

## Die Bedeutung raum-zeitlich ungleich verteilter Niederschläge für den Mischwassernachweis

Stefan Krämer<sup>1</sup>, Daniel Fitzner-Pukade<sup>1</sup>, Hanna Leberke<sup>1</sup>, Helge Günther<sup>2</sup>,  
Martin Lindenberg<sup>2</sup>, Fabian Friese<sup>3</sup> und Sebastian Würfel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie (itwh) GmbH,  
Engelbosteler Damm 22, 30167 Hannover, Deutschland*

<sup>2</sup> *Itwh GmbH, Niederlassung Dresden, Am Waldschlößchen 4, 01099 Dresden, Deutschland*

<sup>3</sup> *Tiefbauamt Infrastruktur, Entwässerung Wasserbau Naturgefahren, Dufourstrasse 40-50,  
CH-4001 Basel, Schweiz*

**Kurzfassung:** Die Bedeutung der ungleichmäßigen Überregnung für die Ergebnisse wasserwirtschaftlicher Planungen wird häufig nur unzureichend diskutiert und unterschätzt. Am Beispiel des Mischwassersystems der Stadt Basel wird der Einfluss der ungleichmäßigen Überregnung für das Entlastungsverhalten auf Grundlage einer qualitativ hochwertigen Radarlangzeitereignisserie untersucht. Die Ergebnisse werden einer gleichmäßigen Überregnungsbelastung aus Regenschreiberbeobachtung vergleichend gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Radarregenhöhen zeigen ein eindeutiges Muster in der räumlichen Regenverteilung mit geringeren Regenhöhen in dem stark versiegelten Stadtzentrum gegenüber den angrenzenden Siedlungsgebieten im Übergangsbereich zu natürlichen, nicht versiegelten Flächen. Die Unterschiede für die Gesamtregenhöhe betragen etwa 10 %; für statistische Starkregenhöhen konvektiver Ereignisse treten die Unterschiede deutlicher hervor und betragen 30 % – 40 %.

Die räumliche Regenverteilung und die Ungleichmäßigkeit der Überregnung wirken sich auch auf die Ergebnisse der hydrodynamischen Schmutzfrachtberechnung aus. In der Gesamtbetrachtung des Entwässerungssystems verringert sich die Schmutzfracht für die Nachweisgröße  $\text{NH}_4\text{-N}$  um 15 % gegenüber der gleichmäßigen Überregnung aus den Regenschreibern; die Zahl der Entlastungstage verringert sich um 11 %.

**Key-Words:** Radarlangzeitserie, hydrodynamische Schmutzfrachtberechnung; Mischwasserentlastung

## 1 Einleitung

Der Standard zum Nachweis der Gewässerbelastung aus Mischwassernetzen ist der Einsatz hydrologischer und hydrodynamischer Modelle. Im Rahmen der erforderlichen Erstellung der Kanalnetzmodelle werden GIS-Systeme eingesetzt, um die relevanten Flächeninformationen aus verschiedenen Quellen (Kataster- und Landnutzungsinformationen, Orthofotos, digitale Geländemodelle) zu qualifizieren. Weiterhin ist es notwendig, umfangreiche Datenerhebungen zur Ermittlung des Trockenwetterabflusses aus Schmutz- und Fremdwasser und dessen Schmutzstoffe zu erfassen.

Im Gegensatz zu den hohen Aufwendungen für die Modellerstellung werden für die Bemessung und Nachweisführung seit den Ursprüngen und bis heute Regenschreiberinformationen verwendet. Diese sind streng betrachtet eine Punktinformation ohne räumliche Aussagekraft, die nicht mehr zu dem heute geforderten Detaillierungsgrad der Flächeninformation im Kanalnetzmodell passen. In der Bemessungspraxis wird nichtsdestotrotz vereinfachend angenommen, dass die Regenschreiberinformation in die Fläche extrapoliert werden kann (gleichmäßige Überregnung). Eine kritische Diskussion dieser Vereinfachung unterbleibt häufig, da langjährige, zeitlich parallele Regenzeitreihen mehrerer ortsgültiger Stationen oftmals nicht verfügbar sind. Dabei kann bei großen, hydraulisch zusammenhängenden Mischsystemen eine räumlich-zeitlich ungleiche Niederschlagsverteilung bei relevanten Ereignissen das Entlastungsverhalten deutlich beeinflussen. Eine Alternative zur Verwendung der Regenschreiberpunktinformation ist der Einsatz von Radarregendaten. Radardaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sind seit den 2000er Jahren flächendeckend als kontinuierliche Zeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten für Deutschland und für Grenzgebiete der Anrainerstaaten verfügbar. Unter der Voraussetzung einer sachgerechten Aufbereitung, die u. a. eine Korrektur der regenindizierten Radarsignaldämpfung beinhalten muss, sind Radarregendaten als Belastungsgröße für Kanalnetzmodelle und extremwertstatistische Analysen geeignet (Krämer et al., 2024).

Der vorliegende Beitrag hat das Ziel, die Bedeutung der ungleichmäßigen Überregnung auf das Entlastungsgeschehen von Mischwasserbauwerken am Beispiel des Entwässerungssystems der Stadt Basel zu untersuchen und zu erläutern. Dabei werden die Ergebnisse der Anwendung einer Radarlangzeitereignisserie denen der Verwendung eines einzelnen Regenschreibers gegenübergestellt. Die vergleichende Ergebnisanalyse erfolgt für 72 Mischwasserentlastungsbauwerke mittels hydrodynamischer Schmutzfrachtberechnung, welche im Rahmen der Bearbeitung des GEP 2.0 für die Stadt Basel gewonnen wurde.

## 2 Niederschlagsdaten

Die Lage des verwendeten Radarstandortes und des Regenschreibers in Bezug auf das Einzugsgebiet des Kanton Basel-Stadt sind in Abbildung 1 dargestellt.

## 2.1 Regenschreiber

Messungen des Regengeschehens am Boden im Stadtgebiet von Basel sind nur für die Station Binningen verfügbar. Die Daten des Regenschreibers haben eine zeitliche Auflösung von 10 Minuten.

## 2.2 Radardaten

Für die Erstellung der Radarlangzeitereignissserie wurden die Rohdaten (DX-Produkt) des C-Band Radars Feldberg des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Die Entfernung zwischen dem Radarstandort und dem Regenschreiber Binningen beträgt 48,5 km. Das Rohdatenprodukt hat eine zeitliche Auflösung von  $\Delta t = 5$  Minuten; die räumliche Auflösung der Daten in Polarkoordinaten beträgt  $1^\circ$  Winkelschritt sowie 1 km Feldlänge in radialer Richtung.

Aufgrund der Höhenlage des Radars auf dem Feldberg (1.516 m üNN), der Höhenlage der Stadt Basel (260 m üNN) sowie der Einflüsse aus der Elevation der Radarantenne in Richtung des Stadtgebiets von Basel von  $\alpha = 0,4^\circ$  und der Erdkrümmung erfolgt die Radarregenmessung in einer Höhe von etwa 1.800 m über Basel. Die räumliche Auflösung der Radarmessung in Polarkoordinaten über dem Stadtgebiet beträgt zwischen  $0,7 - 0,9 \text{ km}^2$ .

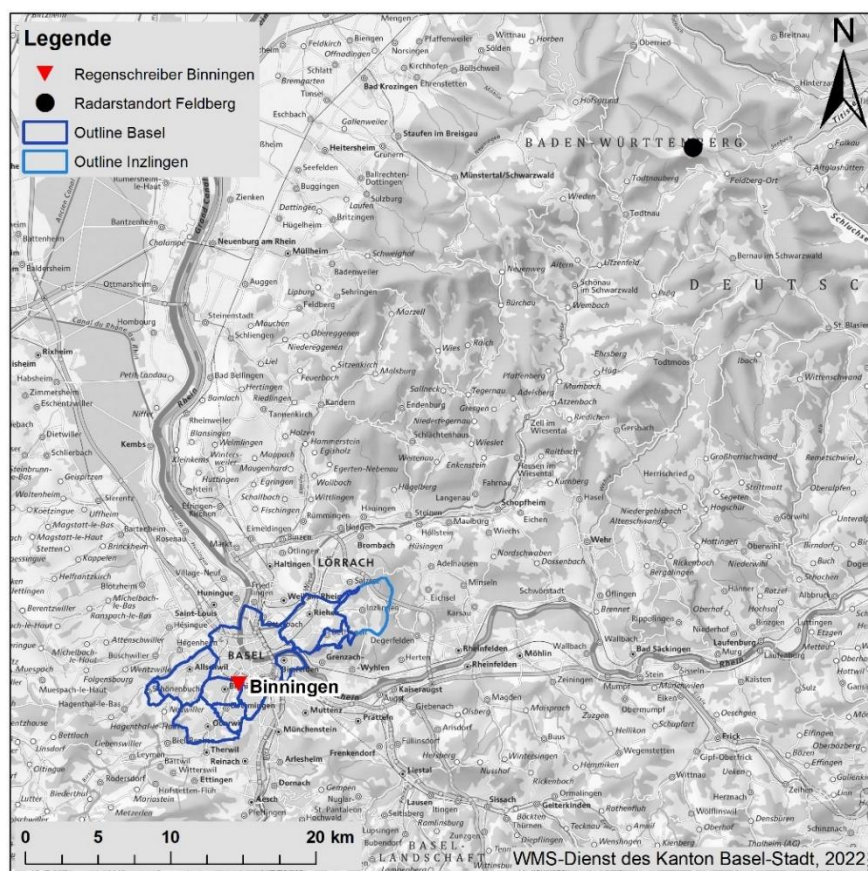


Abbildung 1: Lageübersicht von Radar, Regenschreiber und Untersuchungsgebiet.

## 2.3 Radardatenkorrektur

Die Anwendung von Radarregendaten als direkte Belastungsgröße in der urbanhydrologischen Modelltechnik stellt im Gegensatz zur Modellierung des Niederschlags-Abflussgeschehens natürlicher Einzugsgebiete von Oberflächengewässern besonders hohe Anforderungen an die Auflösung sowie die Richtigkeit und Güte der Radarregendaten. Das hohe Anforderungsniveau resultiert einerseits aus den dynamischen Niederschlagabflussprozessen der versiegelten Flächen und deren räumliche detaillierte Abbildung in den Kanalnetzmodellen auf der Haltungsebene; andererseits aber auch aus den detaillierten Bemessungsvorgaben der Speicher- und Entlastungswasserbauwerke für häufige Ereignisse im Bereich weniger Millimeter Effektivregenhöhe sowie für Kanalisationen im Bereich seltener Starkregenereignisse mit Wiederkehrzeiten von  $T \geq 1$  a bis  $T \leq 5$  a.

Der Standardansatz zur Aufbereitung von Radardaten für quantitative Anwendungsprodukte bei den europäischen Wetterdiensten basiert auf dem Vergleich von Radarregendaten mit einem Messnetz von Bodenbeobachtungen. Auf Grundlage des Stationsvergleichs werden Korrekturfaktoren abgeleitet, mit deren Hilfe die Radarregendaten an die Bodenmessungen angepasst werden. Dieses Vorgehen hat jedoch verschiedene Nachteile:

- Die Radarregenmessung unterliegt physikalischen Einflüssen. Insbesondere die Dämpfung des Radarsignals ist hochnichtlinear; sie kann bei Starkregen (Wiederkehrzeit  $T \geq 1$  a, Dauerstufe  $D \leq 60$  min) innerhalb kurzer Distanzen (1 – 2 km) zur systematischen Unterschätzung der Regenintensität in einer Größenordnung von 35 % und mehr führen (Schleiss et al. 2020). Die vorhandenen Stationsdichten der Regenschreibermessnetze sind i. d. R. zu grob, um das Phänomen der intensitätsabhängigen Signaldämpfung anforderungsgerecht zu erfassen.
- Die räumliche Repräsentativität der Bodenbeobachtung für das zu vergleichende Rasterelement ist eingeschränkt. Untersuchungen zeigen, dass die Unsicherheit in der räumlichen Extrapolation einer einzelnen Bodenbeobachtung auf der Mikroskala, die der Radarrasterauflösung entspricht, sehr groß ist; die Abweichung einer Einzelbeobachtung vom Mittelwert mehrerer Stationen auf einer Fläche von 1 km<sup>2</sup> beträgt im Mittel 25 % (Fiener and Auerswald 2009, Pedersen et al. 2010, Peleg et al. 2013).
- Regenschreibermessungen können Messfehlern oder Umwelteinflüssen wie z. B. Abschattungseinflüssen aus angrenzendem Bewuchs oder Anströmungsturbulenzen aus angrenzender Bebauung unterliegen. Derartige Fehler der Bodenbeobachtung werden durch die Anpassungsverfahren auf die Radardaten aufgeprägt.
- Infolge von Windeinfluss können die in der Atmosphäre gemessenen Regenstrukturen gegenüber der Bodenbeobachtung verdriftet werden. In Abhängigkeit der Regenintensität, der Windgeschwindigkeit und der Höhe der Radarmessung oberhalb der Bodenmessungen kann die Verdriftung bis zu 2 km betragen.

Um diesen Einflüssen entgegenzuwirken, erfolgt die Radardatenaufbereitung zeitschrittweise in zwei Schritten mit dem Programm NVIS-Server:

- Schritt 1: Korrektur physikalischer Einflüsse auf die Radarregenmessung. Dazu gehören die Behandlung von Störechos, die Korrektur der niederschlag-indizierten Radom- und Radarsignaldämpfung, die Umrechnung der Radarreflektivität (Z) in die Zielgröße Regenintensität (R), die Umrechnung von Polarkoordinaten in kartesische Raster in das Zielkoordinatenreferenzsystem des Anwendungsbezugs, sowie die raum-zeitliche Interpolation der 5-minütigen Ausgangsdaten auf 1-Minuten Raster. Diese Korrekturen erfolgen unabhängig von Bodenmessungen; Grundlage sind die Radarrohdaten als Reflektivitätswerte in Polarkoordinaten.
- Schritt 2: In einem nachgelagerten Schritt erfolgt zeitschrittweise die Anpassung der zuvor korrigierten Radarregendaten an verfügbare Bodenbeobachtungen (hier: Regenschreiber Binningen) nach dem Prinzip einer Mean Field Bias Anpassung zur Minimierung eines verbleibenden systematischen Fehlers. Dabei wird u. a. auch der Einfluss von Winddrift im Stationsvergleich von Radar- und Regenschreiberbeobachtung einbezogen. Im Ergebnis liegen hochgenaue Radardaten mit einer zeitlichen Auflösung von  $dt = 5 \text{ min}$  und einer Rasterkantenlänge von 500 m vor.

## 2.4 Erstellung der Regenlangzeitereignisseries

Für die Emissionsberechnungen ist es entscheidend, alle Niederschlagsereignisse zu berücksichtigen, die an einem beliebigen Bauwerk zu einer Entlastung führen können. Erfahrungen aus vergleichbaren Systemen zeigen, dass dies bei ca. 20 – 50 Regenereignissen pro Jahr der Fall sein kann. Diese Entlastungsereignisse können jedoch kanalnetz- und niederschlagsspezifisch stark variieren. Aus diesem Grund erfolgt eine Voranalyse zur Abgrenzung der relevanten Ereignisse aus dem Niederschlagskontinuum der Radaraufzeichnungen der Jahre 2001 bis 2020. Es wird festgelegt, dass der Umfang der Serie so viele Einzelereignisse umfassen muss, dass mindestens 20 % der Einzelereignisse pro Jahr zu keiner Entlastung an einem Entlastungsbauwerk führen. Damit kann sichergestellt werden, dass alle Regenereignisse für eine korrekte statistische Auswertung der Berechnungsergebnisse erfasst werden. Zeitlich parallel zu der Radarlangzeitserie für das Belastungsszenario ungleichmäßige Überregnung aus den Messdaten des Regenschreibers Binningen wird das Belastungsszenario für die gleichmäßige Überregnung zusammengestellt. Die beiden Niederschlagsserien umfassen jeweils identische Ereigniszeiträume.

Für die Untersuchung wurden insgesamt 1.884 relevante Regenereignisse ermittelt (94 Ereignisse / Jahr). Die Kriterien für die verwendete Auswahl der Regenereignisse für die Regenserien sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Kriterien zur Auswahl der Regenereignisse für die Radarregenserie.

Kriterium	[-]	Wert
Trockenäquivalent - Mindestintensität	mm/5min	0,1
Mindestregensumme	mm	2,5
Ereignistrennzeit	h	4

## 2.5 Ergebnisse der Radarlangzeitserie

Zur Verdeutlichung der Qualität der Radarregendatenaufbereitung sowie der Ungleichmäßigkeit der Überregnung zeigt Abbildung 2 beispielhaft die Radar-Regenschreiberstationsvergleiche für zwei Ereignisse der Langzeitserie für unterschiedliche Ereignischarakteristiken. Dargestellt sind jeweils die Ganglinien aus der Regenschreiberbeobachtung (rot), des zugehörigen Radarrasterelementes oberhalb der Regenschreiberstandortkoordinate (schwarz) sowie der direkt angrenzenden Rasterumfelder (grau); in Blau abgebildet ist das Rasterelement mit der besten Übereinstimmung mit der Regenschreiberbeobachtung. Besonders offensichtlich ist für das konvektive Ereignis vom 10. Mai 2018 die hohe räumliche Variabilität des Regeregeschehens, die sich in der Bandbreite der Radarganglinien der angrenzenden Raster zeigt sowie die extreme Niederschlagsintensität. Demgegenüber steht der Ereigniszeitraum vom 30. April bis 2. Mai 2015, der durch gleichmäßige, langanhaltende Niederschläge geringer und mittlerer Intensität geprägt ist.

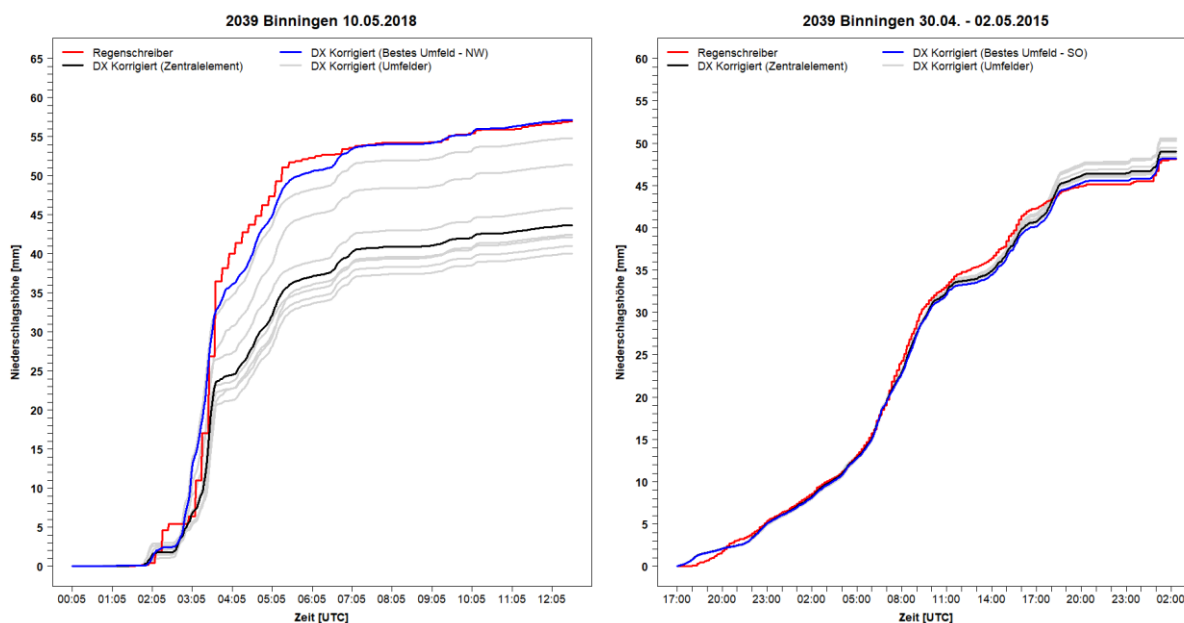


Abbildung 2: Stationsvergleiche von Regenschreiberbeobachtung und korrigierten Radarregenhöhen unterschiedlicher Ereignischarakteristiken, links: 10.05.2018 (konvektiv), rechts: 30.04.-02.05.2015 (stratiform).



In Abbildung 3 ist die zu den beiden Ereignissen zugehörige räumliche Verteilung der Radarregenhöhen dargestellt. Die ausgeprägte räumliche Variabilität und Ungleichmäßigkeit der Überregnung wird besonders für das konvektive Ereignis vom 10. Mai 2018 deutlich.

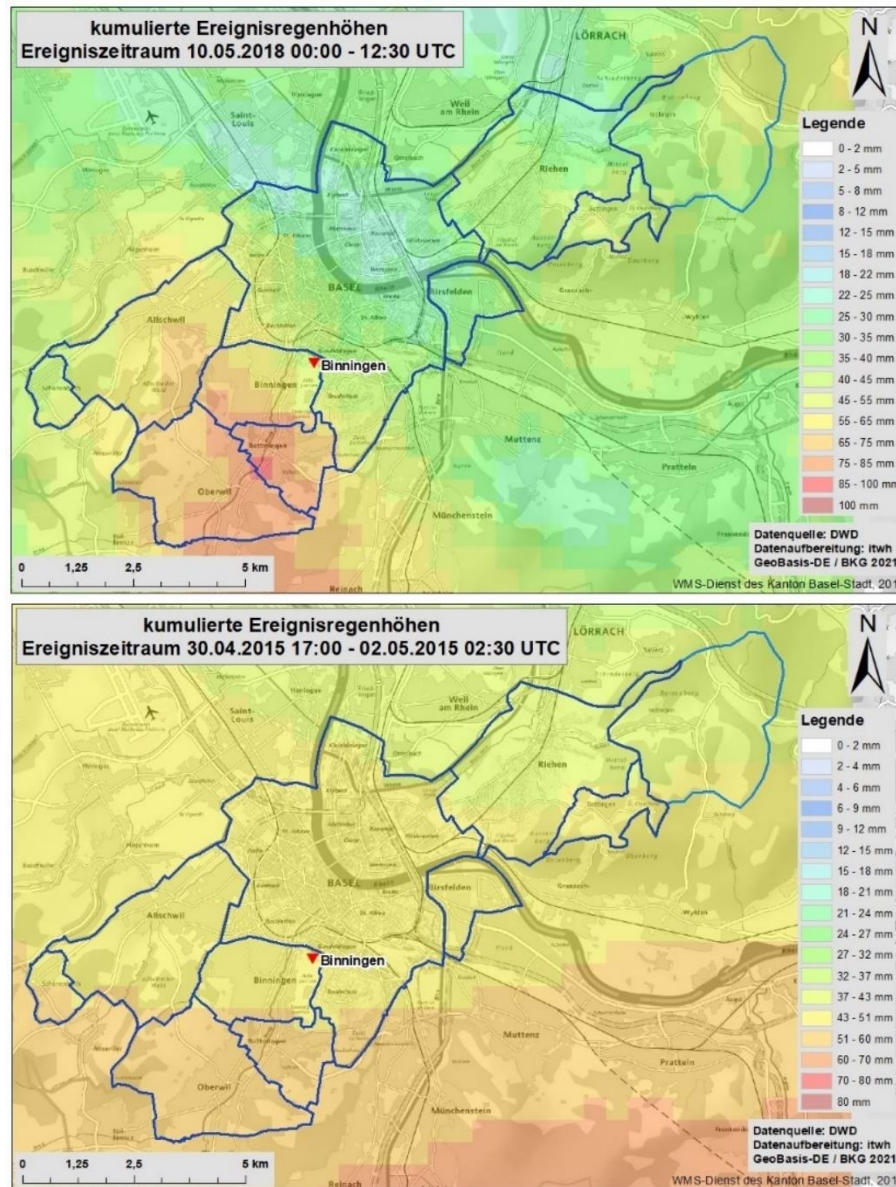


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der Radarregenhöhen für unterschiedliche Ereignischarakteristiken und dem Regenschreiber Binningen, oben: 10.05.2018 (konvektiv), unten: 30.04.-02.05.2015 (stratiform).

Von übergeordnetem Interesse ist die Frage, ob eine räumliche Verteilung der Regenhöhen im Stadtgebiet besteht. Abbildung 4 enthält eine Kumulation der Radarregenhöhen für die 1.884 Ereignisse aus dem Zeitraum 2001 – 2020. Auffällig ist, dass die Regenhöhen im Stadtzentrum von Basel geringere Niederschlagshöhen aufweisen als in den angrenzenden Nachbargemeinden.

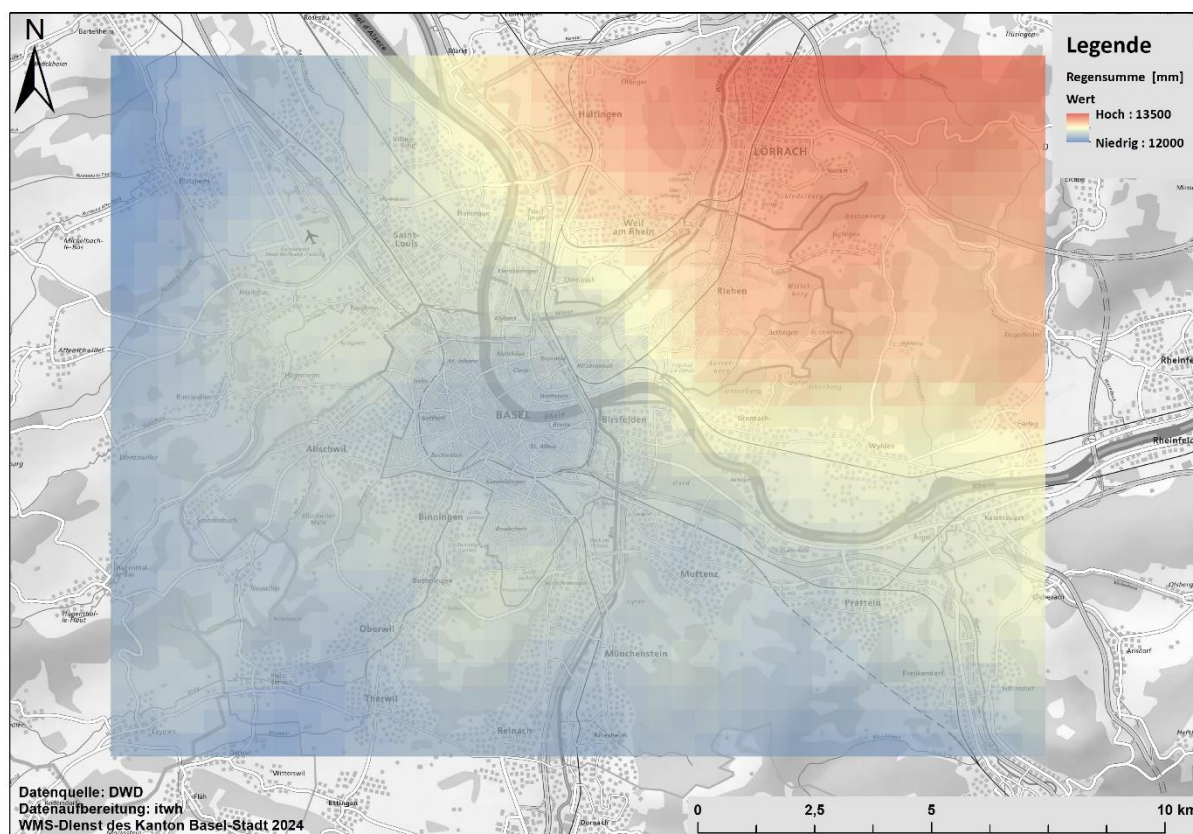


Abbildung 4: Kumulierte Regenhöhen der Radarlangzeitereignissreihe, 1.884 Ereignisse aus dem Zeitraum 2001 – 2020.

## 2.6 Räumliche Verteilung statistischer Starkregenhöhen

Um weitere Erkenntnisse über die räumliche Regenverteilung zu erhalten, wurde eine Untersuchung der Radarlangzeitserie für die Starkregenereignisse mit einer Wiederkehrzeit  $T > 1a$  durchgeführt. Dabei wurde für jedes einzelne Rasterelement (Kantenlänge:  $500 \times 500m$ ) im Stadtgebiet jeweils eine partielle Serie der Starkregenhöhen gemäß DWA-A 531 gebildet. Die Bildung der partiellen Serien erfolgte losgelöst vom Ereignisgeschehen, d. h., räumlich und zeitlich unabhängig von den Regenstrukturen und Werten der benachbarten Radarraster.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Radarregenhöhen für die Wiederkehrzeit  $T = 5a$  beispielhaft für die Dauerstufen  $D = 15 \text{ min}$  und  $D = 60 \text{ min}$ . Die dargestellten statistischen Regenhöhen zeigen erneut das zuvor festgestellte räumliche Muster: Während im Stadtzentrum Basels geringe Regenhöhen (hellblau) festzustellen sind, zeigen die südlichen und westlichen Umlandgemeinden sowie nordöstlich in Bettingen größere Regenhöhen (dunkelblau). Die Bandbreite der abgebildeten Regenhöhen beträgt für die Dauerstufe  $D = 15 \text{ min}$   $10 - 15 \text{ mm}$  und für  $D = 60 \text{ min}$   $16 - 28 \text{ mm}$ . Die Differenzen sind deutlich ausgeprägter als in der Abbildung 4 für die Kumulation der Regenhöhen über alle Ereignisse.



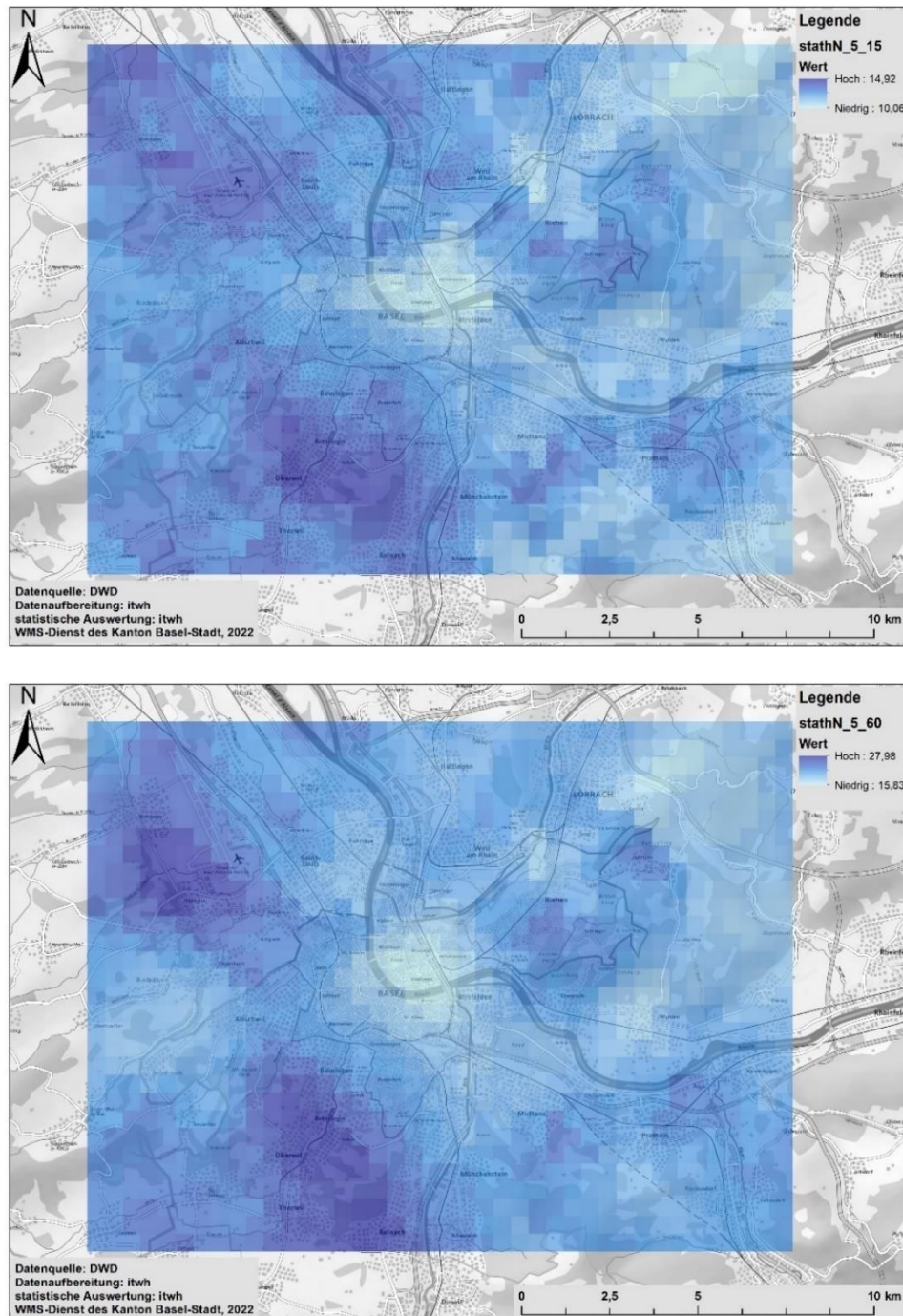


Abbildung 5: Statistische Radarregenhöhen in Basel, Wiederkehrzeit  $T = 5$  a, oben:  $D = 15$  min, unten:  $D = 60$  min.

Eine weitergehende Diskussion über die Ursachen der räumlichen Ausprägung der Regenhöhen wird an dieser Stelle nicht geführt. Allerdings legen verschiedene Untersuchungen nahe, dass die Landnutzung und die damit verbundene unterschiedliche Aufheizung natürlicher und versiegelter Oberflächen, die Entstehung und räumliche Ausprägung konvektive Regenereignisse beeinflusst (vgl. Kingfield et al. 2018, Liu and Niyogi 2019).

### 3 Langzeitanalyse des Entlastungsverhaltens

Die Stadt Basel wird überwiegend im Mischsystem entwässert. Aus hydraulischen, technischen und wirtschaftlichen Gründen sind im Ableitungssystem des Stadtgebietes 72 Entlastungsanlagen angeordnet, über die das Mischwasser bei Regenwetter in die Gewässer eingeleitet werden kann.

Die VSA-Richtlinie „Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter, Basismodul“ aus dem Jahr 2019 behandelt unter anderem den Umgang mit entlastetem Mischwasser und gibt Hinweise, welches Wasser in das Grundwasser oder ein oberirdisches Gewässer eingeleitet werden darf. Gemäß der VSA-Publikation „Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter, Modul B“ liegt der an sämtlichen Entlastungsstellen einzuhaltende Grenzwert bei 2 Prozent der jährlichen Gesamtfracht an Ammonium.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wird das Entwässerungssystem Basel Stadt mittels modelltechnischer Berechnungen hinsichtlich der Emissionen bewertet. Dazu wurde untersucht, welche Auswirkungen die Analyse des Entlastungsverhaltens für die Anwendung einer Radarlangzeitereignisserie gegenüber der bisherigen Verwendung der gleichmäßigen Überregnung mit Regenschreiberdaten hat. Die Gegenüberstellung wurde für die Jahresmittelwerte der Kenngrößen mittlere Entlastungsfrachten ( $\text{kg NH}_4\text{-N pro Jahr}$ ) und Entlastungshäufigkeit (Tage pro Jahr) durchgeführt.

#### 3.1 Schmutzfrachtmodell

Aufgrund der komplexen, vermaschten und z. T. rückstaubehafteten Netzstruktur werden die Untersuchungen mit dem hydrodynamischen Niederschlag-, Abfluss- und Schmutzfrachtmodell HYSTEM-EXTRAN durchgeführt. Die Berechnung der Schmutzfrachten im Kanalnetz erfolgt dabei mit Hilfe der eindimensionalen Konvektions-Dispersions-Massentransport-Differentialgleichung.

Als Grundlage steht ein aktuelles Kanalnetzmodell der Stadt Basel zur Verfügung (Abbildung 6). Das verwendete Modell hat eine Länge von 380 km und eine angeschlossene befestigte Fläche von 1.787 ha. Die Profilhöhen der Kanäle variieren zwischen 150 mm und 3500 mm. Der mittlere Trockenwetterzufluss  $Q_{T,aM}$  zur ARA Basel beträgt 743 L/s. Das Modell wurde anhand von Niederschlag-Abfluss-Messungen kalibriert.

Für den Nachweis der Emissionen aus der Mischwasserkanalisation der Stadt Basel ist es notwendig, das gesamte Einzugsgebiet der ARA-Basel zu bewerten. Für die Berücksichtigung der in das Kanalnetz der Stadt Basel einleitenden kommunalen Abwässer von benachbarten Gemeinden ist es erforderlich, die mittleren Trockenwetterabflüsse und -konzentrationen sowie das Verhalten bei Niederschlag abzubilden. Da für die betrachteten Nachbargemeinden keine HYSTEM-EXTRAN Modelle oder entsprechende Abflussganglinien zur Verfügung stehen, werden die Einzugsgebiete durch vereinfachte Ersatzsysteme für 17 Einleitungsstellen mit einer angeschlossenen befestigten Fläche von 531 ha abgebildet.

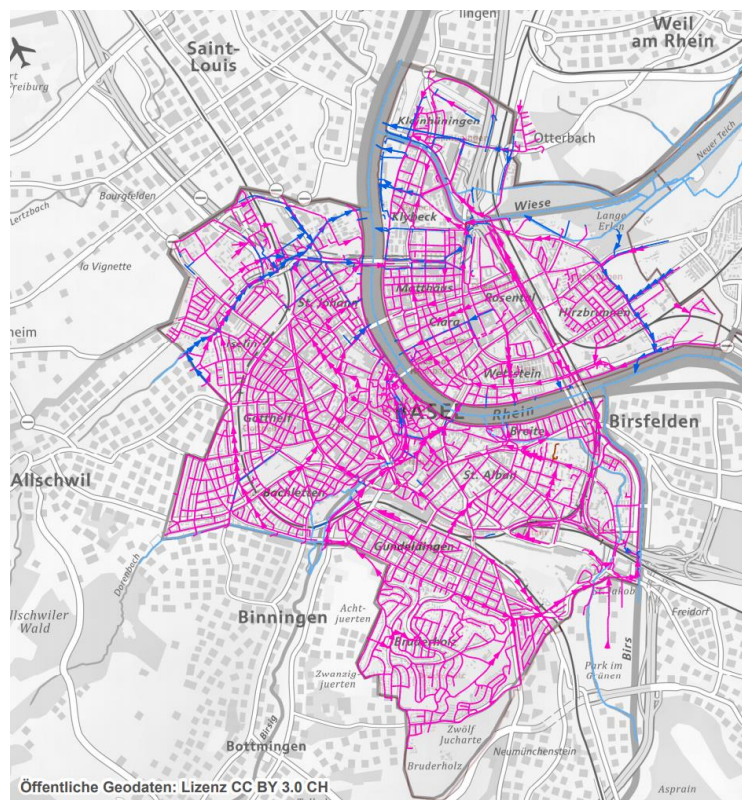


Abbildung 6: Kanalnetzmodell Basel-Stadt.

Zur Bewertung der Entlastungsfrachten muss im Modell die im Kanalnetz transportierte Fracht für den Nachweisparameter Ammonium-Stickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) definiert werden. Hierzu wird entsprechend den Vorgaben des Regelwerks von unbelastetem Niederschlagswasser ( $c_{r,\text{NH}_4\text{-N}} = 0 \text{ mg/L}$ ) ausgegangen. Zur Ermittlung einer mittleren langjährigen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht wird die Güte-Beprobung des Zulaufs der ARA-Basel aus den Jahren 2019 bis 2021 ausgewertet (Abbildung 7). Dabei werden 111 Tage mit Güte-Beprobung und davon 57 Tage mit Trockenwetter erfasst. Die Auswertung erfolgt für die TN-Fracht bei Trockenwetter, da für  $\text{NH}_4\text{-N}$  keine Werte erhoben wurden.

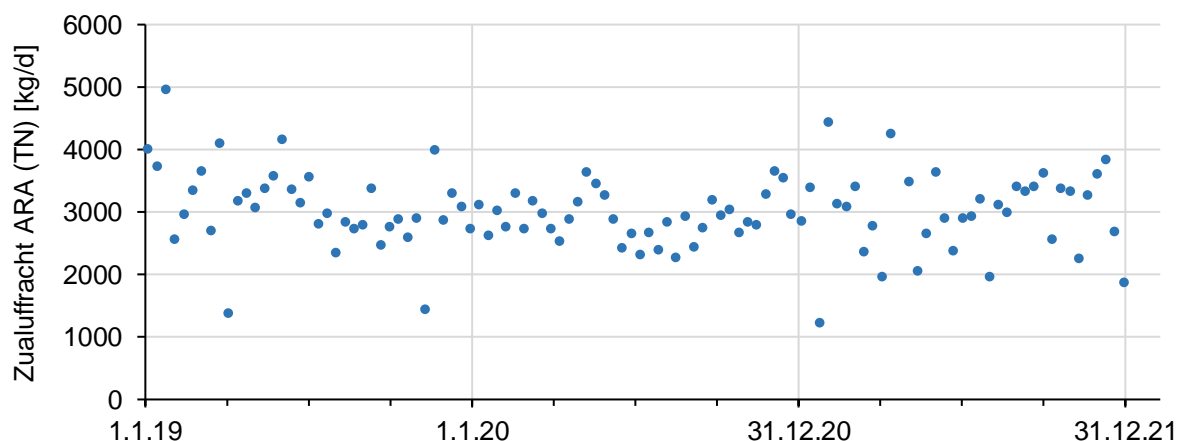


Abbildung 7: Tagesfrachten im Zulauf zur ARA-Basel (TN)

Um die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Belastung zu bewerten, wurde im Februar 2022 eine temporäre Ermittlung vom  $\text{NH}_4\text{-N}$  : TN-Verhältnis im Zulauf zur ARA durchgeführt. Aus der Auswertung der Messungen geht hervor, dass das Verhältnis  $\text{NH}_4\text{-N}$  : TN ca. 0,7 : 1 beträgt. Durch Übertragung dieses Stoffverhältnisses auf die langjährige Auswertung (Abbildung 7) lässt sich die mittlere  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht und über den langjährigen Trockenwetterabfluss die mittlere Trockenwetterkonzentration berechnen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Trockenwetterauswertung Güte (Median).

	<b>B_gesamt [kg/d]</b>	<b>B_TW [kg/d]</b>	<b>c<sub>TW</sub> [mg/l]</b>
<b>CSB</b>	44.318	44.562	694
<b>TOC</b>	9.630	9.605	150
<b>AFS</b>	21.819	21.428	334
<b>TN</b>	2.978	2.900	45
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	Verhältnis	TN : NH <sub>4</sub> -N   1 : 0,7	32

### 3.2 Gegenüberstellung der Berechnungen mit Radarregendaten und der gleichmäßigen Überregung auf Grundlage eines Regenschreibers

In Übereinstimmung mit den Vorgaben der VSA-Richtlinie soll die Ermittlung der Entlastungsfracht durch eine Langzeitsimulation des Mischabwassernetzes unter Berücksichtigung historischer Regendaten erfolgen. Es werden keine weiteren Hinweise oder Vorgaben hinsichtlich der zu verwendenden Regenreihe formuliert. In der gängigen Praxis erfolgt dazu eine Langzeitsimulation unter Verwendung von Regenschreiberinformationen. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die Messungen in die Fläche extrapoliert werden können, d. h., dass eine gleichmäßige Überregnung stattfindet. In Bezug auf Basel-Stadt sind ausschließlich die Daten des Regenschreibers Binningen mit einer hinlänglichen Dauer und zeitlichen Auslösung verfügbar. Im Rahmen der Nachweisführung erfolgt eine Bewertung der Auswirkungen, welche die Berechnungen mit einer räumlich-zeitlich ungleichen Niederschlagsverteilung, basierend auf Radarregendaten, gegenüber den Resultaten einer gleichmäßigen Überregnung aufweisen.

### 3.3 Ergebnisse der Berechnungen

In der Abbildung 8 erfolgt eine Gegenüberstellung der mittels Radarregen- und Regenschreiberdaten berechneten mittleren  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Entlastungsfrachten. Des Weiteren wird die jeweilige, bauwerksbezogene prozentuale Abweichung angegeben. In der Abbildung sind die 21 Mischwasserentlastungsbauwerke dargestellt, welche mittlere Entlastungsfrachten von mehr als 10 kg  $\text{NH}_4\text{-N/a}$  aufweisen.

Die vergleichende Analyse belegt, dass die Ammonium-Stickstoff-Entlastungsfrachten an allen Mischwasserbauwerken bei den Berechnungen mit ungleichmäßiger Überregnung aus Radarregen geringer sind als bei der gleichmäßigen Überregnung aus der Regenschreiberbeobachtung. Die mittlere Differenz für das Betrachtungsgebiet beträgt 15,2 % (2.036 kg  $\text{NH}_4\text{-N/a}$ ). Dabei ist zu bemerken, dass mit 13.448 kg  $\text{NH}_4\text{-N/a}$



N/a ca. 85 % der insgesamt 15.445 kg  $\text{NH}_4\text{-N/a}$  der mittleren jährlichen Entlastungsfrachten über das Regenüberlaufbauwerk auf der Kläranlage (Bauwerk Nr. 1 in Abbildung 8) erfolgen. Die mittlere Jahresdifferenz der Entlastungsfracht beträgt für dieses Bauwerk 14 %. Für die Mischwasserbauwerke mit geringerer Entlastung ergeben sich Differenzen zwischen 11 % und 62 %; der Mittelwert liegt bei 22 %.

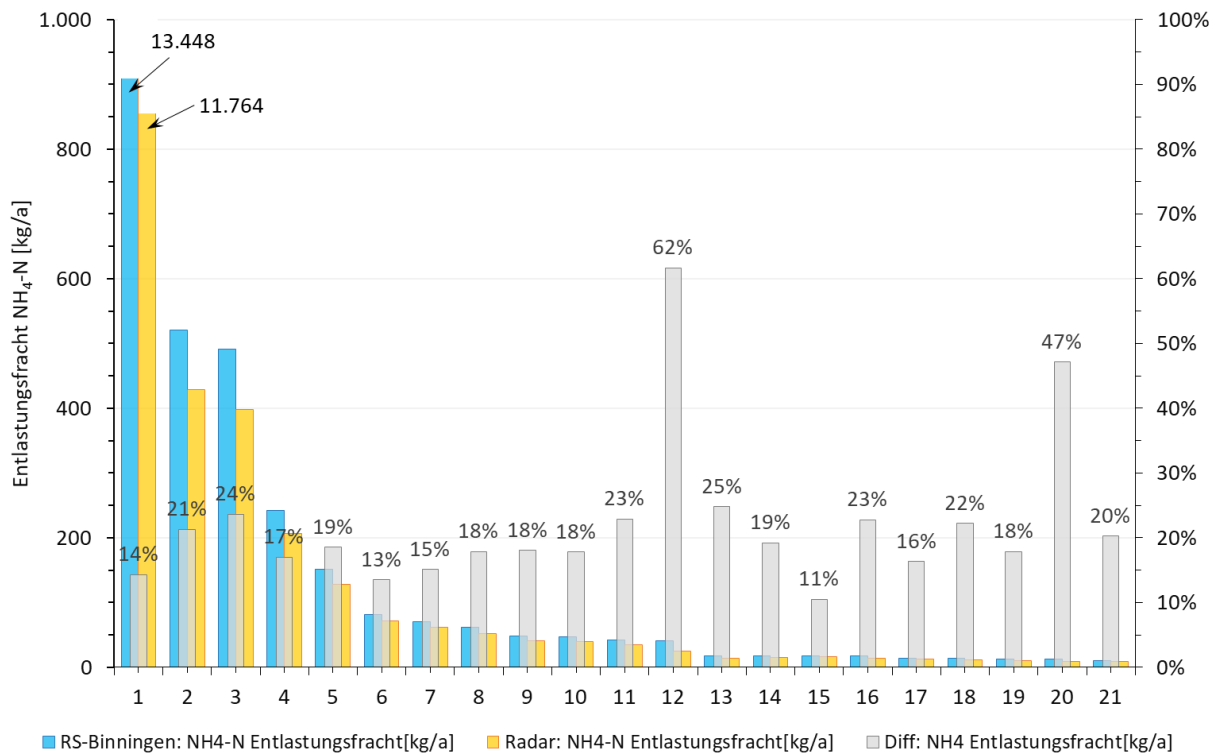


Abbildung 8: Bauwerke mit mittlerer  $\text{NH}_4\text{-N}$  Entlastungsfracht bei Nutzung von Radarregendaten und Regenschreiberdaten (Auswahl mittlere Entlastungsfrachten  $> 10 \text{ kg } \text{NH}_4\text{-N/a}$ ).

Abbildung 9 zeigt analog die Berechnungsergebnisse für die mittlere Anzahl der Kalendertage mit Entlastungen für die Berechnungsergebnisse der verschiedenen Niederschlagsbelastungen. Zusätzlich ist die jeweilige bauwerksbezogene prozentuale Abweichung der Tage bezogen auf die Radarregenergebnisse angegeben. Dargestellt sind die 31 Mischwasserentlastungsbauwerke, an denen im Mittel an mindestens 10 Kalendertagen pro Jahr Entlastungen berechnet werden.

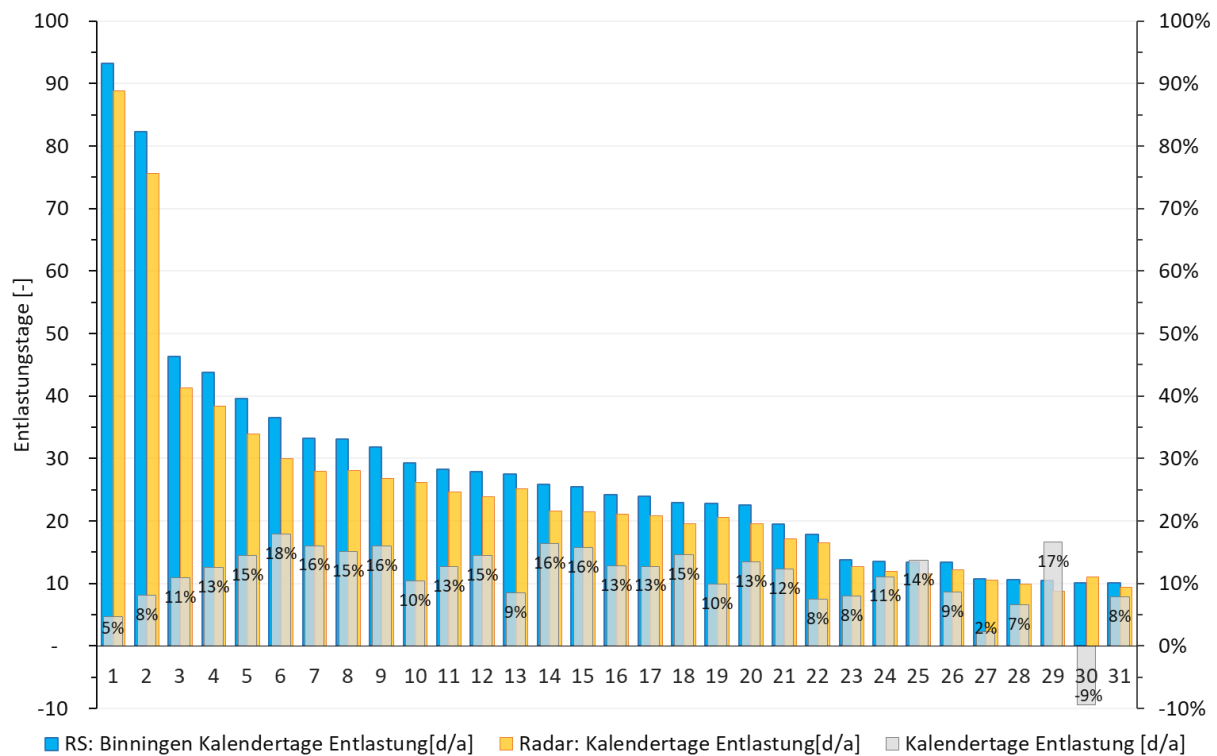


Abbildung 9 Bauwerke mit Angabe der mittleren Anzahl von Kalendertagen mit Entlastungen bei Nutzung von Radarregendaten und Regenschreiberdaten (Auswahl Bauwerke mittlere Entlastungstage > 10 Tage/a).

Die Differenzen bezüglich der Entlastungstage an den einzelnen Bauwerken liegen zwischen -9 % und 18 % gegenüber den Radarregenergebnissen. Der Vergleich zeigt, dass die mittlere Anzahl der Kalendertage mit Entlastungen bei der Berechnung mit Radarregendaten ca. 11 % geringer ist als bei der gleichmäßigen Überregnung mit einem Regenschreiber. Die Anzahl der Entlastungstage ist lediglich an einem Bauwerk geringer (Bauwerk 30).

Die Ergebnisse weiterer Auswertungen im Rahmen dieser Untersuchung legen nahe, dass die Abweichungen der Entlastungsmengen tendenziell größer werden, je kleiner die Einzugsgebiete des zugehörigen Mischwasserbauwerks werden. Der Effekt eines Ausgleichs durch längere Fließzeiten im Einzugsgebiet nimmt mit der Gebietsgröße ab. Des Weiteren nimmt die Differenz mit zunehmender Entfernung der Entlastungsanlagen zum Stadtzentrum zu. Diese Beobachtung erscheint plausibel vor dem Hintergrund der räumlichen Verteilung der Radarregenhöhen in Abhängigkeit von den orographischen Gegebenheiten und Einflüssen der Landnutzung (städtische Gebiete) (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5). Die Niederschlagssummen im Stadtzentrum sind erkennbar geringer als im umliegenden Bereich.

## 4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Radarlangzeitanalyse für 1.884 Ereignisse aus dem Zeitraum 2001 – 2020 mit einer zeitlichen Auflösung von  $\Delta t = 5$  min und einer räumlichen Diskretisierung von  $500 \times 500$  m zeigen ein räumliches Muster in der Niederschlagsverteilung im Stadtgebiet von Basel. Offensichtlich sind im Kanton Basel-Stadt gegenüber den angrenzenden Nachbargemeinden geringere Gesamtniederschlagshöhen für die vollständige Radarlangzeitserie in einer Größenordnung von etwa bis zu 10 %. Die Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Niederschlagshöhen verstärken sich für seltenere Starkregenereignisse mit Wiederkehrzeiten  $T > 1a$ , die relevant sind für die hydraulische Bemessung von Kanalisationen, auf Größenordnungen von bis zu 30 % bis 40 %.

Die räumliche Niederschlagsvariabilität spiegelt sich in den Ergebnissen der hydrodynamischen Schmutzfrachtberechnung innerhalb der vergleichenden Betrachtung der Ereignisseries aus Radarregen und Regenschreiberbeobachtung wider. In der Gesamtbetrachtung des Entwässerungssystems ist die Entlastungsfracht für die betrachtete Zielgröße  $NH_4-N$  für das Belastungsszenario der ungleichmäßigen Überregnung mit Radarregendaten um etwa 15 % geringer als für die gleichmäßige Belastung aus Regenschreiber. In der Einzelbetrachtung der Entlastungsbauwerke, insbesondere bei denen mit kleinen Einzugsgebieten sind die Entlastungsfrachten überwiegend in der Bandbreite von 20 bis 25 % geringer. Für die Zielgröße Entlastungstage pro Jahr resultiert eine um etwa 11 % geringere Entlastungstätigkeit für die Radarregenbelastung.

Damit ist zu schließen, dass die bisherige Annahme einer gleichmäßigen Überregnung aus einer einzelnen Regenschreiberbeobachtung erhebliche Unsicherheiten bei der Bewertung der einzelnen Mischwasserbehandlungsanlagen beinhaltet. Die Verwendung von Radarregendaten eröffnet die Möglichkeit, die tatsächliche Leistungsfähigkeit der Systeme auf präzisere Weise abzubilden und zu bewerten, da sie eine genauere Abbildung der Ungleichmäßigkeit der Überregnung erlaubt. Dies kann dazu beitragen, die Einleitungen in die Gewässer realitätsnah zu bewerten und somit die Anforderungen an erforderliche Sanierungen für den Gewässerschutz zielgenau zu bestimmen.

## 5 Literatur

- DWA-A 531, Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer (September 2012), Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- Fiener and Auerswald (2009): Spatial variability of rainfall on a sub-kilometre scale, *Earth Surf. Process. Landforms* 34, 848–859, <https://doi.org/10.1002/esp.1779>.
- Kingfield M.D, Calhoun K.M., de Beurs K.M. and Henebry G.M. (2018): Effects of City Size on Thunderstorm Evolution Revealed through a Multiradar Climatology of the Central United States, *Journal of Applied Meteorology*, 57(2), 295-317. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0341.1>.
- Krämer S., Leberke H., Fitzner Pukade D., Zimmermann U., Lindenberg M. (2024): Die Bedeutung der räumlichen Niederschlagsbelastung für die Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen, *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 71 (9), 694-707, <https://doi.org/10.3242/kae2024.09.001>.
- Liu, J., Niyogi D. (2019): Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Sci Rep* 9, 7301. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42494-2>.
- Pedersen L., Jensen, N.E., Christensen L.E., Madsen H. (2009): Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges; *Atmos. Res.* 95, 441–454; <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.11.007>.
- Peleg N., Ben-Asher M., Morin E. (2013): Radar subpixel-scale rainfall variability and uncertainty: lessons learned from observations of a dense rain-gauge network. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17. 2195–2208.
- Schleiss M., Olsson J., Berg P., Niemi T., Kokkonen T., Thorndahl S., Nielsen R., Ellerbæk Nielsen J., Bozhinova D., Pulkkinen S. (2020): The accuracy of weather radar in heavy rain: a comparative study for Denmark, the Netherlands, Finland and Sweden. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24. 3157–3188. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3157-2020>.
- VSA-Richtlinie (2019) , Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter, Basismodul, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, 2019.

### Korrespondenz an:

Stefan Krämer, itwh GmbH  
Engelbosteler Damm 2  
30167 Hannover, Deutschland  
+49 (0)511 97193 - 38  
[s.kraemer@itwh.de](mailto:s.kraemer@itwh.de)