

Simulation der Effekte von blau-grünen Infrastrukturen auf den urbanen Wasserhaushalt: Ein einfaches Berechnungsmodell zur Bewertung von Regenwasserbewirtschaftungsstrategien auf gesamtstädtischer Ebene

Francesco Del Punta¹, Hauke Sonnenberg¹, Ningzhou Li¹, Leilah Haag², Luisa Schwab³, Andreas Matzinger¹

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

² *Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen, Fehrbelliner Platz 1, 10707 Berlin, Deutschland*

³ *Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR, Ostmerheimer Straße 555, 51109 Köln, Deutschland*

Kurzfassung: präsentiert wird ein einfaches Modell zur Berechnung des urbanen Wasserhaushalts, das für die strategische Planung hinsichtlich Regenwassermanagement und blau-grüner Infrastruktur eingesetzt werden kann. Aufbauend auf dem Modell ABIMO wurde eine neue, transparente R-Version entwickelt und um Maßnahmen wie Gründächer und Versickerungsmulden erweitert. Das Modell ermöglicht die Berechnung der Abweichung vom natürlichen Wasserhaushalt (ΔW), welches als Indikator für Umweltbelastungen dient. Das Modell wurde erfolgreich auf Berlin angewendet und die Übertragbarkeit durch eine Fallstudie in Köln bestätigt. Eine Korrelationsanalyse zeigt starke Zusammenhänge zwischen dem Wasserhaushalt und klimabezogenen Risiken wie urbaner Hitze, Überflutung und Mischwasserüberläufen. Die Ergebnisse belegen, dass das Modell eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Stadtplanung bieten kann.

Key-Words: urbaner Wasserhaushalt, Regenwasserbewirtschaftung, blau-grüne Infrastruktur, ABIMO, Klimarisiken, Übertragbarkeit

1 Einleitung

Städtische Gebiete sind bestimmten Umweltrisiken stärker ausgesetzt, wie beispielsweise der Bildung von Wärmeinseln, Überschwemmungen aufgrund starker Regenfälle oder der Verschmutzung von Oberflächengewässern durch das Überlaufen von unbehandeltem Abwasser. All diese Risiken hängen mit der hohen Versiegelung des Bodens, dem relativen Mangel an Vegetation und dem hohen Grad der Kanalisierung städtischer Gebiete zusammen, die einerseits eine schnelle Entwässerung der städtischen Gebiete gewährleisten, andererseits aber die damit verbundenen Probleme verstärken.

Mit der Veränderung der Wetterverhältnisse, die durch seltenere, aber stärkere Regenfälle gekennzeichnet sind, verschärfen sich diese Risiken und stellen eine echte

Bedrohung für die Erhaltung von Sachwerten und die öffentliche Gesundheit sowie eine Verschlechterung der Lebensqualität dar. Zahlreiche Studien untersuchen die Dynamik hinter diesen Phänomenen, sowohl aus physikalischer Sicht als auch unter dem Gesichtspunkt des Risikomanagements und der sozioökonomischen Auswirkungen. Die diesem Dokument zugrunde liegende Studie, die im Rahmen des AMAREX-Projekts entwickelt wurde, zielt darauf ab, das beschriebene Problem durch die Berechnung des lokalen Wasserhaushalts anzugehen. In diesem Kontext bezeichnet der Wasserhaushalt die Aufteilung des auf ein bestimmtes Gebiet fallenden Niederschlagswassers in Oberflächenabfluss, Versickerung und Evapotranspiration. Der Grund für diesen Ansatz liegt in der direkten Beziehung dieser Komponenten zu klimabezogenen Phänomenen in Städten, wie z. B. der Verdunstungskühlung oder der Überlastung der Kanalisationssysteme bei starken Regenfällen. Die Berechnung des städtischen Wasserhaushalts bietet daher die Möglichkeit, die Ökosystemleistung eines bestimmten Gebiets zu bewerten und besonders umweltgefährdete Gebiete zu identifizieren. Ein leicht zu interpretierender Parameter, der sich aus der Berechnung der Wasserbilanz eines Gebiets ableitet, ist dessen prozentuale Abweichung ΔW von einem definierten natürlichen Referenzszenario. Während urbanisierte Gebiete durch einen hohen Oberflächenabfluss gekennzeichnet sind, überwiegt in natürlichen Gebieten die Evapotranspiration durch die Vegetation.

Im Folgenden werden die Materialien und Methoden beschrieben, die für die Berechnung der Wasserbilanz auf dem Gebiet Berlins mit dem Open-Source-Modell ABIMO verwendet wurden, sowie dessen Erweiterung und Übertragbarkeitstests auf die Stadt Köln.

2 Methoden

2.1 Das Wasserhaushaltsmodell ABIMO

Die Software ABIMO (*AbflussBildungsMOdell*), die ursprünglich von der Bundesanstalt für Gewässerkunde zur Berechnung des Wasserhaushalts in der Landwirtschaft entwickelt wurde, wird aktuell in einer überarbeiteten und an städtische Umgebungen angepassten Version von der Stadt Berlin eingesetzt. Die Karten, die die Versickerung, Evapotranspiration und Oberflächenabfluss darstellen, werden veröffentlicht und Planern und Entscheidungsträgern zur Verfügung gestellt.

Das Modell stützt sich auf drei Kategorien von Eingangsdaten (Rachimow, 2009):

- Klimadaten (Jahresniederschlag und potenzielle Verdunstung in mm/a),
- Landnutzungsdaten (wie die Flächenzusammensetzung, Versiegelungsgrad oder Anschlussgrad an die Kanalisation),
- Bodendaten (wie Vegetation, nutzbare Feldkapazität oder Grundwassertiefe).

In Berlin liegen diese Daten in aggregierter Form auf Ebene der „Blockteilflächen“ vor.

Im Rahmen des AMAREX-Projekts wurde das Modell detailliert analysiert (Guericke, 2023) und vollständig in der Programmiersprache R neu geschrieben. Im Vergleich zur ursprünglichen Version in C++ bietet die neue Version mehr Flexibilität und Transparenz. Darüber hinaus hat R derzeit einen großen Nutzerkreis und wird insbesondere für Datenwissenschaft, Modellierung und Statistik eingesetzt.

Im Fall von Berlin liegen diese Daten aggregiert auf der Ebene der Blockteilflächen vor (sind abgegrenzte Gebiete, die in der Regel von Straßen umschlossen sind). Auch Straßenabschnitte zwischen zwei Kreuzungen werden im Modell als eigene Blockteilflächen behandelt. Diese flächendeckende Unterteilung des gesamten Berliner Stadtgebiets wird vom Umweltatlas Berlin als räumliche Bezugseinheit für verschiedene Zwecke verwendet.

Die aktuelle Berliner Anwendung umfasst 58.531 einzelne Blockteilflächen, von denen 32.153 Straßen sind.

2.2 Abweichung vom natürlichen Wasserhaushalt

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) formuliert als Zielsetzung, „die Veränderungen des natürlichen Wasserhaushalts durch Siedlungsaktivitäten in mengenmäßiger und stofflicher Hinsicht so gering zu halten, wie es technisch, ökologisch und wirtschaftlich vertretbar ist“ (DWA, 2022).

Um die Abweichung vom natürlichen Zustand zu quantifizieren, führen wir den Parameter ΔW ein:

$$\Delta W = \frac{1}{2} (|ev_{nat} - ev_{urb}| + |ri_{nat} - ri_{urb}| + |rs_{nat} - rs_{urb}|) * \frac{100\%}{Niederschlag}$$



Abbildung 1: Abweichung vom natürlichen Wasserhaushalt (ΔW) in % für einen Abschnitt der Stadt Berlin.

Dabei werden die drei Wasserhaushaltskomponenten – Evapotranspiration (ev), Infiltration (ri) und Oberflächenabfluss (rs) – jeweils mit ihren natürlichen Referenzwerten verglichen. Das Ergebnis wird als Zahl zwischen 0 und 100 % angegeben, wobei höhere Werte auf stärkere Abweichungen vom natürlichen Zustand hinweisen.

Als Referenz dient ein städtischer Park, der durch eine Mischung aus Rasenflächen und bepflanzten Bereichen charakterisiert ist.

2.3 Modellerweiterung: Regenwasserbewirtschaftung (RWB) und Übertragbarkeit

Neben der Übertragung der internen Prozesse des Modells in R wurde eine umfassende „Refactoring“- und Generalisierungsarbeit durchgeführt, mit dem Ziel, das ABIMO-Modell an verschiedene Szenarien und den Einsatz an unterschiedlichen Orten anpassbar zu machen (Del Punta, 2024). Zentral war die Integrierung ins Modell zweier Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung: extensive grüne Dächer, die modellintern wie Dächer mit besonderer Verdunstungsleistung behandelt werden, und Versickerungsmulden, die durch den Anschluss an abflusswirksame Flächen ein Teil des Oberflächenabflusses in Versickerung und Verdunstung umleiten.

Diese Erweiterung ermöglicht die Simulation und den Vergleich verschiedener Szenarien für das strategische Regenwassermanagement (Abb. 2).

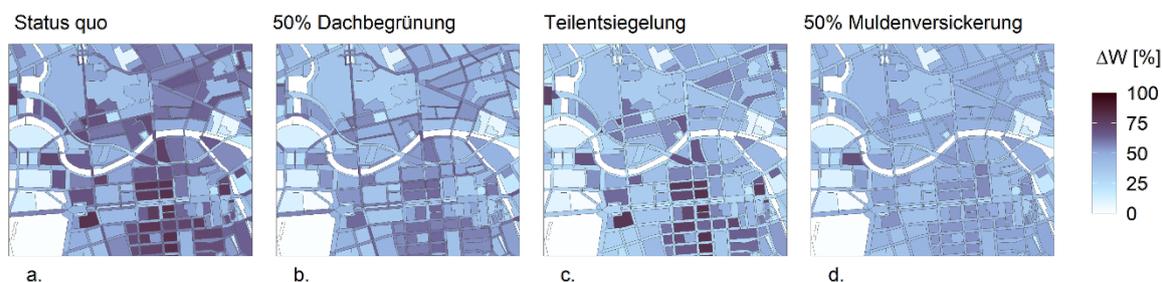


Abbildung 2: Simulation der Effekte verschiedener hypothetischer RWBM-Szenarien im Vergleich zum Status quo (a). b) Extensive Dachbegrünung auf 50 % der Dachflächen, c) Austausch aller Bodenbeläge durch durchlässige Beläge (z. B. Rasengittersteine), d) Anschluss von 50 % der versiegelten Flächen und Dächer an Versickerungsanlagen.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Verbesserung der Übertragbarkeit des Modells gelegt. Dazu wurden Rechenschritte angepasst, die bislang stark an die spezifischen Stadtstrukturen und Nutzungen Berlins gekoppelt waren. Außerdem wurden mehrere intern berechnete (implizite) Variablen in explizite Eingabegrößen umgewandelt, die nun vor der Modellanwendung vom Nutzer direkt angegeben werden müssen.

Beispiele hierfür sind: Der Wert der potenziellen Verdunstung war zuvor an den Berliner Stadtteil gekoppelt; ebenso wurden die Vegetationsklasse und die Bewässerungsmenge intern aus der Gebietsnutzung (z. B. „Schule“, „Krankenhaus“ oder „Wohngebiet“) abgeleitet. In der neuen Modellversion müssen diese Informationen ausdrücklich vorab bereitgestellt werden.

Die auf diese Weise erreichte größere Übertragbarkeit konnte erfolgreich anhand von Daten aus der Stadt Köln validiert werden. Fehlende Informationen zur Vegetation in Köln konnten durch die Auswertung von Copernicus Satellitendaten ergänzt werden, insbesondere durch die Berechnung des *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Die benötigten Klimadaten wurden über den Deutschen Wetterdienst (DWD) bezogen und bezirksscharf gemittelt.

2.4 Korrelation mit klimabezogenen Risiken

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Untersuchung des urbanen Wasserhaushalts ist die Analyse seiner Korrelation mit anderen Umwelt- und Klimarisiken. Die Motivation hinter diesem Ansatz liegt in der vergleichsweise einfachen und schnellen Modellierbarkeit des Wasserhaushalts, insbesondere im Vergleich zur Modellierung der betrachteten Risiken, die oft hohe Rechenleistungen erfordern und zeitintensiv sind.

Die folgende drei Klima- und Umweltrisiken wurden näher betrachtet:

- **Urbane Hitzeinseln:** Anhand öffentlich zugänglicher Modellierungsdaten zur Tages- und Nachttemperatur (Geoportal Berlin) im Sommer, die in Berlin mit derselben räumlichen Auflösung wie die für die Wasserbilanz verwendeten Blockteilflächen vorliegen, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Ergänzend dazu wurden die Daten der Wasserbilanz genutzt, um ein *Random Forest* Machine-Learning-Modell zu trainieren, das die Oberflächentemperatur vorhersagen kann.
- **Überflutungsvolumen:** Auf Basis von Modellergebnissen zur Simulation der Überflutungstiefe – entwickelt im Rahmen des Projekts AMAREX für ausgewählte Einzugsgebiete in Berlin – wurde der Zusammenhang zwischen dem überfluteten Volumen und der städtischen Wasserbilanz im jeweiligen Simulationsgebiet analysiert. Die räumliche Zuordnung zwischen den beiden Größen ist in diesem Fall weniger eindeutig, da ABIMO keine Interaktionen zwischen Flächen berücksichtigt und das Kanalnetz – ein zentrales Element bei der Überflutungssimulation – ebenso unberücksichtigt bleibt. Daher wurde der Zusammenhang zwischen der Gesamtwasserbilanz des Einzugsgebiets und dem gesamten überfluteten Volumen untersucht, wobei unterschiedliche Umsetzungsszenarien von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung, wie z. B. Gründächer oder Versickerungsmulden, miteinander verglichen wurden.

- **Mischwasserüberläufe:** In ähnlicher Weise wurden die Ergebnisse des Projekts MISA genutzt. Dort wird mithilfe einer Modellkette simuliert, wie sich – unter verschiedenen Szenarien zur Entkopplung von Flächen im Mischwassergebiet – das Mischwasserüberlaufvolumen sowie die daraus resultierende Reduktion des gelösten Sauerstoffs in Berliner Gewässern verändern. Diese Ergebnisse wurden mit der Wasserbilanz der für jeden Mischwasserauslass relevanten Flächen in Beziehung gesetzt.

3 Ergebnisse

3.1 Wasserhaushalt in Berlin

Die mit aktualisierten Eingabedaten durchgeführte Modellierung des Wasserhaushalts zeigt deutlich, dass dicht bebaute Gebiete höhere Abweichungen vom natürlichen Wasserhaushalt aufweisen. Die Einführung expliziter Eingabeparameter, etwa bei der Vegetationsklasse, ermöglicht eine realitätsnähere Abbildung insbesondere in begrünten Straßen sowie in grünen und unbebauten Flächen.

Ein erster Plausibilitätstest der implementierten RWB-Maßnahmen bestätigt die Konsistenz der Ergebnisse und zeigt unter anderem den positiven Effekt von Gründächern in stark versiegelten Bereichen.

3.2 Übertragbarkeit: Wasserhaushalt in Köln

Die Arbeiten mit den Daten der Stadt Köln haben die grundsätzliche Übertragbarkeit des Modells auf andere Kommunen unter Beweis gestellt. Die enge Zusammenarbeit mit Akteuren der kommunalen Verwaltung (StEB Köln) war entscheidend, um Eingabedaten in ausreichender Qualität und Quantität zu erhalten – wobei der Datenaufbereitungsprozess dennoch mit erheblichem Aufwand verbunden war.

Die berechneten Wasserhaushaltskarten für Köln zeigen vergleichbare Muster wie in Berlin und unterstreichen die Modellkonsistenz.

3.3 Korrelationsanalyse

Die durchgeführte Analyse zeigt eine starke Korrelation zwischen der modellierten Temperatur und sowohl ΔW als auch der jährlich berechneten Verdunstung (Abb. 3).

Das trainierte Random-Forest-Modell kann die Temperatur in bebauten und teilbebauten Flächen mit hoher Genauigkeit vorhersagen. Die Prognosequalität in öffentlichen Straßenbereichen fällt hingegen geringer aus.

Diese reduzierte Modellleistung lässt sich vermutlich auf die geringe Variabilität der Straßeneigenschaften zurückführen, was ein adäquates Training erschwert. Zudem hängen die Temperaturen in diesen Bereichen von weiteren, im Modell nicht

berücksichtigten Einflussfaktoren ab – etwa Verschattung, räumliche Ausrichtung oder Gebäudehöhen.

Auch die beiden weiteren untersuchten Umweltrisikofaktoren – Mischwasserüberläufe und Überflutungsvolumen – zeigen qualitativ nachvollziehbare Zusammenhänge mit dem Wasserhaushalt, die jedoch aufgrund begrenzter Datengrundlagen derzeit nicht quantitativ bewertet werden können.

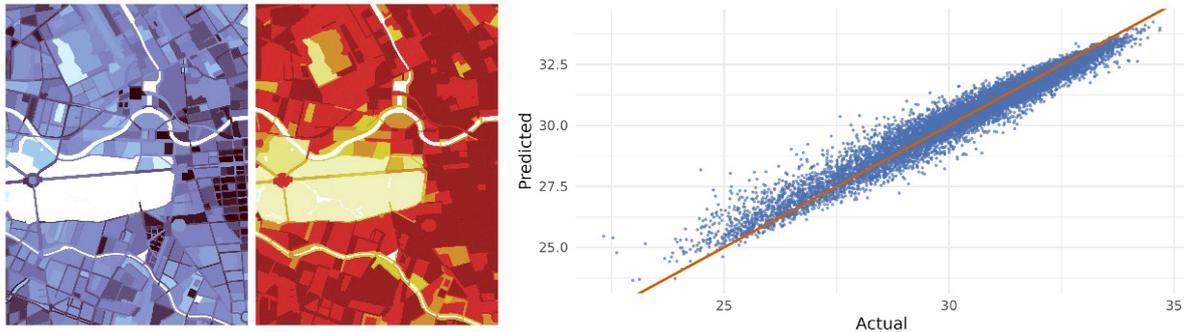


Abbildung 3: Korrelationsanalyse zwischen Wasserhaushalt und Sommertemperatur um 14 Uhr.

4 Diskussion und Aussicht

Das Modell ABIMO ermöglicht eine niederschwellige Berechnung des urbanen Wasserhaushalts auf lokaler Ebene auf Grundlage von allgemein verfügbaren klimatischen, topografischen und umweltbezogenen Daten. Es eignet sich somit für stadtplanerische Analysen im großen Maßstab und kann eine wertvolle Entscheidungsgrundlage für die urbane Entwicklung bieten.

Die Implementierung des Modells in der Programmiersprache R wurde auf einer GitHub-Repository veröffentlicht und trägt zu einer besseren Nachvollziehbarkeit und Transparenz bei (Sonnenberg 2025). Die Eingabedaten der Stadt Berlin sind im R-Paket enthalten und können als Demo verwendet werden, um Anwendungen in anderen Kommunen zu testen. Die Struktur der Eingabedaten sowie einzelne Berechnungsschritte wurden gezielt angepasst, um die Übertragbarkeit des Modells zu verbessern. Diese konnte erfolgreich durch eine Anwendung auf die Stadt Köln demonstriert werden.

Zudem wurden zwei neue Typen von RWB-Maßnahmen in das Modell integriert: extensive Gründächer und Versickerungsmulden. Dadurch ist es möglich, die Wasserbilanz unter Berücksichtigung verschiedener blau-grüner Infrastrukturszenarien zu berechnen. Die Ergebnisse für Berlin wurden aktualisiert und werden unter Berücksichtigung neuerer Datengrundlagen veröffentlicht, insbesondere zu den Gründächern und mit einem genaueren Indikator zur Beschreibung der

Vegetationsmenge. Letzterer basiert auf dem öffentlich zugänglichen Datensatz zum „Grünvolumen“, der im Umweltatlas Berlin verfügbar ist.

Die durchgeführte Korrelationsanalyse hat das Potenzial der städtischen Wasserbilanz als Proxy-Indikator für andere klimatische Einflussgrößen aufgezeigt. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Wasserbilanz erwies sich dabei als am stärksten ausgeprägt – vor allem aufgrund der hohen Datenverfügbarkeit und der räumlichen Übereinstimmung der Flächeneinheiten in beiden Modellen.

Der Indikator ΔW stellt eine einfach interpretierbare Kennzahl dar, um den Anforderungen der DWA in Bezug auf die Abweichung vom natürlichen Wasserhaushalt gerecht zu werden.

Eine Weiterentwicklung des Modells durch die Integration zusätzlicher RWB-Maßnahmen – wie intensive Gründächer oder Rigolen – wäre sinnvoll, um die Anwendung in Berlin noch detaillierter zu gestalten und gleichzeitig die Flexibilität für andere Nutzungskontexte zu erhöhen.

Die Anwendung in Köln hat zudem gezeigt, dass die Datenaufbereitung trotz aller Bemühungen zur Generalisierung und Vereinfachung weiterhin mit erheblichem Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden ist. Die Entwicklung von Algorithmen zur automatisierten Gewinnung und Interpretation technischer und umweltbezogener Eingangsdaten – etwa auf Basis von Satelliten- oder Luftbildern – würde den Transfer von ABIMO auf andere Städte deutlich erleichtern und beschleunigen.

5 Literatur

Rachimow, C. and M. Rachimow (2009), ABIMO3.2 – Abflußbildungsmodell. Algorithmus zum BAGROV-GLUGLA-Verfahren für die Berechnung langjähriger Mittelwerte des Wasserhaushalts (Version 3.2)

Del Punta et al. (2024), Adaptation and Transfer of the Urban Water Balance Model ABIMO, Konferenzbeitrag 16th International Conference on Urban Drainage, Delft, 2024.

DWA, Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-M 3-4 (2022), Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 4.

Guericke et al. (2023), Quantifizierung des lokalen Wasserhaushalts im urbanen Raum, Konferenzbeitrag Aqua Urbanica, Garching, 2023

Deutscher Wetterdienst (DWD) – Heruntergeladene Daten: Niederschlag und potentielle Evaporation in monatlicher Auflösung für den Berliner Raum, Einzelwerte gemittelt.

Wasserbilanz-Expert-Handbuch (2018), Software zum Arbeitsblatt DWS-A 102 (Entwurf), IWARU Institut für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen, Umwelt.

Sonnenberg H, Del Punta F (2025), kwb.rabimo: R-Implementation des Wasserhaushaltsmodells ABIMO. R-Paket Version 1.0.1, <https://github.com/kwb-r/kwb.rabimo>.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen, Geoportal Berlin (Datenerfassung 2009 bis 2020), <https://www.berlin.de/sen/sbw/stadtdaten/geoportal/geoportal-daten-und-dienste/>

Korrespondenz an:

Francesco Del Punta
Kompetenzzentrum Wasser Berlin, Deutschland
Telefon: +49 (0) 30 - 53 653 800
E-Mail: francesco.del-punta@kompetenz-wasser.de