

Abschlussbericht TransMiT

Teil B

Strategiekomponente B.I Qualitätsbasierte Trennentwässerung

B 5.5 Ermittlung der Belastung von Niederschlagswasser - Messungen

Autoren:

M. Sc. Sören Hornig, Dr.-Ing. Katrin Bauerfeld
Technische Universität Braunschweig

Dr.-Ing. Aslan Belli
Stadtentwässerung Braunschweig GmbH

Kurzbeschreibung des Einzelkapitels

Die Belastung abfließenden Niederschlagswasser aus innerstädtischen Quartieren wurde anhand von drei charakteristischen Einzugsgebieten in Braunschweig durch jeweils mehrmonatige ereignisgesteuerte Probennahmen im Kanal ermittelt. Ziel der Untersuchungen war eine übergeordnete Schmutzfrachtcharakterisierung sowie die Ermittlung von Verschmutzungsdynamiken innerhalb einzelner Niederschlags-Abfluss-Ereignisse. Spülstoßeffekte sollten identifiziert werden. Das nachfolgende Kapitel stellt das Untersuchungskonzept und das methodische Vorgehen zur Erfassung von Niederschlags-Abfluss-Qualitäten und ihrer statistischen Aufarbeitung dar, zeigt detailliert die Ergebnisse auf und ordnet sie in den Kontext vergleichbarer Studien ein.

Aus den Untersuchungsergebnissen lassen sich die nachfolgenden Kernaussagen voranstellen:

- Im **Bestandswohngebiet** lassen sich keine signifikanten Erhöhungen mittlerer Ereigniskonzentrationen im Vergleich zu Studien anderer Arbeitsgruppen aufzeigen. Die Schmutzfrachtbelastung ist nahezu gleichbleibend auf insgesamt niedrigem Niveau. gering. Biozidwirkstoffe können mit Ausnahme eines Transformationsproduktes nicht nachgewiesen werden. Insgesamt lässt sich das Bestandswohngebiet als Belastungsschwerpunkt für die untersuchten Parameter ausschließen.
- Im **Neubaugebiet** liegen erhöhte Belastungen für einzelne abwassertechnisch relevante Parameter im Vergleich zum Bestandswohngebiet vor. Eine Einordnung anhand von Literaturwerten ist aufgrund fehlender Vergleichsdaten für Neubaugebiete allerdings erschwert. Auffällig sind aber v.a. die deutlich erhöhten Feststoffkonzentrationen, die vermutlich auf vermehrte Bautätigkeiten zurückzuführen sind. Ein Spülstoffeffekt für Feststoffe lässt sich als moderat klassifizieren. Gleichmaßen lässt sich ein leichtes Spülstoßverhalten für die Parameter CSB, Gesamt-P und Nitrat ableiten. Im Neubaugebiet treten zudem vergleichsweise hohe Emissionen an Bioziden und ihren Transformationsprodukten auf.
- Der Kanalabfluss einer **stark befahrenen Straße** zeigt bei insgesamt niedrigem Niveau im Vergleich zu anderen Standorten keine Auffälligkeiten in der Schmutzfrachtbelastung abwassertechnisch relevanter Parameter. Eine orientierende Ermittlung der Mikroplastikmassekonzentrationen ergab Belastungen im Größenordnungsbereich des Zulaufs kommunaler Kläranlagen mit einer Tendenz zu erhöhten Befunden in den ersten 15 bis 30 min eines Abflussereignisses.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Der Spülstoßeffekt.....	2
2.2 Einflussfaktoren auf den Spülstoßeffekt	3
3 Material und Methoden	4
3.1 Auswahl der Einzugsgebiete	4
3.2 Einzugsgebiete und Messstellen	4
3.2.1 Bestandsgebiet	5
3.2.2 Neubaugebiet.....	6
3.2.3 Straße.....	6
3.3 Prinzip der Probenahme und Probenahmestrategie	7
3.4 Niederschlags- und Durchflussdaten.....	9
3.5 Verschmutzungsparameter und Analytik	9
3.6 Auswertungsmethodik Spülstoßverhalten.....	9
3.7 Einflussfaktoren auf das Spülstoßverhalten.....	10
4 Ergebnisse	11
4.1 Niederschlagscharakteristik.....	11
4.2 Konzentrationen im Regenwasserabfluss.....	13
5 Zusammenfassung und Fazit.....	26
6 Literatur.....	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	beispielhafte Darstellung einer L'V'-Kurve.....	2
Abbildung 2:	Übersicht der drei Einzugsgebiete im Stadtgebiet von Braunschweig für die Niederschlagswasserbeprobung (Datenquelle: Stadt Braunschweig – Open GeoData, 2022, Lizenz:dl-de/by-2-0 [15], bearbeitet)	4
Abbildung 3:	[A] Einzugsgebiet des Typs Bestand mit Einzugsgebietsgrenzen (rot), Trennkanalisation (blau) und Messstelle (orange); Koordinaten der Messstelle 52.247022700468094°N, 10.469478825597816°E (Bilder © 2022 AeroWest, CNES / Airbus, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies, Kartendaten © 2022 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), bearbeitet) und [B] typische Wohnbebauung im Bestandsgebiet (eigene Darstellung, ISWW)	5
Abbildung 4:	[A] Einzugsgebiet des Typs Neubau mit Einzugsgebietsgrenzen (rot), Trennkanalisation (blau) und Messstelle (orange); Koordinaten der Messstelle 52.24752955911249°N, 10.577877523355633°E (Bilder © 2022 AeroWest, CNES / Airbus, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies, Kartendaten © 2022 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), bearbeitet) und [B] typische Wohnbebauung im Neubaugebiet, Stand 03.2022 (eigene Darstellung, ISWW).....	6
Abbildung 5:	[A] Einzugsgebiet des Typs Straße mit Einzugsgebietsgrenzen (rot), Trennkanalisation (blau) und Messstelle (orange); Koordinaten der Messstelle 52.254379157737546°N, 10.563947484481409°E (Bilder © 2022 AeroWest, CNES / Airbus, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies, Kartendaten © 2022 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), bearbeitet) und [B] beispielhafte Verkehrsintensität im Einzugsgebiet (eigene Darstellung)	7
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des Probenahmeprinzips aus einem Regenwasserkanal (eigene Darstellung, ISWW)	8
Abbildung 7:	beispielhafte Installation von [A] Geschwindigkeits- und Drucksensor und [B] Probenahmeschlauch im Regenwasserkanal, Pfeil zeigt die Fließrichtung im Kanal (eigene Darstellung)	8
Abbildung 8:	Boxplots der Parameter CSB [A], AFS [B], Phosphor [C] und Stickstoff [D] in den untersuchten Einzugsgebieten, Whisker zeigen 5 % bzw. 95 % Perzentil an, Probenanzahl n (eigene Darstellung, ISWW)	13
Abbildung 9:	Boxplots der Parameter pH [A] und Leitfähigkeit [B] in den untersuchten Einzugsgebieten, Whisker zeigen 5 % bzw. 95 % Perzentil an, Probenanzahl n (eigene Darstellung, ISWW)	15
Abbildung 10:	Boxplots der Parameter Terbutryn und Diuron inklusive Transformationsprodukte im untersuchten Bestands- und Neubaugebiet, Whisker zeigen 5 % bzw. 95 % Perzentil an, Probenanzahl n, JD-UQN und ZHK-UKN nach [23], (eigene Darstellung, ISWW)	17
Abbildung 11:	Verlauf der Biozidkonzentrationen im Bestandsgebiet für ein ausgewähltes Regenereignis, Beprobungszeitraum in grau (eigene Darstellung, ISWW)	18
Abbildung 12:	Verlauf der Konzentrationen an Diuron (links) und Terbutryn (rechts) inklusive entsprechender Transformationsprodukte im Neubaugebiet	

	für drei ausgewählte Regenereignisse [A-C], Beprobungszeitraum in grau (eigene Darstellung, ISWW).....	19
Abbildung 13:	Berechnete Spülstoßintensitäten für die Parameter CSB [A], AFS [B], Phosphor [C] und Stickstoff [D] der drei untersuchten Einzugsgebiete, Whisker zeigen 5 % bzw. 95 % Perzentil an, Ereignisanzahl n (eigene Darstellung, ISWW)	20
Abbildung 12:	Massekonzentrationen an Kunststofffragmenten in Mischproben (1 bis 3) des EZG Straße für 6 Ereignisse	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Zusammenfassung der Einzugsgebietseigenschaften	5
Tabelle 3-2:	Klassifizierung der Spülstoßstärke nach Saget et al. [11] und Hathaway et al. [14].....	10
Tabelle 4-1:	Übersicht über beprobte Regenereignisse im Bestands- und Neubaugebiet sowie der vielbefahrenen Straße	11
Tabelle 4-2:	Vergleich der bestimmten mittleren Konzentrationen im Bestandsgebiet und im Zulauf des RBFs im Quartier.....	15
Tabelle 4-3:	Übersicht über mittlere Ereigniskonzentrationen (EMC) der untersuchten Einzugsgebiete [mg/l]	16
Tabelle 4-4:	Detailergebnisse der Mikroplastikkonzentration sowie des AFS der Mischproben im Abfluss der vielbefahrenen Straße	24
Tabelle 4-5:	Detailergebnisse der Mikroplastikkonzentration sowie des AFS der Sammelmischproben im Zulauf des RBF.....	25

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
BG	Bestimmungsgrenze
CAS	Chemical Abstracts Service
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
EMC	Event Mean Concentration, mittlere Ereigniskonzentration
EZG	Einzugsgebiet
Gesamt-P	Gesamtphosphor
JD-UQN	Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm nach OGeWV
KFZ	Kraftfahrzeug
LF	Leitfähigkeit
MP	Mikroplastik
NH ₄	Ammonium
NH ₃	Ammoniak
NO ₃	Nitrat
OGeWV	Oberflächengewässerverordnung
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PO ₄	Gelöster Anteil an Phosphor
PP	Polypropylen
SBR	Styrol-Butadien-Rubber
TED-GC MS	Thermische Extraktion und Desorption kombiniert mit Gaschromatographie-Massenspektrometrie
TN	Total Nitrogen, Gesamt-Stickstoff
ZHK-UQN	Zulässige Höchstkonzentration-Umweltqualitätsnorm nach OGeWV

1 Einleitung

Ein nachhaltiges Regenwassermanagement, der Umgang mit Starkregenereignissen und Vorkehrungen für ein kühleres Stadtklima sind wichtige Faktoren einer Anpassungsstrategie an den Klimawandel, die viele Städte in Deutschland umsetzen müssen. Blau-grüne Infrastrukturen können nur dann als kühlende Elemente im urbanen Raum wirken, wenn eine zuverlässige Wasserversorgung in ausreichender Menge und Qualität gewährleistet ist. Bisherige Studien zeigen deutlich, dass das Regenwasser in städtischen Gebieten zum Teil erheblich verschmutzt ist [1–3]. Das Ausmaß und die Art der Verschmutzung sind stark von der jeweiligen Landnutzung abhängig [4–6], was die Notwendigkeit umfassender Regenwasserbehandlungssysteme zur Folge hat. Gleichzeitig gibt es jedoch, insbesondere in Großstädten, beträchtliche Kapazitäten für die zentrale Behandlung von Regenwasser. Niederschlagswasser, das in der Vergangenheit häufig in die Mischwasserkanalisation eingeleitet wurde, wird heute infolge von Infrastrukturänderungen häufig vom Abwasser getrennt. Die Verringerung der in zentrale Kläranlagen eingeleiteten Wassermenge schafft große freie Kapazitäten für die Wasseraufbereitung.

Derzeit werden vor allem jährliche Schadstoffbelastungen aus Langzeitsimulationen zur Bewertung von Regenwasserbewirtschaftungs- und -behandlungsmaßnahmen herangezogen. Die zeitliche Schwankung der Schadstoffbelastung und -menge des Abflusses innerhalb eines Niederschlagsereignisses wird nicht berücksichtigt, obwohl dies Auswirkungen auf die Leistung und Effizienz der Behandlung hat. Folglich sind Kenntnisse über die Verschmutzungsdynamik innerhalb eines Regenereignisses notwendig. Im Ergebnis können diese Daten als Eingangsgrößen für Steuerungsstrategien zur Regenwasserbehandlung beispielsweise durch eine flexible Nutzung verschiedener Abflusswege in Abhängigkeit von der Niederschlagswasserqualität sowie der Maximierung der Speicher- und Behandlungskapazitäten der bestehenden Entwässerungs- und Behandlungsanlagen genutzt werden. Die synergetische Nutzung bestehender Infrastrukturen legt den Grundstein für eine ressourcen- und umweltschonende Transformation hin zu einem zukunftsorientierten, belastbaren und wirtschaftlichen Stadtentwässerungssystem. Für eine qualitätsorientierte Entwässerung ist daher das Wissen um die Dynamik der städtischen Abflussbelastung und -menge von entscheidender Bedeutung.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens TransMIT wurden innerhalb des Forschungsschwerpunktes „Niederschlagswasserqualität“ Verschmutzungsdynamiken innerhalb einzelner Regenereignisse für ausgewählte Einzugsgebiete aufgenommen und ausgewertet. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse sowie angewendete Methodiken eingehend erläutert.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Der Spülstoßeffekt

Vom Spülstoßeffekt spricht man, wenn eine signifikante Schadstofffracht zu einem relativ frühen Zeitpunkt im Vergleich zu einer entsprechend geringeren Schadstofffracht zu einem späteren Zeitpunkt eines Niederschlagsereignisses abgeleitet wird. In der Regel wird davon ausgegangen, dass Regenwasser während eines Niederschlagsereignisses relativ früh signifikante Schadstoffbelastungen aufweist, obwohl die Faktoren, die den Spülstoßeffekt beeinflussen, größtenteils unbekannt sind. In der Literatur finden sich verschiedene Definitionen für den Spülstoßeffekt [7–12]. Eine häufig verwendete Methode zur Veranschaulichung des Spülstoßeffektes ist das Auftragen der normalisierten kumulativen Schadstoffbelastung gegen das normalisierte kumulative Volumen. (vgl. Abbildung 1). Die Beziehungen sind in den Gleichungen 1 und 2 dargestellt:

$$L' = m(t)/M \quad (1)$$

$$V' = v(t)/V \quad (2)$$

Wobei $m(t)$ und $v(t)$ die kumulativen Massefrachten und kumulativen Abflussvolumina zum Zeitpunkt t während eines Niederschlagsereignisses sind und M und V die Gesamtschadstofffracht und das Gesamtvolumen für das gesamte Abflussereignis darstellen.

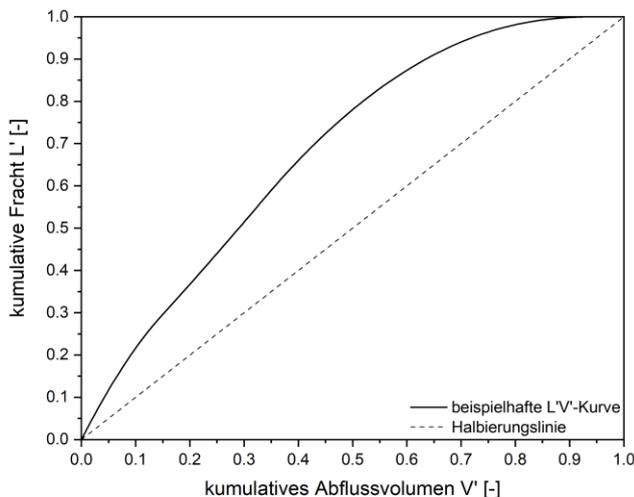


Abbildung 1: beispielhafte Darstellung einer L'V'-Kurve

Die dimensionslose L'V'-Kurve zeigt den Anteil der aus dem Einzugsgebiet abgeleiteten Gesamtschadstofffracht im Verhältnis zum Anteil der Abflussmenge, die das Einzugsgebiet verlassen hat. Dieses Verhältnis bietet die Möglichkeit, die Schadstofffrachten verschiedener Regenereignisse für unterschiedliche Einzugsgebiete zu vergleichen. Während Helsel et al. [7] das Auftreten eines Spülstoßes dadurch definieren, dass die L'V'-Kurve zu jedem Zeitpunkt des Regenereignisses oberhalb der Halbierungslinie liegt, ohne dass eine bestimmte Differenz zwischen L'V'-Kurve und Halbierungslinie vorliegt, liegt nach Geiger [9,13] ein Spülstoß vor, wenn die Differenz zwischen L'V'-Kurve und der Halbierungslinie $> 0,2$ und die Anfangsneigung der L'V'-Kurve $> 45^\circ$ betragen. Hathaway et al. [14] geben einen guten Überblick über weitere Methoden zur Auswertung des

Spülstoßeffektes. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Methoden zur Quantifizierung des Spülstoßeffektes werden in Kapitel 3.6 eingehend erläutert.

2.2 Einflussfaktoren auf den Spülstoßeffekt

Verschiedene Faktoren können Stärke und Auftreten eines Spülstoßeffektes beeinflussen. Zu den wichtigsten Faktoren gehören die Niederschlagsmenge und die Einzugsgebietseigenschaften. Niederschlagscharakteristika wie die Gesamtniederschlagshöhe und -dauer in Verbindung mit der gesamten undurchlässigen Fläche wirken sich auf die Gesamtmenge des abgeleiteten Volumens und damit auf die mittleren und maximalen Fließtiefen an der Oberfläche und im Kanalnetz aus. Das resultierende Abflussverhalten bewirkt mit den entsprechend auftretenden Scherkräften die Mobilisierung von Schmutzstoffen an der Oberfläche und im Kanal. Darüber hinaus hat die Niederschlagsintensität einen Einfluss auf eine mögliche atmosphärische Deposition. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Dauer der vorangegangenen Trockenperiode, in der sich auswaschbare Schmutzstoffe an Oberfläche und Kanal akkumulieren und anschließend bei einem Niederschlagsereignis komplett oder teilweise mobilisiert werden. Nicht zu vernachlässigen ist der maximale Fließweg im Kanal bis zu einer Probenahme, auf dem Verschleppungseffekte vorstellbar sind.

3 Material und Methoden

3.1 Auswahl der Einzugsgebiete

Vorhandene Karten und Katasterdaten der Stadtentwässerung Braunschweig wurden genutzt, um geeignete Einzugsgebiete für die Regenwasserbeprobung im Rahmen des Projektes zu definieren. Berücksichtigt wurden u.a. Art der Bebauung, Versiegelungsgrad, Altersstruktur der Gebäude, Oberflächennutzung, Verkehrsdaten, Entwässerungssystem, Gebietsgröße, Potential für den Einbau einer Probenahme. Nach Begehung potentieller Einzugsgebiete wurden insgesamt drei beispielhafte Gebiete für die Kategorien Bestand, Neubau und Straße gewählt. Die drei Einzugsgebietstypen sollen potentiell unterschiedliche Verschmutzungspotentiale aufgrund unterschiedlicher resultierenden Gesamtnutzung repräsentieren, um mögliche charakteristische Schadstoffverläufe und Verschmutzungsschwerpunkte zu identifizieren. Die ausgewählten Einzugsgebiete sind nachfolgend im Kapitel 3.2 eingehend dargestellt.

3.2 Einzugsgebiete und Messstellen

Für jeden Einzugsgebietstyp wurde für die Beprobung unter den genannten Randbedingungen eine möglichst repräsentative Messstelle ausgewählt, an der Niederschlagswasser direkt aus der Trennkanalisation beprobt wurde. Die Lage der Einzugsgebiete im Stadtgebiet von Braunschweig ist Abbildung 2 zu entnehmen. Darüber hinaus gibt Tabelle 3-1 einen Überblick über die Charakteristik der ausgewählten Einzugsgebiete.

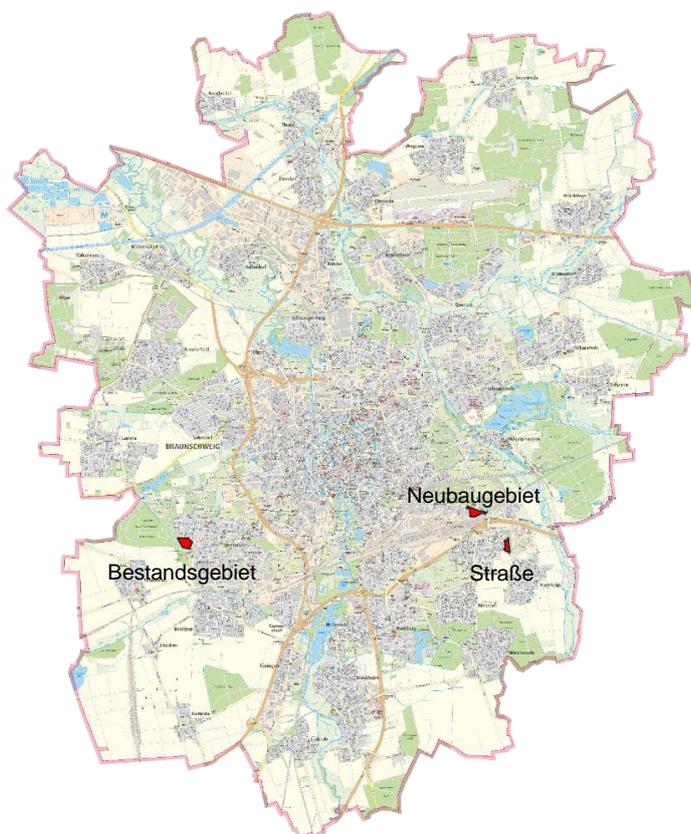


Abbildung 2: Übersicht der drei Einzugsgebiete im Stadtgebiet von Braunschweig für die Niederschlagswasserbeprobung (Datenquelle: Stadt Braunschweig – Open GeoData, 2022, Lizenz:dl-de/by-2-0 [15], bearbeitet)

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Einzugsgebietseigenschaften

EZG-Typ	Standort	Größe (Versiegelung*) [ha]	Max. Fließweg im Kanal* [m]	Durchmesser Kanal @ Beprobung [mm]	Verkehrsdichte [KFZ/d]
Bestand	Lippestraße	5,0 (1,8)	527	600	< 300
Neubau	Frida Kahlo Straße	3,1 (0,9)	351	600	< 300
Straße	Helmstedter Straße	4,8 (4,3)	338	400	> 15.000

* ermittelt mit Hilfe der Open Source Software QGIS Version 3.16.4; u.a. unter der Annahme eines fertiggestellten Neubaugebiets. Mit Fortschreiten der Bauarbeiten verändert sich der Versiegelungsgrad.

3.2.1 Bestandsgebiet

Das 5 ha große Bestandsgebiet liegt im Westen von Braunschweig und ist überwiegend mit Plattenbauten aus den 1970er Jahren bebaut. Die durch Wohnbebauung und Straßen versiegelte Fläche beträgt etwa 1,8 ha (36 %). Die vorhandene Trennkanalisation hat bis zur Messstelle eine maximale Länge von 527 m und an der Messstelle einen Durchmesser von 600 mm. Im Bestandsgebiet wurde zwischen Oktober 2020 und Mai 2021 Niederschlagswasser beprobt. Aufgrund der vergleichbar klaren Abgrenzung zu anderen Einzugsgebietstypen kann dieses Bestandsgebiet als charakteristisch für bestehende Wohngebiete mit typischer Bebauung aus den 1970er Jahren angesehen werden. Der Renovierungszustand der Gebäude variiert. Abbildung 3 zeigt die genaue Lage des Bestandsgebietes sowie beispielhaft die typische Bebauung vor Ort.



Abbildung 3: [A] Einzugsgebiet des Typs **Bestand** mit Einzugsgebietsgrenzen (rot), Trennkanalisation (blau) und Messstelle (orange); Koordinaten der Messstelle 52.247022700468094°N, 10.469478825597816°E (Bilder © 2022 AeroWest, CNES / Airbus, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies, Kartendaten © 2022 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), bearbeitet) und [B] typische Wohnbebauung im Bestandsgebiet (eigene Darstellung, ISWW)

3.2.2 Neubaugebiet

Das untersuchte Neubaugebiet liegt im Südosten von Braunschweig, wobei das beprobte Einzugsgebiet ebenfalls im südöstlichen Teil des Neubaugebietes verortet ist. Die Gesamtgröße beträgt 3,1 ha mit einer geschätzten Versiegelung nach Abschluss der Bauarbeiten von ca. 0,9 ha bzw. ca. 29 %. Auf der gesamten Fläche werden seit 2017 ausschließlich Neubauten, bestehend aus Einfamilienhäusern, Mehrfamilienhäusern und Reihenhäusern, errichtet. An der Messstelle beträgt der Kanaldurchmesser 600 mm und die längste Fließstrecke im angeschlossenen Trennsystem beträgt etwa 351 m. Zwischen August 2021 und Februar 2022 wurden im Neubaugebiet Niederschlagswasserproben genommen. Abbildung 4 zeigt die genaue Lage des Neubaugebietes sowie beispielhaft die typische Bebauung vor Ort.

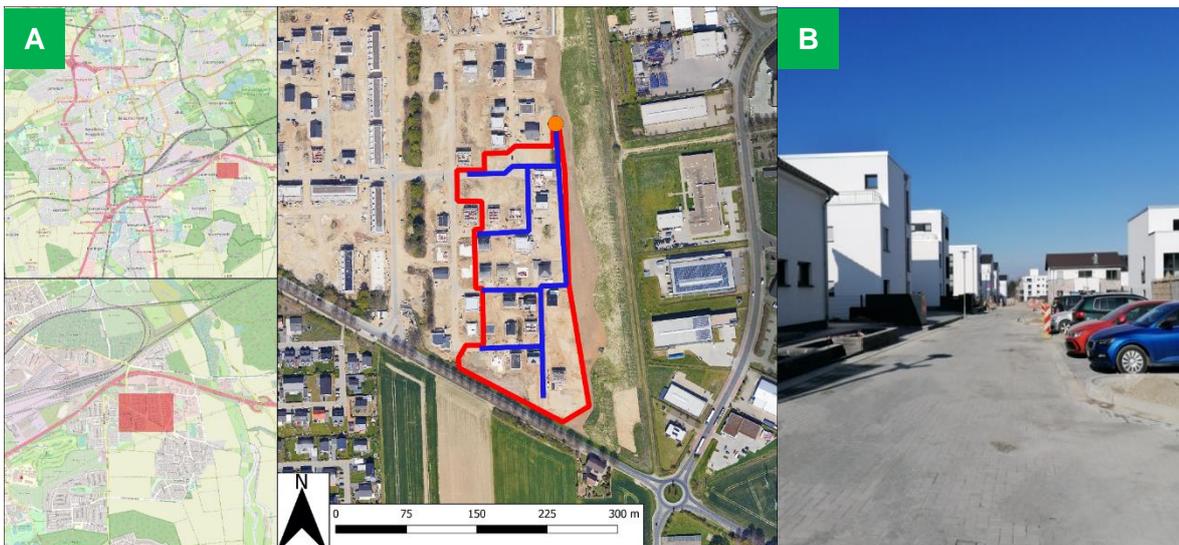


Abbildung 4: [A] Einzugsgebiet des Typs **Neubau** mit Einzugsgebietsgrenzen (rot), Trennkanalisation (blau) und Messstelle (orange); Koordinaten der Messstelle 52.24752955911249°N, 10.577877523355633°E (Bilder © 2022 AeroWest, CNES / Airbus, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies, Kartendaten © 2022 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), bearbeitet) und [B] typische Wohnbebauung im Neubaugebiet, Stand 03.2022 (eigene Darstellung, ISWW)

3.2.3 Straße

Das Einzugsgebiet für den Abfluss einer vielbefahrenen Straße mit einer Größe von 4,8 ha liegt im Südosten von Braunschweig. Mit einer Versiegelung von insgesamt 4,3 ha durch Straßen, Park und Rangierflächen, weist dieses Einzugsgebiet einen Versiegelungsgrad von knapp 90 % auf. Nach Verkehrsmodell 2020 DTV [16] liegt die Verkehrsdichte an der viel befahrenen Straße bei > 15.000 KFZ pro Tag. Der Straßenabfluss wurde im Zeitraum zwischen Februar und Juni 2022 beprobt. Lage und beispielhafte Bebauung und Verkehrsintensität sind in Abbildung 5 dargestellt.

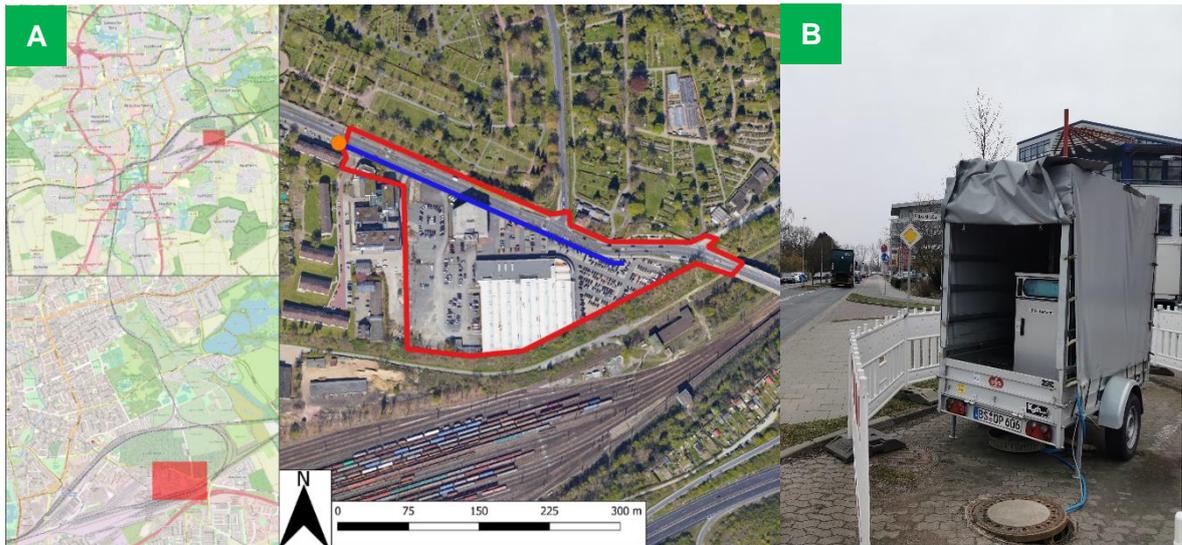


Abbildung 5: [A] Einzugsgebiet des Typs **Straße** mit Einzugsgebietsgrenzen (rot), Trennkanalisation (blau) und Messstelle (orange); Koordinaten der Messstelle 52.254379157737546°N, 10.563947484481409°E (Bilder © 2022 AeroWest, CNES / Airbus, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies, Kartendaten © 2022 GeoBasis-DE/BKG (© 2009), bearbeitet) und [B] beispielhafte Verkehrsintensität im Einzugsgebiet (eigene Darstellung, ISWW)

3.3 Prinzip der Probenahme und Probenahmestrategie

Die Regenwasserproben wurden mit Hilfe eines automatischen Probenehmers entnommen. Im Bestands- und Neubaugebiet wurde der Probenehmer Basic Ex 1 mobil (ORI Abwassertechnik GmbH Co. KG, Hille, Deutschland) zusammen mit dem Geschwindigkeits- und Drucksensor POA Correlation Wedge Sensor (Nivus GmbH, Eppingen, Deutschland) und NivuFlow Mobile 750 Durchflussmessumformer (Nivus GmbH, Eppingen, Deutschland) eingesetzt. Der Straßenabfluss wurde mit Hilfe des Probenehmers WaterSam WS 312 (WaterSam GmbH & Co. KG, Balingen, Deutschland) beprobt. Für die Durchflussmessung wurde das Durchflussmessgerät PCM Pro (Nivus GmbH, Eppingen, Deutschland) mit POA Keilsensor (Nivus GmbH, Eppingen, Deutschland) verwendet. Die Ansteuerung des Probenehmers erfolgte mittels Radarsensor Vegapuls21 (VEGA Grieshaber KG, Schiltach, Deutschland). Die Auswertung des Füllstandes und die Ansteuerung des Probenehmers übernahm der Universal-Messumformer PR electronics 4116 (PR electronics GmbH, Oberhausen, Deutschland). Das grundsätzliche Prinzip der Probenahme ist schematische in Abbildung 6 zusammengefasst.

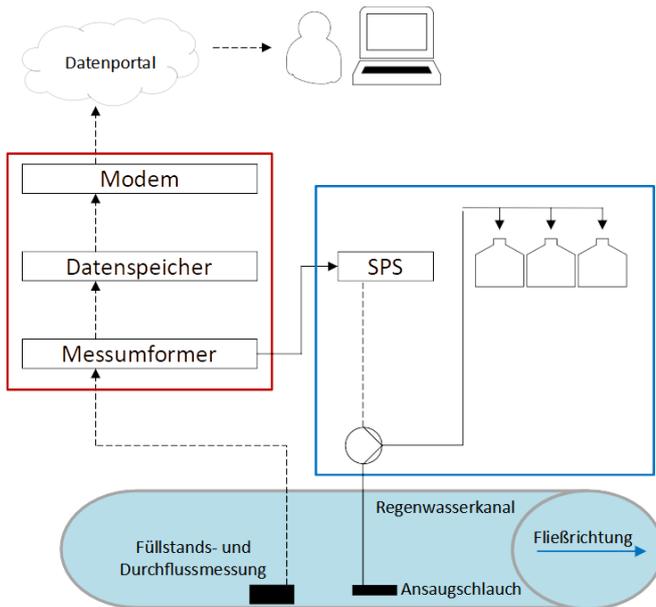


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Probenahmeprinzips aus einem Regenwasserkanal (eigene Darstellung, ISWW)

Im Bestands- und Neubaugebiet konnte der Probenehmer direkt im Regenkanalschacht installiert werden. Beim Straßenabfluss wurden Probenehmer und Messtechnik in einem PKW-Anhänger untergebracht. In allen drei Fällen war der Zugang zum Probenehmer sowie zum Schacht zugänglich, ohne den Straßenverkehr zu beeinträchtigen. Geschwindigkeitssensor und Probenahmeschlauch wurden mit Hilfen von Klemmrings im Kanal installiert (vgl. Abbildung 7).

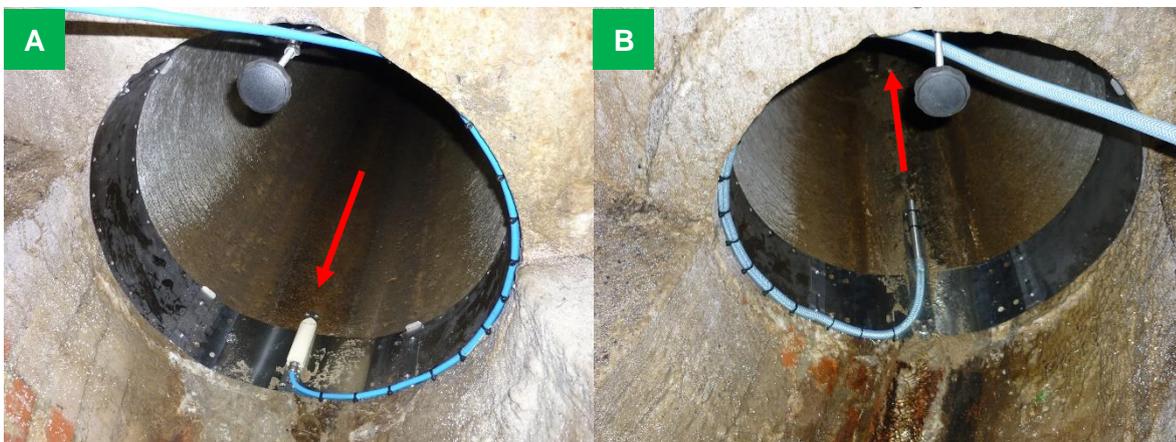


Abbildung 7: beispielhafte Installation von [A] Geschwindigkeits- und Drucksensor und [B] Probenahmeschlauch im Regenwasserkanal, Pfeil zeigt die Fließrichtung im Kanal (eigene Darstellung, ISWW)

Im Bestandsgebiet wurde der Probenahmeschlauch auf einer Höhe von 4 cm über Kanalsole, beim Neubaugebiet und Straßenabfluss auf einer Höhe von 5 cm über Kanalhöhe befestigt. Die ereignisgesteuerte zeitproportionale Probenahme wurde mit 12 Glasflaschen mit einem maximalen Volumen von 0,5 l durchgeführt. Um die Verschmutzungsdynamik innerhalb der beprobten Regenereignisse bestimmen zu können, wurden die ersten 4 Flaschen im Abstand von 5 Minuten, die Flaschen 5 – 8 im Abstand von 10 Minuten und die Flaschen 9 – 12 im Abstand von 18 Minuten genommen.

3.4 Niederschlags- und Durchflussdaten

Die Niederschlagsdaten wurden mit einem Regenmesser mit Kippwaage (Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH, Dresden, Deutschland) im Abstand von 5 Minuten aufgezeichnet. Die Füllstands- und Durchflussgeschwindigkeiten wurden minütlich aufgezeichnet, um entsprechende Abflusskurven möglichst genau aufzuzeichnen. Die Daten der Füllstands- und Durchflussmessungen konnten über das bereitgestellte Datenportal (Fa. ORI bzw. Fa. Nivus) abgerufen werden.

3.5 Verschmutzungsparameter und Analytik

Genommene Regenwasserproben wurden innerhalb von 48 h nach dem Regenereignis abgeholt. Eine Lagerung erfolgte bis zur Analytik bei 4°C. Die Regenwasserproben wurden hinsichtlich der abwassertechnisch relevanten Parameter chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Feststoffe (AFS), Gesamt-Phosphor (Gesamt-P), ortho-Phosphat (PO₄-P), Nitrat (NO₃), Ammonium (NH₄), pH und Leitfähigkeit (LF) untersucht. Darüber hinaus wurden für die Proben aus Bestands- und Neubaugebiet Biozid-Screening durchgeführt. Dabei wurden die Wirkstoff Carbendazim (CAS 10605-21-7), Diuron (CAS 330-54-1), Diuron-desmethyl (CAS 3567-62-2), Terbutryn (CAS 886-50-0), Terbutryn-desethyl (CAS 30125-65-6), Terbutry-2-hydroxy (CAS 66753-07-9) berücksichtigt. Ausgesuchte Mischproben aus dem Straßenabfluss wurde hinsichtlich des Parameters Mikroplastik (MP) analysiert. Parameter und analytische Methoden sind im Abschlussbericht Teil B Kapitel 2.14 Tabelle 5-1 im Anhang zusammengefasst.

3.6 Auswertungsmethodik Spülstoßverhalten

Für jedes Regenereignis wurden die mittleren Ereigniskonzentrationen (*event mean concentration*, EMC) der analysierten Verschmutzungsparameter berechnet. Die mittlere Ereigniskonzentration stellt die durchschnittliche Abflusskonzentration dar, die aus dem Verhältnis der gesamten Schadstofffracht und der Gesamtabflussvolumen während der Dauer des Regenereignisses ermittelt wird (vgl. Gleichung 3).

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t c(t)q(t)dt}{\int_0^t q(t)dt} \quad (3)$$

mit:

- M = gesamte Schadstofffracht
- V = Gesamtabflussvolumen
- c (t) = zeitabhängige Schadstoffkonzentration
- q (t) = zeitabhängiger Durchfluss
- t = Zeit

Für die Charakterisierung des Spülstoßverhaltens wurden die Methode nach Saget et al. [11] verwendet, um die Intensität des Spülstoßes zu berechnen. L'V'-Kurven, wie in Abbildung 1 dargestellt, können annähernd als Exponentialfunktion beschrieben werden (vgl. Gleichung 4).

$$L' = V'^b \quad (4)$$

Der Exponent repräsentiert dabei die Differenz zwischen L'V'-Kurve und Halbierungslinie und ist damit ein Maß für die Stärke des Spülstoßeffectes. Folglich kann eine Klassifizierung der Spülstoßstärke durchgeführt werden. Tabelle 3-2 gibt einen Überblick über eine

mögliche Klassifizierung der Spülstoßintensität in Anlehnung an Saget et al. [11] und Hathaway et al. [14], die im Rahmen dieser Untersuchungen genutzt wurde.

Tabelle 3-2: Klassifizierung der Spülstoßstärke nach Saget et al. [11] und Hathaway et al. [14]

Exponent b	Spülstoßstärke
0,000 – 0,185	starker Spülstoß
0,185 – 0,862	moderater Spülstoß
0,862 – 1,000	schwacher Spülstoß
1,000	gleichmäßige Schadstoffbelastung
1,000 – 1,159	schwache Verdünnung
1,159 – 5,395	moderate Verdünnung
5,395 - ∞	starke Verdünnung

3.7 Einflussfaktoren auf das Spülstoßverhalten

Mehrere verschiedene Faktoren können das Auftreten und die Stärke des Spülstoßeffectes beeinflussen. Zu den wichtigsten Faktoren gehören die Niederschlagsmenge und die Eigenschaften des Einzugsgebiets. Niederschlagseigenschaften wie die Gesamtniederschlagshöhe und -dauer wirken sich in Verbindung mit der gesamten undurchlässigen Fläche auf die Gesamtabflussmenge und damit auf die mittlere und maximale Abflusstiefe in der Kanalisation aus. Darüber hinaus haben die mittlere und maximale Niederschlagsintensität einen Einfluss auf die atmosphärische Deposition und das Auswaschungsverhalten an der Oberfläche und im Kanal. Auch die Dauer einer vorangegangenen Trockenperiode kann die Akkumulation von (auswaschbaren) Schadstoffen an der Oberfläche beeinflussen. Zu den Merkmalen des Einzugsgebiets, die einen Einfluss auf den Erstabfluss haben könnten, gehören die Flächennutzung, die gesamte undurchlässige Fläche und die Merkmale der einzelnen Kanalsysteme, einschließlich der maximalen Abflusswege bis zur Probenahme. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden insgesamt 5 nachfolgend aufgeführte Parameter bestimmt, die einen Einfluss auf das generelle Auftreten, den Zeitpunkt des Auftretens sowie der Stärke des Spülstoßeffectes haben können:

- Gesamtniederschlagshöhe [mm]: ist die Gesamtmenge des Niederschlags, der innerhalb eines Niederschlagsereignisses gemessen wurde,
- Mittlere Niederschlagsintensität [mm/h]: definiert als Mittelwert der aufgezeichneten Niederschlagshöhe dividiert durch das entsprechende Zeitintervall von 5 Minuten,
- Maximale 5 Minuten Intensität [mm/h]: definiert als die maximale aufgezeichnete Niederschlagshöhe dividiert durch das entsprechende Zeitintervall von 5 Minuten,
- Niederschlagsdauer [min]: definiert als die Zeit zwischen der ersten und der letzten aufgezeichneten Niederschlagshöhe eines bestimmten Niederschlagsereignisses
- Vorangegangene Trockenperiode [d]: definiert als die Zeit vor einem beprobten Niederschlagsereignis, in der die Gesamtniederschlagshöhe unabhängig von der Niederschlagsintensität summiert 1 mm erreicht.

4 Ergebnisse

4.1 Niederschlagscharakteristik

Tabelle 4-1 zeigt eine Übersicht über die Niederschlagscharakteristik der beprobten Regenereignisse. Die Probenahme im Bestandsgebiet erfolgte im Zeitraum von Oktober 2020 bis Mai 2021. Bei der Beprobung im Bestandsgebiet variierte die Niederschlagshöhe zwischen 1,40 mm und 19,40 mm, während eine maximale Niederschlagsintensität von 19,20 mm/h bestimmt wurde. Die längste Trockenperiode vor einem beprobten Regenereignis beträgt 3,76 Tage. Anschließend wurde von August 2021 bis Januar 2022 das Neubaugebiet beprobt. In diesem Zeitraum wurden Regenereignisse mit Niederschlagshöhen zwischen 1,00 mm und 49,20 mm beprobt. Die maximale Niederschlagsintensität beträgt 159,60 mm/h und die längste Trockenperiode vor einem Regenereignis beträgt 6,01 Tage. Im Zeitraum zwischen Februar 2022 und Juni 2022 wurde der Ablauf einer stark befahrenen Straße beprobt. Dabei wurden Regenereignisse mit Niederschlagshöhen zwischen 0,80 mm und 5,50 mm erfasst. In diesem Zeitraum beträgt die maximale Niederschlagsintensität 21,60 mm/h, während die längste Trockenperiode vor einem Regenereignis 4,51 Tage dauerte.

Tabelle 4-1: Übersicht über beprobte Regenereignisse im Bestands- und Neubaugebiet sowie der vielbefahrenen Straße

EZG	Datum	Niederschlags- höhe [mm]	Mittlere Niederschlags- intensität [mm/h]	Maximale Niederschlags- intensität [mm/h]	Dauer [Min]	Dauer vorherige Trockenperiode [d]
Bestand	11.10.2020	1,60	2,13	4,80	90	1,09
	18.10.2020	1,40	3,36	6,00	25	3,41
	20.10.2020	1,50	1,64	3,60	75	0,08
	23.10.2020	19,40	6,29	19,20	190	2,09
	30.10.2020	6,50	1,44	4,80	430	0,70
	12.01.2021	2,80	1,20	1,20	445	0,49
	13.01.2021	2,00	4,00	6,00	25	1,04
	18.01.2021	1,60	1,20	1,20	135	0,31
	06.05.2021	2,70	2,16	4,80	110	3,76
	11.05.2021	1,60	1,20	1,20	170	0,87

Fortsetzung Tabelle 4-1: Übersicht über beprobte Regenereignisse im Bestands- und Neubaugebiet sowie der vielbefahrenen Straße

EZG	Datum	Niederschlags- höhe [mm]	Mittlere Niederschlags- intensität [mm/h]	Maximale Niederschlags- intensität [mm/h]	Dauer [Min]	Dauer vorherige Trockenperiode [d]
Neubau	05.08.2021	49,20	53,67	159,60	70	0,13
	10.08.2021.	4,60	5,52	15,60	75	4,20
	16.08.2021	6,10	2,82	14,40	215	5,74
	22.08.2021	9,60	4,61	20,40	125	4,50
	05.10.2021	9,30	1,86	4,80	345	3,06
	21.10.2021	2,80	2,80	8,40	125	5,92
	04.11.2021	21,50	1,64	4,80	970	0,12
	07.11.2021	1,00	1,71	4,80	35	2,09
	01.12.2021	4,10	1,70	3,60	195	0,64
	23.12.2021	13,20	2,20	27,60	540	6,01
09.01.2022	7,50	1,43	3,60	435	0,11	
Straße	16.02.2022	4,10	3,78	8,40	60	0,43
	20.02.2022 A	4,00	3,20	8,40	90	1,32
	20.02.2022 B	4,80	1,60	3,60	245	0,20
	21.02.2022	2,40	2,06	3,60	70	0,11
	24.02.2022	0,80	2,40	6,00	25	2,10
	17.03.2022	5,10	2,11	3,60	165	2,83
	05.04.2022 A	1,80	1,20	1,20	135	0,26
	05.04.2022 B	2,20	1,65	3,60	130	0,39
	07.04.2022 A	5,50	6,00	12,00	50	1,51
	07.04.2022 B	0,90	5,40	9,60	5	0,25
	14.04.2022	4,70	2,26	6,00	165	3,81
	25.04.2021	3,50	2,63	8,40	100	3,34
	24.05.2022	1,10	2,20	4,80	25	0,49
	13.06.2022	2,90	11,60	21,60	15	4,51

4.2 Konzentrationen im Regenwasserabfluss

Die Konzentrationen der untersuchten abwassertechnisch relevanten Parameter CSB, AFS, P_{Gesamt} , $PO_4\text{-P}$, $NO_3\text{-N}$ und $NH_4\text{-N}$ aller Einzugsgebiete sind in Abbildung 8 A-D dargestellt.

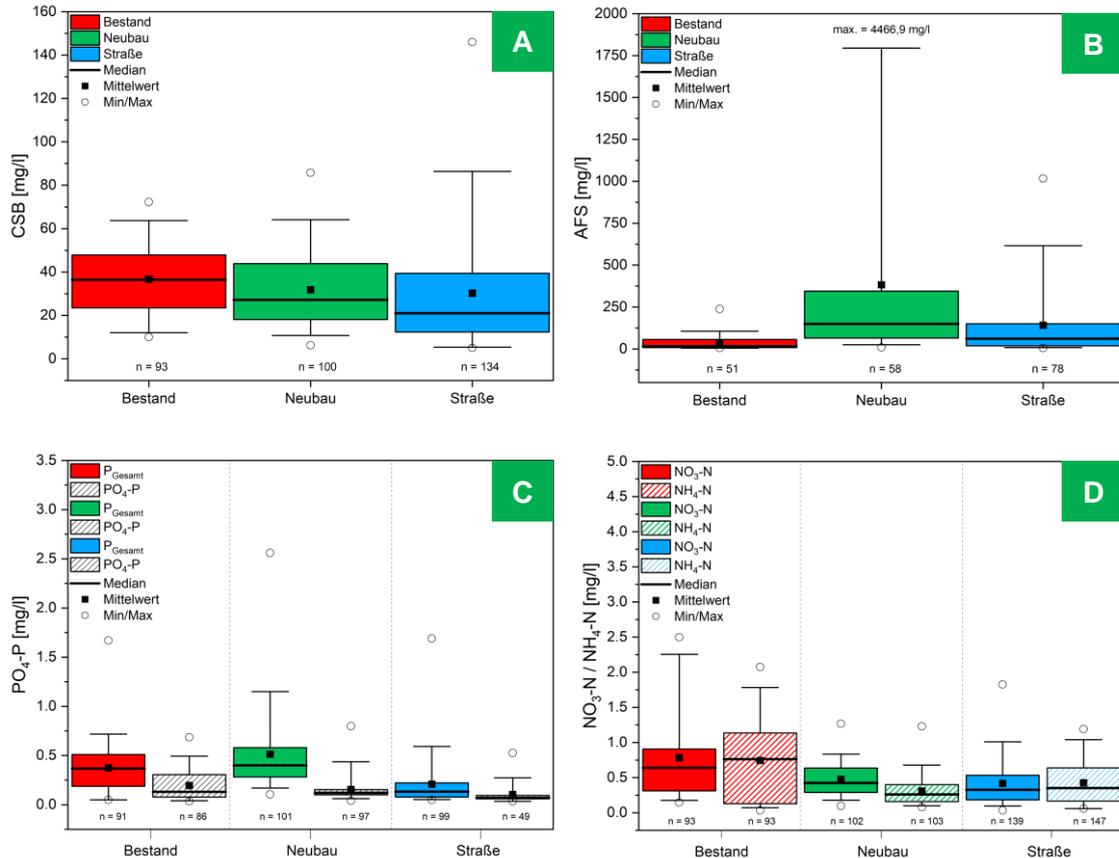


Abbildung 8: Boxplots der Parameter CSB [A], AFS [B], Phosphor [C] und Stickstoff [D] in den untersuchten Einzugsgebieten, Whisker zeigen 5 % bzw. 95 % Perzentil an, Probenanzahl n (eigene Darstellung, ISWW)

Für den CSB wurden im Mittel Konzentrationen zwischen 30 mg/l und 40 mg/l ermittelt (vgl. Abbildung 8 A). In vergleichbaren Einzugsgebieten wurden im Mittel CSB-Konzentrationen von 125 mg/l (Bestand) [17], 13 mg/l (Neubau) [2] und 244 mg/l (Straße) [6] bestimmt. Auffällig ist, dass der Ablauf der stark befahrenen Straße sich nicht wesentlich von den anderen beiden Einzugsgebieten unterscheidet. Im Vergleich dazu haben Wicke et al. (2021) [6] beispielsweise eine deutliche höhere Belastung von Abläufen stark befahrener Straßen im Vergleich zu anderen Einzugsgebieten ermittelt. Bei diesem Vergleich sind die Beprobungszeiträume und die Flächennutzung im Einzugsgebiet zu berücksichtigen.

Abfiltrierbare Stoffe (AFS) im Bestandsgebiet liegen im Mittel bei 36 mg/l und sind damit etwa um etwa Faktor 2-5 [6,17] niedriger im Vergleich zu ähnlichen Einzugsgebieten (vgl. Abbildung 8 B). Im Ablauf der stark befahrenen Straße wurden im Mittel eine AFS-Konzentrationen von 141 mg/l ermittelt, die ebenfalls deutlich niedriger im Vergleich zu bekannten AFS-Konzentrationen (368 mg/l [6]) im Ablauf stark befahrener Straßen ist. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Belastung vom Ablauf stark befahrener Straßen wesentlich von der Streckencharakteristik (Kurven, Ampeln), der Geschwindigkeit und dem Verkehrsaufkommen abhängt. Das im Rahmen des Projektes untersuchte Einzugsgebiet für den Ablauf einer stark befahrenen Straße weist eine überwiegend gerade

Streckenführung mit lediglich einer Ampelanlage auf (vgl. Abbildung 5). Bei einem Vergleich mit Belastungen anderer Straßenabläufe sollte dies berücksichtigt werden. Im Neubaugebiet wurden die höchsten AFS-Konzentrationen von 382 mg/l im Mittel bestimmt. Die maximale Konzentration im Neubaugebiet liegt mit 4.466 mg/l nochmals deutlich über dem Mittel. Aufgrund der vor Ort stattfindenden Bautätigkeiten einschließlich der Ablagerung von Baustoffen wie beispielsweise Sand sowie einem hohen Anteil an unbefestigten Flächen, wurden vergleichsweise hohe AFS-Konzentrationen im untersuchten Neubaugebiet erwartet. Ellis & Mitchell (2006) [4] geben darüber hinaus die Bauindustrie als signifikante Quelle von Feststoffen an.

Für die untersuchten Einzugsgebiete wurden im Mittel Gesamt-Phosphor-Konzentrationen von 0,373 mg/l (Bestand), 0,513 mg/l (Neubau) und 0,208 mg/l (Straße) ermittelt. Die Konzentrationen an gelöstem ortho-Phosphat liegen im Mittel bei 0,195 mg/l (Bestand), 0,154 mg/l (Neubau) und 0,102 mg/l (Straße). Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Ablauf der stark befahrenen Straße bei lediglich etwa 33 % der Proben die Konzentration an ortho-Phosphat über der Bestimmungsgrenze lag, was für eine tendenziell geringe Belastung spricht. Die ermittelten Gesamt-Phosphor-Konzentrationen liegen für das Bestandsgebiet in einer aus ähnlichen Einzugsgebieten bekannten Größenordnung [6]. Für das Neubaugebiet sind die Gesamt-Phosphor-Konzentrationen deutlich erhöht im Vergleich zu bekannten Einzugsgebieten (0,24 mg/l [2]) und der Ablauf der stark befahrenen Straße weist eine deutlich niedrigere Belastung mit Gesamt-Phosphor (0,81 mg/l [6]) auf. Bekannte Konzentrationen für gelöstes ortho-Phosphat liegen für Bestandsgebiet und Ablauf der starkbefahrenen Straße nur geringfügig über der Bestimmungsgrenze bei 0,038 mg/l bzw. 0,044 mg/l [6]. Alle untersuchten Einzugsgebiete weisen im Vergleich zu den Untersuchungen von Wicke et al., (2021) [6] erhöhte Konzentration an gelöstem ortho-Phosphat auf. Phosphorverbindungen im Regenwasserablauf können aus Düngemitteln und atmosphärischer Deposition [18] stammen. Darüber hinaus können Vegetationsabfall und Fremdwassereinträge vor Ort eine Rolle spielen. Zusätzlich können Fahrzeugemissionen zur Belastung des Regenwassers mit Phosphor beitragen [4]. Phosphorverbindungen werden als Zusatzstoffe in Benzin und Motorölen verwendet [19].

In den untersuchten Einzugsgebieten wurden im Mittel Nitrat-Konzentrationen von 0,782 mg/l (Bestand), 0,473 mg/l (Neubau) und 0,418 mg/l (Straße) ermittelt. Die Ammonium-Konzentrationen liegen im Mittel bei 0,744 mg/l (Bestand), 0,308 mg/l (Neubau) und 0,426 mg/l (Straße). Bekannte mittlere Nitrat-Konzentration aus sub-urbanen Einzugsgebieten liegen im Bereich zwischen 0,7 mg/l und 1,7 mg/l [20] tendenziell höher. Aus Bestandsgebieten und Straßenabläufen sind Ammonium-Konzentrationen von 0,47 mg/l bzw. 0,40 mg/l [6] bekannt, die bis auf Ausnahme im Bestandsgebiet sehr ähnlich zu den ermittelten Ammonium-Konzentrationen sind. Auch für die Stickstoff-Konzentrationen des Niederschlagswassers im Bestandsgebiet können Vegetationsabfall und Fremdwassereinträge nicht ausgeschlossen werden. Fahrzeugemissionen können ebenfalls zur Belastung des Regenwassers mit Stickstoff beitragen [4].

In Abbildung 9 sind pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit des Niederschlagswassers aller Einzugsgebiete zusammenfassend dargestellt.

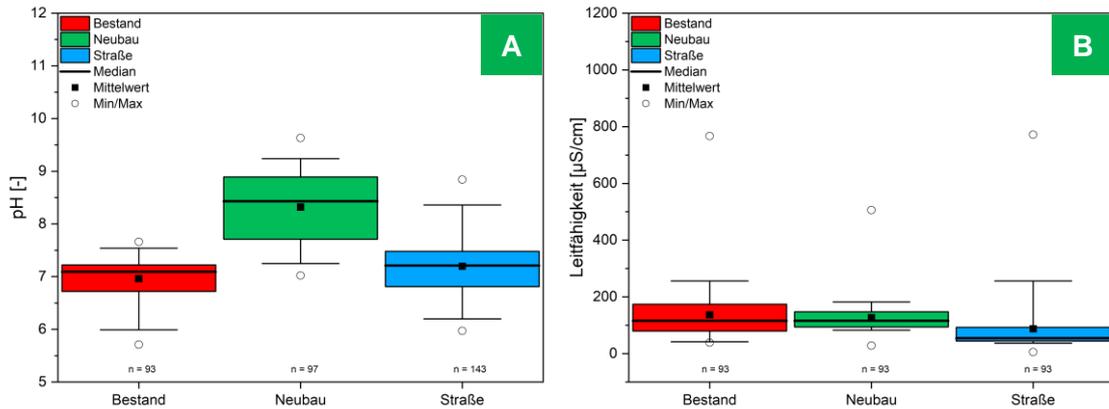


Abbildung 9: Boxplots der Parameter pH [A] und Leitfähigkeit [B] in den untersuchten Einzugsgebieten, Whisker zeigen 5 % bzw. 95 % Perzentil an, Probenanzahl n (eigene Darstellung, ISWW)

Die ermittelten pH-Werte liegen im Mittel bei 6,96 (Bestand), 8,32 (Neubau) und 7,20 (Straße). Zgheib et al. (2011) [17] geben für ein ähnliches Bestandsgebiet einen mittleren pH-Wert von 7,21 an. Alkalische pH-Werte im Neubaugebiet können durch den Einfluss alkalisch reagierender Baumaterialien verursacht worden sein. Darüber hinaus sind pH-Werte im neutralen pH-Bereich in Bezug auf die Niederschlagswasserqualität vorteilhaft, da beispielsweise Schwermetalle größtenteils ungelöst vorliegen und mit einer vergleichsweise einfachen Fest-Flüssig-Trennung abgetrennt werden könnten. Schwermetalle wurden im Rahmen dieser Untersuchungen nicht bestimmt. Die elektrische Leitfähigkeit in den untersuchten Einzugsgebieten liegt im Mittel bei 137 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Bestand), 127 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Neubau) und 88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Straße). Die geringen elektrischen Leitfähigkeiten lassen den Schluss zu, dass Niederschlagswässer aus den untersuchten Einzugsgebieten tendenziell eine geringe Salzfracht aufweisen.

Das untersuchte Bestandsgebiet ist Teil des Einzugsgebiets des RBFs im Quartier. Ein Vergleich der ermittelten Konzentrationen im Bestandsgebiet und im Zulauf des RBF zeigt, dass für alle untersuchten Parameter im Zulauf des RBF signifikant höhere Konzentrationen (Faktor 2 bis 6) bestimmt wurden (vgl. Tabelle 4-2). Es wurden nur Parameter berücksichtigt, die an beiden Probenahmestellen detektiert wurden.

Tabelle 4-2: Vergleich der bestimmten mittleren Konzentrationen im Bestandsgebiet und im Zulauf des RBFs im Quartier

Parameter	Bestandsgebiet [mg/l]	Zulauf RBF im Quartier [mg/l]
CSB	36,7	224
AFS	36,6	130
Gesamt-P	0,373	1,020
PO ₄ -P	0,195	0,629
NO ₃ -N	0,782	1,710
NH ₄ -N	0,744	2,278
Terbutryn-2-hydroxy	0,077	0,296

Folglich müssen im Einzugsgebiet des RBFs ein oder mehrere Verschmutzungsschwerpunkte vorliegen, die zu signifikant höheren Konzentrationen im Zulauf des RBFs im Vergleich zum untersuchten Bestandsgebiet führen.

Neben den absoluten Konzentrationen spielt die mittlere Ereigniskonzentration (EMC) hinsichtlich der Niederschlagswasserqualität eine entscheidende Rolle. Eine Übersicht über ermittelte EMCs aus allen Einzugsgebieten gibt Tabelle 4-3.

Tabelle 4-3: Übersicht über mittlere Ereigniskonzentrationen (EMC) der untersuchten Einzugsgebiete [mg/l]

Parameter	Bestand	Neubau	Straße	Bestand [21]	Neubau [2]	Straße [22]
CSB	36,6 ± 14,0	34,9 ± 15,8	28,0 ± 12,7	72	5-42	45,38
AFS	25,4 ± 31,7	588,3 ± 754,4	126,0 ± 183,6	105	6,9-879	148,70
Gesamt-P	0,359 ± 0,190	0,638 ± 0,593	0,148 ± 0,073	0,29	0,03-2,5	0,44
PO ₄ -P	0,200 ± 0,144	0,145 ± 0,078	0,047 ± 0,018	-	-	-
NO ₃ -N	0,809 ± 0,596	0,411 ± 0,163	0,395 ± 0,298	-	-	-
NH ₄ -N	0,721 ± 0,557	0,295 ± 0,137	0,462 ± 0,313	1,91*	-	0,46
TN	-	-	-	-	1,0-16	-

* als NH₃-N

Aus Tabelle 4-3 wird nochmals deutlich, dass das untersuchte Bestandsgebiet hinsichtlich der Parameter CSB, AFS und NH₄-N ein vergleichbar geringes Verschmutzungspotential aufweist. Im Gegensatz dazu wurde im untersuchten Bestandsgebiet eine erhöhte Belastung des Niederschlagswassers mit Phosphor ermittelt. Für das untersuchte Neubaugebiet liegen die ermittelten EMC-Konzentrationen aller Parameter in bekannten Größenordnungen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einzelne Regenereignisse beispielsweise für den Parameter AFS sehr hohe Konzentrationen verursachen können (vgl. Abbildung 8B). Der untersuchte Ablauf einer stark befahrenen Straße zeigt ebenfalls keine signifikanten Abweichungen von bekannten Belastungen im Ablauf stark befahrener Straßen vergleichbarer Einzugsgebiete. Tendenziell ist der Ablauf der stark befahrenen Straße hinsichtlich der Parameter CSB und Phosphor gering belastet.

Neben den abwassertechnisch relevanten Parametern wurden im Bestands- und Neubaugebiet für insgesamt 4 ausgewählte Regenereignisse die Biozidkonzentrationen bestimmt. Abbildung 10 zeigt zusammenfassend die Bandbreite gemessener Konzentrationen. Zur Einordnung der gemessenen Konzentrationen werden die Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm (JD-UQN) und zulässige Höchstkonzentration-Umweltqualitätsnorm (ZHK-UQN) für Oberflächengewässer nach OGewV [23] herangezogen.

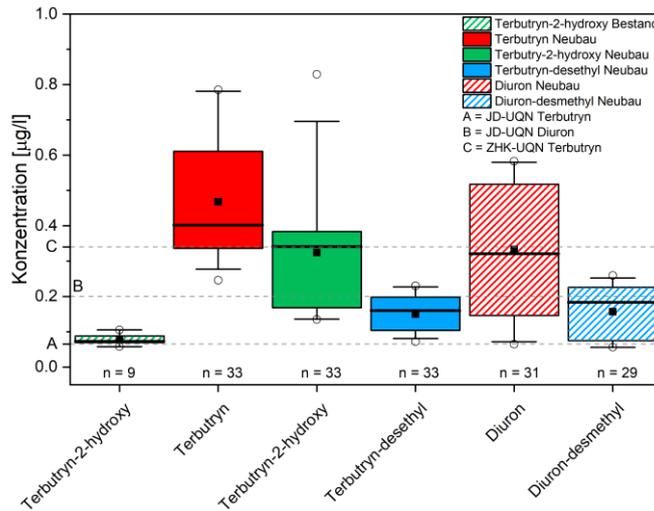


Abbildung 10: Boxplots der Parameter Terbutryn und Diuron inklusive Transformationsprodukte im untersuchten Bestands- und Neubaugebiet, Whisker zeigen 5 % bzw. 95 % Perzentil an, Probenanzahl n, JD-UQN und ZHK-UQN nach [23], (eigene Darstellung, ISWW)

Auffällig ist, dass im Neubaugebiet für den Wirkstoff Terbutryn überwiegend Konzentrationen über der zulässigen Höchstkonzentration-Umweltqualitätsnorm (ZHK-UQN) gemessen wurden. Darüber hinaus liegen im Neubaugebiet die Konzentrationen am Transformationsprodukt Terbutryn-2-hydroxy im Mittel ebenfalls in der Größenordnung der ZHK-UQN. Im Bestandsgebiet konnte lediglich das Transformationsprodukt Terbutryn-2-hydroxy gemessen werden. Dort liegen die Konzentrationen im Mittel im Bereich der Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm (JD-UQN). Für den Wirkstoff Diuron wurden im Neubaugebiet im Mittel deutlich erhöhte Konzentrationen im Vergleich zur ZHK-UQN bestimmt, während die Konzentrationen des Transformationsprodukts Diuron-desmethyl im Mittel im Bereich der ZHK-UQN liegen. Folglich wurde das Neubaugebiet eindeutig als Verschmutzungsschwerpunkt für die Biozide Terbutryn und Diuron inklusive deren Transformationsprodukte identifiziert. Im Bestandsgebiet wurden zwar keine Ausgangssubstanzen nachgewiesen, jedoch sind die Konzentrationen an Transformationsprodukten im Mittel in der Größenordnung der JD-UQN der Ausgangssubstanzen und damit nicht zu vernachlässigen.

Des Weiteren konnte anhand der Konzentrationsverläufe der untersuchten Biozide beispielhaft aufgezeigt werden, dass sowohl im Bestandsgebiet (vgl. Abbildung 11) als auch im Neubaugebiet (vgl. Abbildung 12 A-F) die Biozidkonzentrationen im Verlauf eines Regenereignisses durchweg erhöht sein können und nicht unbedingt durch intensive Regenereignisse und damit einhergehend größere Abflussereignisse verdünnt werden.

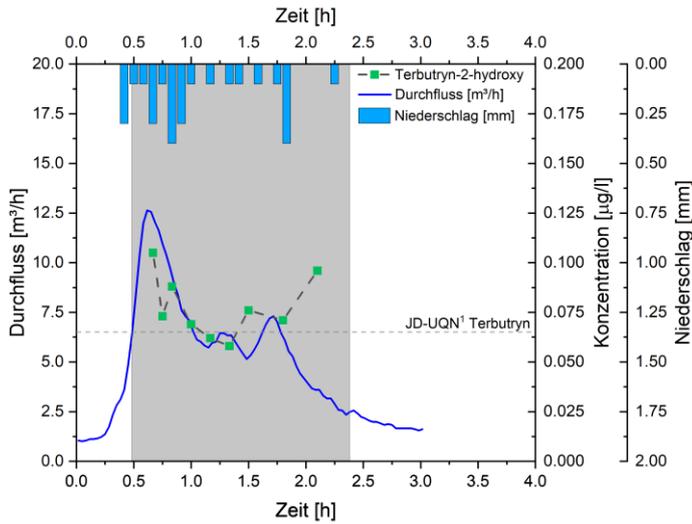


Abbildung 11: Verlauf der Biozidkonzentrationen im Bestandsgebiet für ein ausgewähltes Regenereignis, Beprobungszeitraum in grau (eigene Darstellung, ISWW)

Abbildung 11 zeigt den Konzentrationsverlauf des Transformationsprodukts Terbutryn-2-hydroxy im Bestandsgebiet. Gut erkennbar sind die überwiegend hohen Konzentrationen über der JD-UQN für Terbutryn. An dieser Messstelle entspricht ein Durchfluss von 12,5 m³/h etwa einer Teilfüllung im Kanal von 10 %.

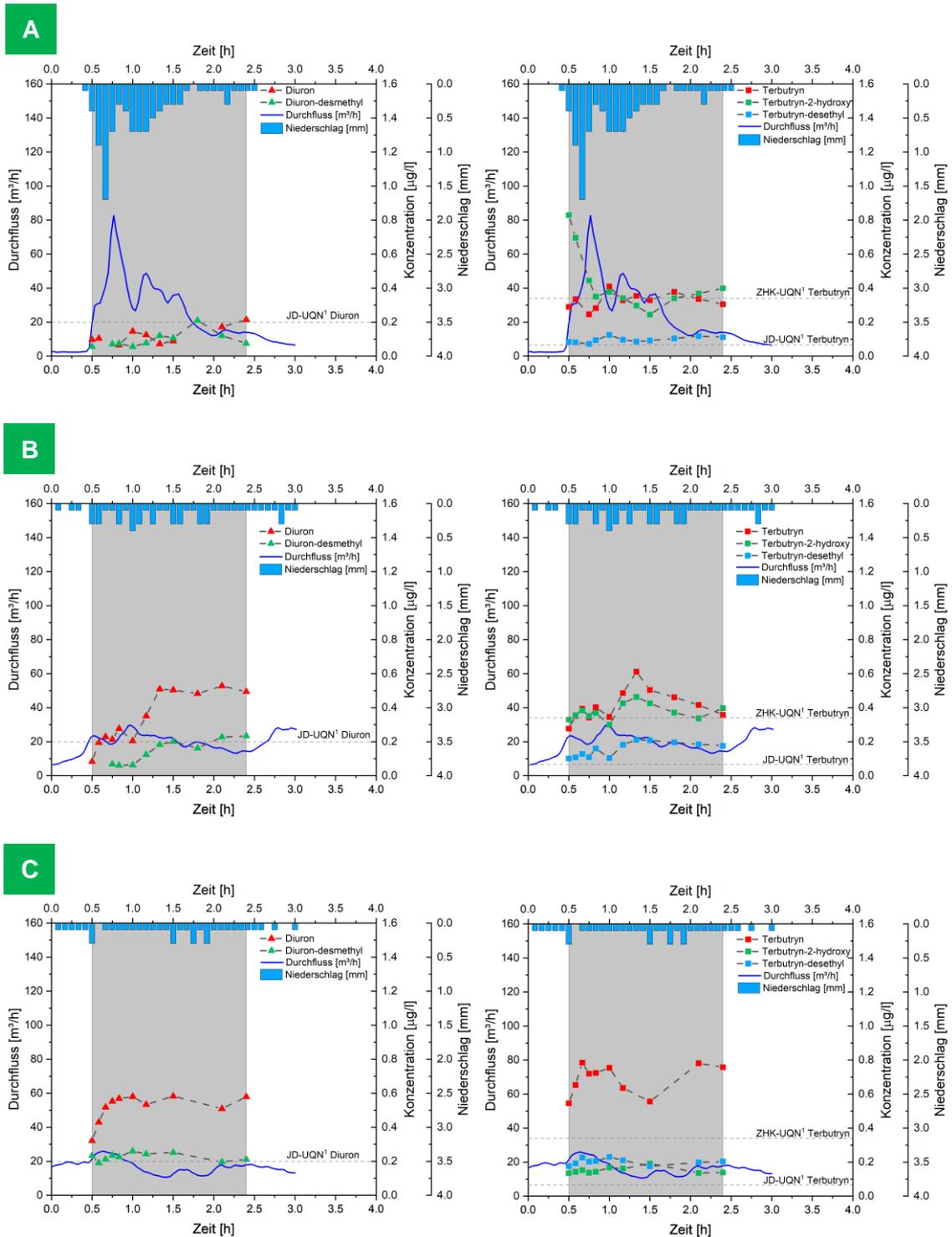


Abbildung 12: Verlauf der Konzentrationen an Diuron (links) und Terbutryn (rechts) inklusive entsprechender Transformationsprodukte im Neubaugebiet für drei ausgewählte Regenereignisse [A-C], Beprobungszeitraum in grau (eigene Darstellung, ISWW)

Aus Abbildung 12 wird ersichtlich, dass Diuron-Konzentrationen bei weniger intensiven Regenereignissen im Bereich von 0,6 µg/l liegen und damit deutlich über der JD-UQN für Oberflächengewässer [23]. Die ZHK-UQN von Diuron beträgt 1,8 µg/l [23]. Bei einem deutlich intensiveren Regenereignis (vgl. Abbildung 12A links) wurden im Gegensatz dazu Diuron-Konzentrationen bestimmt, die deutlich unter der JD-UQN liegen und erst bei Abnahme des Durchflusses zunehmen. Der Wirkstoff Terbutryn zeigt ein ähnliches

Verhalten. Bei einem intensiven Regenereignis (vgl. Abbildung 12A rechts) erreichen die Terbutryn-Konzentrationen die Größenordnung der ZHK-UQN. Bei weniger intensiven Regenereignissen wird diese teilweise deutlich überschritten (vgl. Abbildung 12B und C rechts). Darüber hinaus erreichen Transformationsprodukte beider Wirkstoffe ebenfalls Größenordnungen, die im Bereich der jeweiligen JD-UQN und können im Fall von Terbutryn-2-hydroxy auch deutlich darüber liegen.

Neben den Konzentrationen der untersuchten Parameter ist die Art und Weise ihres Auftretens hinsichtlich der Niederschlagswasserbehandlung relevant. Dieser Aspekt wird mit Hilfe des Spülstoßeffektes beschrieben. In Anlehnung an Gleichung 4 wurde die Intensität des Spülstoßeffektes für die abwassertechnisch relevanten Parameter berechnet. Abbildung 13 fasst diese Ergebnisse zusammen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein niedriger Wert für den Exponenten b eine höhere Spülstoßintensität widerspiegelt (vgl. Tabelle 3-2).

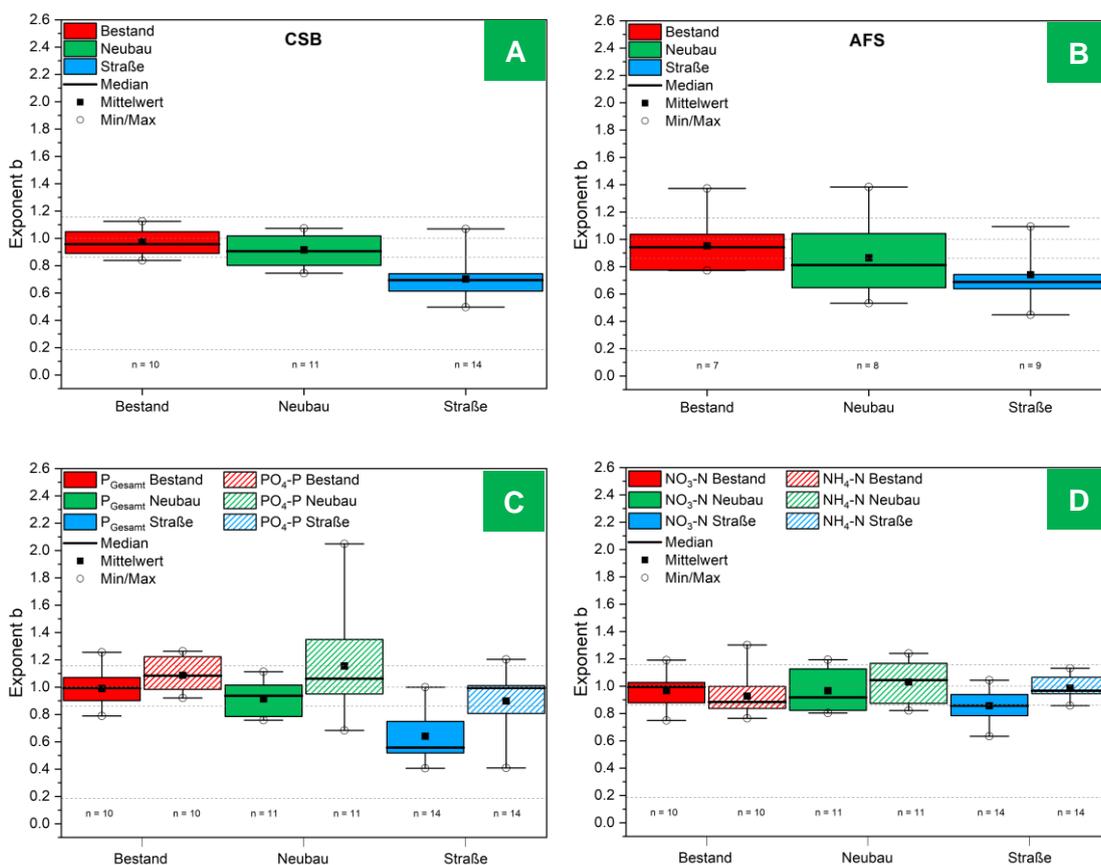


Abbildung 13: Berechnete Spülstoßintensitäten für die Parameter CSB [A], AFS [B], Phosphor [C] und Stickstoff [D] der drei untersuchten Einzugsgebiete, Whisker zeigen 5 % bzw. 95 % Perzentil an, Ereignisanzahl n (eigene Darstellung, ISWW)

Für den Parameter CSB wurde im Bestands- und Neubaugebiet kein bzw. ein leichtes Auftreten des Spülstoßeffektes ermittelt (vgl. Abbildung 13A). Der Ablauf der stark befahrenen Straße weist durchschnittlich einen moderaten Spülstoß auf. Ein ähnliches Bild zeigen die Ergebnisse der Spülstoßintensität beim Parameter AFS (vgl. Abbildung 13B) und Gesamt-Phosphor (vgl. Abbildung 13C). Folglich zeigt sich für die untersuchten Einzugsgebiete für partikuläre Stoffe bzw. teilweise partikuläre Stoffe, dass die Spülstoßintensität in der Reihenfolge Bestand < Neubau < Straße abnimmt. Die gelöste Phosphorfraktion zeigt für das Bestands- und Neubaugebiet hingegen eine gleichmäßige

Schadstoffbelastung bzw. schwache Verdünnungseffekte. Für die Stickstoffparameter konnte kein signifikantes Spülstoßverhalten in keinem Einzugsgebiet ermittelt werden (vgl. Abbildung 13D). Die Spülstoßintensitäten der Parameter Nitrat und Ammonium liegen im Mittel nah im Bereich einer gleichmäßigen Schadstoffbelastung. Einzige Ausnahme stellt Nitrat im Ablauf der stark befahrenen Straße dar, bei dem im Mittel Intensitäten im Übergangsbereich zwischen leichtem und moderatem Spülstoß ermittelt wurden.

Mikroplastikkonzentrationen im Abfluss der stark befahrenen Straße

Vorbemerkungen

Im Rahmen der Projektarbeit wurde für ausgewählte Regen- bzw. Abflussereignisse des Einzugsgebiets Straße orientierende Mikroplastikmassekonzentrationen im Kanalabfluss ermittelt. Die Mikroplastikanalytik erfordert vergleichsweise hohe Probevolumina um eine kritische Feststoffmasse nach Probenaufbereitung für die eigentliche Messung zu erhalten. Daher wurden aus den zeitdiskreten Einzelproben volumenproportionale Mischproben für die Analytik erstellt. Pro Ereignis konnten somit in Abhängigkeit des erfassten Einzelprobevolumens der automatischen Probenahme zwei bis drei Mischproben erstellt werden, die auch eine grobe Einschätzung der Verschmutzungsdynamik für Kunststofffragmente erlauben. Die Proben wurden aufgrund der geringen Feststoffgehalte und zur Vermeidung von Masseverlusten nicht gesiebt, so dass keine Größenklassenzuordnung erfolgen kann. Rein optisch konnten im erfassten Kanalabfluss keine Partikel >1 mm beobachtet werden, so dass in der MP-Analytik die Fraktion des „kleinen Mikroplastiks“ in Anlehnung an Klassifikationen des Umweltbundesamtes [24] bzw. ISO/TR 21960 erfasst wurde.

Die Mischproben wurden zur externen Analyse am FG Siedlungswasserwirtschaft der TU Berlin gefriergetrocknet und gemahlen. Die Mikroplastikdetektion erfolgte thermogravimetrisch mit TED-GC MS. Für die Auswertung der Massenspektrogramme wurden aktuell etablierte Leitabbauprodukte für PE, PP, PET und PMMA betrachtet. Die Polymere PA und PS waren nicht zuverlässig detektierbar. Der „Reifenabriebsmarker“ SBR (Styrol-Butadien-Rubber) konnte ebenfalls über Marker erfasst werden. Für jede Mischprobe erfolgte in Abhängigkeit der vorhandenen gefriergetrockneten Feststoffmasse eine zwei- oder dreimalige Wiederholungsmessung.

Die Ermittlung von Mikroplastikkonzentrationen in heterogenen Proben ist erfahrungsgemäß mit Unsicherheiten behaftet, die trotz anhaltender Optimierungen für jeden einzelnen Analyseschritt mindestens auf den Faktor 2 beziffert werden müssen. Für die alleinige Aufbereitung im Labor und die TED-GC MS Detektion gibt die TU Berlin im Allgemeinen Unsicherheitsfaktoren von 88% für PE, 78% für PP und 82% für SBR für Niederschlagswasserproben an. Die Wiederholungsmessungen der vorliegenden Mischproben zeigten zudem im konkreten Fall Standardabweichungen von bis zu 39% für PE, bis zu 45% für PP und bis zu 28% für SBR. Die bezifferten Unsicherheiten und Abweichungen entsprechen dem aktuellen Stand der Forschung für die bis dato nicht standardisierte Mikroplastikanalytik.

Ein wesentlicher Faktor für die im Vergleich zu Standardparametern der (Ab)wasserqualität relativ hohen Unsicherheiten der Messergebnisse rührt aus der zwingend notwendigen aber fehleranfälligen Feststoffaufkonzentration und vollständigen Überführung für die eigentliche Messung. Die o.a. ermittelten Unsicherheiten für die Aufbereitung im Labor und die Detektion müssen dabei grundsätzlich um Unsicherheiten für die Erstellung der volumenproportionalen Mischproben erweitert werden. Hier zeigte sich insbesondere eine

vollständige Überführung auch feiner Feststoffpartikel aus den einzelnen Kanalabflussproben für die Vereinigung zu Mischproben als äußerst problematisch. Dieses Fehlerpotential ließ sich im Rahmen der Projektarbeiten allerdings nicht weitergehend quantifizieren. Vor diesem Hintergrund können die im Folgenden dargestellten Mikroplastikkonzentrationen als orientierende Angaben nach Stand der Forschung gewertet, sollten aber nicht als absolute Konzentrationen aufgefasst werden.

Ergebnisse

Während des Untersuchungszeitraums für das Einzugsgebiet Straße konnten insgesamt sechs Ereignisse zwischen Februar und Juni 2022 mit variierenden Randbedingungen bzgl. des Regenereignisses zur Analyse auf Mikroplastik genutzt werden. Für die Abflussqualität dieser Ereignisse erfolgte zusätzlich eine in Kapitel 3.5 dargestellte Standardanalytik der Nährstoffe für bis zu 12 Einzelproben aus dem automatischen Probenehmer. Eine parallele Ermittlung der AFS in allen Einzelproben konnte aufgrund des geringen Probevolumens und damit der unzureichend enthaltenen kritischen Feststoffmasse für die Analyse beider Parameter (Mikroplastik und AFS) lediglich in den volumenproportionalen Mischproben erfolgen. Damit ist allerdings eine anteilige Zuordnung der erfassten Kunststofffragmente innerhalb eines Zeitfensters der Abflussbeprobung zur korrespondierenden Feststofffracht möglich.

Abbildung 14 zeigt die gemittelten Massekonzentration an Mikroplastikpartikeln (Summe) sowie die anteilige Fragmentierung für die detektierten Polymerarten PE, PP und SBR in sechs Regenereignissen. Die Mikroplastikmassekonzentrationen (Summe) variieren über die erfassten Ereignisse zwischen 356 und 5.083 $\mu\text{g/l}$ und liegen damit innerhalb der Größenordnungen des Zulaufs von kommunalen Kläranlagen (ermittelt ab Sandfang, vgl. Fuhrmann et al. 2021 [25]; Spelthahn et. al. 2019 [26]) und auch innerhalb der Spannweite vergleichbarer Untersuchungen zur Qualität innerstädtischen Kanalabflusses viel befahrener Straßen [27].

In der Differenzierung der Polymerarten zeigt PE, ebenfalls wie im Mischwasserzufluss einer Kläranlage, die höchsten Konzentrationen. Auch PP wird erfasst, während andere Polymerarten im Niederschlagsabfluss der Straße nicht detektiert werden konnten. Betrachtet man die jeweiligen Mikroplastikmassekonzentrationen in zugehörigen Mischproben eines Ereignisses (Proben 1 bis 2 oder bis 3 eines Ereignisses) so lässt sich eine orientierende Dynamik erkennen: Die höchsten Mikroplastikkonzentrationen wurden grundsätzlich zu Beginn eines Abflussereignisses erfasst (während der ersten 15 bis 30 min, das erfasste Zeitintervall orientiert sich an der Zusammenstellung der Mischprobe), während bei ausklingendem Regen- bzw. Abflussereignis deutlich geringere Konzentrationen oder gar keine synthetischen Polymere nachweisbar waren. Die Quantifizierung des Parameters b und damit eine qualifizierte Spülstoßcharakterisierung, wie sie für die zeitdiskreten Einzelproben im Einzugsgebiet Straße bspw. für AFS aufgeführt wurde (vgl. Kapitel 4.2), ist für den AFS und den Mikroplastikgehalt in den Mischproben aufgrund der o.a. Unsicherheiten bei der Analytik und der innerhalb des Projektrahmens begrenzt erfassbaren Probenanzahl nicht zielführend.

Besondere Aufmerksamkeit muss der Interpretation der Konzentrationen des „Reifenabriebsmarker“ SBR zugeordnet werden. Reifenpartikel scheinen tendenziell ebenfalls in der ersten Phase eines Abflussereignisses von der Oberfläche abgespült und im Kanalabfluss der Straße nachweisbar zu sein. Bei der Erfassung dieser Polymerfraktion spielt allerdings die Transportdynamik der Partikel eine entscheidende Rolle: Reifenabrieb umfasst Partikel mit vergleichsweise hoher Dichte (Dichte reiner Gummiabrieb: 1,2 g/cm^3 ;

Konglomerate aus Straßen- und Reifenabrieb $1,8 \text{ g/cm}^3$ [28] vs. Dichte PE $< 1 \text{ g/cm}^3$, die sich leicht an der Kanalsohle ablagern und - wenn überhaupt - nur bei ausreichender Abflussintensität transportiert werden [29]. Variierende hydraulische Randbedingungen im Kanal und die Abflussdynamik selbst erschweren gleichermaßen eine repräsentative Probennahme der zur Sedimentation neigenden „schweren“ SBR-Partikel. Eine Probennahme in einigen cm über Kanalsohle, wie sie im Allgemeinen üblich ist und auch in den TransMit-Projektarbeiten realisiert wurde, kann dazu führen, dass bei geringer Wasserführung im Kanal kein Transport und damit kein SBR aufgefunden werden kann, obwohl die Partikel in Folge von Niederschlagsereignissen von der Straßenoberfläche abgeschwemmt wurden. Es ist daher davon auszugehen, dass die SBR-Massekonzentrationen bei bis dato üblicher Probenahmemethodik im Kanal deutlich unterschätzt werden (vgl. [27]).

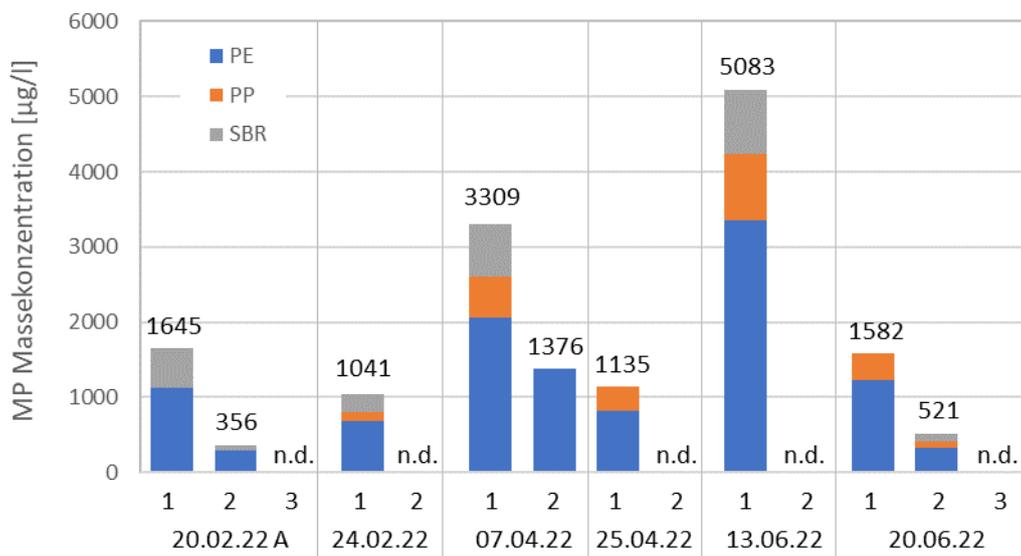


Abbildung 14: Massekonzentrationen an Kunststofffragmenten in Mischproben (1 bis 3) des EZG Straße für 6 Ereignisse

Tabelle 4-4 stellt ergänzend im Detail die ermittelten Konzentrationen der Mikroplastikfraktionen, inkl. der Berücksichtigung des Unsicherheitsfaktor U für die einzelnen Polymere, die AFS-Konzentrationen der Mischproben sowie einen Ausschnitt der Metadaten zum jeweiligen Regenereignis zusammen (zur Charakterisierung der Regenereignisse (vgl. Tabelle 4-1). In grober Tendenz zeigen die Ergebnisse, dass bei hoher Niederschlagsintensität auch höhere Mikroplastikkonzentrationen ermittelt werden, inkl. des Nachweises von SBR. Die ermittelten Konzentrationen des AFS als Summenparameter der organischen und anorganische Feststoffe $>0,45 \mu\text{m}$ in den Mischproben folgen hingegen nicht dieser Tendenz.

Die Mikroplastikfragmente in den Mischproben nehmen einen Anteil an den AFS von 0,1 bis 3,6 Masse-% ein, im Mittel 1,7 Masse-%. Eine Korrelation von AFS- und Mikroplastikkonzentrationen lässt sich nicht darstellen. Dieser Befund deckt sich mit Untersuchungsergebnissen im Abfluss innerstädtischer vielbefahrener Straßen aus vorangegangenen Projektarbeiten (vgl. [27]). Die TransMit Ergebnisse bestätigen somit, dass sich über den AFS ($>0,45 \mu\text{m}$) als analytisch wesentlich unaufwändiger zu

ermittelnden Summenparameter nach derzeitigem Stand keine zuverlässige Abschätzung der Mikroplastikbefrachtung im Kanalabfluss ableiten lässt.

Tabelle 4-4: Detaillierergebnisse der Mikroplastikkonzentration sowie des AFS der Mischproben im Abfluss der vielbefahrenen Straße

Datum/ Ereignis	mittlere Nieder- schlags- intensität [mm/h]	Dauer [min]	Dauer vorherige Trocken- periode [d]	Mischprobe aus Einzelproben im Zeitintervall	PE Gehalt [µg/L]	PP Gehalt [µg/L]	SBR Gehalt [µg/L]	MP- Gesamt [µg/L]	AFS [mg/L]
20.02.2022 A	3,2	90	1,32	1: 0-15 min	1130 ± 994	n.d.	515 ± 422	1645	100
				2: 20-50 min	291 ± 256	n.d.	66 ± 54	356	47
				3: 60-114 min	n.d.	n.d.	< NG	n.d.	6
24.02.2022	2,4	25	2,1	1: 0-30 min	689 ± 606	115 ± 90	237 ± 194	1041	103
				2: 40-78 min	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4
07.04.2022 A	6,0	50	1,51	1: 0-30 min	2060 ± 1812	545 ± 425	704 ± 578	3309	2151
				2: 40-114 min	1376 ± 1211	n.d.	< BG	1376	55
25.04.2022	2,6	100	3,34	1: 0-30 min	813 ± 715	322 ± 251	< BG	1135	1715
				2: 40-96 min	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
13.06.2022	11,6	15	4,51	1: 0-30 min	3348 ± 2946	892 ± 696	842 ± 691	5083	227
				2: 40-114 min	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5
20.06.2022	3,1	100	0,07	1: 0-15 min	1226 ± 1079	356 ± 278	< BG	1582	44
				2: 20-50 min	333 ± 293	72 ± 56	116 ± 95	521	16
				3: 60-114 min	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8

Mikroplastikkonzentrationen im Zulauf zum Retentionsbodenfilter

Vorbemerkungen

Die orientierende Ermittlung von Mikroplastikkonzentrationen im Zulauf des Retentionsbodenfilters stand im Untersuchungsprogramm nicht im Fokus. Dennoch konnten zum Ende der praktischen Untersuchungsphase im Juli 2022 die Abwässer von drei Regenereignissen auf synthetische Polymere inkl. SBR untersucht werden. Ziel war hier nicht die Identifikation von Verschmutzungsdynamiken sondern vielmehr eine erste Einordnung der Mikroplastikemissionen aus dem Einzugsgebiet.

Da im Zulauf des Retentionsbodenfilters wiederholt größere Feststoffe aus Fremdwassereinträgen gefunden wurden, die die automatische intervallgesteuerte Einzelprobenahme stark beeinträchtigten, wurden für die Mikroplastikbeprobungen Sammelmischproben über 115 min eines Abflussereignisses erfasst. Dazu wurden 24 volumengleiche Teilproben im fünfminütigem Abstand entnommen und in einen Behälter vor Ort zusammengeführt. Aus der Sammelmischprobe wurden nach bestmöglicher

Homogenisierung Teilproben zur weitergehenden Standardanalytik und zur Mikroplastikdetektion mit TED GC-MS entnommen.

Der Ablauf des Retentionsbodenfilters konnte aufgrund der geringen verbleibenden Feststoffkonzentrationen nach der im Projekt umgesetzten Probenahmestrategie nicht zur Mikroplastikdetektion genutzt werden. Hier hätte eine Analytik die Entnahme sehr hoher Abwasservolumina vorausgesetzt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Mikroplastikkonzentrationen der orientierenden Beprobungen im Zulauf des Retentionsbodenfilters sind sehr heterogen. Insgesamt konnten im Abwasser von zwei der drei Abflussereignisse synthetische Polymere nachgewiesen werden. Dominantes Polymer ist auch hier PE (vgl. Tabelle 4-5). Beim Abflussereignis vom 01.07.2022 ließen sich auch PP und SBR zuordnen. Die Spannweite der Befunde spiegelt die Größenordnungen der Mikroplastikkonzentrationen der vielbefahrenen Straße wieder und liegt im Bereich 1-2% des Gesamtfeststoffgehaltes (AFS > 0,45 µm).

Tabelle 4-5: Detailergebnisse der Mikroplastikkonzentration sowie des AFS der Sammelmischproben im Zulauf des RBF

Datum/ Ereignis	mittlere Nieder- schlags- intensität [mm/h]	Dauer [min]	Dauer vorherige Trocken- periode [d]	PE Gehalt [µg/L]	PP Gehalt [µg/L]	SBR Gehalt [µg/L]	MP-Gesamt [µg/L]	AFS [mg/L]
01.07.2022	22,8	10	10,87	2623 ± 2308	694 ± 541	411 ± 337	3727	178
07.07.2022	2,1	160	5,65	403 ± 355	n.d.	n.d.	403	32
21.07.2022	2,9	40	11,60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	61

Die Ergebnisse der Zulaufbeprobung zeigen eine hohe Varianz der Abwasserqualitäten im Einzugsgebiet des Retentionsbodenfilters. Eine allgemeingültige Verschmutzungscharakteristik in Bezug auf Mikroplastik und mögliche Zusammenhänge zum Niederschlags-Abfluss-Ereignis können dem angeschlossenen Bestandswohngebiet mit bisheriger Datenlage nicht zugeordnet werden. Um hier eine weitergehende Zulaufcharakterisierung zu erhalten, müsste eine höhere Anzahl Abflussereignisse über einen längerfristigen Zeitraum auf synthetische Polymere untersucht werden. Unklar ist auch der (ungewollte) Einfluss der im Regenwasserkanal angeschwemmten Fremdstoffe auf die Mikroplastikbefunde in den Abwasserproben. Nicht auszuschließen ist, dass kunststoffhaltige, vernässte Abfallstoffe im Kanal zerfasern, vor der Probenahmestelle akkumulieren und so die Mikroplastikbefunde maßgeblich beeinflussen. Ein „Mikroplastik-Fingerprint“ des Retentionselementes bedarf daher unbedingt einer weitergehenden Klärung der Zulaufbedingungen im angeschlossenen Trennsystem und weitergehender gezielter Probenahmen.

5 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde für drei Einzugsgebiete (Bestand, Neubau und Straße) die Niederschlagswasserqualität bestimmt. Dabei wurden abwassertechnisch relevante Parameter gemessen sowie für ausgewählte Regenereignisse die Belastung mit Bioziden bzw. Mikroplastik ermittelt.

Im untersuchten Bestandsgebiet konnten im Vergleich zu ähnlichen Einzugsgebieten keine signifikant erhöhten Konzentrationen bestimmt werden. Während für die Parameter CSB, AFS und Gesamt-Phosphor niedrige Konzentration bestimmt wurden, waren gelöste Inhaltsstoffe wie ortho-Phosphat und Ammonium vergleichsweise hoch. Trotz dieser teilweise erhöhten Konzentrationen konnte im Mittel keine signifikante Erhöhung von mittleren Ereigniskonzentrationen festgestellt werden. Im Bestandsgebiet wurde für die überwiegende Anzahl untersuchter Parameter eine gleichbleibende Schadstoffbelastung festgestellt. Einzig für die gelöste Phosphorfraction wurde im Mittel für die beprobten Regenereignisse ein tendenzieller Verdünnungseffekt ermittelt. Für ein ausgewähltes Regenereignis wurden die Konzentrationen an Bioziden ermittelt. Dabei konnte keine der Ausgangssubstanzen detektiert werden. Lediglich das Transformationsprodukt Terbutryn-2-hydroxy wurde im Bestandsgebiet nachgewiesen. Dabei sind die hohen Konzentrationen im Bereich der JDUQN für die Ausgangssubstanz Terbutryn zu berücksichtigen. Hinsichtlich abwasserrelevanter Parameter kann das untersuchte Bestandsgebiet tendenziell als Belastungsschwerpunkt ausgeschlossen werden. Beim Blick auf eine Biozidbelastung stellt sich die Frage, ob erhöhte Konzentrationen an Transformationsprodukten bzw. Ausgangssubstanzen dauerhaft auftreten. Anhand der beispielhaften stichprobenartigen Bestimmung der Biozidkonzentrationen eines Regenereignisses kann keine abschließende Tendenz angegeben werden.

Im untersuchten Neubaugebiet konnte im Vergleich zu ähnlichen Einzugsgebieten eine erhöhte CSB-Belastung ermittelt werden. Ein Vergleich zwischen untersuchtem Bestandsgebiet und untersuchtem Neubaugebiet hinsichtlich der CSB-Belastung zeigt keine signifikanten Unterschiede. Im Neubaugebiet traten mit Abstand die höchsten Konzentrationen an Feststoffen auf, was auf die vor Ort vorherrschenden Bautätigkeiten zurückzuführen ist. Gleichzeitig konnte eine erhöhte Phosphorbelastung ermittelt werden. Die Nitrat-Belastung ist vergleichsweise gering. Trotz beispielsweise hoher AFS-Konzentrationen konnten im Mittel keine signifikanten Unterschiede bei mittleren Ereigniskonzentrationen im Vergleich zu ähnlichen Einzugsgebieten festgestellt werden. Für einen Vergleich der Niederschlagswasserbeprobung aus Neubaugebieten sind nur wenige Vergleichsdaten verfügbar. Im Vergleich zum Bestandsgebiet konnte im Neubaugebiet eine etwas intensivere Spülstoßdynamik der abwassertechnisch relevanten Parameter ermittelt werden. Beispielsweise konnte für die Parameter CSB, Gesamt-Phosphor und Nitrat eine Tendenz zu leichtem Spülstoß ermittelt werden. Für Feststoffe konnte im Mittel ein Spülstoßverhalten an der Grenze zum moderaten Spülstoß beobachtet werden. Im Neubaugebiet wurden anhand von drei ausgewählten Regenereignisse die Biozidbelastung ermittelt. Sowohl für Diuron und Terbutryn konnte dabei aufgezeigt werden, dass es unabhängig von der Niederschlagsintensität zu hohen Konzentrationen an Bioziden und deren Transformationsprodukten kommen kann, die deutlich über JD-UQN bzw. ZHK-UQN liegen können.

Im untersuchten Ablauf der stark befahrenen Straße wurden vergleichsweise niedrige Konzentrationen an CSB, AFS und Gesamt-Phosphor ermittelt. Im Gegensatz dazu war die Belastung mit gelöstem Phosphor vergleichsweise hoch. Die bestimmten mittleren

Ereigniskonzentrationen liegen dementsprechend im vergleichsweise niedrigen Bereich. Im Ablauf der stark befahrenen Straße wurde tendenziell ein moderates Spülstoßverhalten für die Parameter CSB, AFS und Gesamt-Phosphor ermittelt. Nitrat zeigt ein leichtes Spülstoßverhalten. Gelöster Phosphor und Ammonium zeigen eine gleichbleibende Schadstoffbelastung.

Im Kanalabfluss der vielbefahrenen Straße wurde für ausgewählte Regenereignisse in volumenproportionalen Mischproben Mikroplastik inkl. des Reifenabriebmarkers SBR nachgewiesen. Die detektierten Konzentrationen bewegen sich innerhalb der Spannbreiten des Zulaufs von Kläranlagen und des Straßenabflusses ähnlicher innerstädtischer Einzugsgebiete. Es zeigte sich in den einzelnen Mischproben zu einem Regen- bzw. Abflussereignis, dass die Mikroplastikbefunde hohen Schwankungen unterliegen. So wurden die höchsten Mikroplastikkonzentrationen in den Mischproben innerhalb der ersten 15 bzw. 30 min des Beprobungszeitraums ermittelt. Eine Spülstoßcharakterisierung und damit Quantifizierung kann anhand der vergleichsweise wenigen vorliegenden Daten nicht erfolgen. Die dargestellten Mikroplastikbefunde sind vielmehr aufgrund besonderer Herausforderungen, die bis dato in allen Analyseschritten zur Mikroplastikbestimmung bestehen, als orientierende Größen zu interpretieren. Eine weitergehende statistische Aufarbeitung erfordert insbesondere eine höhere Anzahl an beprobaren Regenereignissen für ein Einzugsgebiet. Im Rahmen der Projektarbeiten nicht gesondert betrachtet, aber von erhöhter Relevanz zur Einordnung von Mikroplastikbefunden spielt zudem die Bewirtschaftung von Einzugsgebieten mit hohem Anteil an Straßen. Insbesondere die Straßenreinigung kann einen erheblichen Einfluss auf Mikroplastikbefunde im Kanalabfluss haben. So stellten Barjenbruch et al. (2021) [30] fest, dass Mikroplastikrückstände auf Straßenbelegen räumlich variieren und Einträge in den Kanalabfluss gezielt durch den Einsatz von Kehrfahrzeugen reduziert werden können. Bei weitergehenden Untersuchungen wäre ein möglicher Einfluss von Kehrereignissen unbedingt mit zu berücksichtigen.

Mikroplastik wurde ebenfalls in zwei von drei Sammelmischproben im Zulauf des Retentionsbodenfilters und damit im Trennsystem des angeschlossenen Bestandswohngebietes detektiert, wenn auch ohne ableitbare Tendenzen im Zusammenhang zum Niederschlagsereignis. Aus den orientierenden Anhaltswerten lässt sich für das Einzugsgebiet noch keine Verschmutzungscharakteristik ableiten. Vielmehr ist festzuhalten, dass eine hohe Varianz von gar kein Mikroplastik bis zu Konzentrationen im mg/L Bereich, vergleichbar mit der vielbefahrenen Straße, detektiert wurden. Unklar bleibt für den Beprobungsstandort, inwiefern fehleingeleitete, vermutlich schmutzwasserbürtige, Abfallstoffe die Mikroplastikbefunde beeinflussten.

6 Literatur

- [1] L. Lundy, J. B. Ellis, and D. M. Revitt, "Risk prioritisation of stormwater pollutant sources," *Water research*, vol. 46, no. 20, pp. 6589–6600, 2012.
- [2] N. Sillanpää and H. Koivusalo, "Stormwater quality during residential construction activities: influential variables," *Hydrological Processes*, vol. 29, no. 19, pp. 4238–4251, 2015.
- [3] C. Kozak, C. V. S. Fernandes, S. M. Braga et al., "Water quality dynamic during rainfall episodes: integrated approach to assess diffuse pollution using automatic sampling," *Environmental monitoring and assessment*, vol. 191, no. 6, p. 402, 2019.
- [4] J. B. Ellis and G. Mitchell, "Urban diffuse pollution: key data information approaches for the Water Framework Directive," *Water and Environment Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 19–26, 2006.
- [5] H. Song, T. Qin, J. Wang et al., "Characteristics of Stormwater Quality in Singapore Catchments in 9 Different Types of Land Use," *Water*, vol. 11, no. 5, p. 1089, 2019.
- [6] D. Wicke, A. Matzinger, H. Sonnenberg et al., "Micropollutants in Urban Stormwater Runoff of Different Land Uses," *Water*, vol. 13, no. 9, p. 1312, 2021.
- [7] D. R. Helsel, J. I. Kim, T. J. Grizzard et al., "Land use influences on metals in storm drainage," *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 51 (4), pp. 709–717, 1979.
- [8] P. Balmer, P.-A. Malmquist, and A. Sjöberg, eds., *Proceedings of the Third International Conference on Urban Storm Drainage*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1984.
- [9] F. W. Geiger, "Flushing effects in combined sewer systems," *Proc. 4th International Conference on Urban Storm Drainage*, pp. 40–46, 1987.
- [10] K. Gupta and A. J. Saul, "Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows," *Water research*, vol. 30, no. 5, pp. 1244–1252, 1996.
- [11] A. Saget, G. Chebbo, and J.-L. Bertrand-Krajewski, "The first flush in sewer systems," *Water Science and Technology*, vol. 33, no. 9, pp. 101–108, 1996.
- [12] P. M. Bach, D. T. McCarthy, and A. Deletic, "Redefining the stormwater first flush phenomenon," *Water research*, vol. 44, no. 8, pp. 2487–2498, 2010.
- [13] F. W. Geiger, "Characteristics of combined sewer runoff," in *Proceedings of the Third International Conference on Urban Storm Drainage*, P. Balmer, P.-A. Malmquist, and A. Sjöberg, Eds., Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1984.
- [14] J. M. Hathaway, R. S. Tucker, J. M. Spooner et al., "A Traditional Analysis of the First Flush Effect for Nutrients in Stormwater Runoff from Two Small Urban Catchments," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 223, no. 9, pp. 5903–5915, 2012.
- [15] Fachbereich Stadtplanung und Geoinformation, Abt. Geoinformation, *Stadtübersichtskarte Braunschweig*, Stadt Braunschweig, 2022.
- [16] Umweltinformationssystem Stadt Braunschweig, "Verkehrsmengenkarte - KFZ - Gesamtstadt," https://www.braunschweig.de/leben/stadtplan_verkehr/verkehrsplanung/verkehrsmengenkarten.php.
- [17] S. Zgheib, R. Moilleron, M. Saad et al., "Partition of pollution between dissolved and particulate phases: what about emerging substances in urban stormwater catchments?," *Water research*, vol. 45, no. 2, pp. 913–925, 2011.
- [18] A. E. Barbosa, J. N. Fernandes, and L. M. David, "Key issues for sustainable urban stormwater management," *Water research*, vol. 46, no. 20, pp. 6787–6798, 2012.

- [19] S. N. Indris, D. L. Rudolph, B. K. Glass et al., "Evaluating phosphorous from vehicular emissions as a potential source of contamination to ground and surface water," *Cogent Environmental Science*, vol. 6, no. 1, p. 1794702, 2020.
- [20] L. Toran and D. Grandstaff, "Variation of Nitrogen Concentrations in Stormpipe Discharge in a Residential Watershed," *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 43, no. 3, pp. 630–641, 2007.
- [21] H.-Q. Peng, Y. Liu, H.-W. Wang et al., "Event mean concentration and first flush effect from different drainage systems and functional areas during storms," *Environmental science and pollution research international*, vol. 23, no. 6, pp. 5390–5398, 2016.
- [22] Y. Liu, C. Wang, Y. Yu et al., "Effect of Urban Stormwater Road Runoff of Different Land Use Types on an Urban River in Shenzhen, China," *Water*, vol. 11, no. 12, p. 2545, 2019.
- [23] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV, *Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer - Oberflächengewässerverordnung: OGWV*, 2016.
- [24] Umweltbundesamt, "Mikroplastik: Entwicklung eines Umweltbewertungskonzepts: Erste Überlegungen zur Relevanz von synthetischen Polymeren in der Umwelt," 2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_32_2016_mikroplastik_entwicklung_eines_umweltbewertungskonzeptes.pdf.
- [25] T. Fuhrmann, I. Urban, H. Scheer et al., "Mikroplastik-Emissionen aus Kläranlagen: Welche Rolle spielt die Abwasserbehandlung?," *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, vol. 68, no. 9, pp. 730–741.
- [26] V. Spelthahn, R. Dolny, C. Giese et al., "Mikroplastik aus Mischsystemen," in *"Wasser und Gesundheit": 52. Essener Tagung für Wasserwirtschaft : 20. bis 22. März 2019 im Eurogress Aachen*, J. Pinnekamp, Ed., Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V, Aachen, 2019.
- [27] H. Scheer, T. Fuhrmann, P. Wulf et al., "Verbundprojekt REPLAWA: Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt: Schlussbericht," 2022, http://www.replawa.de/wordpress/wp-content/uploads/2022/09/REPLAWA_Schlussbericht_Mikroplastik-Eintr%C3%A4ge-%C3%BCber-Abwasser_02WPL1445A-ff_220828.pdf.
- [28] M. L. Kreider, J. M. Panko, B. L. McAtee et al., "Physical and chemical characterization of tire-related particles: comparison of particles generated using different methodologies," *The Science of the total environment*, vol. 408, no. 3, pp. 652–659, 2010.
- [29] P. Lau, *Methodik und Fehlergrößen bei der Probenahme, PidU-Webinar #9: Mikroplastik in Kläranlagen - Messung, Ergebnisse, Einordnung, online*, 14.21.2021.
- [30] M. Barjenbruch, P. Lau, L. Reinhold et al., "Mikroplastikeinträge durch Regen- und Mischwasser - Reifenabrieb: DWA-Seminar Mikroplastik im Abwasser - Einordnung und Handlungsempfehlungen," 10/7/2021.