelationskoeffizienten von 0,912 bestätigt wird. Der Einstau aufgrund der eingebauten Schwelle ist sowohl in den Ganglinien als auch in der Korrelation zu erkennen. Beobachtungen vor Ort haben gezeigt, dass ein Basisabfluss von im Mittel 0,5 l/s vorliegt, der aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit nicht vom POA-Sensor erfasst wird. Aufgrund der guten Korrelation von Füllstand und Abfluss und zur Berücksichtigung des Basisabflusses wurde eine h-Q-Beziehung aufgestellt und der Abfluss entsprechend rechnerisch aus den gemessenen Füllstandsdaten bestimmt. Diese Berechnung beruht auf den Füllstandsdaten der PKM-Sonde. Vergleiche der gemessenen und berechneten Abflussganglinien sind in Bild 7 für ein Ereignis mit geringen Füllständen und in Bild 8 für ein Ereignis mit hohen Füllständen dargestellt. Da die PKM-Sonde vom 29.10.2020 bis

zum 08.01.2022 im Einsatz gewesen ist, liegt für den gesamten Zeitraum eine berechnete Abflussganglinie vor.

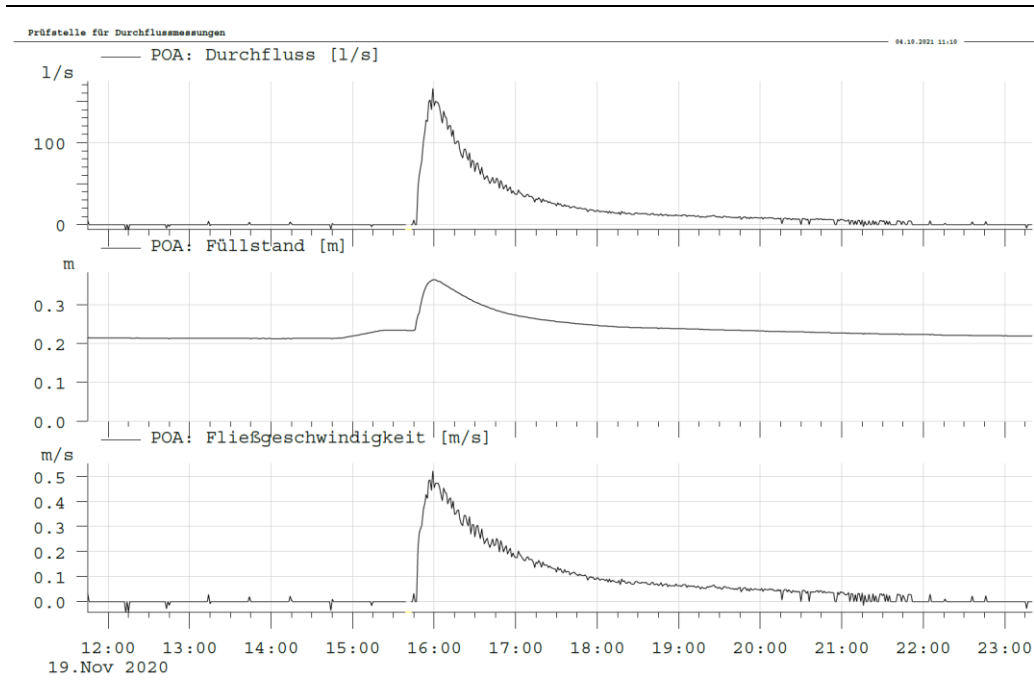


Bild 5 Abfluss-, Füllstands- und Fließgeschwindigkeitsganglinien am POA Sensor an der Messstelle EM1

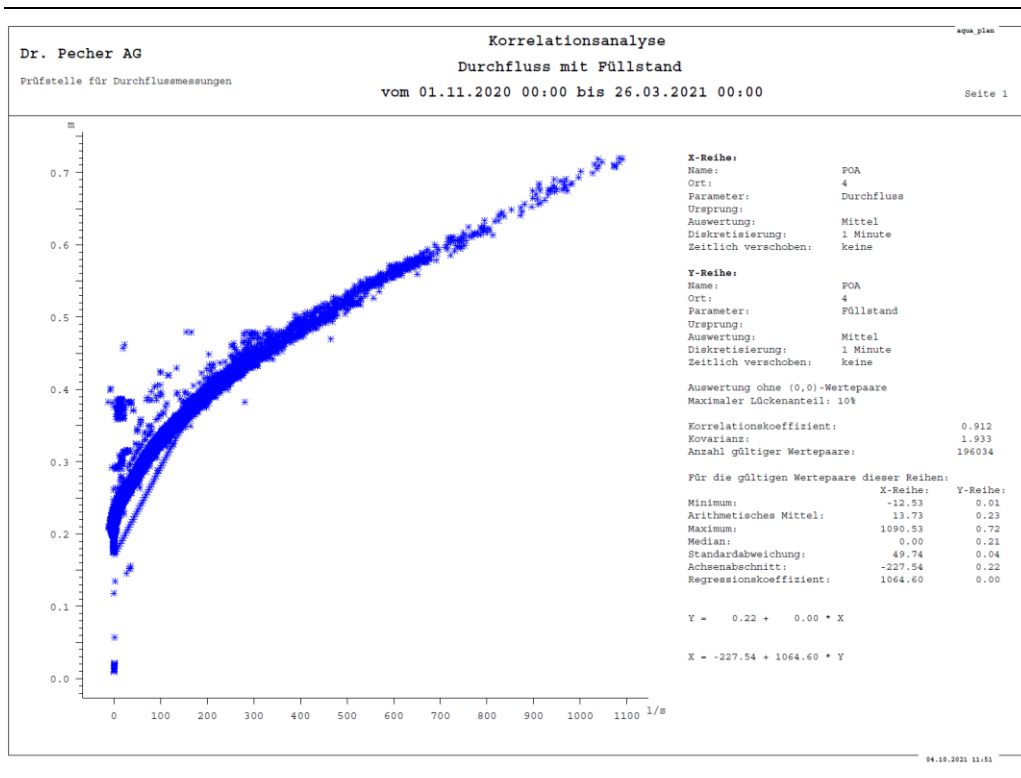


Bild 6 Korrelation zwischen Füllstand und Durchfluss für den Zeitraum vom 01.11.2020 bis 26.03.2021 an der Messstelle EM1

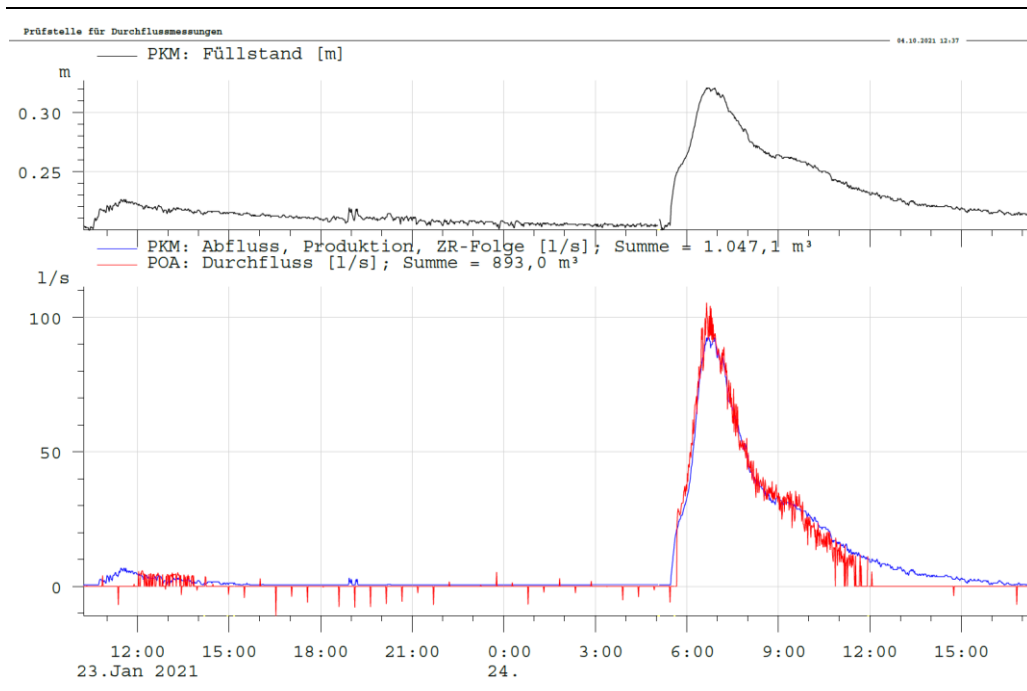


Bild 7 Gemessene (rot) und berechnete (blau) Abflussganglinie für das Ereignis vom 24.01.21 an der Messstelle EM1

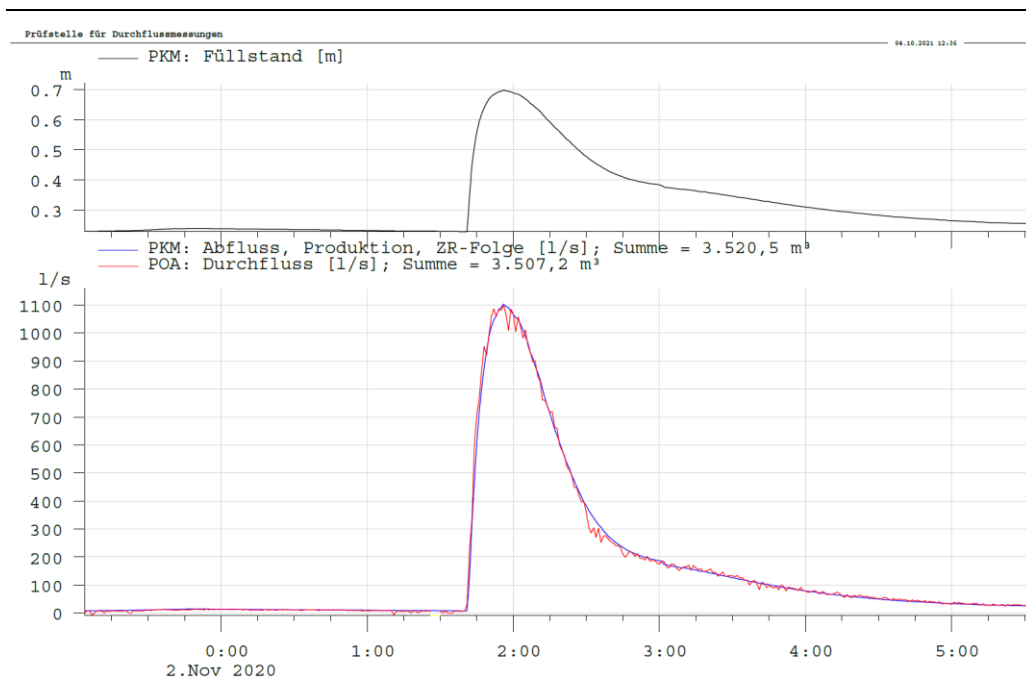


Bild 8 Gemessene (rot) und berechnete (blau) Abflussganglinie für das Ereignis vom 02.11.20 an der Messstelle EM1

Aufgrund der eingebauten Schwelle betrug der Füllstand bei Trockenwetter im Normalfall ca. 20 cm. Am 14 Juli 2021 hat sich die Verschraubung des Sensors in Folge eines starken Niederschlagsereignisses von der Sohle gelöst. Infolgedessen ist der Füllstand bis zur Behebung des Problems am 13.08.21 nicht plausibel (Bild 9). Entsprechend ist auch der berechnete Abfluss unplausibel und lückenhaft, da keine hQ-Beziehung für Füllstände kleiner 19 cm besteht.

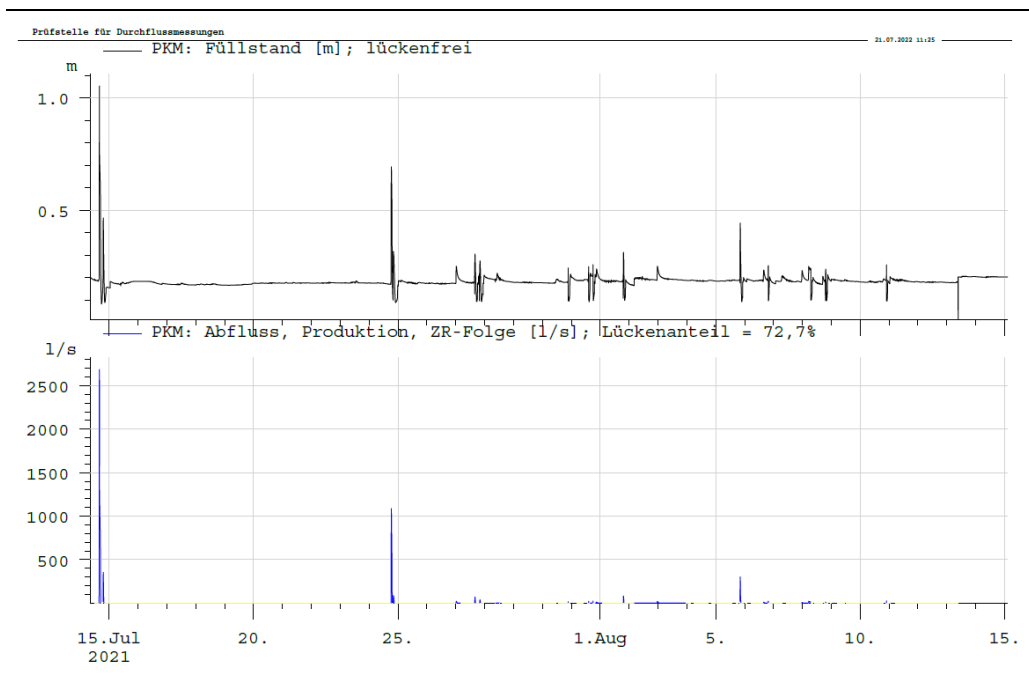


Bild 9 Unplausible Füllstandsmessung im Zeitraum vom 14.07. bis 13.08.2021

3.5.2 Niederschlagsmessung

Die Erfassung des Niederschlagsgeschehens erfolgte vom 28.10.2020 bis zum 13.08.2021 im Rahmen der beauftragten Messkampagne und dank erneuter Verfügbarkeit des Gerätes noch einmal vom 09.12.21 bis zum 02.02.22.

Während des ersten Zeitraums wurde über eine Dauer von 10 Monaten eine Niederschlagssumme von 481,4 mm gemessen. Im zweiten Zeitraum betrug die Niederschlagssumme über 2 Monate 67,5 mm.

In beiden Messzeiträumen lieferte der Regenschreiber lückenlose Daten. Die aufgezeichneten Summen wurden im Rahmen der Kontrollen vor Ort mit dem aufgefangenen Niederschlagsvolumen abgeglichen.

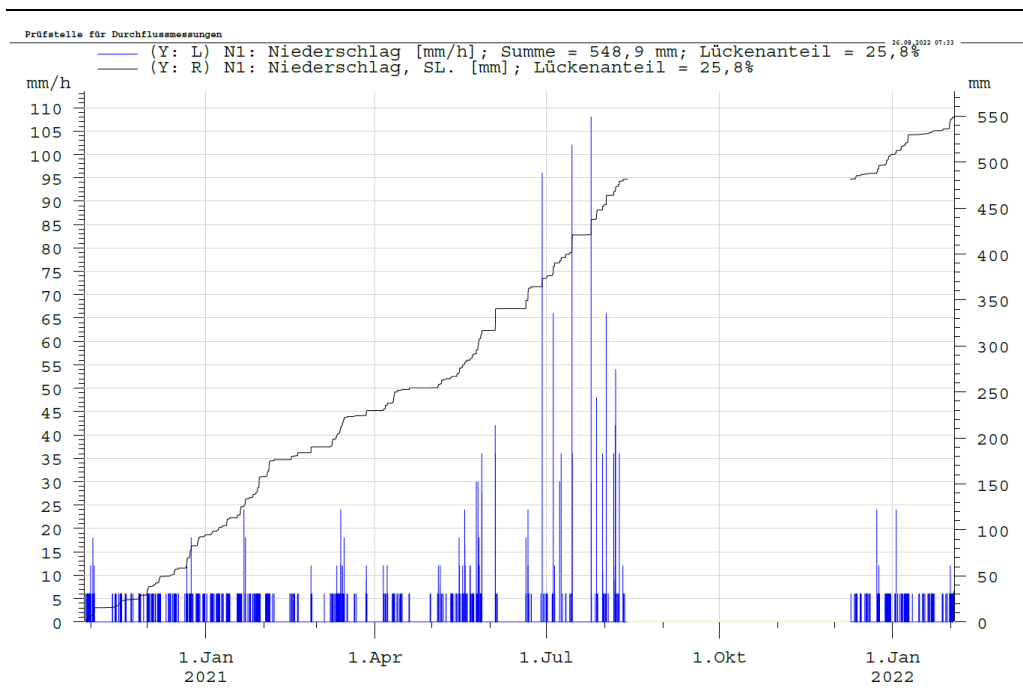


Bild 10 Niederschlagsgeschehen vom 28.10.20 bis 13.08.21 und 09.12.21 bis 02.02.22

3.5.3 AFS- und AFSeq-Konzentration

Die kontinuierliche Messung der AFSeq-Konzentrationen erfolgte mittels Spektrometersonden und einer Ultraschall-Partikelsonde.

Spektrometersonde

Für einen Zeitraum von 5 Wochen wurden zwei Spektrometersonden parallel betrieben, die sich gegenseitig plausibilisieren. Dies zeigt in Form von parallel verlaufenden Ganglinien Bild 11 und in Form einer Korrelationsanalyse über den Gesamtzeitraum von fünf Wochen Bild 12. Die Korrelationsanalyse wurde mit 5-Minuten Mittelwerten durchgeführt und ergab einen Korrelationskoeffizienten von 0,925. Im weiteren Verlauf der Messkampagne wurde nur noch die Spektrometersonde „SCAN1“ weiter betrieben.

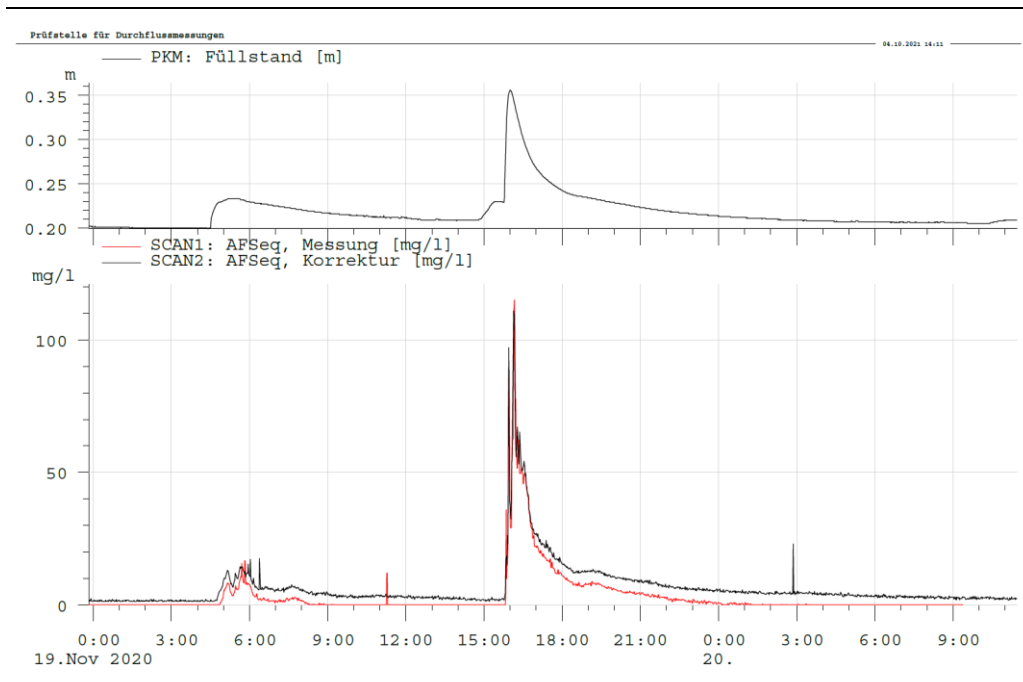


Bild 11 Ganglinien der beiden eingesetzten Spektrometersonden am 19. und 20. November 2020 zur Plausibilisierung der Messergebnisse

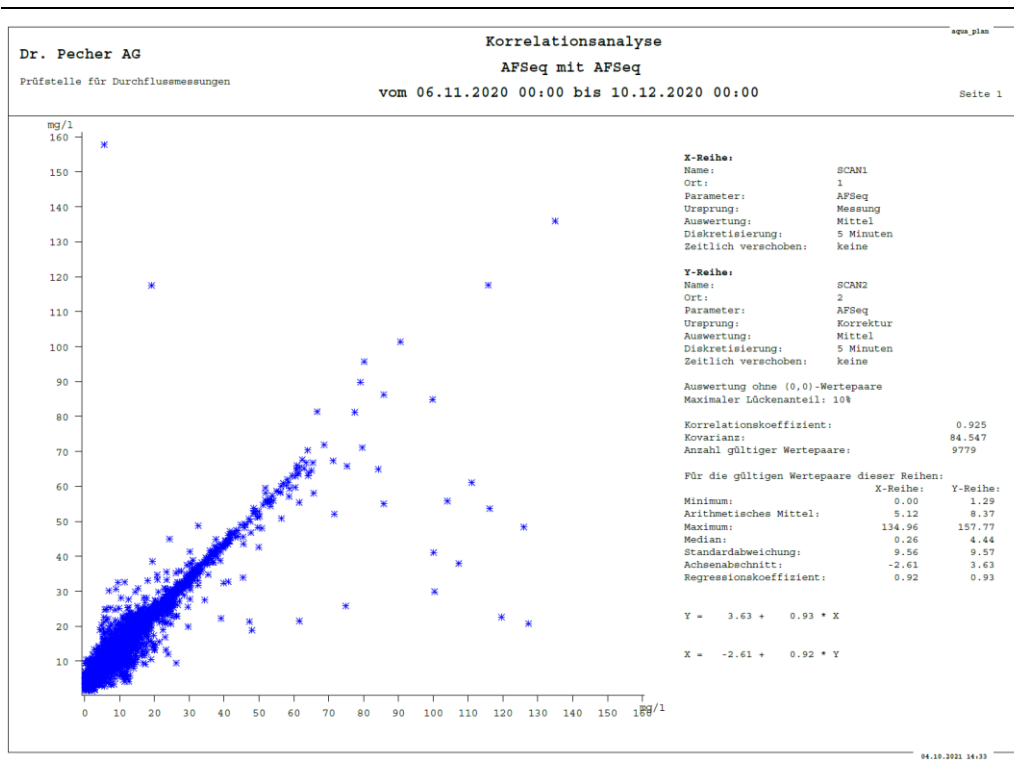


Bild 12 Korrelationsanalyse der zwei Spektrometersonden SCAN1 und SCAN2 an der Messstelle EM1 zur Plausibilisierung der Messungen

Weitere Qualitätskontrollen der Messwerte der Sonde „SCAN1“ über den gesamten Messzeitraum haben gezeigt, dass die Daten grundsätzlich plausibel sind. Die Messwerte weisen kein generelles Driftverhalten und keinen Versatz zum Nullpunkt auf.

Ausreißer in den Ganglinienverläufen treten selten auf und sind auf das Prinzip der punktuellen Messung im Messspalt zurückzuführen. Zwischenzeitlich treten sprunghafte Änderungen auf, die nicht plausibel erklärt werden können (Beispiel Bild 13). Hier ist zu vermuten, dass das Messfenster verlegt ist, durch die automatische Druckluftspülung, manuelle Reinigung oder steigenden Abfluss im Kanal jedoch wieder freigespült wird.

Die Größenordnung der Messwerte lag im grundsätzlich zu erwartenden Bereich. Die Überprüfung der Messwerte durch Laboranalysen wird in Kapitel 3.5.5 beschrieben.

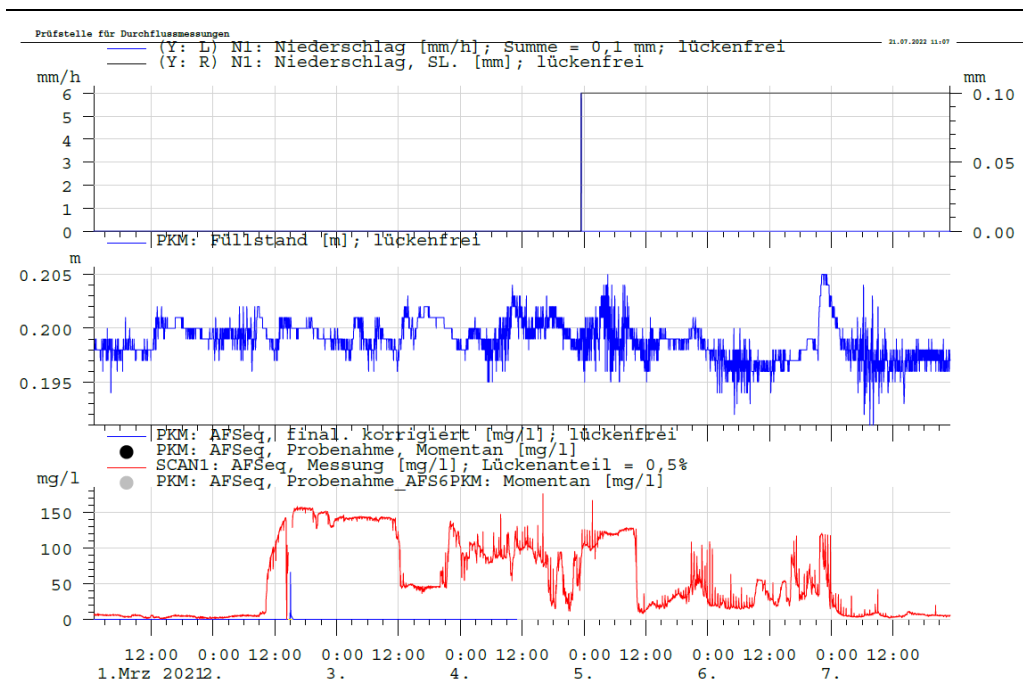


Bild 13 Unplausible Messung mittels Spektrometersonde

Ultraschallsonde

Die PKM Sonde war vom 30.11.2020 bis zum 08.01.2021 an der Messstelle im Einsatz. Die Messung erfolgte in Kooperation mit der Firma NIVUS, die die neuartige Sonde zur Verfügung gestellt hat. Bei Trockenwetter und entsprechend geringen Füllständen (auf Höhe der Schwelle), wurde in der Regel eine AFS-Konzentration von 0 mg/l ausgegeben. Während der Niederschlags-Abfluss-Ereignisse wurden plausible Konzentrationsverläufe gemessen. Auf die absoluten gemessenen Konzentrationen wird in Kapitel 3.5.5 eingegangen.

Über die gesamte Dauer der Messkampagne sind weder Drifts, noch Versätze zum Nullpunkt festgestellt worden.

3.5.4 Laboranalysen

Zwischen dem 10.12.2020 und dem 21.05.2021 haben insgesamt zehn Niederschlagsereignisse stattgefunden, zu denen auch Probenahmen erfolgen konnten.

Die Probenahme wurde zu Beginn über die Wasserstandsänderungen gestartet, um die Niederschlagsabflüsse zu erfassen. Während der ersten drei Ereignisse (10.12.20, 05.01.21 und 15.01.21) waren die Konzentrationen an der Messstelle sehr gering (AFS_{gesamt} maximal 17 mg/l). Bei einzelnen Probeflaschen lag die Konzentration unterhalb der Nachweisgrenze.

Bei den nächsten Probenahmen (26.01.21 und 28.01.21) lagen die Konzentrationen weiterhin im geringen (AFS_{gesamt} maximal 71 mg/l), aber nachweisbaren Bereich. Für die Probe am 26.01.21 wurde, aufgrund der geringen zu erwartenden Konzentration, eine Mischprobe aus allen 8 Flaschen erstellt, um sicherzustellen, dass die AFS-Menge für die Analyse ausreicht. Mit dem gesamten Probenvolumen konnten mehrere Analysevorgänge durchgeführt werden. Bei anderen Probenahmen wurden z.T. ebenfalls zwei oder mehr Proben gemischt und anschließend analysiert.

Für die Probenahmen ab dem 02.02.2021 wurde die Bedingung zur Aktivierung des Probenehmers von einem Mindestfüllstand auf eine Mindestkonzentration an der PKM Sonde umgestellt, was beprobte Ereignisse mit höheren Konzentrationen zur Folge hatte.

Die vollständigen Ergebnisse der Laboranalysen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Konzentration von AFS_{gesamt} ergibt sich aus der Summe von $AFS > 63 \mu m$ und $AFS < 63 \mu m$. Der Anteil der Fraktion $< 63 \mu m$ an AFS_{gesamt} weist ein großes Spektrum zwischen 18 und 100 % auf. Ein konstanter Zusammenhang zwischen der AFS Gesamtkonzentration und dem Anteil von AFS63 konnte bei den durchgeführten Probenahmen nicht beobachtet werden. Sowohl bei geringen als auch bei hohen AFS_{gesamt} -Konzentrationen kann der Anteil von AFS63 einen geringen oder sehr hohen Anteil ausmachen (Bild 14). Daraus folgt, dass bei jedem Ereignis damit zu rechnen sein muss, dass die AFS-Fracht zu großen Teilen aus AFS63 bestehen kann. Die Häufigkeitsverteilung der AFS63-Anteile zeigt jedoch, dass die Hälfte der Werte zwischen 30 % und 80 % und der Median bei 53 % Anteil von AFS63 an AFS_{gesamt} liegen.

Tabelle 1 Ergebnisse der Laboranalysen für AFS_{gesamt} und AFS₆₃ an der Messstelle EM1

Datum / Parameter Nr. Probenflasche	10.12.2020	05.01.2021	15.01.2021		26.01.2021		28.01.2021		02.02.2021		15.02.2021		15.05.2021		18.05.2021		21.05.2021	
	AFS _{gesamt} [mg/l]	AFS _{gesamt} [mg/l]	AFS > 63 [mg/l]	AFS < 63 [mg/l]	AFS > 63 [mg/l]	AFS < 63 [mg/l]	AFS > 63 [mg/l]	AFS < 63 [mg/l]	AFS > 63 [mg/l]	AFS < 63 [mg/l]	AFS > 63 [mg/l]	AFS < 63 [mg/l]	AFS > 63 [mg/l]	AFS < 63 [mg/l]	AFS > 63 [mg/l]	AFS < 63 [mg/l]	AFS > 63 [mg/l]	AFS < 63 [mg/l]
1	7,0	3,0	< 1	14,0	20,8 23,2 29,6 26,0 23,5 26,3	11,1 11,3 11,1 9,7 9,2 7,6	14,0	33,0	59,9	85,5	113,0	360,0	97,8	90,9	274,0	89,0	180,5	50,0
2	-								60,6	68,5	124,0	410,0			236,0	100,0	121,8	46,0
3	3,5	2,0	< 1	17,0			20,0	51,0	45,8	38,8	104,0	383,0			230,0	139,0	143,9	31,0
4	4,0						31,1	38,2	62,0	350,0	172,0	75,0			57,1	14,3		
5	-	1,0	< 1	15,0			14,0	57,0	22,2	34,9	48,0	280,0	76,9	85,6	244,0	90,0	74,6	32,2
6	-						26,2	54,8	24,0	240,0	184,0	145,0			64,6	14,2		
7	1,4	1,5	< 1	13,0			13,0	52,0	30,4	36,1	24,0	280,0			216,0	85,0	44,3	18,2
8	1,7						18,7	63,1	48,0	220,0	222,0	100,0			40,3	19,3		

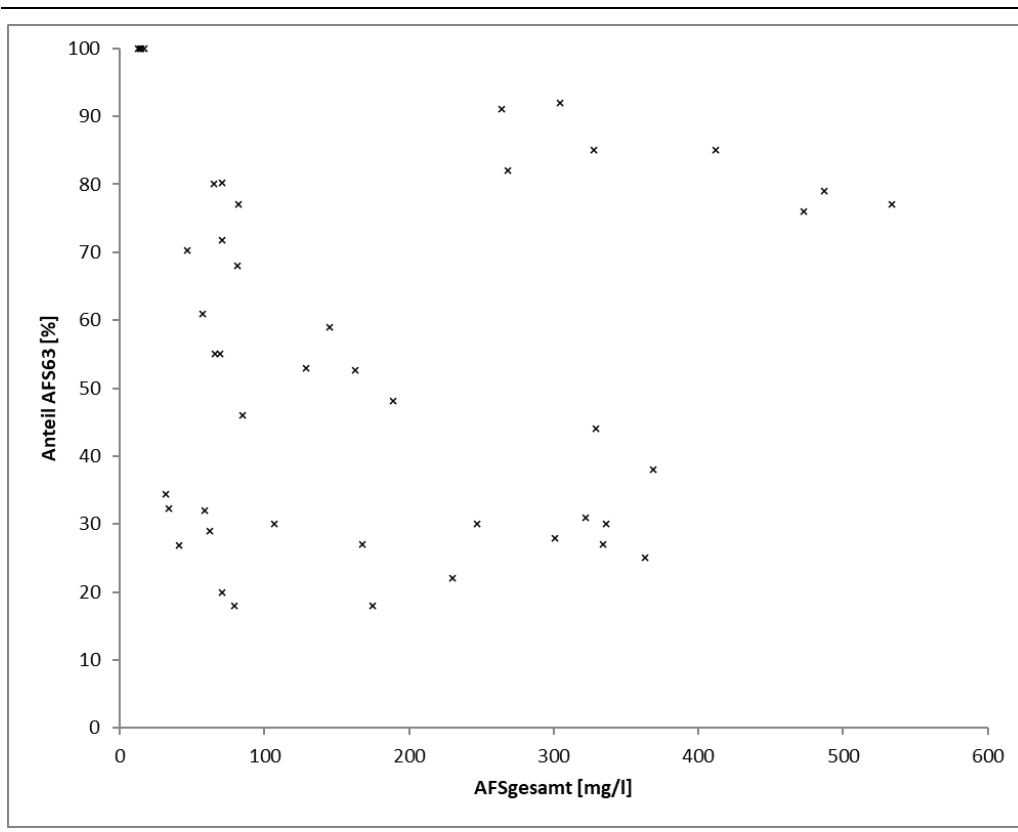


Bild 14 Gegenüberstellung von AFS_{gesamt} und dem Anteil von AFS63 für acht Niederschlagsereignisse an der Messstelle EM1 im Zeitraum 10.12.2020 bis 21.05.2021.

3.5.5 Gegenüberstellung von Online-Spektrometermessung, Online Ultraschallmessung und Laboranalysen

In Bild 15 bis Bild 17 sind für drei Probenahmeereignisse das Niederschlagsgeschehen, der Füllstand und die AFS/AFS63/AFSeq- Konzentrationen dargestellt. Die Onlinemessungen wiesen in der Regel, wie bei den Ereignissen am 28.01. und 02.02.2021 ähnliche Verläufe, aber nicht die gleichen absoluten Konzentrationswerte auf. Zum Teil wichen die Konzentrationen, wie beim Ereignis am 18.05.2021 auch sehr stark voneinander ab. Häufig wurden von der PKM Sonde während der Ereignisse höhere Konzentrationen gemessen als von der Spektrometersonde. Es ist jedoch kein eindeutiger Zusammenhang feststellbar und in einigen Fällen wurden die höheren Konzentrationen auch an der Spektrometersonde gemessen.

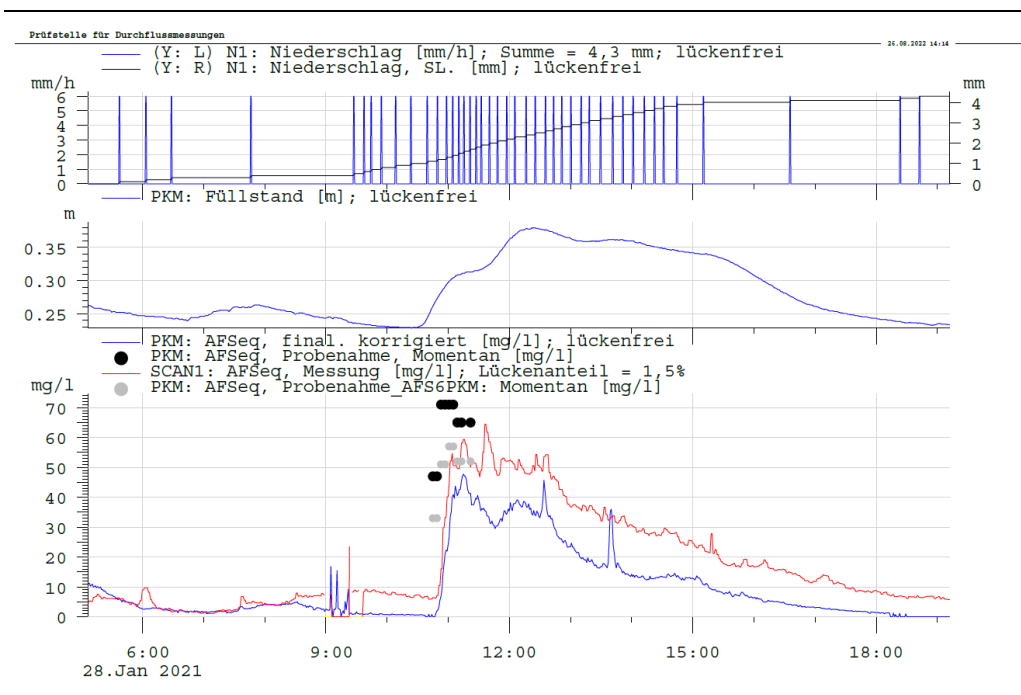


Bild 15 Erfasste Niederschlags- und Online-Messergebnisse während des Probenahmeereignis am 28.01.2021.

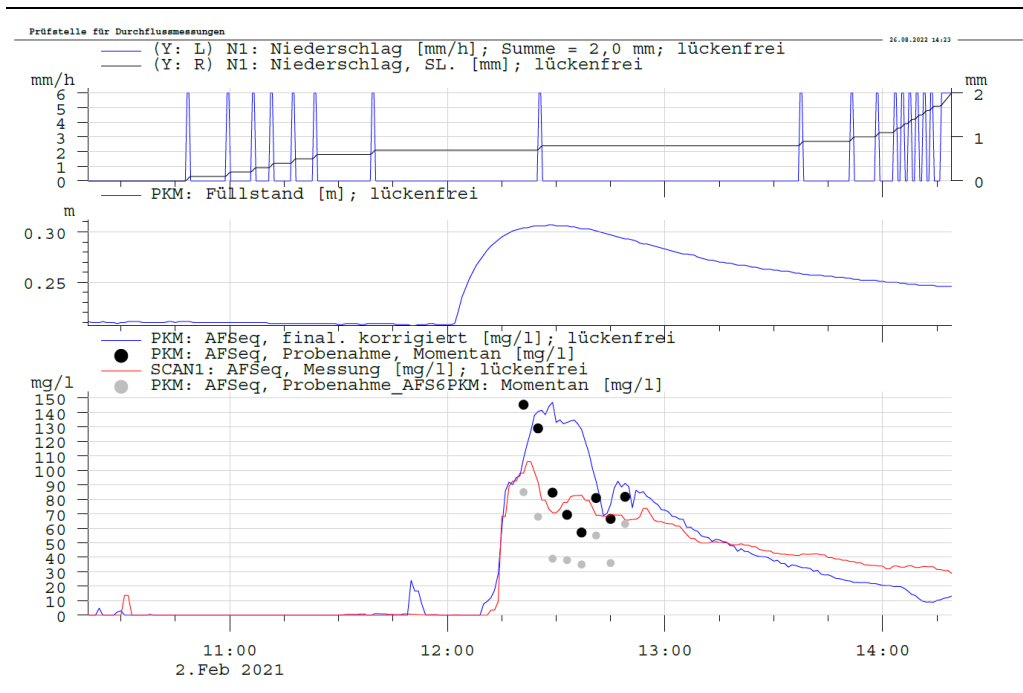


Bild 16 Erfasste Niederschlags- und Online-Messergebnisse während des Probenahmeereignis am 02.02.2021.

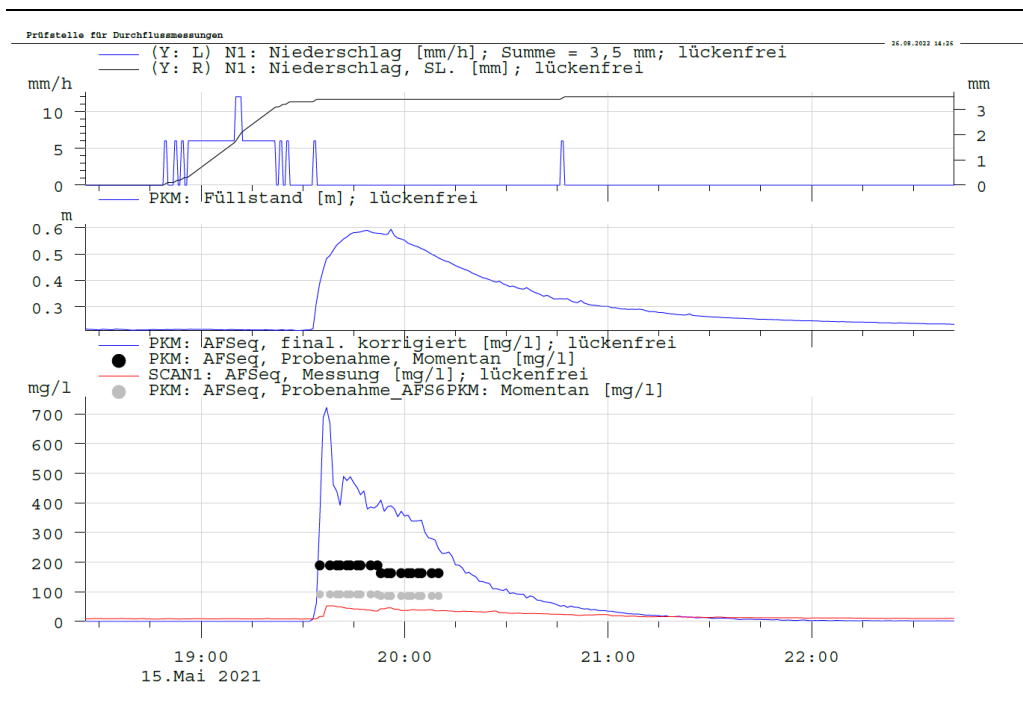


Bild 17 Erfasste Niederschlags- und Online-Messergebnisse während des Probenahmeereignis am 15.05.2021.

Der Vergleich der Onlinemessungen mit den Laboranalysen hat gezeigt, dass die Größenordnung der Messwerte in einem ähnlichen Bereich liegen. Die höchsten Übereinstimmungen bestehen zwischen der Spektrometersonde und den labortechnisch ermittelten AFS63-Konzentrationen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich der Ansaugpunkt den Probennehmers in Sohlnähe im Bereich der Spektrometersonde befand. Die Messung der PKM-Sonde fand hingegen nicht punktuell, sondern über den gesamten Füllstandsbereich statt.

3.6 Auswertung der Konzentrationsmessungen

Der typische Konzentrationsverlauf während eines Niederschlagsereignisses zeichnete sich durch einen raschen Anstieg zu Beginn des Ereignisses und einen langsamen Konzentrationsrückgang aus. Beispiele hierfür sind die im vorherigen Kapitel dargestellten Ereignisse. Bild 18 zeigt für mehrere Ereignisse eine Gegenüberstellung der normierten kumulativen AFSeq-Fracht und des normierten kumulativen Gesamtabflussvolumens. In Rot dargestellt sind die von der Spektrometersonde stammenden Daten, in Blau die Daten

der PKM Sonde. Die Gegenüberstellung zeigt, dass alle Kurven über der Winkelhalbierenden liegen, was bedeutet, dass der größere Anteil der Fracht zu Beginn der Ereignisse abfließt. Gleichzeitig ist aber auch zu sehen, dass es Unterschiede zwischen den Ereignissen und den beiden Sonden gibt. Bei 50 % des abgeflossenen Volumens liegt die Kumulative Fracht für die dargestellten Ereignisse zwischen 54 und 93 %.

Die Ergebnisse der Messkampagne bestätigen damit die Vermutung, dass die Verschmutzungen aus dem Einzugsgebiet eine hohe zeitliche Variabilität aufweisen. In diesem Fall ist eine messdatengesteuerte Teilstrombehandlung (auch: verschmutzungsabhängige Kanalnetzsteuerung oder engl. P-RTC; pollution based real-time-control)) besonders effizient.

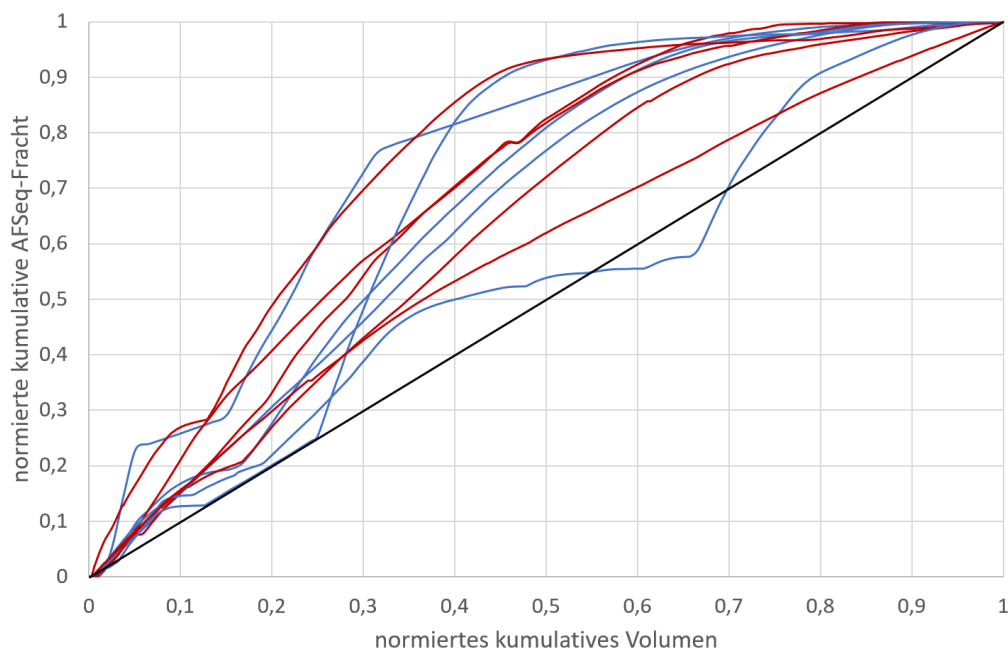


Bild 18 Masse-Volumen-Diagramme für fünf N-A-Ereignisse im Verlauf der Messkampagne. Rot: Spektrometermessung, Blau: PKM-Messung

Neben den Niederschlags-Abfluss-Ereignissen wurde auch das Konzentrationsgeschehen bei Trockenwetter ausgewertet. Hier zeigt sich, dass Fehleinleitungen im Netz vorliegen,

da es auch unabhängig vom Niederschlagsgeschehen zu Konzentrationsanstiegen kommt (Bild 19).

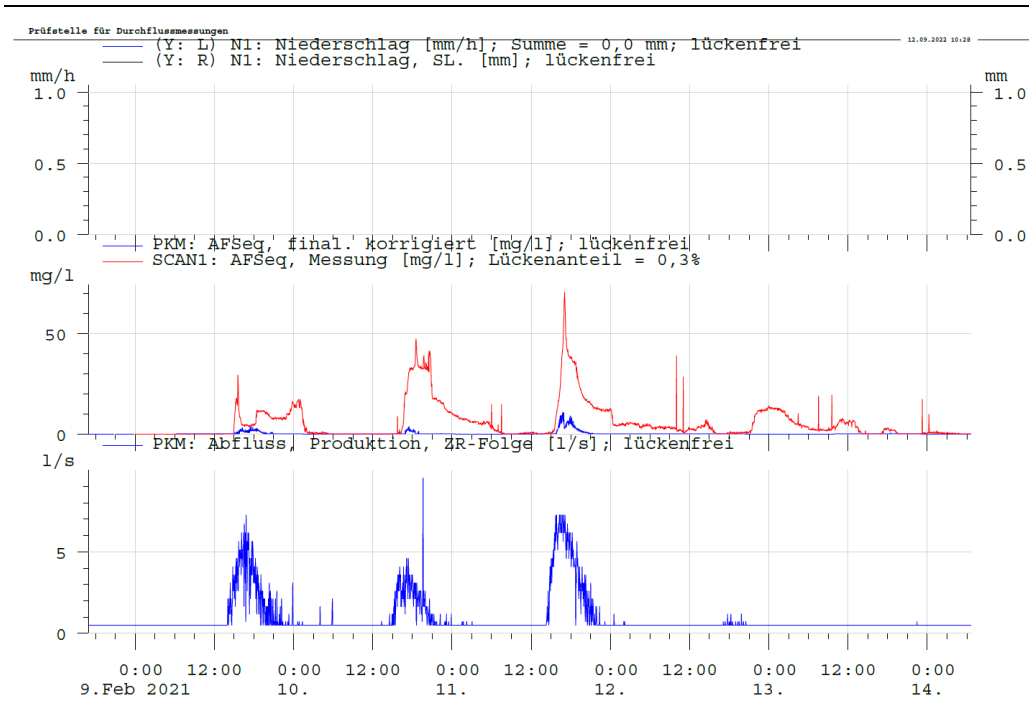


Bild 19 Konzentrationsanstiege bei Trockenwetter als Hinweise auf Fehleinleitungen.

4 Konzeption der Regenwasserbehandlung

4.1 Anforderungen nach DWA-A 102

Die Behandlungsbedürftigkeit von Niederschlagswasser wird gem. Arbeitsblatt DWA-A 102:2020 in Abhängigkeit der Herkunftsfläche festgelegt. Die Einteilung der Herkunftsflächen erfolgt je nach zu erwartender Belastung des Niederschlagswassers in drei Kategorien, gering (Kategorie I), mäßig (Kategorie II) oder stark (Kategorie III) belastet. Das Niederschlagswasser der Kategorien II und III ist vor der Einleitung in Oberflächengewässer grundsätzlich zu behandeln. Gering belastetes Niederschlagswasser der Kategorie I, beispielsweise aus reinen Wohngebieten, gilt als nicht behandlungsbedürftig.

Das Niederschlagswasser von Flächen der Kategorien II und III ist so zu behandeln, dass die rechnerisch ins Gewässer eingeleitete Fracht maximal der Fracht von Flächen der Kategorie I entspricht. Zur Ermittlung der Behandlungserfordernis werden im DWA-A102:2020 mittlere Konzentrationen und der flächenspezifische jährliche Stoffabtrag für die Bezugsgröße AFS63 für die drei Kategorien angegeben, anhand derer Bilanzierungen durchgeführt werden können (Tabelle 2).

Tabelle 2 Rechenwerte zur Bilanzierung des Stoffabtrags für die Bezugsgröße AFS63 nach DWA-A 102

Kategorie	Mittlere Konzentrationen $C_{R,a,AFS63}$ im Jahresregenwasserabfluss in mg/l	Flächenspezifischer Stoffabtrag $b_{R,a,AFS63}$ in kg/(ha·a)
Kategorie I	50	280
Kategorie II	95	530
Kategorie III	136	760

Das betrachtete Einzugsgebiet mit einer angeschlossenen, befestigten Fläche von ca. 108 ha setzt sich wie folgt aus den drei Belastungskategorien zusammen (Werte gerundet):

$A_{b,a,I}$: 36 ha

$A_{b,a,II}$: 51 ha

$A_{b,a,III}$: 21 ha

Mit den ermittelten Flächenanteilen ergibt sich als Stoffabtrag von AFS63 für die Teilflächen entsprechend dem Arbeitsblatt DWA-A 102 (hier Tabelle 2):

$$B_{R,a,AFS63,I} : \quad 36 \text{ ha} \cdot 280 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a}) = 10.080 \text{ kg/a}$$

$$B_{R,a,AFS63,II} : \quad 51 \text{ ha} \cdot 530 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a}) = 27.030 \text{ kg/a}$$

$$B_{R,a,AFS63,III} : \quad 21 \text{ ha} \cdot 760 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a}) = 15.960 \text{ kg/a}$$

Der Stoffabtrag des Gesamtgebiets beträgt:

$$B_{R,a,AFS63} = \quad 53.070 \text{ kg/a}$$

Der resultierende flächenspezifische Stoffabtrag des betrachteten Gebiets ergibt sich zu:

$$B_{R,a,AFS63} = \quad 491 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a})$$

Zur Reduktion auf den zulässigen flächenspezifischen Stoffabtrag von 280 kg/(ha·a) ergibt sich der erforderliche Wirkungsgrad der Behandlungsmaßnahmen zu:

$$\eta_{\text{erf}} = \quad 43 \%$$

4.2 Mögliche Behandlungskonzepte

4.2.1 Behandlung im RKB

Eine klassische Möglichkeit zur Behandlung des Regenwassers aus dem gesamten Einzugsgebiet wäre ein Regenklärbecken. Nach DWA-A 102 beträgt der Bemessungswert der Oberflächenbeschickung zur Erreichung eines Gesamtwirkungsgrades zum Stoffrückhalt AFS63 $q_{A,Bem} = 5,4 \text{ m/h}$ (Bild 20).

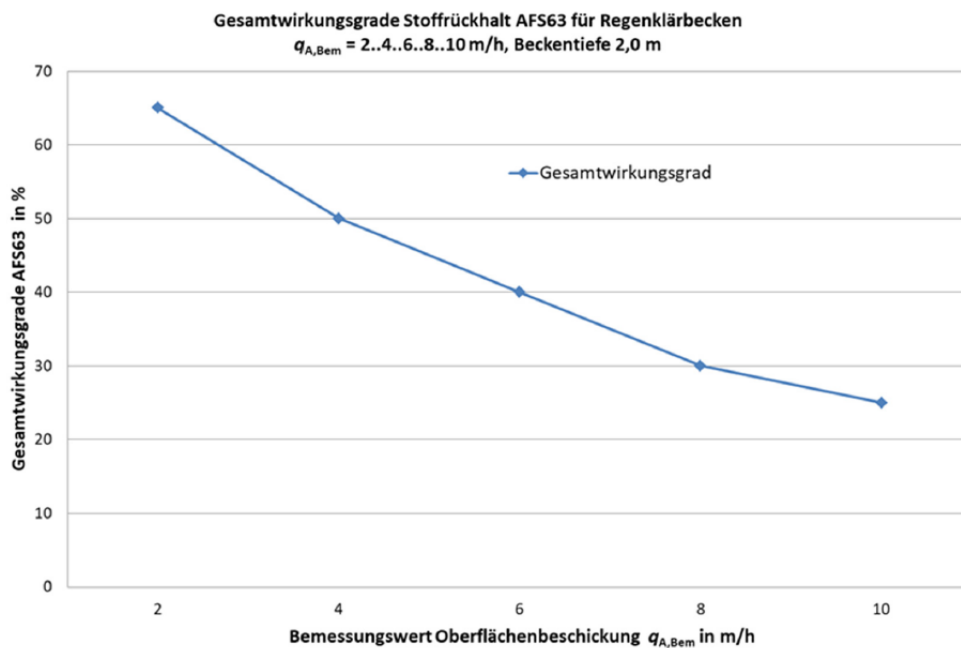


Bild 20 Bemessungswert der Oberflächenbeschickung in Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrades (Quelle: DWA-A 102: 2020)

Zur Behandlung der Niederschlagsabflüsse der gesamten befestigten Einzugsgebietsfläche von 108 ha berechnet sich die erforderliche Oberfläche des RKBs zu:

$$A_{RKB,erf.} = 3,6 \cdot Q_{Bem,Tr} / q_{A,Bem.} = 1.080 \text{ m}^2$$

Bei einer empfohlenen Beckentiefe von 2,0 m ergibt sich ein Beckenvolumen von

$$V_{RKB} = 2.160 \text{ m}^3$$

Mögliche Abmessungen für ein Becken mit der erforderlichen Oberfläche von 1.080 m² ergeben sich aus den Empfehlungen nach DWA-A 166_2013. Demnach sollten die relativen Abmessungen innerhalb folgender Grenzen liegen:

$$6 \leq l : h \leq 15$$

$$3 \leq l : b \leq 4,5$$

$$2 \leq b : h \leq 4$$

Für die Realisierung von einem Becken ergeben sich mögliche Abmessungen zu:

$$l = 66 \text{ m}$$

$$b = 16,4 \text{ m}$$

$$h = 4,2 \text{ m}$$

Daraus ergibt sich ein Beckenvolumen von 4.546 m³.

Eine geringere Tiefe und Breite wäre möglich, wenn das RKB aus 4 separaten Teilbecken mit den folgenden Abmessungen je Becken bestünde:

$$l = 32 \text{ m}$$

$$b = 8,5 \text{ m}$$

$$h = 2,1 \text{ m}$$

Das Gesamtvolumen der 4 Becken ergibt sich zu 2.285 m³.

4.3 Anforderungen nach Trennerlass NRW

Derzeit werden in NRW Planungen für Regenwasserbehandlungsanlagen noch nach Trennerlass ausgelegt. Im Regelfall sind Regenklärbecken ohne Dauerstau (RKBoD) vorzusehen, deren Beckeninhalt in einem Bodenfilter oder in einer Abwasserbehandlungsanlage biologisch zu behandeln ist. Für das erforderliche Beckenvolumen eines RKBoD gilt:

- 10 m³/ha für befestigte Flächen der Verschmutzungskategorien II und III
- 5 m³/ha für befestigte Flächen der Kategorie I

Für das betrachtete Einzugsgebiet ergibt sich ein erforderliches Nutzvolumen von 900 m³ bei 72 ha angeschlossener befestigter Flächen der Kategorien II und III und 36 ha der Kategorie I.

Die Oberflächenbeschickung q_A ist für eine kritische Regenspende von 15 l/(s·ha) der angeschlossenen befestigten Flächen der Kategorien II und III und 5 l/(s·ha) bezogen auf

die Flächen der Kategorie I auf $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ zu begrenzen. Die erforderliche Beckenoberfläche ergibt sich zu:

$$A_{\text{erf}} = 3,6 \cdot Q_{\text{krit}}/q_A$$

$$A_{\text{erf}} = 3,6 \cdot 1.260 \text{ l/s} : 10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 453,6 \text{ m}^2$$

Die Verhältnisse von Länge zu Breite zu Höhe des Beckens müssen innerhalb der in Kapitel 4.2 genannten Grenzen nach DWA-A 166_2013 liegen.

Für die Realisierung von einem Becken ergeben sich mögliche Abmessungen zu:

$$l = 43 \text{ m}$$

$$b = 10,7 \text{ m}$$

$$h = 2,9 \text{ m}$$

Daraus ergibt sich ein Beckenvolumen von rd. 1.334 m^3 und eine Oberfläche von rd. 460 m^2 .

Bezogen auf die Anforderungen nach DWA-A 102 ergibt sich für dieses RKB nach Bild 20 ein Wirkungsgrad von 24,5 %.

4.3.1 Dezentrale Behandlungsmöglichkeiten

Grundsätzlich kann auch der Einsatz von dezentralen Regenwasserfiltern oder Einsätzen in Straßeneinläufen betrachtet werden. Aus betrieblicher Sicht ist der Einsatz der genannten dezentralen Systeme im vorliegenden Einzugsgebiet insbesondere aufgrund der Hauptverkehrsstraße (schlechte Voraussetzung für die Durchführung von Wartungen) und der Vermischung von Abflüssen der Kategorie I Flächen mit denen von Kategorie II und III (viele erforderliche Betriebspunkte) ungünstig.

Darüber hinaus wären für eine zu behandelnde Einzugsgebietsfläche von ca. 72 ha (Kat II und III) ca. 50 herkömmliche Filteranlagen oder mehr als 3.000 Einsätze in Straßeneinläufen erforderlich. Zu der Einschätzung, dass der Einsatz vieler herkömmlicher dezentraler Behandlungsanlagen für große Einzugsgebiete unvorteilhaft ist, kommen bereits auch Grüning et.al. (2010).

4.3.2 Messdatenbasierte Teilstrombehandlung

Die messtechnische Überwachung der Regenwasserabflüsse aus dem Betrachtungsgebiet hat gezeigt, dass der AFS-Gehalt häufig sehr gering ist und über die Ereignisdauer i.d.R. abnimmt. Mittels messdatenbasierter Teilstrombehandlung können diese Effekte bei der Behandlung des Niederschlagswasser genutzt werden (Stoffstromtrennung). Durch effektive Reinigung der stärker verschmutzten Abflussanteile und Einleitung der gering verschmutzten Abflussanteile ohne Behandlung soll mit einer kleineren Behandlungsanlage derselbe oder ein höherer Gesamtwirkungsgrad erreicht werden, wie bei einer Behandlung des Gesamtabflusses im RKB.

Für die praktische Umsetzung des Konzepts kann im bestehenden Regenwasserkanal ein Trennbauwerk errichtet werden, welches die Weiterleitung des Wassers in die Ems oder alternativ in einen parallelen Strang mit Behandlungsanlage ermöglicht. Die Steuerung kann über einen Grenzwert der kontinuierlich gemessenen AFS(eq)-Konzentration erfolgen. Ein geeigneter Grenzwert sollte so gering sein, dass keine stark verschmutzten Abflüsse ohne Behandlung eingeleitet werden und gleichzeitig so hoch, dass keine hydraulische Belastungen der Behandlungsanlagen mit gering verschmutzten Abflüssen entstehen.

Immissionsorientierte Vorgaben an eine einzelne Regenwassereinleitung, die die Einhaltung von Umweltqualitätszielen oder vergleichbarer Anforderungen z. B. aus dem DWA-A 102:2022 haben, lassen sich derzeit (für die Ems) nicht ableiten. Vergleichbare immissionsorientierte Fragestellungen wurden u.a. in Wuppertal bereits diskutiert. In Wuppertal stand dabei die Erreichung des guten Zustands nach WRRL im Fokus. (Wuppertalverband, 2015; v. Seidlitz, 2014).

Für eine bereits umgesetzte qualitätsabhängige Abflusssteuerung in Wuppertal (zuletzt u.a. Raith et. al., 2017) wurde u.a. auf Grundlage von Publikationen zu Anforderungen an AFS-Konzentrationen in Lachslachgewässern (BWK, 2008) ein Grenzwert von 100 mg/l gewählt. Daher wurde auch für das Pilotgebiet in Emsdetten im Sinne des Gewässerschutzes ebenfalls angestrebt, diesen Wert als Grenze nicht zu überschreiten.

Es wurden zunächst auch andere Parameter (wie der Füllstand) als Steuerungsgröße in Betracht gezogen. Die Messungen vor Ort zeigten jedoch, dass eine abfluss- oder füllstandsgesteuerte Behandlung an dieser Stelle nicht zweckmäßig ist, da ein steigender Füllstand nicht zwangsweise mit höheren Verschmutzungen einhergeht. Dies bestätigt die Untersuchungen von Hoppe et al. 2010 für die Regenwasserabflüsse in Wuppertal.

Bei Überschreiten des gewählten AFS(eq)-Grenzwertes wird der parallele Strang geöffnet und gleichzeitig der Strang zur Ems geschlossen. Der parallel verlaufende Kanal dient als Stauraumkanal, der bei Niederschlägen, die zu behandelnde (stark verschmutzte)

Niederschlagswassermenge aufnehmen kann und die Abflüsse gedrosselt in eine Behandlungsanlage mit hoher Reinigungsleistung weiterleitet. Sehr hohe Reinigungsleistungen können mit technischen Filtern (90 – 95 % nach Angaben verschiedener Hersteller) oder auf der Kläranlage erreicht werden.

Technische Regenwasserfilter kommen i.d.R. zur dezentralen Niederschlagswasserbehandlung von Einzugsgebietsflächen bis zu ca. maximal 3.000 m² zum Einsatz. Die Bemessung eines Filterschachts für die angestrebte Teilstrombehandlung ist neben dem Drosselabfluss insbesondere von der Zulauffracht abhängig und würde im Rahmen der Bauwerksplanung anhand der modellierten Fracht des Teilstroms ermittelt werden. Die Dimensionierung eines erforderlichen Rückhalteraums zur gedrosselten Weiterleitung der Abflüsse zu einer geeigneten Behandlungsanlage werden modelltechnisch ermittelt. Als Zielwert soll der zuvor ermittelte Gesamtwirkungsgrad von 43 % vor Einleitung in die Ems erreicht werden.

5 Hydrodynamische Schmutzfrachtmodellierung

5.1 Ziele der Modellierung und eingesetzte Modelltechnik

Für die Auslegung der qualitätsgesteuerten Behandlungsanlage und des erforderlichen Rückhalteraaumes zur Umsetzung der beschriebenen Teilstrombehandlungskonzepte existiert kein rechnerisches Nachweisverfahren oder Vorgaben im technischen Regelwerk.

Zur Bewertung des Gesamtwirkungsgrades der Regenwasserbehandlung kann das Konzept modelltechnisch abgebildet und über einen Zeitraum von mehreren Jahren simuliert werden. Hierfür wurde im Rahmen des Pilotprojekts die Modellumgebung PCSWMM EU von Computational Hydraulics International Water (CHI) verwendet.

Die Modellumgebung bietet die Möglichkeit neben hydrodynamischen Abflussberechnungen auch Stoffakkumulations- und -abtragsprozesse abzubilden und Steuerungsregeln festzulegen. Ziel war es mögliche Behandlungskonzepte in Abhängigkeit der AFS-Konzentration abzubilden und damit eine Bewertungsgrundlage zu schaffen.

5.2 Modellaufbau

Für das Einzugsgebiet lag bereits ein kalibriertes hydrodynamisches Kanalnetzmodell in der Programmumgebung ++SYSTEMS (Module DYNA-GeoCPM) aus dem GEP der Stadt Emsdetten aus dem Jahr 2016 vor. Dieses wurde als Grundlage für den Modellaufbau in PCSWMM verwendet. Hierin war auch die Zuordnung jeder einzelnen Fläche zur konkreten Kanalhaltung enthalten.

Die Flächenzuordnung wurde grundsätzlich beibehalten. Die Teilflächen wurden jedoch noch weiter in höher aufgelöste Flächen unterteilt, um eine Flächenkategorisierung nach DWA-A 102-2 Anhang A vornehmen zu können. Im Zuge der neuen Flächenunterteilung wurden außerdem die Befestigungsgrade der Teilflächen angepasst. Den Dachflächen wurde in Anlehnung an die empfohlenen Abminderungswerte nach DWA-A 102-2 Anhang C ein Befestigungsgrad von 100 % zugeordnet. Die Befestigungsgrade der verbliebenen Restteilfläche wurden um den Anteil der Dachflächen reduziert, so dass der jeweilige Gesamtbefestigungsgrad, soweit möglich, unverändert bleibt.

5.3 Qualitative und quantitative Modellkalibrierung

5.3.1 Niederschlagsereignisse

Zur Kalibrierung des Modells wurden Niederschlagsereignisse aus dem Messzeitraum vom 29.10.2020 bis 13.08.2021 ausgewählt. Als Mindestanforderungen an die

Kalibrierungsereignisse wurden in Orientierung an DWA-M 165-1 eine Niederschlagssumme vom mindestens 4,5 mm und eine Intensität von mindestens 2 mm/h festgelegt. Insgesamt haben sechs Niederschlagsereignisse diese Kriterien erfüllt. Tabelle 3 liefert eine Übersicht über die verwendeten Ereignisse. Da nur ein Niederschlagsschreiber zur Verfügung stand, wurden für die ausgewählten Ereignisse zusätzlich Radardaten betrachtet, anhand derer die Gleichmäßigkeit der Gebietsüberregnung überprüft wurde. Dazu wurden die Niederschlagssummenlinien von 3 Radar-Rasterzellen im Einzugsgebiet miteinander verglichen. Es handelt sich um die Zellen 350_589 im Norden (in der Nähe des Niederschlagsschreibers N1), 349_586 im Süden und 350_587 in der Mitte des Gebietes. Die mittlere und südliche Rasterzelle decken das Einzugsgebiet ab. Die Summenlinien der Niederschlagsverläufe sollten nach DWA-M 165-1 um maximal +/- 30% voneinander abweichen. Die Gesamtniederschlagshöhen sollten um maximal 15% voneinander abweichen. Für die Ereignisse am 02.02.2021 und 10.04.2021 wird das 30%-Kriterium jeweils im ersten Zeitschritt mit 33,3% knapp überschritten. Aufgrund der geringen Abweichungen im weiteren Verlauf, wurden die Ereignisse dennoch für die Modellkalibrierung berücksichtigt.

Tabelle 3 Niederschlagsereignisse zur Modellkalibrierung des hydrodynamischen Schmutzfrachtmodells

Beginn	Ende	Dauer [h]	N-Summe [mm]	Max. Intensität [mm/h]
21.12.2020 22:39	22.12.2020 11:26	12,78	8,7	3,7
23.12.2020 12:12	23.12.2020 16:15	4,05	4,9	2,4
21.01.2021 20:41	22.01.2021 04:24	7,72	6,9	2
02.02.2021 10:47	03.02.2021 04:59	18,2	6,1	2,2
25.02.2021 20:24	25.02.2021 23:50	3,43	6,2	2,8
10.04.2021 12:00	11.04.2021 10:11	22,18	11,4	2,2

5.3.2 Anpassung der Modellparameter

Es wurden zunächst, soweit möglich, alle Modellparameter aus dem kalibrierten Kanalnetzmodell aus dem GEP 2016 übernommen. Der GEP wurde in der Modellumgebung ++ Systems erstellt. Im Rahmen des Pilotprojekts wurde das hydrodynamische Softwareprogramm PCSWMM genutzt, das Ablagerungs- und Remobilisierungsprozesse detailliert abbilden kann. Aufgrund der unterschiedlichen Modellumgebungen war eine 1:1 Übernahme aller Parameter jedoch nicht möglich. Insbesondere Anfangs- und Dauerverluste konnten nicht direkt übernommen werden.

Zur Annäherung der simulierten Abflussganglinie an die gemessene Abflussganglinie, wurden die aus dem GEP 2016 übernommenen Befestigungsgrade der Flächen um 25 % reduziert. Die Dachflächen haben unabhängig davon pauschal einen Befestigungsgrad von 80 % bekommen. Als weiterer Unterschied zum GEP-Modell wurde ein konstanter Verdunstungswert von 0,3 mm/d festgelegt.

5.3.3 Gütekriterien der Modellkalibrierung

Als Güteparameter der Modellkalibrierung werden die Volumenabweichung (Gl.1) und der Nash-Sutcliffe-Index NSE (Gl.2) herangezogen.

$$dV = \frac{V_{Sim} - V_{Mess}}{V_{Mess}} \quad \text{Gl. 1}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{t,mess} - Q_{t,sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{t,mess} - \overline{Q_{t,mess}})^2} \quad \text{Gl. 2}$$

Die ermittelten Güteparameter für die Kalibrierungsereignisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Übereinstimmung der Ganglinienverläufe, bewertet durch den NSE, liegt für alle Kalibrierungsereignisse mit Werten zwischen 0,827 und 0,974 in einem sehr guten Bereich.

Die Volumendifferenz ist zum Teil hoch, aber für mindestens 1 Ereignis werden für beide Güteparameter sehr gute Werte erreicht. Die Güteparameter über einen langen Zeitraum (20.12.2020 bis 26.05.2021) liegen bei $dV = 0,158$ und $NSE = 0,755$. Dies zeigt, dass die Ganglinienverläufe über einen langen Zeitraum sehr gut übereinstimmen, das Abflussvolumen im Modell jedoch im Vergleich zu den Messwerten leicht erhöht ist.

Tabelle 4 Güteparameter Modellkalibrierung

Datum	ΣV_{sim} [L]	ΣV_{mess} [L]	dV	NSE
21.12.2020 22:39	9.834.000	9.401.000	0,05	0,961
23.12.2020 12:12	6.147.000	4.997.000	0,23	0,923
21.01.2021 20:41	6.625.000	5.438.000	0,22	0,896
02.02.2021 10:47	10.240.000	9.002.000	0,14	0,974
25.02.2021 20:24	5.435.000	3.549.000	0,53	0,827
10.04.2021 12:00	10.890.000	7.803.000	0,4	0,898

5.3.4 Kalibrierung der Stoffkonzentration

Zur Kalibrierung des Modells hinsichtlich der AFS-Konzentration wurden in einem ersten Schritt einzelne Niederschlags-Abfluss Ereignisse betrachtet, anhand deren Konzentrationsverläufen die Parameter für Stoffakkumulations- und -abtragsprozesse angepasst wurden. In einem weiteren Schritt wurden zur Überprüfung der gewählten Parameter für mehrere aufeinanderfolgende Ereignisse die simulierten Konzentrationsganglinien den Ganglinien der Messkampagne gegenübergestellt und die Parameter weiter angepasst.

Die AFS Akkumulation wurde modelltechnisch für alle Flächenkategorien mittels Potenzfunktion (power function) abgebildet. In PCSWMM ist hierfür folgende Funktion hinterlegt:

$$b = \text{Min} (B_{max}, K_B t^{N_B})$$

Mit:

b = buildup, [B]

t = buildup time interval, days

B_{max} = maximum buildup possible, [B]

K_B = buildup rate constant, [B]-days^{- N_B}

N_B = buildup time exponent, dimensionless

Tabelle 5 zeigt die verwendeten Werte zur Abbildung der AFS Akkumulation.

Tabelle 5 Abbildung der AFS Akkumulation in der Modellumgebung PCSWMM

Flächenkategorie	Funktion	B _{max}	K _B	N _B
Kat 1	POW	10	0,2	0,9
Kat 2	POW	20	0,2	0,6
Kat 3	POW	40	1,6	0,3

Die Abtragsprozesse wurden mittels folgender Exponentialfunktion beschrieben:

$$W(t) = m_B(0)(1 - e^{-kt})$$

W = cumulative mass of constituents washed off

t = time

m_B(0) = initial mass of constituents on the surface at time 0

k = a coefficient

Es wurden folgende Werte für das vorliegende Modell gewählt:

Tabelle 6 Abbildung der AFS Abtragsprozesse in der Modellumgebung PCSWMM

Flächenkategorie	Funktion	k	Kt
Kat 1	EXP	100	2
Kat 2	EXP	10	8
Kat 3	EXP	5	10

Bei den gewählten Parametern wird der Konzentrationsverlauf wie in Bild 21 in grün dargestellt abgebildet. Der charakteristische Konzentrationsverlauf, den die Messkampagne gezeigt hat, konnte im Modell gut nachgestellt werden.

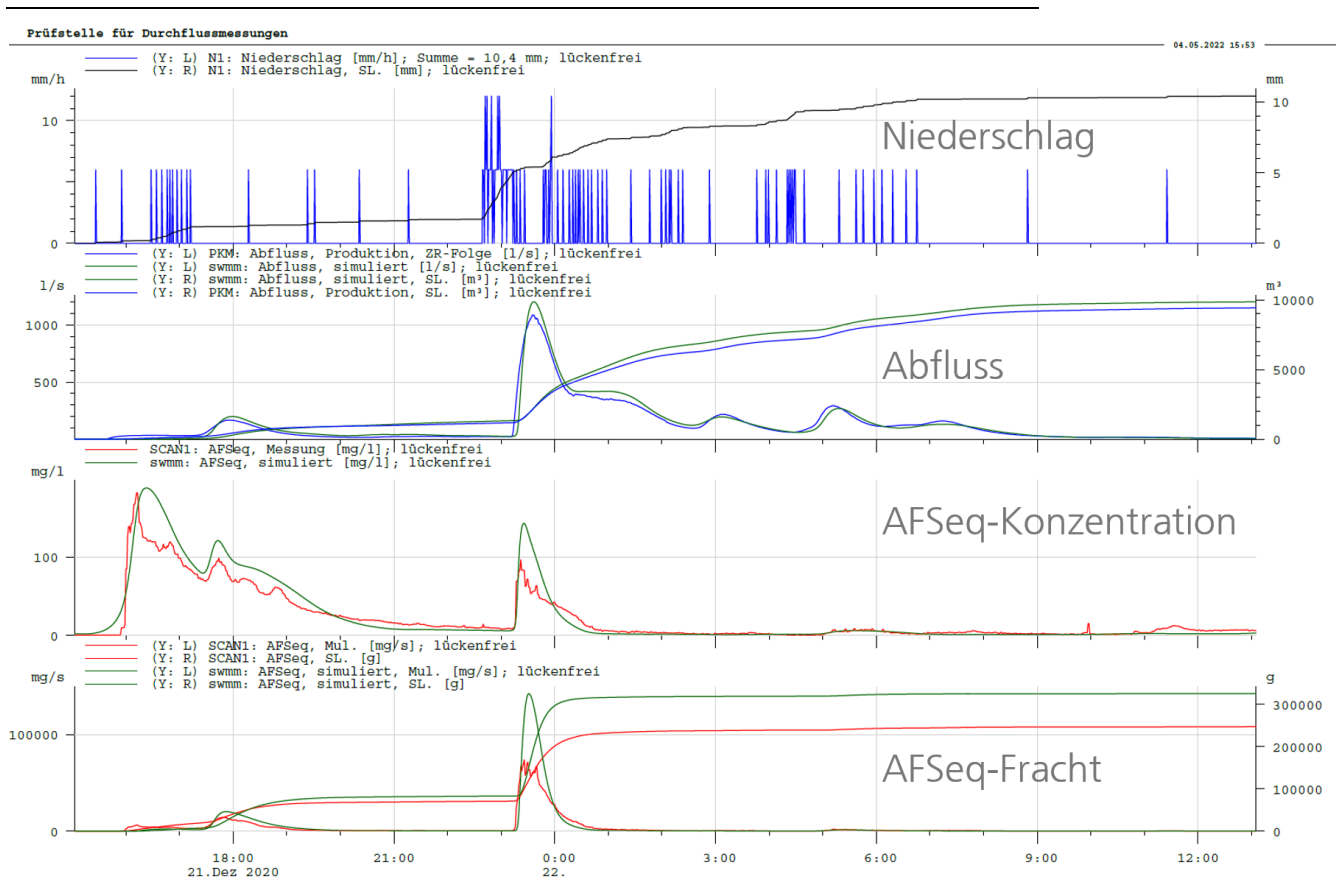


Bild 21 Gegenüberstellung simulierter und gemessener Ganglinien für das Niederschlag-Abfluss-Ereignis am 21.12.2020

Die Güte der modellierten Stoffakkumulations- und Abtragsprozesse wurde darüber hinaus durch die Gegenüberstellung der normierten kumulativen AFSeq-Fracht zum normierten kumulativen Volumen bewertet. Für das Ereignis vom 21.12.2020 ist das entsprechende M/V-Diagramm in Bild 22 für die Messungen mit der PKM-Sonde, der Spektrometersonde und für die Simulation dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass in beiden Messungen und der Simulation die AFSeq-Fracht während des Ereignisses schneller ansteigt als das Abflussvolumen. Wenn 50 % des Volumens abgeflossen sind, sind in allen drei Fällen bereits über 90 % der AFSeq-Fracht abgeflossen.

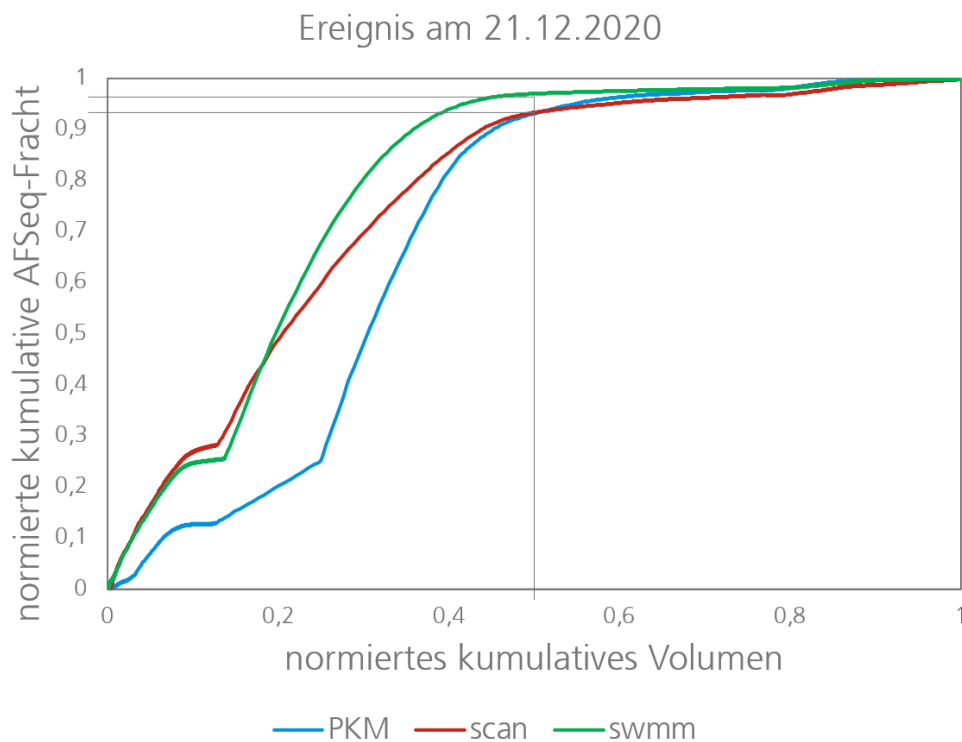


Bild 22 MV-Diagramm für das Niederschlag-Abfluss-Ereignis am 21.12.2020

Zur Bewertung der Modellgüte über einen längeren Zeitraum mit verschiedenen, aufeinanderfolgenden Ereignissen und unterschiedlich langen Trockenperioden von wenigen Stunden bis hin zu mehr als zwei Wochen zwischen den Ereignissen diente der Vergleich der gemessenen und simulierten AFSeq-Fracht über einen Zeitraum von mehreren Monaten.

Dieser Vergleich zeigt, dass beide Messungen und die Simulation für die ersten zwei Monate sehr ähnliche Ergebnisse lieferten. Aufgrund einzelner Ereignisse laufen die Summenlinien mit der Zeit auseinander, wobei die Summenlinie der simulierten Daten mittig zwischen den Messungen der PKM- und der Spektrometersonde verläuft. Dies zeigt, dass im Rahmen der Messungengenauigkeiten keine bessere modelltechnische Abbildung der AFS-Konzentration möglich ist.

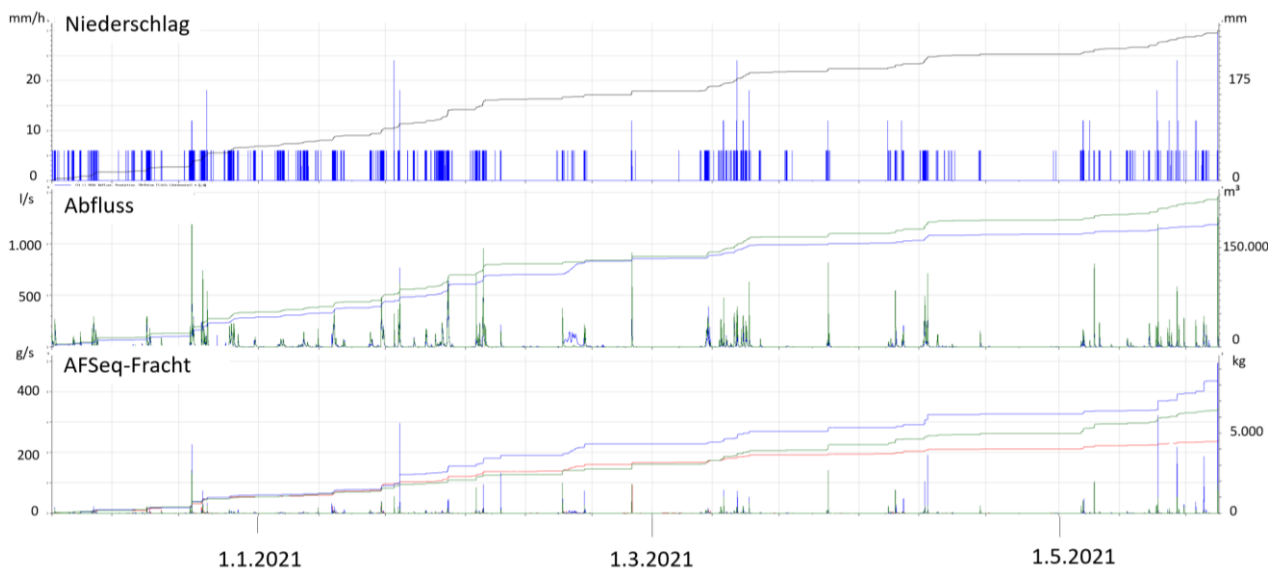


Bild 23 Vergleich der gemessenen und simulierten AFSeq-Fracht über einen Zeitraum von sechs Monaten

5.4 Modelltechnische Bewertung

5.4.1 Modelltechnische Umsetzung

Zur Überprüfung des Wirkungsgrades einer Teilstrombehandlung vor der Einleitstelle EM1, wurde eine Trennung des Abflusses in Abhängigkeit der AFS-Konzentration modelltechnisch abgebildet. Hierbei war zunächst nicht relevant, welche Behandlungsanlage zum Einsatz kommt, sondern wie hoch die Reinigungsleistung einer grundsätzlich denkbaren Behandlungsanlage eingeschätzt wird.

Für die modelltechnische Umsetzung wurden die folgenden Komponenten in das bestehende Modell eingefügt:

- Trennbauwerk
- Speicherbauwerk mit Notentlastung
- Drosseleinrichtung

- Behandlungsanlage

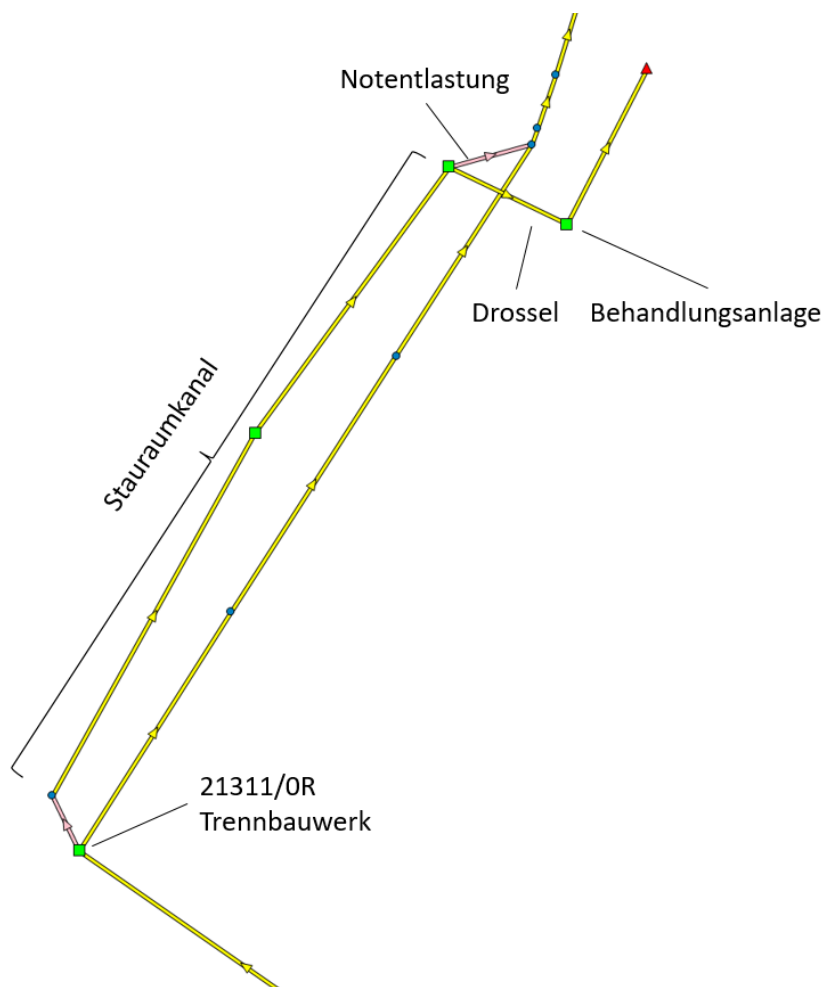


Bild 24 Abbildung einer Teilstrombehandlung in PCSWMM

Das Trennbauwerk wurde im Knoten 21311/OR eingefügt. Die bestehende Haltung 21311/OR (im Modell C8) bleibt erhalten und im Trennbauwerk wird eine weitere Öffnung (OR1) vorgesehen, über die stärker verschmutztes Wasser in einen neuen

Kanalstrang geleitet werden kann. Zur Steuerung der Abflüsse wurde die in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Regel in PCSWMM aufgestellt.

```
rule 1
if node 21311/OR concentration > 45
then conduit C8 status = closed
And orifice OR1 setting = 1
else conduit C8 status = open
And orifice OR1 setting = 0
```

Bild 25 Steuerungsregel in PCSWMM zur Abbildung der Teilstrombehandlung

Diese Steuerung bewirkt, dass ab einer AFSeq-Konzentration im Regenwasserabfluss von mehr als 45 mg/l die Haltung 21311/OR geschlossen und ein Schieber zum parallel verlaufenden Strang geöffnet wird. Bei Unterschreitung des Grenzwertes wird der Schieber zum parallelen Strang wieder geschlossen und die Haltung 21311/OR geöffnet.

Der Stauraumkanal wurde hinter der Öffnung des Trennbauwerks parallel zum weiterführenden Kanal in das Modell eingefügt. Die Festlegung der genauen Abmessungen wird Teil der Bauwerksplanung. Für die Modellierung wurde der Stauraumkanal so vorgesehen, dass kein Rückstau in das Trennbauwerk stattfindet. Zu diesem Zweck wurde der Scheitel des Stauraumkanals auf Sohlhöhe des bestehenden Regenwasserkanals vorgesehen. Zur Annäherung an das erforderliche Volumen eines SRKs wurden mehrere Simulationsläufe mit den in der Messkampagne erfassten Niederschlagsdaten durchgeführt. In einem nächsten Schritt wurde mit den gleichen Einstellungen ein längerer Zeitraum mit historischen Niederschlagsdaten der Station St. Arnold zur Überprüfung der Dimensionierung simuliert.

Am Ende des Stauraumkanals erfolgt eine gedrosselte Entleerung zur Behandlungsanlage. Im Modell wird dies durch eine Rohrdrossel im Freispiegel abgebildet. Je nach genauem Behandlungsort und tatsächlich gewählter Tiefe des SRK wird dieser Stelle ggf. eine Pumpe erforderlich sein.

Die Behandlungsanlage wird im Modell als „normaler Schacht“ abgebildet, in dem modelltechnisch eine Reduktion der AFS-Konzentration stattfindet. Für diesen Standort bietet sich die Behandlung mittels technischem Regenwasserfilter oder in der Kläranlage an.

5.4.2 Verwendete Niederschlagsdaten

Zur Simulation wurden zunächst die, während der Messkampagne aufgezeichneten, Niederschlagsdaten über einen Zeitraum von 10 Monaten verwendet.

Zur Überprüfung des Wirkungsgrades bei anderen Niederschlagsverhältnissen wurden zusätzlich die Daten der Station St. Arnold für die Jahre 2008 bis 2013 verwendet. Diese wurden mit den Daten der Station DWD01232 aus dem Zeitraum 1941 bis 2022 verglichen. Wie Tabelle 7 verdeutlicht, spiegelt der gewählte Zeitraum die mittleren Niederschlagsverhältnisse im Einzugsgebiet sehr gut wider. Die mittlere Jahressumme der Jahre 1941 bis 2022 deckt sich sehr gut mit den Niederschlagssummen der Jahre 2008 bis 2013.

Tabelle 7 Monats- und Jahressummen der verwendeten Niederschlagsdaten im Vergleich zu den Mittelwerten der Jahre 1941 bis 2022

	Niederschlag [mm]												Summe
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
Mittel 1941 - 2022	64,8	49,2	50,8	43,2	55,8	65,7	77,7	71,9	59,1	56	62,3	70,4	726,9
2008	122,4	44,96	70,8	39,6	36,3	37,8	101,6	83,1	36,6	49,9	52,2	25,1	700,5
2009	31,1	54,4	57,0	28,5	38,9	70,5	161,3	22,8	38,3	95,5	100,4	82,3	781,0
2010	41,4	51,8	61,2	21,0	38,1	10,5	71,7	291,3	72,3	39,2	84,5	69,5	852,5
2011	69,0	28,3	10,4	22,6	19,3	78,4	42,3	114,3	49,7	54,7	1,2	112,8	602,9
2012	99,4	19,4	17,4	43,9	34,3	112,5	107,2	42,3	43,3	73,8	33,5	99,9	726,8
2013	58,1	35,3	31,4	33,6	54,1	49,8	23,8	32,5	118,3	72,3	66,6	59,69	635,41

Darüber hinaus wurde die Repräsentativität der verwendeten Niederschlagsdaten im Hinblick auf maximale und minimale Monatssummen überprüft (Bild 26 und Bild 27). Sowohl das absolute Monatsmaximum (August 2010) als auch das absolute Monatsminimum (November 2011) sind in den ausgewählten Niederschlagsjahren enthalten. Damit sind diese Daten sehr gut zur Simulation geeignet.

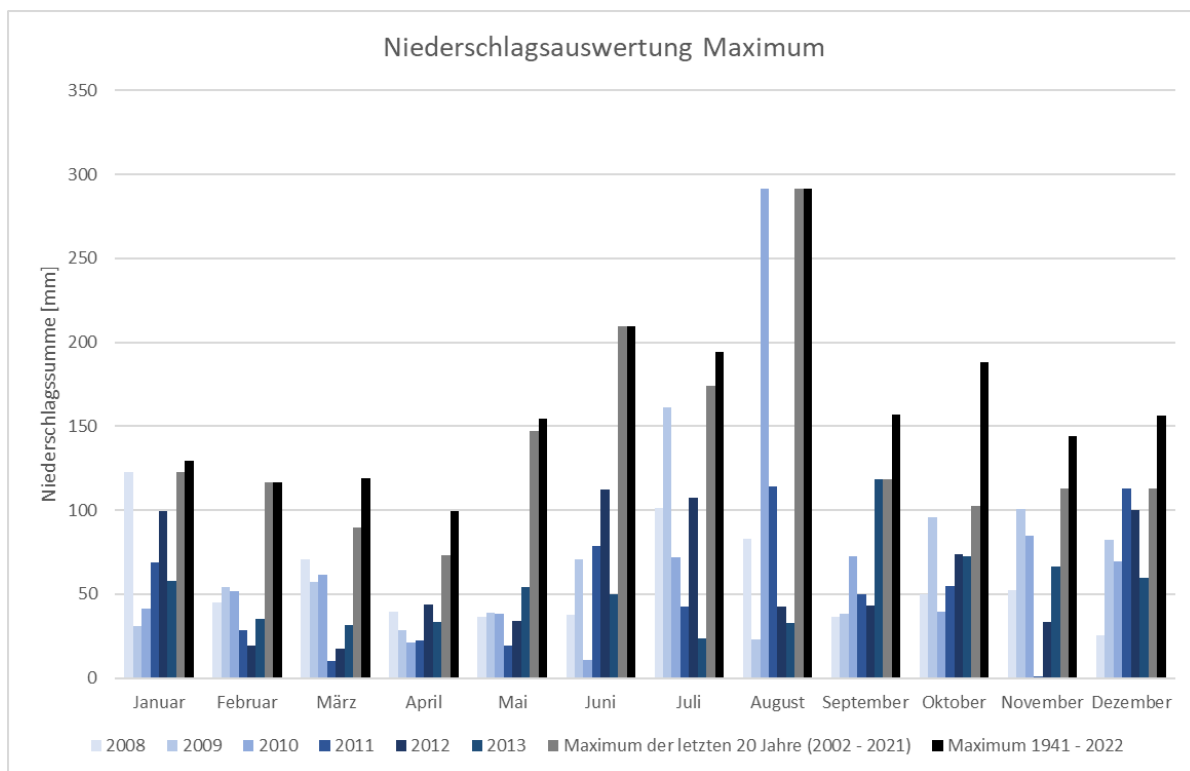


Bild 26 Repräsentativität der Niederschlagsjahre 2008 bis 2013 im Hinblick auf Maximalniederschlagssummen

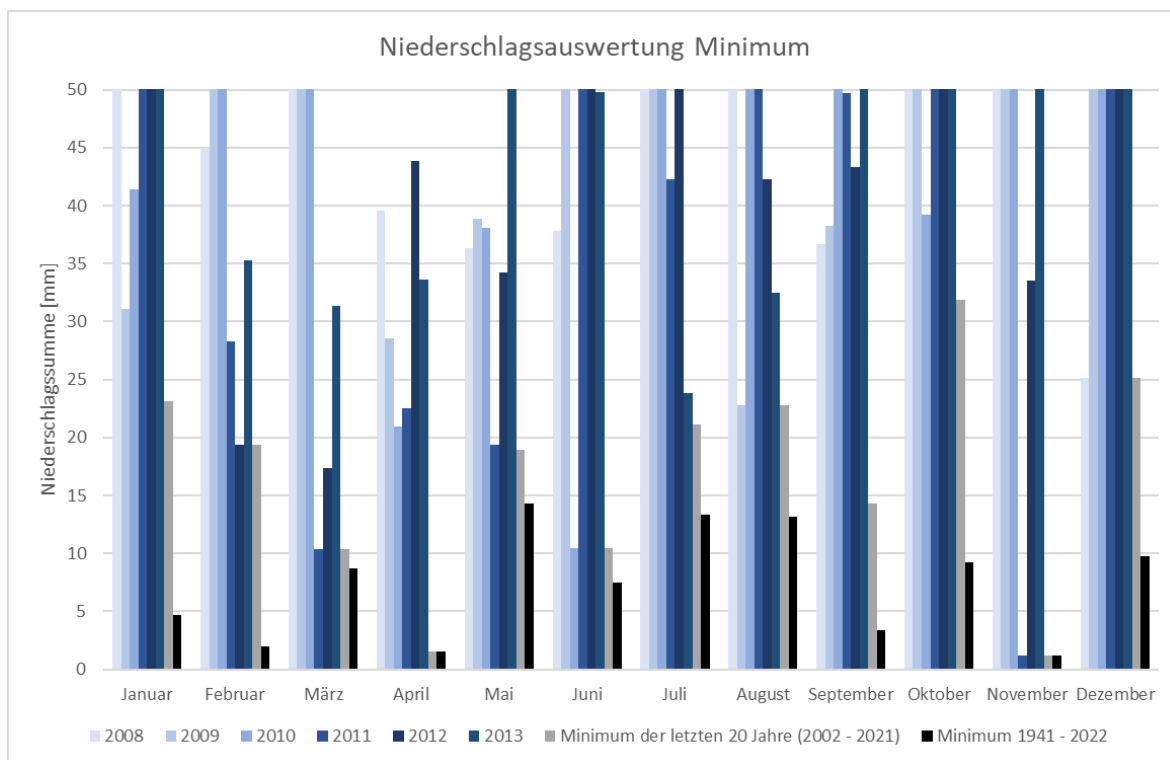


Bild 27 Repräsentativität der Niederschlagsjahre 2008 bis 2013 im Hinblick auf Minimalniederschlagssummen

5.4.3 Ergebnisse der Modellierung

Zur Erreichung eines erforderlichen Wirkungsgrades von mindestens 43 % ergaben die Simulationsläufe im Zeitraum vom 31.10.2020 – 31.08.2021 ein erforderliches Volumen des Stauraumkanals von 1.150 m³ bei Verwendung einer Behandlungsanlage mit einer Reinigungsleistung von 90 % (realisierbar mit technischem Regenwasserfilter oder auf der Kläranlage) und einem Drosselabfluss zur Behandlungsanlage von 25 l/s.

Die Simulation der Teilstrombehandlung über einen längeren Zeitraum (2008 – 2013) bestätigt das Erreichen des erforderlichen Gesamtwirkungsgrades von 43 %. Die Ergebnisse für beide Zeiträume sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8 Ergebnisse Simulation Teilstrombehandlung

	2020/2021 (10 Monate)	2008 – 2013 (6 Jahre)
Volumen SRK	1.150 m ³	
Reinigungsleistung d. Behandlungsanlage	90 %	
AFS-Fracht vor dem TBW	10.950 kg	97.520 kg
AFS-Fracht nach der Teilstrombehandlung	6.128 kg	55.479 kg
Wirkungsgrad der Teilstrombehandlung	44 %	43 %
Abflussvolumen vor dem TBW	495.500 m ³	7.706.000 m ³
Abflussvolumen unbehandelt	435.812 m ³	7.193.800 m ³
Abflussvolumen behandelt	60.620 m ³	523.200 m ³
Abflussanteil behandelt	12 %	7 %
Abflussanteil unbehandelt	88 %	93 %

6 Empfehlung für ein Behandlungskonzept

6.1 Gegenüberstellung möglicher Behandlungskonzepte

6.1.1 Regenkklärbecken

Die Dimensionierung eines RKBs nach DWA-A 102 ergibt eine erforderliche Beckenoberfläche von 1.080 m². Unter Berücksichtigung der Grenzen nach DWA-A 166 für das l:b:h- Verhältnis wäre ein Becken mit den Abmessungen 66,0 m x 16,4 m x 4,2 m denkbar. Damit hätte das Becken ein Volumen von 4.546 m³.

Eine mögliche Reduzierung des Bauwerksvolumens wäre denkbar, wenn mehrere parallel beschickte Becken vorgesehen werden. Bei einer Aufteilung der erforderlichen Beckenoberfläche auf 4 Becken, könnten diese jeweils Abmessungen von 32,0 m x 8,5 m x 2,1 m haben. Das Volumen läge dann nur noch bei 2.285 m³. Hierfür wäre jedoch im

Gegensatz zur Variante mit nur einem Becken ein Verteilerbauwerk zur gleichmäßigen Verteilung auf alle Becken erforderlich.

Für beide Varianten ist davon auszugehen, dass ein RKB im Umkreis der Kläranlage gegen Auftrieb gesichert werden müsste, da sich bereits der bestehende Regenwasserkanal zum Teil im Grundwasser befindet. Zur Entleerung des RKBs wäre aufgrund der Höhenlage zudem eine Pumpe erforderlich.

Auf dem Gelände der Kläranlage ist für beide Varianten kein ausreichender Platz vorhanden.

6.1.2 Teilstrombehandlung

Die modelltechnische Betrachtung eines Teilstrombehandlungskonzepts in Abhängigkeit der kontinuierlich gemessenen AFS(eq)- Konzentration hat ein erforderliches Rückhaltevolumen von 1.150 m³ ergeben. Zur Vermeidung von Rückstau in das Kanalnetz, sollte der Scheitel des Stauraumkanals am Trennbauwerk unterhalb der Sohle des bestehenden Regenwasserkanals liegen, womit ein SRK im Umkreis der Kläranlage im Grundwasserbereich läge.

Das erforderliche Rückhaltevolumen könnte beispielsweise mit einem ca. 230 m langen DN 2600 Kanal erreicht werden.

Zur gedrosselten Weiterleitung des zu behandelnden Wassers wäre aufgrund der Höhenverhältnisse eine Pumpe erforderlich. Für die Behandlung in einem technischen Filterschacht wäre eine Filterfläche von ca. 25 m² erforderlich. Dabei handelt es sich um einen Auslegungswert in Orientierung an das LANUV NRW-Pilotprojekts ReWaFil zur Großfilteranlage Böhler Weg in Wuppertal. Anstelle der Behandlung im technischen Filter, könnte das Wasser auch gedrosselt der Kläranlage zugeführt werden. Für die letzte Variante ist der geringste Platzbedarf erforderlich. Ob für den Stauraumkanal und ggf. einen Filterschacht Flächen zur Verfügung stehen, die bereits im Besitz der Stadt sind, ist im Rahmen der Bauwerksplanung zu klären.

6.2 Ökonomische Bewertung

6.2.1 Herstellungskosten

Zur vergleichenden Gegenüberstellung der Herstellungskosten für die in Kapitel 6.1 beschriebenen Behandlungskonzepte, wurden mittlere Kosten vergangener Bauprojekte herangezogen. Insbesondere aufgrund aktueller Preissteigerungen kann diese Gegenüberstellung nur zum Vergleich der Varianten herangezogen werden. Die Ermittlung der Herstellungskosten kann Anlage 3 entnommen werden.

Eine Übersicht zum Vergleich der Kosten für verschiedene Varianten zeigt Tabelle 9. Nach dieser Kostenschätzung ist für die Herstellung eines ca. 4.500 m³ großen RKB (Bemessung für die gesamte Einzugsgebietsfläche) mit Kosten in Höhe von ca. 9 Mio. € zu rechnen. Durch eine Aufteilung der erforderlichen Oberfläche auf 4 parallel beschickte Becken, kann das Volumen auf ca. 2.300 m³ reduziert werden. Es fallen jedoch zusätzlich Kosten für ein Verteilerbauwerk an. Dennoch könnten die Kosten auf ca. 5 Mio. € reduziert werden.

Für eine Teilstrombehandlung mit technischem Regenwasserfilter liegt die Schätzung der Herstellungskosten bei ca. 1,5 Mio. €. Für die Variante der Behandlung des Teilstroms auf der Kläranlage werden die Kosten auf knapp 1 Mio. € geschätzt.

Der Vergleich zeigt, dass die ersten beiden Varianten insbesondere aufgrund der großen Bauwerke erheblich teurer sind, als die Varianten ohne RKB. Nicht berücksichtigt sind Kosten für den Kauf von erforderlichen Grundstücksflächen. Auch hier können für die ersten beiden Varianten höhere Kosten erwartet werden, da ein größerer Flächenbedarf besteht.

Tabelle 9 Übersicht zu den geschätzten Herstellungskosten für 4 Behandlungsvarianten

Variante	Geschätzte Herstellungskosten
1: Regenklärbecken (66,0 m x 16,4 m x 4,2 m)	9.034.800,00 €
2: 4 Regenklärbecken (je 32,0 m x 8,5 m x 2,1 m)	5.087.000,00 €
3: Teilstrombehandlung mit Technischem Regenwasserfilter	1.458.000,00 €
4: Teilstrombehandlung auf der Kläranlage	994.000,00 €

6.2.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten (Tabelle 10) können zum Teil bisher nur mit entsprechenden Unsicherheiten abgeschätzt werden, da diese stark von der weiteren Planung abhängig sind.

Für den Betrieb der Regenklärbecken sind die Kosten maßgeblich abhängig von dem Volumenanteil, der zur Kläranlage entleert wird. Mit welchen Mengen gerechnet werden

muss, hängt stark von der Entleerungsstrategie des RKB ab. Für die Gegenüberstellung der Betriebskosten wurden zwei Szenarien betrachtet. Für den günstigsten Fall wurde angenommen, dass bis zu einem Füllstand von 1,0 m ein Klarwasserabzug stattfindet. In diesem Fall würde das Volumen bis zum Füllstand von 1,0 m in die Kläranlage entleert werden. Weiterhin wurde angenommen, dass die Entleerung 40 Mal pro Jahr stattfindet. Das würde zu einem Volumen von 43.300 m³ pro Jahr führen, welches zur Kläranlage entleert wird. Die Betriebskosten für dieses Szenario lägen bei ca. 13.000 €. Denkbar wäre auch ein ungünstiger Fall, bei dem ca. 40 % des Jahresabflussvolumens entleert werden müssen. Dadurch könnten sich die Betriebskosten auf über 68.000 € erhöhen.

Bei einer Teilstrombehandlung fallen vor allem die Wartung der Messtechnik und der Austausch von Filterelementen bzw. die Behandlung auf der Kläranlage ins Gewicht. Der auf der Kläranlage zu behandelnde Anteil, kann durch die Simulation auf ca. 10 % des Jahresabflussvolumens geschätzt werden. Bei der Auslegung eines technischen Filterschachts wird eine Standzeit von ca. 12 Monaten angestrebt. Es ist jedoch auch denkbar, dass das Filtermaterial bereits nach einem halben Jahr oder erst nach zwei Jahren getauscht werden muss. Daher können die Betriebskosten zwischen knapp 25.000 € und ca. 77.000 € variieren. Die Ermittlung der Betriebskosten für die verschiedenen Varianten kann Anlage 4 entnommen werden.

Tabelle 10 Übersicht zu den geschätzten jährlichen Betriebskosten für die vier untersuchten Behandlungsvarianten

Variante	Geschätzte Betriebskosten pro Jahr	
	Von	bis
1: Regenklärbecken (66,0 m x 16,4 m x 4,2 m)	13.020,00 €	68.360,00 €
2: 4 Regenklärbecken (je 32,0 m x 8,5 m x 2,1 m)	13.384,00 €	68.680,00 €
3: Teilstrombehandlung mit Technischem Regenwasserfilter	24.864,00 €	77.364,00 €
4: Teilstrombehandlung auf der Kläranlage	22.244,00 €	

6.2.3 Datenbasierte Planung

Grundlage zur datenbasierten Planung ist die Durchführung einer Messkampagne. Die Kosten hierfür lagen im Pilotprojekt EM1 bei ca. 50.000 € für eine Dauer von 9 Monaten. Die Gesamtkosten des Projekts inklusive Messkampagne, Datenauswertung, Modellierung und Konzeption der Anlage lagen bei ca. 145.000 €.

6.2.4 Gesamtkosten

Ein Vergleich von Projektkostenbarwerten (Gesamtkosten) ist für die wirtschaftliche Beurteilung der Varianten nicht erforderlich. Die Herstellungskosten unterscheiden sich erheblich. Gleichzeitig sind die Betriebskosten der Variante mit den geringsten Herstellungskosten (Variante 4) im Vergleich zu den mittleren geschätzten Betriebskosten der anderen Varianten am geringsten. Für die Varianten 3 und 4 müssen jedoch die Kosten zur Datenerfassung, Modellierung und Konzeption der Anlage addiert werden. Im Pilotprojekt lagen diese bei ca. 145.000 EUR. Damit ist Variante 4 auch unter Berücksichtigung dieser Kosten am wirtschaftlichsten.

6.3 Fazit zum Behandlungskonzept

Die Herstellung eines RKBs für das betrachtete Einzugsgebiet erfordert viel Platz und es fallen sehr hohe Baukosten an. Um die Betriebskosten für ein RKB an dieser Stelle zu begrenzen, sollte ein geeignetes Entleerungskonzept entwickelt werden, damit ein möglichst großer Abflussvolumenanteil als Klarwasserabzug entlastet werden kann.

Platzbedarf und Herstellungskosten für eine Variante mit Teilstrombehandlung sind deutlich geringer. Das Gelände der Kläranlage wird jedoch auch hierfür nicht ausreichen. Die jährlichen Betriebskosten sind im Vergleich zum Betrieb eines RKBs mit sehr guter Entleerungsstrategie höher. Bei Verwendung eines technischen Regenwasserfilters ist es möglich, dass bereits nach wenigen Monaten oder erst nach 2 Jahren ein Austausch des Filtermaterials erforderlich ist. Das führt zu großen Unterschieden bei den Betriebskosten.

Für die Teilstrombehandlung auf der Kläranlage können die Betriebskosten am besten abgeschätzt werden, da es hier die geringsten Unsicherheiten gibt.

Unter Berücksichtigung aller Aspekte empfiehlt sich eine Teilstrombehandlung auf der Kläranlage Austum. Hierzu ist die Leistungsfähigkeit der Kläranlage nochmals zu bewerten.

7 Diskussion der Projektergebnisse

Für das Einzugsgebiet der Einleitstelle EM1 in Emsdetten wurde auf Grundlage von kontinuierlichen Messungen und unter Verwendung und Erweiterung eines bestehenden Kanalnetzmodells die Möglichkeit einer konzentrationsabhängigen Teilstrombehandlung geprüft und klassischen Behandlungsmethoden gegenübergestellt. Dabei hat sich gezeigt, dass durch die Anwendung einer Strategie, bei der nur die stärker verschmutzten Abflussanteile in einer Behandlungsanlage mit hoher Reinigungsleistung behandelt werden, erheblich weniger Behandlungsvolumen bei gleichem Gesamtwirkungsgrad erforderlich ist.

Für das betrachtete Gebiet würde aufgrund der Verschmutzungsdynamik die Behandlung von im Mittel rund 10 % der Niederschlagsabflussmenge ausreichen, um den nach DWA-A 102 ermittelten Gesamtwirkungsgrad von 43 % zu erreichen. Zur Erfüllung der Anforderungen nach Trennerlass (Standardbemessung), wäre ein RKB mit rund 1.300 m³ Volumen erforderlich. Der benötigte Retentionsraum zur Teilstrombehandlung liegt mit 1.150 m³ knapp darunter. Der Wirkungsgrad des RKBs nach Trennerlass ist jedoch mit 24,5 % deutlich geringer. Eine Teilstrombehandlung bietet damit das Potential, bei vergleichbarem Mitteleinsatz einen deutlich besseren Wirkungsgrad zu erreichen.

Im betrachteten Einzugsgebiet bietet sich die Möglichkeit an, den zu behandelnden Anteil nach einer Zwischenspeicherung in einem ausreichend dimensionierten Stauraumkanal gedrosselt in die Kläranlage einzuleiten. Diese Möglichkeit ist nicht in jedem Einzugsgebiet gegeben, wenn die Leistungsfähigkeit der Kläranlage keine weiteren Zuflüsse erlaubt oder eine Einleitung aufgrund der Lage nicht möglich ist.

Alternativ wäre die Behandlung des gedrosselten Abflusses in einer technischen (Groß)Filteranlagen möglich, wie sie z.B. in Wuppertal bereits umgesetzt sind. Für das Einzugsgebiet in Emsdetten wurde für diesen Fall eine erforderliche Filterfläche von ca. 25 m² geschätzt. Für Einzugsgebiete, in denen ausreichend große Flächen zur Verfügung stehen, wäre auch ein Retentionsbodenfilter denkbar. Diese Möglichkeit wurde hier jedoch aufgrund der Platzverhältnisse und Grundwasserstände nicht weiter betrachtet.

Die Dimensionierung des erforderlichen Rückhaltevolumens vor der Behandlungsanlage ist abhängig von dem zu behandelnden Abflussvolumen und dementsprechend vom gewählten Grenzwert der AFSeq-Konzentration sowie des erforderlichen Gesamtwirkungsgrades.

Die Simulation der Teilstrombehandlung wurde zunächst für einen Zeitraum von 10 Monaten und der Verwendung der im Rahmen der Messkampagne erfassten Niederschlagsdaten durchgeführt. Anschließend wurde ein längerer Zeitraum (6 Jahre) mit repräsentativen Niederschlagsdaten (mittlere Niederschlagsverhältnisse,

minimale/maximale Monatssummen) simuliert. Da auch für den repräsentativen Zeitraum der erforderliche Gesamtwirkungsgrad eingehalten wurde, werden die Ergebnisse als belastbar bewertet.

Mögliche Gebietsentwicklungen wurden nicht simuliert, da insbesondere die zeitliche Variabilität der Verschmutzung das Ergebnis beeinflusst. Sollte dennoch die Kapazität der Kläranlage in Zukunft nicht mehr ausreichen, können zusätzlich technische Filter in das Behandlungskonzept integriert werden, um weiterhin die erforderliche Reinigungsleistung zu gewährleisten.

Grundsätzlich lässt sich die Vorgehensweise zur Konzeptionierung einer Teilstrombehandlung der Niederschlagsabflüsse auf andere Einzugsgebiete übertragen. Da die Voraussetzungen nicht für jedes Einzugsgebiet gleich sind, sollten zunächst die erforderlichen Grundlagen geschaffen oder wenn bereits vorhanden hinsichtlich der individuellen Verschmutzungscharakteristik untersucht werden. Das in Bild 28 dargestellte Fließschema zeigt eine mögliche Vorgehensweise.

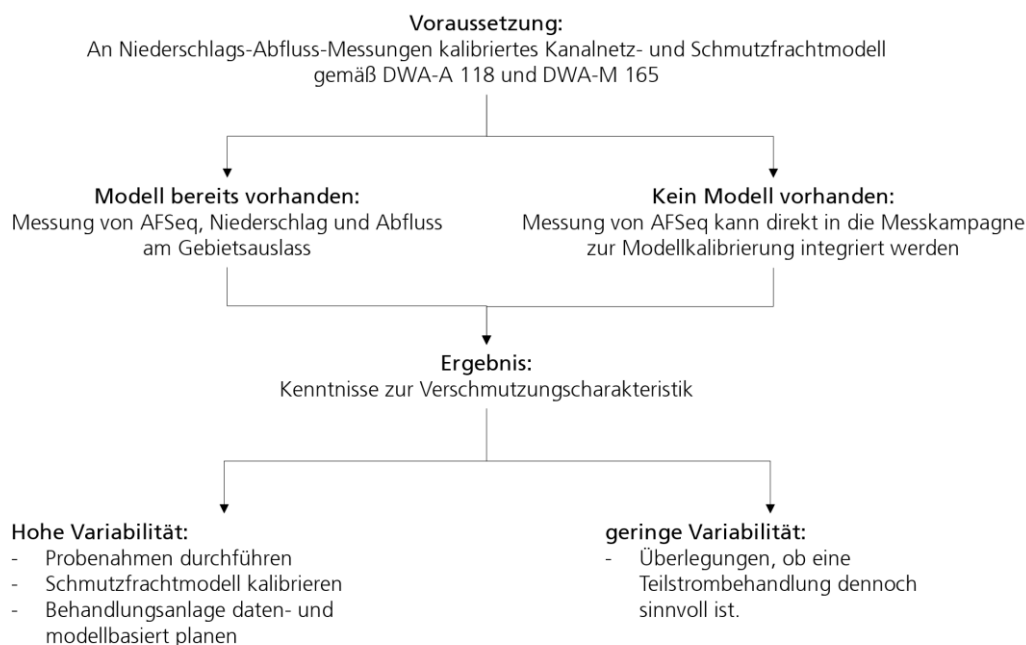


Bild 28 Vorgehensweise zur Konzeptionierung einer datenbasierten Niederschlagswasserbehandlungsanlage

8 Fazit und Ausblick

Das Pilotprojekt hat gezeigt, dass es wirtschaftlich ist, die tatsächlichen Gegebenheiten vor Ort messtechnisch zu erfassen und die Planung einer Regenwasserbehandlungsanlage an diese Gegebenheiten anzupassen.

Im Einzugsgebiet der Einleitstelle EM1 konnte im Rahmen der Messkampagne festgestellt werden, dass die AFS(eq)-Konzentration deutlich unterhalb von Vergleichswerten aus der Literatur liegt. Höhere Konzentrationen wurden meist nur über einen begrenzten Zeitraum festgestellt. Häufig traten die höchsten Konzentrationen zu Beginn der Ereignisse auf und es gab lange, gering verschmutzte Nachläufe. Da bietet es sich an, den Fokus der Behandlung auf die stärker verschmutzten Abflussanteile zu legen und die sehr gering verschmutzten Abflüsse direkt einzuleiten. Aufgrund der geringen Platzverhältnisse, der unmittelbaren Nähe zur Kläranlage und der verschmutzungsabhängigen Steuerung, bei der kein „sauberes“ Wasser behandelt wird, eignet sich die Nutzung der bestehenden Kläranlage besonders.

Die durchgeführten Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass durch die Behandlung der am stärksten verschmutzten Abflussvolumina (rund 10 % der Abflussmenge) mit einer sehr hohen Reinigungsleistung von 90 % der erforderliche Gesamtwirkungsgrad von 43 % erreicht werden kann. Damit werden die gesetzlichen Anforderungen möglichst effizient (Mittel- und Ressourceneinsatz) erreicht. Dies kann zu erheblichen Kostenersparnissen führen. Hieraus lassen sich auch weitere Optimierungen ableiten, die auf eine maximale AFS-Reduktion bei festzulegendem Mitteleinsatz zielen.

Grundsätzlich lässt sich das Vorgehen sehr gut auf andere Gebiete übertragen. Die größten Vorteile gegenüber klassischen Behandlungskonzepten sind dabei vor allem für Einzugsgebiete mit einer hoher Verschmutzungsdynamik zu erwarten. Diese ist für jedes Einzugsgebiet individuell im Rahmen einer Messkampagne zu erfassen. Die Erfahrungen aus dem Pilotprojekt haben gezeigt, dass beide hier verwendeten Sondentypen zur Erfassung der Dynamik geeignet sind. Die Bestimmung der absoluten Konzentration muss jedoch zusätzlich durch die Analyse von Proben im Labor stattfinden.

Neben den Grundlagen zur Konzeption einer Behandlungsanlage hat die Messkampagne auch Hinweise auf vorhandene Fehlanschlüsse im Trennsystem geliefert.

Für das Einzugsgebiet EM1 sollten als nächste Schritte die Objektplanung zum Bau des Trennbauwerks, des Stauraumkanals mit einem technischen Filter oder der Einleitung in die Kläranlage, sowie ein daran anschließender Probetrieb stattfinden.

Gelsenkirchen, 16. Januar 2023
DAB/STK/HOH

DR. PECHER AG

Dr. Holger Hoppe

9 Literaturverzeichnis

- Baum, P., Benisch, J., Blumensaat, F., Dierschke, M., Dittmer, U., Gelhardt, L., Gruber, G., Grüner, S., Heinz, E., Hofer, T., Kemper, M., Leutnant, D. und Nickel, J. P. (2018). AFS63 – Harmonisierungsbedarf und Empfehlungen für die labortechnische Bestimmung des neuen Parameters. Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen Band 1, TU Kaiserslautern, S. 153 – 168.
- BWK (2008) BWK-Merkblatt 7. Detaillierte Nachweisführung immissionsorientierter Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen gemäß BWK-Merkblatt 3.
- Dierschke und Welker (2015). Bestimmung von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen. Gwf-Wasser|Abwasser 4/2015, S. 440-446.
- Dierschke, M. (2014). Methodischer Ansatz zur Quantifizierung von Feinpartikeln (PM63) in Niederschlagsabflüssen in Abhängigkeit von der Herkunftsfläche. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- DIN 38409-2 (1987). Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) BEstimmung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glührückstandes (H2)
- DWA (2013). DWA-A 166 Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung – Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. ISBN 978-3-942964-50-0.
- DWA (2016). DWA-M 119 Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. ISBN 978-3-88721-243-8.
- DWA (2020). DWA-A 102 Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. ISBN 978-3-96862-045-9.

- Fricke, K. I., Boeckmann, D., Hoppe, H. und Muschalla, D. (2017). Integrating spectrometry-based stormwater quality data in the planning process – potential analysis for pollution-based real time control in Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage (ICUD). Prague, Czech Republic.
- Gruening, H., Hoppe, H., Messmann, S. und Giga, A. (2010). Cost effectiveness of centralised and decentralised storm water treatment. 7th international conference on sustainable techniques and strategies in urban water management. NOVATECH 2010.
- Hartwein, S. (2017). Wasserrahmenrichtlinie: Vom guten Zustand weit entfernt. Wasserwirtschaft Wassertechnik wwt 4/2017, S. 35-38.
- Holthuis, J. U. und Tegge, K. T. (2016). Gewässerökologische Effekte von Straßenabwassereinleitungen. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft (1): 24 – 33.
- Hoppe, H., Messmann, S., Giga, A. und Grüning, H. (2010). A real-time control strategy for the separation of highly polluted storm water based on UV-Vis online measurements – from theory to operation. Novatech 2010.
- Hoppe H. (2017). Urbanes Niederschlagswassermanagement zwischen zentralen und dezentralen Maßnahmen. Keynote zur Aqua Urbanica 2017, 03.-04-07.2017, Graz. In: Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft – Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz. Band 75, Urbanes Niederschlagswassermanagement zwischen zentralen und dezentralen Maßnahmen, S. A1-A20. DOI: 10.3217/978-3-85125-534-8.
- MKULNV NRW (2015a). Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV). 17. Auflage, Düsseldorf. Verfügbar unter: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/abwasserbeseitigung_entwicklung_kurzfassung.pdf [zuletzt aufgerufen am 01.06.2017].
- MKULNV NRW (2015b). Retentionsbodenfilter Handbuch für Planung, Bau und Betrieb. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV). 2. Auflage, Düsseldorf.
- MULNV (2020) ENTWICKLUNG UND STAND DER ABWASSERBESEITIGUNG IN NORDRHEIN-WESTFALEN. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf. Download unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/lagebericht/00_EStAb2020_Gesamtversion.pdf (11.09.2022)

- Raith, K. I., Hoppe, H., Kutsch, S., Ante, J. und Massing, C. (2017). Qualitätsabhängige Kanalnetzsteuerung – Konzeption und Umsetzung lokaler und stadtgebietsweiter Steuerungsstrategien.
- Rieckermann, J., Gruber, G. und Hoppe, H. (2017). Zukunftsfähige Systeme zur Regenwasserbehandlung brauchen datenbasierte Betriebs-, Planungs- und Vollzugskonzepte. In: Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft – Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz. Band 75, Urbanes Niederschlagswassermanagement zwischen zentralen und dezentralen Maßnahmen. S. C1-C27. DOI: 10.3217/978-3-85125-534-8.
- Sommer, H. (2007). Behandlung von Straßenabflüssen – Anlagen zur Behandlung und Filtration von Straßenabflüssen in Gebieten mit Trennsystemen – Neuentwicklungen und Untersuchungen. Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- Sprenger, J. (2016). Bestimmung von AFS_{fein} (AFS₆₃) im Mischsystem: Konsequenzen für die Laboranalytik. Masterarbeit am Lehrstuhl für Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft an der RWTH Aachen.
- Welker, A. (2022). Aktueller Stand zu Analyseverfahren zur AFS-bestimmung. 2. Expertentreffen Partikelmessung, Gelsenkirchen.
- Wicke, D., Matzinger, A. und Rouault, P. (2015). Relevanz organischer Spurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins. Kompetenzzentrum Wasser Berlin.
- Wupperverband (2015) Handlungsspielräume und Erreichbarkeit der Ziele der WRRL an der Unteren Wupper im Rahmen einer Kosten -Nutzen -Analyse - am Beispiel Wärmebelastung (interen Projektkommunikation; unveröffentlicht).
- von Seidlitz, A.-E. (2014) Handlungsspielräume und Erreichbarkeit der Ziele der WRRL an der Unteren Wupper im Rahmen einer Kosten -Nutzen -Analyse - am Beispiel Wärmebelastung. In: Gewässerchutz, Wasser, Abwasser; 234. Tagungsband zur 47. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft "Ist Unsere Wasserwirtschaft Zukunftsfähig". ISBN 978-3-938996-40-9.