

Substanzmapping in komplexen urbanen Gewässersystemen mittels einfacher dynamischer Modellierung

Daniel Wicke¹, Michael Rustler¹, Malte Zamzow¹, Christoph Sprenger¹, Nasrin Haacke¹, Josefine Filter², Jens Burgschweiger², Regina Gnirss², Andreas Matzinger¹

¹ Kompetenzzentrum Wasser Berlin, Grunewaldstraße 61-62, 10825 Berlin, Deutschland

² Berliner Wasserbetriebe, Neue Jüdenstraße 1, 10179 Berlin, Deutschland

Kurzfassung: Für das Wassermanagement urbaner Gewässersysteme werden schnelle und zugleich ausreichend belastbare Modellansätze benötigt, um beispielsweise Stoffeinträge, Abwasseranteile oder Auswirkungen zukünftiger Randbedingungen bewerten zu können. Am Beispiel Berlins wurde hierfür das *Berlin Water Model* als vereinfachtes dynamisches Mischungsmodell entwickelt, das für 35 Gewässerabschnitte Durchflüsse, Stoffkonzentrationen sowie Anteile von gereinigtem Abwasser, Regenabfluss und Mischwasserüberläufen in stündlicher oder täglicher Auflösung berechnet. Die Validierung mit Ergebnissen hydrodynamischer Modelle und Messdaten zeigt eine gute Übereinstimmung, auch bei Sonderfällen wie Fließumkehr. Mit dem Modell können Hotspots und Überschreitungshäufigkeiten identifiziert und die Ergebnisse als Karte dargestellt werden. Das Modell eignet sich somit für Substanzmapping und Szenarienrechnungen zur Unterstützung des Berliner Wassermanagements.

Key-Words: Gewässerbelastung, Stoffeinträge, Modellierung

1 Hintergrund

Das Berliner Gewässersystem ist durch den hohen Anteil an Uferfiltration die hauptsächliche Trinkwasserquelle Berlins. Auswirkungen des Klimawandels wie niedrigere Durchflüsse der Oberflächengewässer vor allem im Sommer, ein damit erhöhter Anteil gereinigten Abwassers und der Einfluss von Regenabfluss und Mischwasserüberläufen (MWÜ) stellen sowohl die Berliner Wasserversorgung als auch die Gewässer an sich vor steigende Herausforderungen. Das komplexe Berliner Gewässersystem mit Seen, vielen künstlichen Kanälen und flacher Topographie (mit teilweiser Fließumkehr bei niedrigen Zuflüssen), ist bisher nur mit komplexen hydraulischen Modellen gut abbildbar. Außerdem gibt es sehr vereinfachte statische Modellansätze, die jedoch zeitlich dynamische Einträge wie Regenabflüsse und MWÜ nicht berücksichtigen. Für die Rechnung langer Zeitreihen und Sensitivitätsanalysen wird ein vereinfachtes, recheneffizientes Modell benötigt, das die Vielzahl der Quellen berücksichtigt sowie die hohe zeitliche Dynamik von Substanz-Peaks und die

hydraulischen Phänomene adäquat abbildet. Ziel der Modellanwendung ist die Unterstützung des Wassermanagements, insbesondere die Ermittlung von langjährigen Häufigkeiten von hohen Abwasseranteilen (Klärwerke, MWÜ, Regenabflüsse), die Identifikation von Hotspots und „Hot-times“, schnelle Szenarienrechnungen verschiedener Zukunftsszenarien, sowie die Abschätzung möglicher Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen (z.B. aus dem Masterplan Wasser Berlin, SenMVKU 2022).

Am Beispiel des komplexen Berliner Gewässersystems wurde ein vereinfachtes, dynamisches Mischungsmodell (Berlin Water Model, kurz BWM) als Emulator aufgebaut. Der Modellansatz kann aufgrund der einfachen Konfigurierbarkeit (csv-Dateien) auch auf andere Standorte übertragen werden.

2 Methodik

Das Berlin Water Model wurde als Gewässermodell mit 35 Gewässerabschnitten in R umgesetzt (Rustler et al. 2026). Mathematisch wird das Gewässernetz als Abfolge gemischter Reaktoren betrachtet, so dass für jeden Gewässerabschnitt die Konzentration von Tracern und gewünschten Substanzen über die Zeit mit einer vereinfachten Differenzialgleichung in stündlicher oder täglicher Auflösung berechnet werden kann. Datengrundlage ist ein 21-jähriger Datensatz (2002-2022) verschiedener Inputdaten, die im Modell zusammengeführt wurden (Abbildung 1): Zuflüsse (Daten SenMVKU), Einträge aus Klärwerken (Daten BWB), Regenabfluss der Trennkanalisation (Daten ABIMO, Del Punta et al. 2025 und DWD) und Mischwasserüberläufen (Knoche et al.

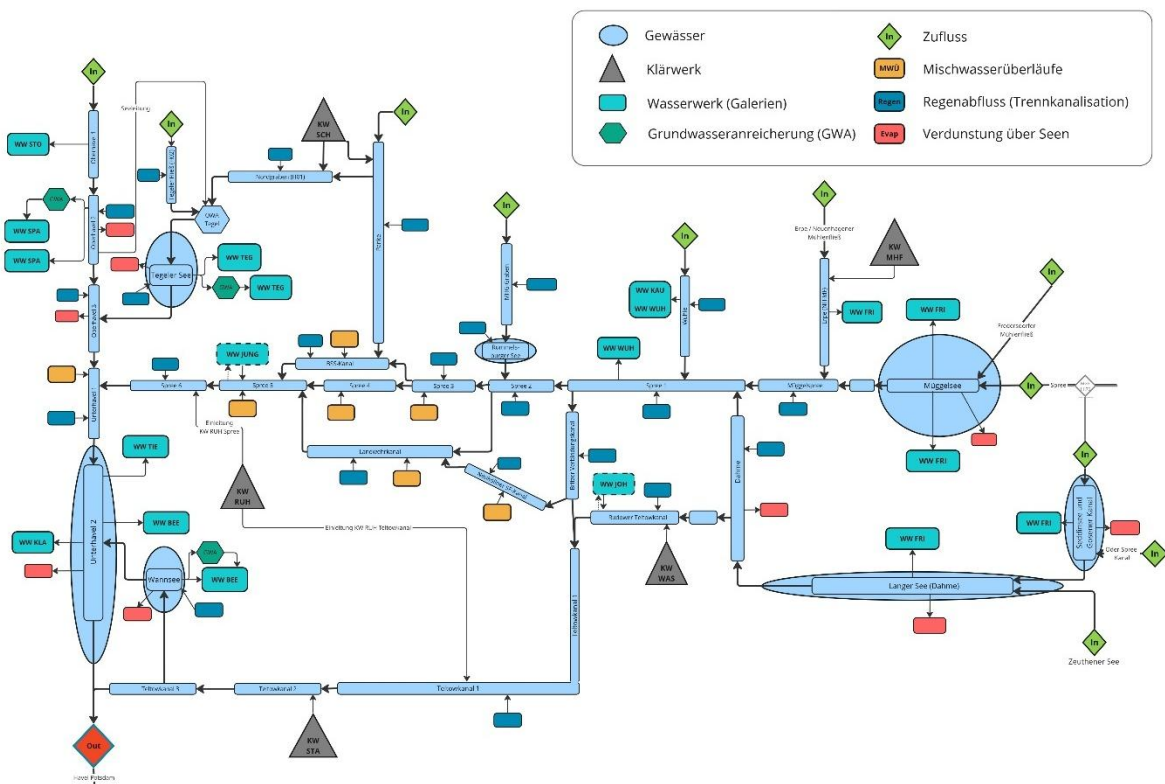


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Berlin Water Model mit In- und Outputs.

2022), Entnahmen von Wasserwerken über Uferfiltration (Daten BWB) sowie Verdunstung und Direktregen in die Gewässer (Daten DWD). Als Regenreihe wird eine Zeitreihe mit Stundenwerten des DWD-Regenschreibers Tempelhof verwendet (einziger Regenschreiber Berlins mit Stundenwerten für Gesamtzeitraum). Zur Bestimmung der Einträge der Regenwasserabflüsse der Trennkanalisation in die Gewässer wurde aus Ergebnissen des Wasserhaushaltsmodells ABIMO (mittlere Jahresabflüsse der Einzugsgebiete der Trennkanalisation für einzelne Gewässerabschnitte) spezifische Abflusskoeffizienten je Gewässerabschnitt ermittelt und mit der DWD-Regenreihe des Regenschreibers Tempelhof verknüpft. Zukünftig sollen zudem Regenrasterdaten des DWD verwendet werden, um lokale Unterschiede der Niederschlagsverteilung besser abzubilden. Für die Einträge aus Mischwasserüberläufen können entweder Zeitreihen für Überlaufmengen verwendet werden, die mit dem hydrodynamischen Kanalnetzmodell Infoworks für 14 Überlaufereignisse sowie die Jahre 2016 und 2017 (Mai – Oktober) berechnet wurden, oder eine aus diesen Ergebnissen abgeleitete Korrelation zwischen Gesamtüberlaufmengen je Regenereignis und den Regenhöhen. Die mittels Korrelation ermittelten Gesamtmengen wurden dann über den mittleren Anteil der Infoworks-Ergebnisse auf die sieben Gewässerabschnitte mit MWÜ-Einträgen aufgeteilt (siehe Abbildung 1) und die zeitliche Aufteilung der Gesamtmenge je Überlaufereignis analog der Regendaten vorgenommen. Auf diese Weise können für den gesamten Zeitraum 2002-2022 MWÜ-Einträge in stündlicher Auflösung ermittelt werden. Als Uferfiltratsanteile wurden für die hier gezeigten Ergebnisse fixe Werte je Brunnengalerie verwendet (Werte BWB). Die Verdunstung über großen Gewässerflächen wird nicht über die potentielle Verdunstung ET_0 (Grasreferenzverdunstung), sondern über Werte für die Verdunstung von Seenflächen berücksichtigt (Mittelwert Schönefeld, Tegel, Potsdam; Daten DWD), die insbesondere im Sommer und Herbst höher als ET_0 ist.

Die Kalibrierung der Durchflüsse erfolgte mittels Simulationen des hydraulischen Prozessmodells HYDRAX, insbesondere um Funktionen für die Aufteilung der Durchflüsse bei Verzweigungen zu ermitteln. Dadurch konnten auch Sondersituationen wie Fließumkehr bei niedrigen Zuflüssen berücksichtigt und gut abgebildet werden.

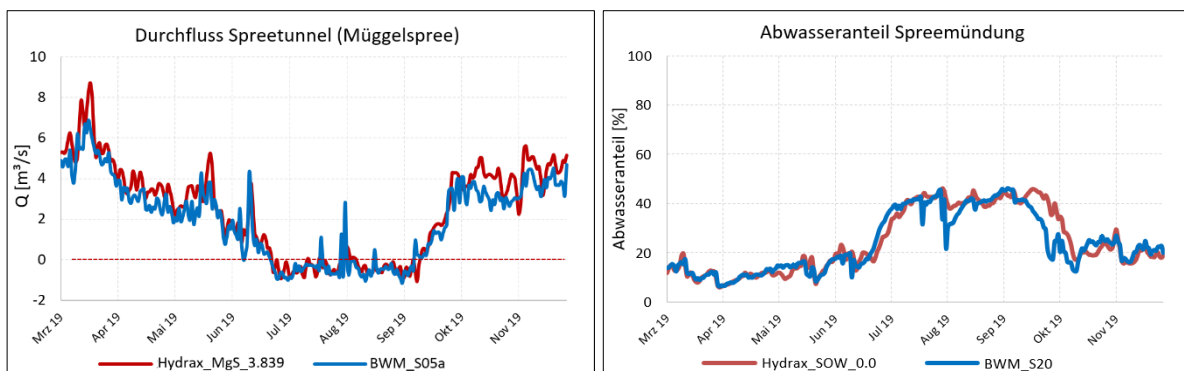


Abbildung 2: Vergleich der Ergebnisse des Berlin Water Model mit Werten des hydraulischen Prozessmodells HYDRAX für das Trockenjahr 2019. Links: Durchflusswerte für einen Gewässerabschnitt mit Fließumkehr (Müggelspree). Rechts: Abwasseranteile an der Spreemündung.

3 Ergebnisse

Zur Validierung des BWM wurde zum einen ein Vergleich mit Ergebnissen des hydrodynamischen Modells HYDRAX/QSim für Durchfluss und Abwasseranteil vorgenommen, die im Rahmen des Masterplan Wasser Berlin für den Zeitraum März-November 2019 berechnet wurden (SenMVKU 2022). Sowohl Durchflüsse als auch Abwasseranteile zeigen dabei eine gute Übereinstimmung. Dies trifft auch für Sonder-situationen mit Fließumkehr zu, die bei niedrigen Zuflüssen wie im Sommer 2019 in einzelnen Gewässerabschnitten auftreten können (siehe Abbildung 2 links, $Q < 0$). Auch der durch Rückströmungseffekte im Sommer 2019 erhöhte Abwasseranteil an der Spreemündung kann mit dem BWM gut abgebildet werden und zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des hydrodynamischen Modells HYDRAX/QSim (Abbildung 2 rechts).

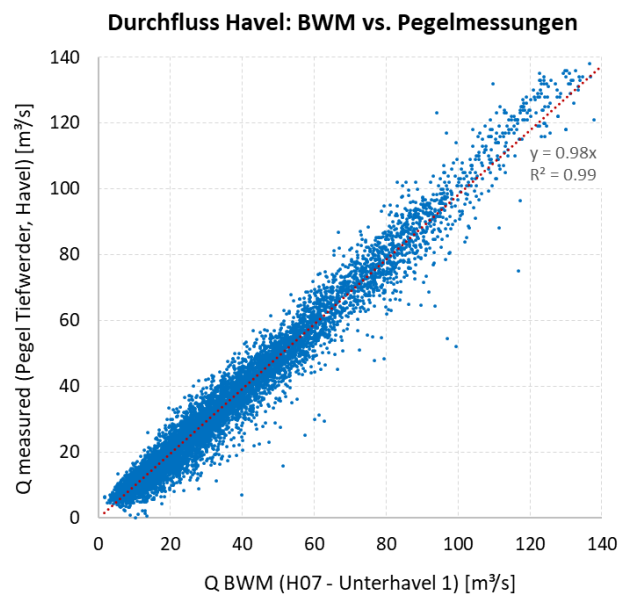


Abbildung 3: Scatterplot der Durchflüsse des Berlin Water Model (Abschnitt Unterhavel 1) vs. Messwerten des Pegels Tiefwerder (Havel), Tageswerte 2002 – 2022.

Zum anderen erfolgte ein Vergleich mit verfügbaren Messwerten. Abbildung 3 zeigt für den Gesamtzeitraum 2002-2022 eine Gegenüberstellung der Durchflusstagesmittelwerte des Pegels Tiefwerder (Wasserportal Berlin, Pegel in der Havel kurz nach Zusammenfluss mit der Spree) mit den Ergebnissen des Modells (Tageswerte). Dabei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der modellierten Durchflusswerte mit den gemessenen Durchflüssen (Nash-Sutcliffe-Koeffizient NSE: 0,97). Für andere Pegel der

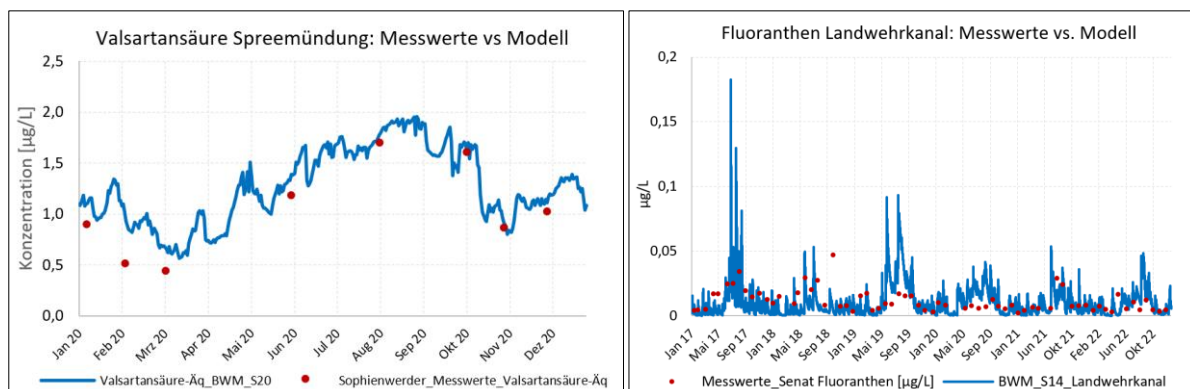


Abbildung 4: Vergleich modellierter und gemessener Werte für Valsartansäure-Äq an der Spreemündung (links, Bestimmungsgrenze BG: 0,01 µg/L) und Fluoranthen im Landwehrkanal (rechts, BG: 0,001 µg/L).

Berliner Hauptflüsse (Pegel Sophienwerder an der Spreemündung und Pegel Mühlendamm Schleuse an der Stadtspre in der Innenstadt) zeigt sich ein ähnliches Bild (NSE Sophienwerder: 0,93; NSE Mühlendamm Schleuse: 0,92).

Hinsichtlich der Qualität zeigt der Vergleich von Modellergebnissen für Valsartansäure (Medikamentenrückstand, Eintragspfad: Abwasser) und Fluoranthren (PAK in Verkehrsabgasen und Reifenabrieb, Haupteintragspfad: Regenabfluss) mit Messwerten des Berliner Senats für zwei unterschiedliche Gewässerabschnitte ebenfalls eine gute Übereinstimmung (Abbildung 4). Während bei abwasserbürtigen Stoffen wie Medikamentenrückständen die Einträge über Klärwerke relativ konstant sind und die Variabilität der Konzentrationen in einem Gewässerabschnitt größtenteils auf Veränderungen des Abwasseranteils beispielsweise durch geringere Zuflüsse in Trockenperioden zurückzuführen ist, sind die Einträge von regenwasser-bürtigen Stoffen wie beispielsweise Fluoranthren charakterisiert durch Peaks während Regenereignissen. Durch die monatlichen Routineprobenahmen des Berliner Senats werden diese Konzentrationspeaks bei Regenereignissen allerdings nur selten und zufällig erfasst (Abbildung 4 rechts).

Abbildung 5 (links) zeigt Ergebnisse des Modells für die mittleren Konzentrationen von Fluoranthren in allen Gewässerabschnitten als Karte (2017-2022, Stundenwerte). Dabei zeigt sich, dass insbesondere in kleineren urbanen Gewässern mit hohem Anteil an eingeleitetem Regenabfluss (z.B. Wuhle, Rummelsburger See) hohe mittlere Fluoranthren-Konzentrationen erreicht werden, die über der Umweltqualitätsnorm (UQN) der zulässigen Höchstkonzentration (ZHK) für Fluoranthren von 0,12 µg/L liegen. Über integrierte Ergebnisanalysen können zudem Überschreitungshäufigkeiten und -dauern berechnet und dargestellt werden, was insbesondere für Schadstoffeinträge mit hoher zeitlicher Dynamik wie Regenabflüsse oder Mischwasserüberläufe relevant ist. Abbildung 5 (rechts) zeigt mittlere Konzentrationen für Valsartansäure (2002-2022, Tageswerte) in einer Karte zusammen mit Einleitpunkten der Kläranlagen. Dabei ist zu sehen, welche Gewässerabschnitte durch Klärwerkeinträge beeinflusst sind und wie

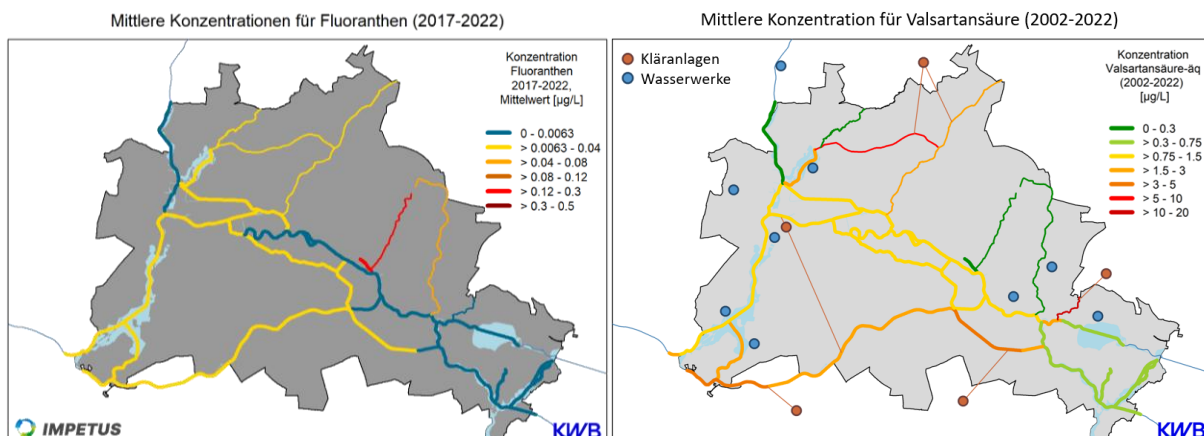


Abbildung 5: Links: Mapping der mittleren Konzentrationen von Fluoranthren (Hauptquelle: Regenabfluss; 2017-2022, Stundenwerte). Rechts: Mapping der mittleren Konzentrationen von Valsartansäure in Oberflächengewässern (Quelle: Abwasser; 2002-2022, Tageswerte)

sich diese stromabwärts im Gewässernetz verteilen. Mit einem solchen Substanz-mapping können Hotspots schnell ermittelt und visualisiert werden.

4 Schlussfolgerungen

Die guten Validierungsergebnisse zeigen, dass es möglich ist, die komplexe Situation der Berliner Gewässer durch einen vereinfachten Emulator abzubilden. Das Modell ist gut geeignet, Durchflüsse, Konzentrationen gewünschter Substanzen sowie Anteile von gereinigtem Abwasser, Regenabfluss sowie Mischwasserüberläufen je Gewässerabschnitt schnell zu berechnen, Ergebnisse als Karten darzustellen und durch Anpassung der Eingangsdaten Szenarien zu berechnen (z.B. Auswirkung der Ozonung als 4. Reinigungsstufe in den Kläranlagen auf die Konzentrationen in Wasserwerksrelevanten Gewässerabschnitten). Damit ist das Modell ein hilfreiches Tool, um Entscheidungen zum Berliner Wassermanagement wie beispielsweise den Masterplan Wasser zu unterstützen, indem Auswirkungen einzelner Maßnahmen oder zukünftiger Zuflussbedingungen auf die Wasserressourcen Berlins durch Szenarienrechnungen abgebildet und in Kartendarstellungen visualisiert werden.

5 Literatur

SenMVKU (2022): Masterplan Wasser Berlin – 1. Bericht, Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt.

Rustler M and Wicke D (2025). kwb.BerlinWaterModel.public (v0.1.0): R Package of Berlin Water Model (v0.1.0). <https://doi.org/10.5281/zenodo.17962962>

Del Punta F, Sonnenberg H, Li N, Haag L, Schwab L, Matzinger A (2025) Simulation der Effekte von blau-grünen Infrastrukturen auf den urbanen Wasserhaushalt: Ein einfaches Berechnungsmodell zur Bewertung von Regenwasserbewirtschaftungsstrategien auf gesamtstädtischer Ebene, Tagungsband Aqua Urbanica Rapperswil, S. V09-1 – V09-9.

Knoche F, Schumacher F, Zamzow M, Sohrt J, Rehfeld-Klein M, Rouault P, Matzinger A, Pawlowsky-Reusing E (2022) Strategische Planung von blau-grünen Infrastrukturen zur Verringerung der Gewässerbelastung durch Mischwasserüberläufe, Tagungsband Aqua Urbanica Glattfelden, S.144-149.

Korrespondenz an:

Name: Dr. Daniel Wicke
Adresse: Grunewaldstraße 61-62, 10825 Berlin
Telefon: 0049 30 / 53653 833
E-Mail: daniel.wicke@kompetenz-wasser.de