

Andreas Steinbrich, Malte Henrichs, Hannes Leistert, Isabel Scherer, Tobias Schuetz, Mathias Uhl und Markus Weiler

Ermittlung eines naturnahen Wasserhaushalts als Planungsziel für Siedlungen

Determination of a natural water balance as reference for planning in urban areas

Der Wasserhaushalt von Siedlungsgebieten unterscheidet sich erheblich vom Landschaftswasserhaushalt. Der erhöhte Oberflächenabfluss, die verringerte Grundwasserneubildung und Verdunstung verändern das hydrologische Regime, die Morphologie und die Ökologie stadtnaher Gewässer, das Grundwasser im Siedlungsbereich sowie das Stadtklima. Die heutige Siedlungsentwässerung soll Niederschlagsabflüsse vermeiden, vermindern, versickern, verdunsten oder stark verzögert in nahe Oberflächengewässer einleiten. Sie folgt damit den Prämissen des Wasserhaushaltgesetzes (WHG) und den Zielen der maßgebenden technischen Regelwerke DWA-A 100 und DWA-A 102 (Entwurf), Veränderung des natürlichen Wasserhaushaltes durch Siedlungsaktivitäten so gering wie ökologisch, technisch und wirtschaftlich vertretbar zu halten. Dafür ist ein Referenzzustand des „natürlichen“ Wasserhaushaltes zu definieren, um dessen Veränderung in Siedlungen zu quantifizieren. Als geeignete Referenz wird der Wasserhaushalt der Landschaft der zugehörigen naturräumlichen Einheit mit heutiger Kulturlandnutzung ohne Siedlungsanteile vorgeschlagen. Mit ihr lassen sich die örtlichen Bedingungen besser repräsentieren als mit der Wasserbilanz des Einzugsgebietes des der Siedlung zugehörigen Oberflächengewässers. Der vorgestellte Berechnungsansatz für Referenzwerte des Wasserhaushaltes nutzt Boden-, Nutzungs-, Niederschlags- und Klimadaten und ist deutschlandweit einheitlich anwendbar. Die Wasserbilanzen werden mit dem validierten Wasserhaushaltsmodell RoGeR_WB_1D errechnet. Die Vorgehensweise wird für mehrere Orte in Deutschland beispielhaft und vergleichend durchgeführt.

Schlagwörter: Urbane Hydrologie, Wasserhaushalt, Referenzzustand, Modell RoGeR

The water balance of urban areas differs considerably from the landscape water balance. Increased surface runoff, reduced groundwater recharge and evaporation change the hydrological regime, the morphology and ecology of water bodies close to cities, the groundwater in the urban area and the urban climate. Today's urban drainage systems are designed to prevent, reduce, drain, seep away, evaporate or discharge precipitation into nearby surface waters with considerable delays. In doing so, it follows the principles outlined in the German Water Resources Act (WHG) and the objectives of the relevant technical regulations DWA-A 100 and DWA-A 102 (draft) to keep changes in the natural water balance by settlement activities as low as ecologically, technically and economically justifiable. To this end, a reference state of the "natural" water balance must be defined as a planning goal in order to quantify its change in settlements. As a suitable reference we propose to use the water balance of the landscape of the associated ecoregion with today's cultivated land use without the settled areas. This approach can better represent local conditions than the water balance of the catchment of the river adjacent to the settlement. The presented calculation method for a reference value of the water balance uses soil and geological properties, land use, precipitation and climate data and can be implemented and applied uniformly throughout Germany. The water balances in this study are simulated with the uncalibrated, validated water balance model RoGeR_WB_1D. The procedure is done for five locations in Germany by way of example and for comparison.

Keywords: Urban hydrology, water balance, reference state, RoGeR model

1. Einführung

In Siedlungsgebieten bewirken die Versiegelung von Flächen und die Ableitung des Niederschlagswassers erhebliche Veränderungen maßgebender hydrologischer Prozesse im Vergleich zur unbebauten Landschaft (LEOPOLD, 1968; WHITE & GREER, 2006; YA, 2012; BARRON et al., 2013). Der Wasserhaushalt in Siedlungsgebieten ist durch erhöhte Oberflächenabflüsse, verringerte Grundwasserneubildung und Verdunstung geprägt. Das hydrologische Regime siedlungsgeprägter Gewässer weist dadurch häufig eine große Spanne zwischen Hoch- und Niedrigwasserabflüssen auf. Somit sind wichtige abiotische Einflussgrößen für aquatische Habitate betroffen (LEIBUNDGUT, 1996; SOMMERHÄUSER et al., 1998; TETZLAFF, 2003).

Die Veränderungen des Abflussregimes beeinflussen auch den Sedimenttransport und die Häufigkeit der Drift von Makroinvertebraten und somit die ökologische Qualität der Gewässer (BOOTH & JACKSON, 1997; YANG et al., 2010).

Die verminderte Verdunstung übt einen wesentlichen hydrologischen Einfluss auf das Stadtklima aus (KUTTLER, 2013).

Diese enge Kopplung zwischen Wasserbilanz und Energiebilanz führt deshalb insbesondere in Städten zu höheren Lufttemperaturen (Urban Heat Island) als im unbebauten Umland (OKE et al., 2017).

Die heutige Siedlungsentwässerung soll angesichts der erheblichen Umweltauswirkungen der Regenwasserableitung Niederschlagsabflüsse vermeiden, vermindern, versickern, verdunsten oder nur stark verzögert in nahe Oberflächengewässer einleiten. Diese Prämissen greifen das Wasserhaushaltgesetz (WHG) (2009, ergänzt 2017), die meisten Landeswassergesetze sowie untergesetzliche Regelungen der Länder und Kommunen auf. Das technische Regelwerk (Arbeitsblatt DWA-A 100, 2006) fordert für die integrale Entwässerungsplanung, die Veränderung des natürlichen Wasserhaushaltes durch Siedlungsaktivitäten so gering wie ökologisch, technisch und wirtschaftlich vertretbar zu halten. Als naturnaher Wasserhaushalt gilt in diesem Kontext der Wasserhaushalt der Landschaft mit heutiger Nutzung als Kulturland ohne Siedlungsanteile, zu der das Planungsgebiet in der Siedlung gehört. Im Arbeitsblatt DWA-A 102 (2016) wird für „entwässerungstechnisch neu zu erschließende Gebiete“ ein rechnerischer Nachweis der Wasserbilanz gefordert. Das zuge-

hörige Wasserbilanzmodell für die Regenwasserbewirtschaftung liegt vor (HENRICHES et al., 2016 & 2017) und wird Gegenstand des geplanten Merkblatts DWA-M 101 sein.

Der Landschaftswasserhaushalt kann mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen ermittelt werden, die aber in der siedlungswasserwirtschaftlichen Planungspraxis als zu aufwändig erachtet werden. Es fehlt bislang eine vergleichbare und nachvollziehbare Methode, um Bilanzen des natürlichen Wasserhaushalts zu ermitteln, die als Referenzwerte für die künftigen Nachweise der Wasserbilanz in Siedlungsgebieten dienen können. Daher widmete sich ein Teilprojekt des BMBF-Verbundprojektes WaSiG (SCHERER et al., 2017; siehe auch: bmbf.nawam-rewam.de/de/projekt/wasig/) der Entwicklung geeigneter Methoden zur Ableitung von Referenzwerten, die bundesweit einheitlich anwendbar sind. Der Untersuchung und dieser Publikation liegen folgende Forschungsfragen zugrunde:

1. Mit welchem Transferkonzept lassen sich Referenzwerte für den Siedlungswasserhaushalt aus dem Landschaftswasserhaushalt ableiten?
2. Welche Instrumente und Daten sind hierzu erforderlich?
3. Ist der Berechnungsansatz praktikabel?
4. Sind die Ergebnisse des Berechnungsansatzes validierbar?

2 Methoden

2.1 Transferkonzept

Für ein Planungsgebiet in Siedlungen wird als **Referenzzustand** des Wasserhaushalts der Wasserhaushalt einer Landschaft in vergleichbarer Lage mit heutiger Nutzung als Kulturland ohne Siedlungsanteile definiert. Dieser Status quo wird bei einer entwässerungstechnischen Neuerschließung verändert. Dem Verschlechterungsverbot des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) und dem Ziel des technischen Regelwerkes folgend liegt somit ein geeigneter Referenzzustand vor.

Eine denkbare Alternative wäre der potenziell natürliche Zustand der Landschaft. Dessen Herleitung ist jedoch planungstheoretisch nur schwer begründbar und methodisch mit großen Unsicherheiten behaftet. Ein potentiell natürlicher Zustand ist in Deutschland heute kaum mehr anzutreffen und wird daher als Zielvorgabe für die Planung von Siedlungs- und Gewerbeflächen als unrealistisch angesehen.

Jeder Siedlungsteil befindet sich innerhalb einer naturräumlichen Einheit, für die aus vorliegenden Geo-, Nutzungs-, Klima- und Wetterdaten die Wasserbilanz berechnet und dem Siedlungsteil zugeordnet werden kann. Für die **Planungsgebiete** sind folgende Punkte relevant:

1. Planungsgebiete sind Gebiete der Bauleitplanung oder des Siedlungsbestandes, für die Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung vorgesehen sind.
2. Die klimatischen Verhältnisse der Planungsgebiete werden durch die Daten der nächstgelegenen Klimastation beschrieben. Lokale stadtklimatische Einflüsse werden nicht berücksichtigt.

3. Die bodenhydrologischen Gegebenheiten des Planungsgebietes können auf Basis der BÜK (Bodenübersichtskarte) und des DGM (digitales Geländemodell) ermittelt werden. Anthropogene Bodenüberformungen werden nicht berücksichtigt.
4. Es wird davon ausgegangen, dass alle nicht urban geprägten Flächen mit den gleichen hydrologischen, bodenhydrologischen und klimatischen Eigenschaften wie das Planungsgebiet den nicht urban beeinflussten Wasserhaushalt für diese Flächen repräsentieren. Der Wasserhaushalt dieser Flächen kann folglich als Referenzzustand herangezogen werden. Um den Referenzzustand ermitteln zu können, müssen die Flächen abgegrenzt werden, auf denen diese Bedingungen herrschen. Diese Flächen werden im Folgenden als Referenzgebiet bezeichnet.

Als **Referenzgebiet** mit analogen hydrologischen Eigenschaften dienen Teilflächen aus der naturräumlichen Einheit, in der das Planungsgebiet liegt und nicht das hydrologische Einzugsgebiet. Die naturräumliche Einheit bildet gemäß der physischen Geographie eine homogene Einheit bezüglich der Geofaktoren wie Klima, Relief, Wasserhaushalt, Boden, geologischem Untergrund und Biosphäre.

Im Falle der Wahl des hydrologischen Einzugsgebietes als Referenzgebiet müsste für ein Planungsgebiet in Freiburg im Breisgau beispielsweise das gesamte Einzugsgebiet des Flusses Dreisam als Referenzgebiet zugrunde gelegt werden, das bis in die Gipfellagen des Schwarzwaldes (Feldberg) reicht. Die dort herrschenden Verhältnisse entsprechen aber den örtlichen Bedingungen des Planungsgebietes nicht. Eine andere Möglichkeit wäre, das Referenzgebiet durch eine räumliche Nachbarschaftsbeziehung abzuleiten (z. B. Radius von 20 km um das Planungsgebiet). In einem physiographisch einheitlichen Gebiet wäre dies repräsentativ. Wenn aber das Planungsgebiet an der Grenze zwischen verschiedenen naturräumlichen Einheiten liegt (z. B. Freiburg an der Grenze zwischen Freiburger Bucht, Schwarzwald und Vorbergen) wäre diese Definition problematisch.

Als Referenzgebiete dienen die Teilflächen der naturräumlichen Einheit, die gleiche bodenhydrologische Eigenschaften besitzen, jedoch keine urbanen Landnutzungen aufweisen. Diese Flächen werden unter Nutzung von GIS-Software auf der Basis der neuen BÜK 1 : 200.000 (BGR, 2017) und der CORINE Landnutzungsdaten (KEIL et al., 2015) bestimmt (Abb. 1) und für die Simulation des Wasserhaushalts aufbereitet. Die Auswahl der Parameter hängt vom eingesetzten Wasserhaushaltsmodell ab.

Die für den Wasserhaushalt entscheidenden Geodaten sind die aus Bodenkarten abgeleiteten hydraulischen Eigenschaften von Böden (z. B. gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, nutzbare Feldkapazität, Luftkapazität) sowie die Vegetation. Die zur Ausweisung naturräumlicher Einheiten notwendigen Geodaten können dem Hydrologischen Atlas von Deutschland (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, 2003) entnommen werden.

2.2 Wasserbilanz und Wasserhaushaltsmodellierung

Die Grundlage der Ermittlung von Referenzwerten für den Wasserhaushalt ist die allgemeine Wasserhaushaltsgleichung eines geschlossenen Einzugsgebiets für die drei Größen Niederschlag (N), Abfluss (Q) und aktuelle Verdunstung (ET) und die

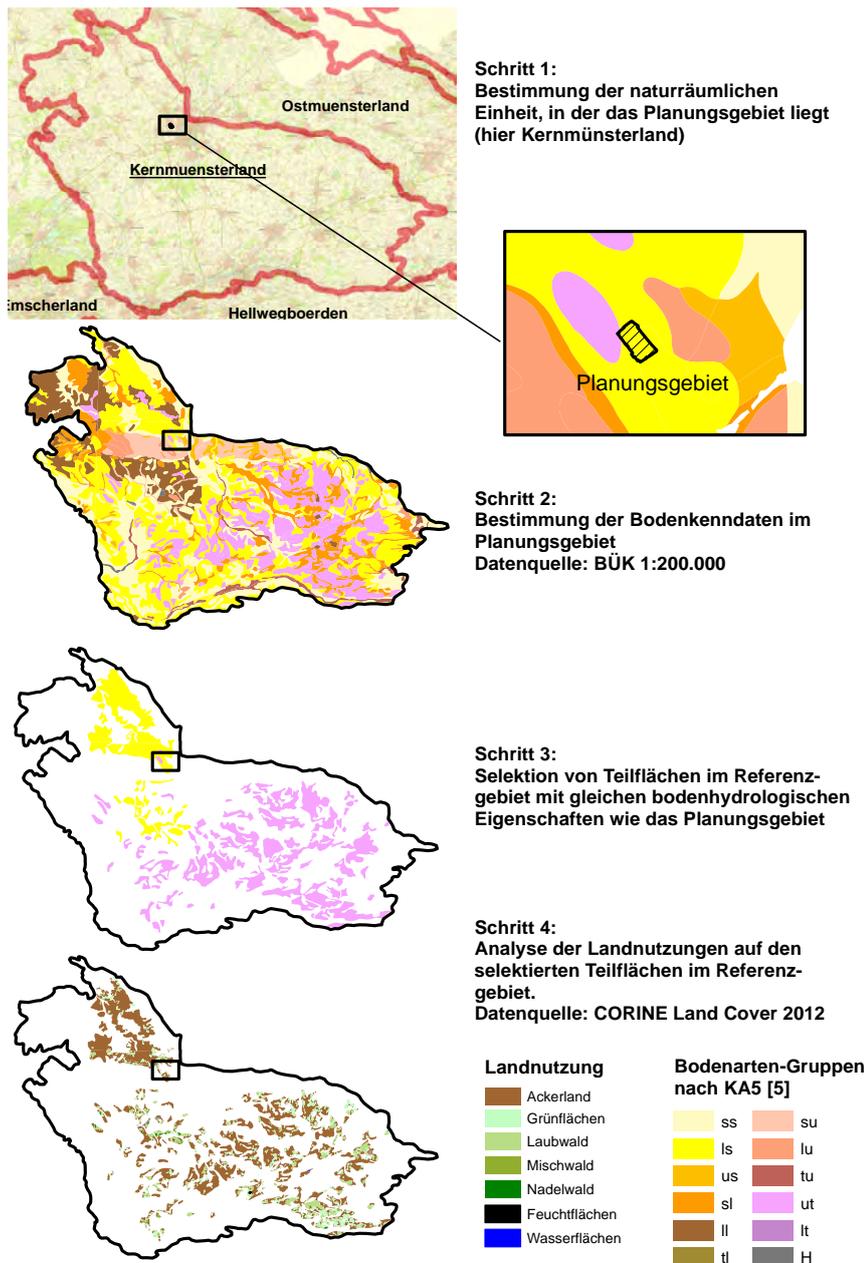


Abbildung 1
Vorgehen bei der Bestimmung der Datengrundlagen für die Planungs- und Referenzgebiete.
Work flow for determining the database for planning and reference regions.

Speicheränderung (dS) des betrachteten Systems (FOHRER et al., 2016):

$$N = Q + ET + dS \tag{1}$$

Der Abfluss (Q) setzt sich aus dem Direktabfluss (Q_D) und dem Basisabfluss (Q_B) zusammen, der für ein Einzugsgebiet langfristig der Grundwasserneubildung (GWN) entspricht. Somit ergibt sich:

$$N = Q_D + GWN + ET + dS \tag{2}$$

Der Direktabfluss (Q_D) wird häufig weiter unterteilt in den Oberflächenabfluss (Q_O) und den Zwischenabfluss oder Interflow (Q_I),

(DIN 4049 T. 3), der aber auch dem Basisabfluss zugerechnet werden kann und somit gilt:

$$N = Q_O + Q_I + GWN + ET + dS \tag{3}$$

Die Wasserbilanz kann in der Regel für hydrologische Einzugsgebiete bestimmt, bzw. modelliert werden. Da die zu definierenden Planungs- und Referenzgebiete meist nicht durch ein geschlossenes Einzugsgebiet beschrieben werden können, ist es in diesem Fall sinnvoll, die Wasserbilanz für ein eindimensionales System zu bestimmen, das dem Bodenwasserhaushalt entspricht. Dabei wird angenommen, dass es keine lateralen Zuflüsse gibt und somit die Wasserbilanz entsprechend Gleichung 3 weiterhin gilt. Oberflächenabfluss entsteht dabei, wenn Niederschlag nicht in den Boden infiltrieren kann und Zwischenabfluss, wenn die Perkolationsrate im Boden größer ist als die Durchlässigkeit eines Bodenhorizonts oder des geologischen Untergrundes (FOHRER et al., 2016).

Wenn die Wasserbilanz für einen längeren Zeitraum (mehrere Jahre) berechnet wird, kann die Speicheränderung (dS) vernachlässigt werden, da sie im Vergleich zu den anderen Komponenten sehr klein wird. Im Falle von grundwasserbeeinflussten Böden kann durch kapillaren Aufstieg in den Boden zusätzlich zum Niederschlag Wasser in das System gelangen und zur Verdunstung beitragen. In diesem Falle ist es möglich, dass die Wasserbilanz aufgrund des kapillaren Aufstiegs nicht aufgeht.

In dieser Arbeit wurde der langjährige Wasserhaushalt der Referenzgebiete mit dem Modell RoGeR_WB_1D (**R**unoff **G**eneration **R**esearch **W**ater **B**alance) berechnet. Die Methode ist generell für jedes Wasserhaushaltsmodell anwendbar, das für die entsprechenden Gebietstypen validiert wurde. Das Modell RoGeR_WB_1D ist eine vereinfachte Version des Modells RoGeR_WB_urban und berücksichtigt im

Gegensatz zu diesem keine laterale Umverteilungen von Wasser. Daher der Zusatz „1D“. Das Modell RoGeR_WB_urban ist ein Wasserhaushaltsmodell, das auf der Plattform des ereignisbasierten Niederschlags-Abfluss-Modells (N-A-Modell) RoGeR (STEINBRICH et al., 2016) zur kontinuierlichen Simulation der in urbanen Räumen relevanten hydrologischen Prozesse entwickelt wurde.

Das ursprünglich zugrundeliegende Modell RoGeR ist ein rein ereignisbasiertes N-A-Modell, das in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung die Abflussbildungsprozesse abbildet. Dabei wird neben der zeitlich variablen Infiltration an der Bodenoberfläche auch die Infiltration durch Makroporen und Trockenrisse berücksichtigt. Aufgrund der expliziten Modellierung des Bo-

denspeichers werden auch Prozesse wie Sättigungsabfluss, Tiefenperkolation und Zwischenabfluss adäquat abgebildet. Da das Modell RoGeR aufgrund von räumlich flächendeckenden Geodaten und Fachwissen aus der Abflussbildungsforschung prozessorientiert entwickelt wurde, ist keine Kalibrierung erforderlich (STEINBRICH et al., 2016). Das Modell RoGeR wurde anhand von 33 N-A-Ereignissen in 13 unterschiedlichen mesoskaligen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg und anhand von über 138 Großberegnungsversuchen auf 23 Standorten mit unterschiedlichen Böden, Landnutzungen und Vorfeuchten validiert (STEINBRICH et al., 2016, RIES et al., 2018). In Baden-Württemberg wird das Modell flächendeckend in einer Auflösung von $5 \times 5 \text{ m}^2$ verwendet um Starkregen-Szenarien als Grundlage für das Starkregen-Risiko-Management zu bestimmen (LUBW, 2016).

Um die Bestimmung des langjährigen Wasserhaushalts nach der Bebauung auch für komplexe Siedlungsräume zu ermöglichen, wurde im Rahmen des WaSiG-Projektes das Siedlungswasserhaushaltsmodell RoGeR_WB_urban entwickelt (LEISTERT et al., 2018): die neu implementierten Prozesse beinhalten die laterale Umverteilung von Oberflächenabfluss, der auf ganz oder teilweise versiegelten Flächen entsteht und statt in die Kanalisation geleitet zu werden auf benachbarte, nicht versiegelte Flächen oder in Versickerungsanlagen geleitet wird. Die Funktion solcher Versickerungsanlagen wird genauso abgebildet wie die Auswirkung verschiedener urbaner Oberflächen (Pflaster, Rasengittersteine, etc.) oder die Auswirkung von Gründächern. Außerdem werden die Interzeption und die Verdunstung von Stadtbäumen sowie die Wirkung der Beschattung durch Gebäude auf die Verdunstung berücksichtigt. Auch RoGeR_WB_urban muss nicht kalibriert werden, braucht aber aufgrund der lateralen Beziehung zwischen den 1 m^2 großen Rasterzellen entsprechend viel Rechenzeit. RoGeR_WB_urban wurde bislang mit gemessenen Abflüssen in Regenwasserkanälen in einigen Stadtteilen von Freiburg validiert (eine Publikation der Ergebnisse der Validierung sowie eine Beschreibung des Modells RoGeR_WB_urban ist in Planung).

Für die Abschätzung des langjährigen Wasserhaushalts nicht urban geprägter Referenzflächen wurde eine 1-D-Version aus RoGeR_WB_urban abgeleitet. Diese steht als ausführbares Programm zur Verfügung. Es genügt, die Eigenschaften der im Referenzgebiet vorkommenden Flächen und deren Anteil an der Gesamtfläche zu kennen. Als Eingangsdaten werden eine Parametermatrix und eine Klimadatenreihe (Niederschlag und potentielle Verdunstung (ET_{pot})) benötigt. Das Modell liefert als Ausgangsdaten Zeitreihen von Niederschlag, Abfluss (Q_0 und Q_1), Tiefensickerung bzw. Grundwasserneubildung und Verdunstung sowie die sich daraus ergebenden langfristigen Mittelwerte.

2.3 Ableitung relevanter Parameter für die Modellierung des Wasserhaushaltes

Da der vorgestellte Ansatz für gesamt Deutschland anwendbar sein soll, wird auf die Bodenübersichtskarte (BÜK) im Maßstab 1 : 200.000 der Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR, 2017) zurückgegriffen. Die zugrundeliegenden Daten der BÜK sind aktuell noch in Entwicklung und es stehen noch nicht alle Daten für die gesamten Blattsschnitte zur Verfügung, aber diese sollen in naher Zukunft vorliegen.

Die Daten zu den Bodenprofilen sind bisher nur vorläufig auf ihre Plausibilität geprüft, nicht jedoch abschließend auf ihre

Vollständigkeit und Richtigkeit, insbesondere auch die richtige Zuordnung der Profile zu den Legendeneinheiten. Es wird davon ausgegangen, dass mit dem vorgestellten Verfahren aufgrund der prozessorientierten Ansätze und der Nutzung flächendeckend verfügbarer Geodaten auf jeden Fall eine Verbesserung der Abschätzung des Wasserhaushaltes im Vergleich zu bisherigen Ansätzen möglich ist.

Neben den Geometriedaten der Bodenkundlichen Kartiereinheiten der BÜK steht auch eine umfangreiche Sachdatenbank mit tabellarischen Informationen zu den Kartiereinheiten bereit. Damit kann jeder Fläche ein repräsentatives Bodenprofil zugeordnet werden. Für jedes Profil stehen wiederum umfangreiche Informationen zu den einzelnen Bodenhorizonten zur Verfügung. Anhand der Informationen zu Bodentextur, Lagerungsdichte, Humusgehalt, Grobbodenanteil und Horizontbezeichnung (alle Parameter nach AD HOC ARBEITSGRUPPE BODEN (2005)) und anhand der in WESSOLEK et al. (2009) tabellierten Pedotransferfunktionen wurden im Rahmen dieser Untersuchung für jeden Horizont die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_{sat}), die nutzbare Feldkapazität (nFK), die Luftkapazität (LK), sowie die Funktion des Horizontes als Basis des Feinbodens (Gestein, Stauhorizont, Grundwasserbeeinflussung) ermittelt.

Da das Modell RoGeR_WB_1D nicht zwischen verschiedenen Horizonten unterscheidet, wurden die horizontbezogenen Informationen für jedes Profil bis zur Feinbodenbasis zusammengefasst. Als Basis des Feinbodens wurde der erste Horizont definiert, der in der Bezeichnung gemäß AD HOC ARBEITSGRUPPE BODEN (2005) die Kürzel „C“ (Untergrundhorizont), „P“ (Tongestein oder Tonmergelgestein), „T“ (Lösungsrückstand aus Carbonat-Gestein), „Sd“ (stauender Horizont) oder „W“ (durch Grundwasser beeinflusster Horizont) enthält. Im Falle des grundwasserbeeinflussten Horizontes wurde die Horizontmitte als Tiefe der Basis definiert, in allen anderen oben genannten Fällen die Horizontobergrenze.

Die Aggregation der horizontbezogenen Informationen über das Bodenprofil erfolgt mit einem über die Horizontmächtigkeit gewichteten, arithmetischen Mittel. Dieses stellt gewissermaßen einen Mittelweg zwischen der ausschließlichen Berücksichtigung des obersten Horizontes und dem harmonischen Mittel dar. Da in den RoGeR-Modellen nicht nur die Infiltrationsleistung an der Oberfläche modelliert wird, sondern auch der Infiltrationsprozess durch Makroporen und Trockenrisse in die tieferen Bereiche des Bodens, erscheint die Wahl der arithmetischen Mittelung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit hier adäquat. Bei der Summierung für die Speichergrößen nFK und LK wird auch der Auflagehorizont mitberücksichtigt, der zur Ermittlung der mittleren hydraulischen Leitfähigkeit nicht herangezogen wird.

Zur Abschätzung der potentiellen Tiefenperkolation aus dem Boden zum Grundwasser wird die im Profil minimal auftretende gesättigte hydraulische Leitfähigkeit herangezogen. Alternativ können hierfür aber auch Informationen aus hydrogeologischen Karten verwendet werden. Aufgrund der Texturklasse der Böden werden außerdem noch die Parameter für die Abbildung der Trockenriss-Dynamik abgeleitet (aufgrund des Tongehaltes) sowie die Saugspannung an der Sättigungsfront (aus der pF-Kurve). Die Parameter der pF-Kurve wurden hierzu aus WESSOLEK et al., (2009) entnommen. Weitere Modell-Eingangsparameter werden aus der Landnutzung abgeleitet: Dies sind der je nach Landnutzung jahreszeitlich variierende Interzeptionsspeicher,

die Ausstattung der Makroporen und die Verdunstungstiefe (bei Vegetation gleich der Durchwurzelungstiefe).

Um den Referenzzustand des Wasserhaushaltes abbilden zu können sollte ein hinreichend langer Zeitraum (mind. 10 Jahre) modelliert werden. Das Modell RoGeR_WB_1D benötigt idealerweise Niederschlagsdaten in hoher zeitlicher Auflösung (10 Minuten) und Daten der potentiellen Verdunstung als Tageswerte (Gras-Referenz-Verdunstung).

2.4 Validierung

Das Wasserhaushaltsmodell RoGeR_WB_1D wurde als unkalibriert anwendbares Modell entwickelt. Bezüglich der Bildung der Abflusskomponenten Horton'scher Oberflächenabfluss, Sättigungsflächenabfluss und schneller Zwischenabfluss wurde das zugrunde liegende ereignisbasierte N-A-Modell RoGeR schon vielfach getestet und als valide nachgewiesen (STEINBRICH et al., 2016; LUBW, 2016, RIEG et al., 2018). Im Rahmen des vorliegenden Beitrages soll daher auf die Validierung der Komponenten Verdunstung und Grundwasserneubildung eingegangen werden.

Die Validierung dieser beiden im Vergleich zur Dynamik des Oberflächenabflusses eher langfristig wirksamen Komponenten des Wasserhaushaltes ist vorzugsweise anhand von Daten aus Lysimetern möglich. Daten zur Grundwasserneubildung wurden von drei nicht wägbaren Großlysimetern in St. Arnold (Nordrhein-Westfalen) verwendet und dazu die Modellparameter Boden, Landnutzung, Klima und Sickerwasser herangezogen (HARSCH et al., 2009). Aufgrund der Angaben zur Bodentextur wurden dazu analog zum oben für die BÜK beschriebenen Vorgehen die bodenhydrologischen Parameter anhand der in WESSOLEK et al. (2009) tabellierten Pedotransferfunktionen abgeleitet. Die Parametrisierung der Makroporen-ausstattung und der Wurzel-tiefe erfolgte analog zur BÜK-basierten Parametrisierung für die Landnutzungsklassen Wiese, Laub- und Nadelwald. Das Modell wurde nicht kalibriert, so dass ein direkter Vergleich des unkalibrierten Modells mit den Messdaten des Großlysimeters möglich war.

2.5 Untersuchungsgebiete

Für die beispielhafte Anwendung der vorgestellten Methode wurden 5 Gebiete mit unterschiedlichen Ausprägungen der warm- und feucht-gemäßigten klimatischen Bedingungen in Deutschland ausgewählt. Die Spannweite der Jahresniederschläge reicht von etwas über 550 mm bis zu knapp unter 1.100 mm, während die potentielle Verdunstung in allen Gebieten zwischen 600 und 700 mm variiert (Tab. 1). Es handelt sich dabei um drei Gebiete aus dem Projekt WaSiG (Münster B-Plan-Gebiet Oxford-Kaserne,

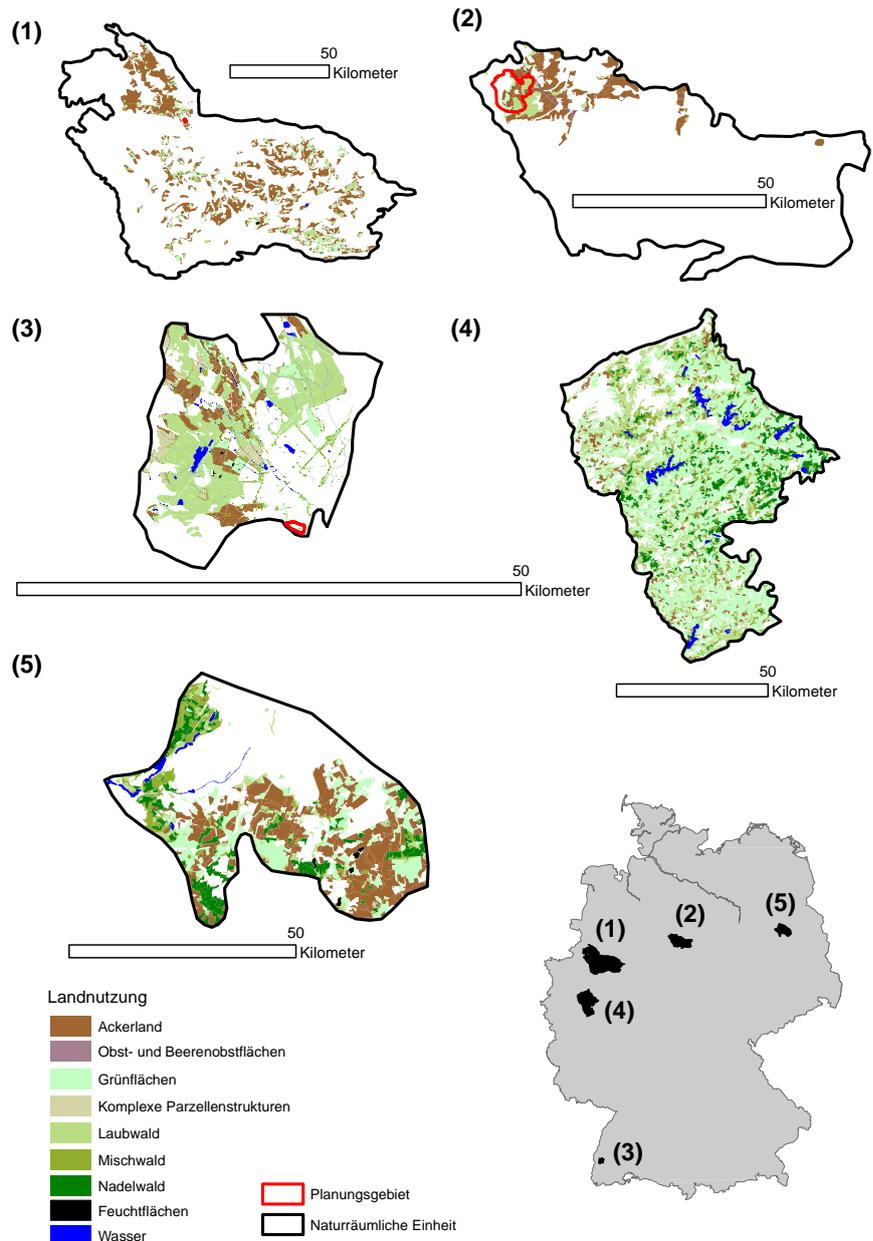


Abbildung 2

Lage der Planungsgebiete und die Verteilung Landnutzung der Referenzflächen innerhalb der naturräumlichen Einheit für die 5 ausgewählten Regionen (Details und Nummerierung Tabelle 1). Location of target areas and distribution of land use and land cover of the reference areas within the physiographic units for the 5 model regions. (Details related to the numbering can be found in Table 1).

Hannover Stadtteil Kronsberg und Freiburg Stadtteil Vauban) sowie zwei weitere Gebiete mit geringen und hohen mittleren jährlichen Niederschlägen (Region Berlin und Bergisches Land, NRW). Da innerhalb des Modells RoGeR_WB_1D zur Zeit dieser Untersuchungen noch kein Schneemodul implementiert war, wurden Gebiete mit weniger als 30 Schneetagen im Jahr ausgewählt.

Für diese fünf Gebiete (Tab. 1 und Abb. 2) wurden Referenzzustände des Wasserhaushaltes mit der vorgestellten Methodik ermittelt. Die Planungsgebiete 1 und 3 sind Gebiete mit bereits langjährig betriebenen Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung und entsprechenden Messdaten. In Planungsgebiet 2 liegt eine Planung vor, die den Prämissen des künftigen Ar-

beitsblattes DWA-A 102 entspricht. Für das Gebiet 3 wurde bereits mit dem Modell RoGeR_WB_urban der Wasserhaushalt für den aktuellen Zustand mit den dortigen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen (RWBM) sowie für einen hypothetischen Zustand ohne die vorhandenen RWBM modelliert, so dass hier auch eine Gegenüberstellung verschiedener Zustände möglich war.

Für die drei Gebiete mit definierten Planungsgebieten wurden entsprechend der beschriebenen Methodik die Böden innerhalb der zugehörigen Naturräume herangezogen, die denen in den Planungsgebieten entsprechen. In den beiden Gebieten ohne konkrete Planungsgebiete wurden alle Böden des Naturraums auf denen keine urbane Nutzung stattfindet in die Analyse einbezogen. Um für alle fünf Gebiete den gleichen Zeitraum der meteorologischen Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zugrunde legen zu können, beschränkt sich der Modellzeitraum für diese Studie auf die Jahre 2007 bis 2017.

3 Ergebnisse

3.1 Validierung

Während des Validierungszeitraums (1990 bis einschließlich 1999) konnten die jährlichen gemessenen Grundwasserneubildungen (GWN) der drei Großlysimeter in St. Arnold zufriedenstellend mit dem unkalibrierten Modell RoGeR_WB_1D abgebildet werden (Abb. 3).

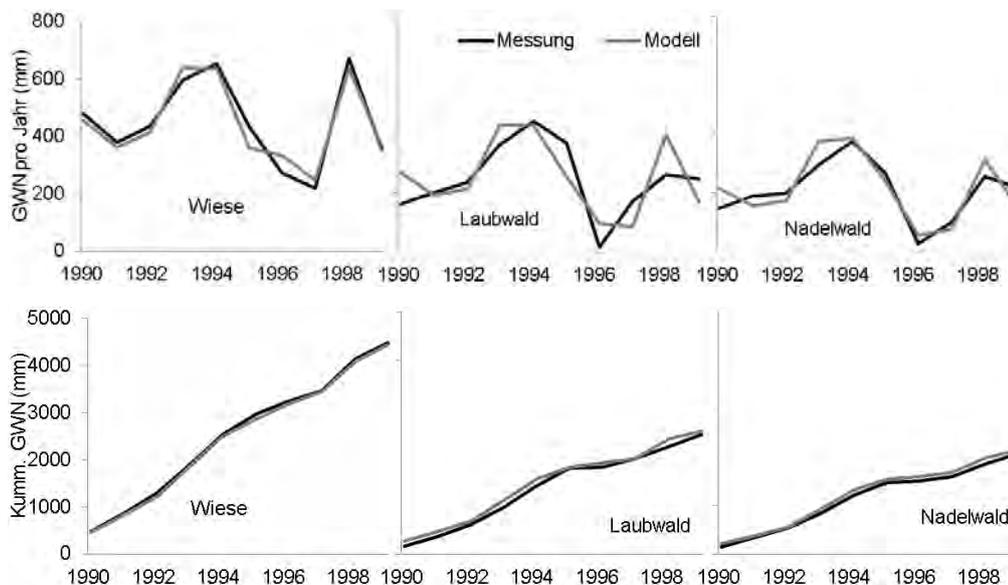


Abbildung 3
Gemessene und simulierte jährliche Grundwasserneubildung (GWN) (oben) und kumulierte GWN (unten) für den Großlysimeter St. Arnold.
Measured and simulated annual (upper part) and cumulated groundwater recharge (lower part) for the St. Arnold lysimeter.

Tabelle 1 Kenndaten der Untersuchungsgebiete. <i>Key figures for the study regions.</i>								
Nr	Planungsgebiet	Naturräumliche Einheit	DWD-Station (Nr)	geog. Breite (°)	geog. Länge (°)	Höhe (mNN)	N (mm/a)	ET _{pot} (mm/a)
1	Oxford Kaserne	Kernmünsterland	Flughafen Münster (1766)	52,13	7,70	48	714	636
2	Kronsberg	Braunschweig-Hildesheimer Löss-Börde	Hannover (2014)	52,45	9,68	55	656	647
3	Vauban	Freiburger Bucht	Freiburg (1443)	48,02	7,83	236	856	709
4		Bergische Hochflächen	Wuppertal (5717)	51,23	7,11	130	1080	626
5		Teltow-Platte	Berlin Schönefeld (427)	52,38	13,53	46	556	699

Bei der Modellierung des Laubwaldes traten in einigen Jahren deutliche Abweichungen zwischen der Messung und der Modellierung auf. Ein Grund hierfür könnte sein, dass hier die Variabilität der Pflanzen (im speziellen der monatlich variierende Interzeptionsspeicher) größer ist als bei einem Nadelbaumbestand bzw. einer Wiese. In allen drei Fällen ist die gemessene, über 10 Jahre kumulierte GWN dem modellierten Verlauf sehr ähnlich. Die Modellierung des Laub- und Nadelwaldes überschätzt die Messung über 10 Jahre hinweg um jeweils etwa 73 mm, während die Modellierung der Wiese die Messung langfristig um 44 mm unterschätzt. In allen 3 Fällen entspricht das weniger als 1 % des Niederschlags (0,9 % bzw. - 0,5 %), der für den Zeitraum im Mittel bei 823 mm pro Jahr lag.

3.2 Naturnaher Wasserhaushalt von Siedlungsräumen

Aus den Ergebnissen der Simulationen mit dem Modell RoGeR_WB_1D sind in Tabelle 2 die langjährigen Mittelwerte der Wasserhaushaltskomponenten für die fünf Untersuchungsgebiete aus den Jahren 2007 bis 2017 zusammengestellt. Für die gleiche Zeitspanne wurde für das Stadtgebiet Vauban in Freiburg der Ist-Zustand des Wasserhaushaltes mit den bestehenden Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen (Mulden-Rigolen-Systeme, Gründächer, Pflaster und Rasengittersteine) sowie für einen hypothetischen Zustand ohne diese Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen (RWBM) mit dem Modell RoGeR_WB_urban ermittelt.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass der Direktabfluss aus den Komponenten Oberflächen- und Zwischenabfluss besteht. Der Oberflächenabfluss wird vor allem aus Infiltrationsüberschuss

Tabelle 2

Langjährige simulierte Mittelwerte der Wasserhaushaltskomponenten für die Referenzgebiete mit dem Modell RoGeR_WB_1D und für das Stadtgebiet Vauban in Freiburg mit dem Modell RoGeR_WB_urban.
 Long-term simulated average water balance components using the model RoGeR_WB_1D for the reference regions and for the urban district Vauban in Freiburg using the model RoGeR_WB_urban.

Naturräumliche Einheit	N mm/a	ET mm/a	Q _b mm/a	Q _o mm/a	Q _i mm/a	GWN mm/a	GWN (inkl. Q _i) mm/a
Kernmünsterland	714	409	132	30	102	172	274
Braunschweig-Hildesheimer Löss-Börde	656	450	57	2	55	174	229
Freiburger Bucht	856	606	81	16	65	166	231
Bergische Hochflächen	1080	479	114	20	94	529	623
Teltowplatte	556	490	80	9	71	108	179
Freiburg Vauban mit RWBM	856	378	167	119	48	310	358
Vauban ohne RWBM	856	346	371	337	35	144	179

des Modellzeitraums kann zu einer geringfügigen Abweichung führen. In Gebieten, in denen kapillarer Aufstieg oder Verdunstung aus Wasserflächen eine signifikante Rolle spielen, wird Wasser aus dem System abgeführt, das nicht von dem auf die Fläche gefallenen Niederschlag stammen muss. Hier liegt die Summe der Wasserhaushaltskomponenten über der Summe des gefallenen Niederschlags.

In Abbildung 4 wird der Zwischenabfluss pauschal dem Direktabfluss zugeordnet.

(Horton'scher Oberflächenabfluss) und bei länger anhaltenden Niederschlägen durch oberflächigen Abfluss aus wassergesättigten Bodenflächen gebildet. Der Zwischenabfluss bildet sich bei Beschränkung der Tiefenperkolations. Dies ist in Teilen des Naturraums „Bergische Hochflächen“ der Fall (mittleres Gefälle 9 %, Maximum 21 %).

Neben geringer Durchlässigkeit des Bodens oder des geologischen Untergrunds können auch hohe Grundwasserstände die Tiefenperkolations einschränken. Diese treten oft in flachem Gelände auf, in dem es aufgrund zu geringer Potenzialdifferenzen nicht zum Zwischenabfluss kommt. In diesen Fällen kann es sinnvoller sein, diese Komponente nicht dem Direktabfluss zuzuweisen sondern dem Grundwasserabfluss. In den Gebieten Kernmünsterland, Braunschweig-Hildesheimer Löss-Börde, Freiburger Bucht und Teltowplatte ist das Gefälle durchweg gering (< 6 %). In diesen Gebieten ist ohne weitere Informationen nicht eindeutig zu entscheiden, ob der vom Modell ausgegebene Zwischenabfluss dem Direktabfluss oder der Grundwasserneubildung zugewiesen werden soll.

Hohe Grundwasserstände mit kapillarem Aufstieg sowie offene Wasserflächen erhöhen die Komponente Verdunstung. Im Naturraum „Teltowplatte“/Berlin (mittleres Gefälle 2 %) sind die Böden auf rund 17 % der Fläche durch Grundwasser beeinflusst, rd. 1,5 % der Fläche sind offene Wasserfläche. Zudem ist die klimatische Wasserbilanz in dieser Region negativ, da die potentielle Verdunstung größer als der Niederschlag ist. Dieser Naturraum weist daher die höchsten Anteile der Verdunstung an der Wasserbilanz auf (Abb. 4).

Die Summen der Wasserhaushaltskomponenten können vom Niederschlag mehr oder weniger abweichen. Die Differenz der Speicherfüllungen zu Beginn und zum Ende

net. Die nicht urban beeinflussten Referenz-Flächen generieren im langjährigen Mittel fast keinen Oberflächenabfluss. Dessen höchsten Wert mit rund 4 % weist das Kernmünsterland auf. Hier tragen gering durchlässige Böden auf rund 70 % der Fläche zu Oberflächenabfluss bei. Ohne die Zuweisung des Zwischenabflusses zum Direktabfluss tendiert der Referenzzustand des Oberflächenabflusses für die Planungsgebiete in diesen Fällen gegen Null, was eine sehr starke Planungsherausforderung für Siedlungsflächen darstellt. Ob der sehr geringe Oberflächenabfluss oder der höhere Direktabfluss als planerische Vorgabe heranzuziehen ist, bedarf weiterer Fachdiskussion. Ansonsten

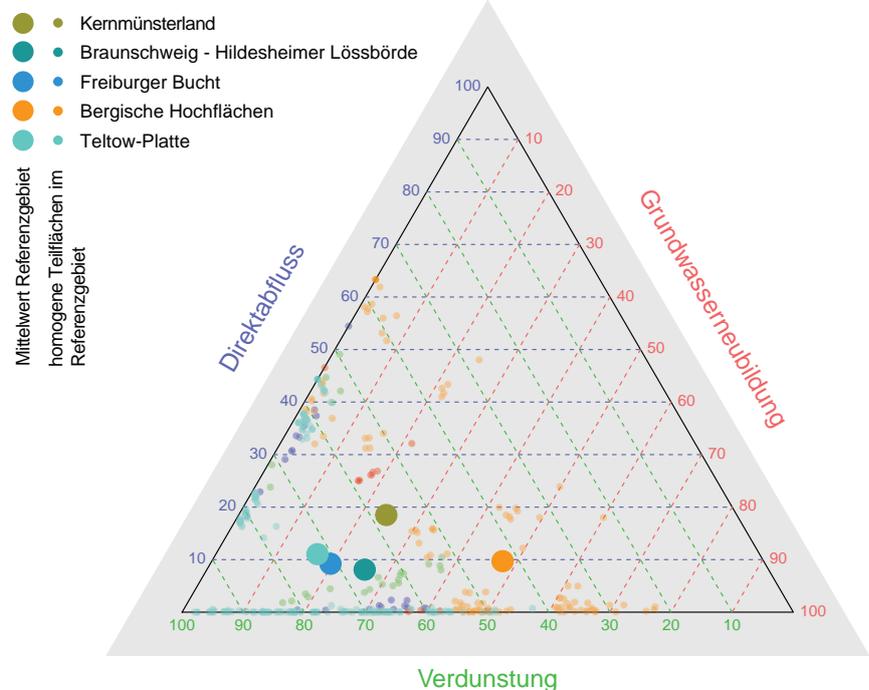


Abbildung 4

Anteile der Abflusskomponenten am Wasserhaushalt für die Referenzgebiete. Die großen Kreise symbolisieren den Mittelwert des gesamten Referenzgebietes, die kleinen die Mittelwerte der Teilflächen einheitlicher Böden- und Landnutzung.

Proportion of the water balance components for the five reference regions. Larger circles represent the mean values for the whole regions; smaller circles represent the mean values of the homogeneous subsections within the respective reference regions.

unterscheiden sich die unterschiedlichen Naturräume vor allem bezüglich der Anteile von Grundwasserneubildung und Verdunstung. Die Untersuchungsregionen Berlin und Freiburger Bucht weisen dabei die höchsten Anteile der Verdunstung auf. Ein Blick in Tabelle 2 zeigt aber, dass die beiden Gebiete sich bezüglich der absoluten Mengen durchaus unterscheiden. Die geringsten Anteile der Verdunstung finden sich in den höher gelegenen und damit auch kühleren Bergischen Hochebenen, die aber bezüglich der Absolut-Werte der Verdunstung sehr nahe bei denen von Berlin liegen.

In Abbildung 5 ist exemplarisch für den Stadtteil Vauban in Freiburg die langjährige (2007 - 2017) Wasserbilanz für den aktuellen Zustand mit Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen (Mulden-Rigolen-Systeme, Gründächer, Pflaster und Rasengittersteine) dem hypothetischen Zustand ohne diese Bewirtschaftungsmaßnahmen sowie dem Referenzzustand gegenübergestellt. Die Bilanz mit Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen weist einen im Vergleich zum Referenzzustand deutlich höheren Oberflächenabfluss und eine um den Faktor 1,9 erhöhte Grundwasserneubildung auf. Die in Vauban realisierten Bewirtschaftungsmaßnahmen begünstigen die Versickerung stark, reduzieren die Ableitung im Vergleich zum Zustand ohne RWBM zwar deutlich aber im Vergleich zum Referenzzustand noch nicht ausreichend. Die Verdunstung liegt um knapp 40 % unter der Verdunstung des Referenzzustandes. Der Vergleich mit dem hypothetischen Zustand ohne Bewirtschaftungsmaßnahmen zeigt aber den positiven Effekt von Gründächern auf die Verdunstung (Erhöhung).

4. Diskussion

Der neue Ansatz zur Definition eines Referenzzustandes für den unbeeinflussten Wasserhaushalt in Siedlungsräumen beruht auf der Erkenntnis, dass die naturräumliche Einheit des Planungsgebietes die örtlichen Verhältnisse repräsentativer abbildet als das zugehörige Einzugsgebiet eines Oberflächengewässers. Die Wahl der aktuellen nicht urbanen Nutzung im Referenzgebiet als Referenz-Zustand trägt der Realität unserer Kulturlandschaft Rechnung und vermeidet unrealistische Anforderungen an die künftigen Planungen in der Siedlungswasserwirtschaft. Eine realitätsnahe Zielsetzung erhöht gleichzeitig auch die Akzeptanz für die Aufwendungen und möglichen Einschränkungen, die mit Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung verbunden sind.

Die Ergebnisse der Modellierung des Wasserhaushaltes für die Großsiedlung St. Arnold zeigen, dass das unkalibrierte Modell RoGeR_WB_1D sehr gut in der Lage ist die unterschiedliche zeitliche Ausprägung des Wasserhaushaltes für die verschiedenen Landnutzungen abzubilden. Weitere Validierungen werden im BMBF-Verbundprojekt WaSiG durchgeführt.

Freiburg – Vauban

- Mittelwert Referenzgebiet
- bebauter Zustand ohne RWBM
- bebauter Zustand mit RWBM
- homogene Teilflächen im Referenzgebiet

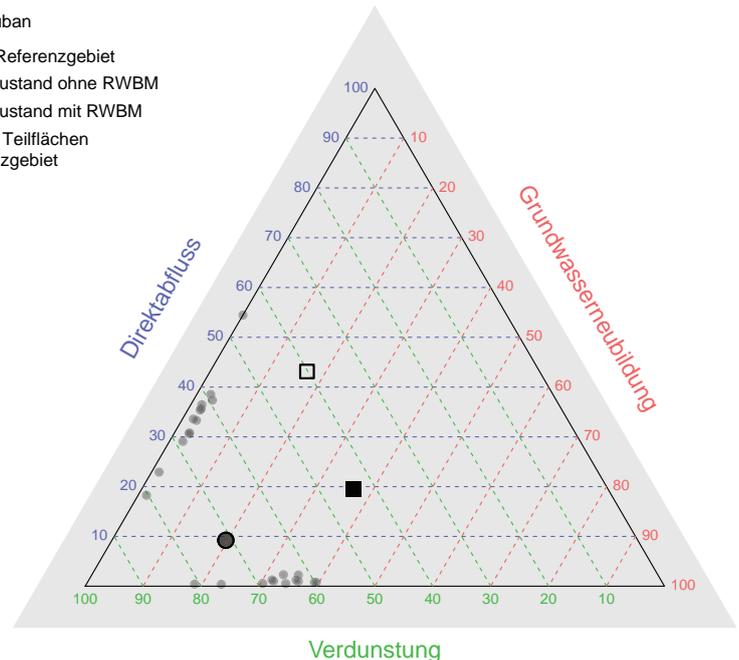


Abbildung 5

Anteile der Abflusskomponenten am Wasserhaushalt für das Stadtgebiet Vauban in Freiburg. Für den ist-Zustand mit Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen (gefülltes Quadrat), für einen hypothetischen Zustand ohne RWBM (nicht gefülltes Quadrat) sowie für das Referenzgebietes „Breisgauer Bucht“ (Kreis). Die kleinen grauen Punkte repräsentieren die homogenen Teilflächen des Referenzgebietes.

Proportion of the water balance components for the urban district Vauban, located in Freiburg. For the current state with rain water management structures (filled square), for a hypothetical state without rain water management structures (hollow square), as well as for the reference region "Breisgauer Bucht" (circle). Smaller grey points represent the homogenous subsections within the reference region.

Das Modell RoGeR_WB_1D bietet zusammen mit den bundesweit zugänglichen Daten zu Boden und Landnutzung und den damit einfach zu verknüpfenden, bereits abgeleiteten Modellparametern ein gutes Werkzeug zur Abschätzung des unbeeinflussten Wasserhaushalts für Siedlungsgebiete in Deutschland. Die bodenhydrologischen Kenngrößen können aus der Bodenübersichtskarte (BÜK) automatisiert zu jedem neuen Datenstand abgeleitet werden. Die im BMBF-Verbundprojekt WaSiG abgeleiteten Parameter sind für den Datenbedarf des Modells RoGeR_WB_1D ausgelegt.

Alternativ können auch regional verfügbare Bodenkarten verwendet werden, die es erlauben, die notwendigen Parameter für die Wasserhaushaltsmodellierung abzuleiten. Auch jedes andere Wasserhaushaltsmodell kann zur Ermittlung des Referenzzustandes verwendet werden, dessen Parameter spezifisch angepasst oder ergänzt werden müssten.

5. Zusammenfassung

Künftige Planungen zur Siedlungsentwässerung verfolgen als eines der Emissionsziele die Veränderung des natürlichen Wasserhaushaltes durch Siedlungsaktivitäten so gering wie ökologisch sowie technisch und wirtschaftlich vertretbar zu halten. Für den Nachweis der Wasserbilanz in Planungsgebieten ist es notwendig, einen Referenzzustand zu definieren, mit dem die Wasserbilanz des Planungsgebiets verglichen werden kann. Jedoch fehlt

bisher eine Methode die es erlaubt, den Referenzzustand des Wasserhaushaltes klar zu definieren. Dieser lässt sich durch eine Analogiebetrachtung von Teilflächen der zugehörigen naturräumlichen Einheit ableiten, die ähnliche bodenhydrologische Eigenschaften wie das Planungsgebiet aufweisen. Für die Ermittlung des Referenzzustandes wird die heutige Kulturlandnutzung ohne Siedlungsanteile zugrunde gelegt. Als Datengrundlage können allgemein verfügbare Geodaten sowie Klimadaten verwendet werden. Das Einzugsgebiet des zugehörigen Oberflächengewässers ist dagegen als Referenz weniger geeignet, da es für die örtlichen Verhältnisse des Planungsgebietes weniger repräsentativ ist. Die Berechnung des Wasserhaushaltes kann mit jedem eindimensionalen Wasserhaushaltsmodell ohne Berücksichtigung lateraler Prozesse erfolgen. In der Untersuchung wurde das Model RoGeR_WB_1D eingesetzt, das auch unkalibriert den Wasserhaushalt der drei Großlysimeter in St. Arnold zutreffend abbilden kann. Die exemplarische Bearbeitung für fünf Fallbeispiele in Deutschland zeigte, dass die Methode anwendbar ist und zu plausiblen Ergebnissen führt.

Conclusion

One of the emission aims of future planning schemes of urban drainage systems is to minimize the impact of urbanization on the water balance to as low as ecologically, technically and economically possible. A reference state must be defined in order to compare and evaluate the water balance of the urban target area with a reference area. However, there is currently no adequate method available to define the reference state. This state can be ascertained by estimating the water balance for representative areas situated within the same physiographic unit. These representative areas should exhibit the same soil hydrologic properties as those within the target area and the same mix of current land cover, excluding settlements, commercial and traffic areas. Readily available geo data and climate data should be used as data base. The catchment of the surface water bodies immediately adjacent to the settlements is, on the other hand, not suitable to serve as a reference, since it is not representative of the conditions in the planning area. The simulation of the water balance can be performed with any one-dimensional water balance model without consideration of the lateral process. The model RoGeR_WB_1D was applied for this study as it does not need to be calibrated. It was also verified by modelling the water balance of the three large-scale lysimeters St. Arnold. The exemplary treatment of five case studies in Germany showed that the method is applicable and yields leads to plausible results.

Anschrift der Verfasser

Andreas Steinbrich, Dipl. Hydrologe
 Hannes Leistert, Dipl. Hydrologe
 Markus Weiler, Prof. Dr.
 Professur für Hydrologie Universität Freiburg
 Friedrichstraße 39
 79098 Freiburg
 Andreas.Steinbrich@hydrology.uni-freiburg.de
 Hannes.Leistert@hydrology.uni-freiburg.de
 Markus.Weiler@hydrology.uni-freiburg.de

Malte Henrichs, Dr.-Ing.
 Isabel Scherer, M.Sc.
 Mathias Uhl, Prof. Dr.-Ing.

Fachhochschule Münster
 Fachbereich Bauingenieurwesen
 Institut für Infrastruktur-Wasser-Ressourcen-Umwelt (IWARU)
 AG Siedlungshydrologie und Wasserwirtschaft
 Corrensstraße 25, Raum A111
 48149 Münster
 henrichs@fh-muenster.de
 scherer@fh-muenster.de
 uhl@fh-muenster.de

Tobias Schütz, Jun.-Prof. Dr.
 Hydrologie
 Fachbereich VI - Raum- und Umweltwissenschaften
 Universität Trier
 Campus II
 Behringstraße 21
 54296 Trier
 tobias.schuetz@uni-trier.de

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- BARRON OV, BARR AD, DONN MJ: Effect of urbanization on the water balance of a catchment with shallow groundwater. In: Journal of Hydrology, 485, pp. 162–176, 2003.
- BOOTH, D. B. UND JACKSON, C. R. (1997): Urbanization of Aquatic Systems: Degradation Thresholds, Stormwater Detection, and the Limits of Mitigation. In: JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 33(5), S. 1077–1090.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) (2017): Bodenübersichtskarte 1:200.000.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD), 3. Lieferung 2003.
- DWA-A 100: Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung. DWA-Regelwerk, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2006.
- DWA-A 102 Teil A (Gelbdruck): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Teil A: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen für Regenwetterabflüsse in Siedlungen, DWA-Regelwerk, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2016.
- HARSCH, N., BRANDENBURG, M., UND KLEMM, O. (2009): Large-scale lysimeter site St. Arnold, Germany: analysis of 40 years of precipitation, leachate and evapotranspiration. In: Hydrology and Earth System Sciences, 13(3), S. 305–317.
- HENRICHs, M., LEUTNANT, D., KLIEWER, D., HÖRNSCHEMEYER, B., SCHLEIFENBAUM, R., LANGNER, J., UND UHL, M. (2017): Die Stadt als hydrologisches System im Wandel - Schritte zu einem anpassungsfähigen Management des urbanen Wasserhaushaltes (SAMUWA). Schlussbericht. BMBF Förderkennzeichen 033W004J. Münster: Fachhochschule Münster, Institut für Wasser-Ressourcen-Umwelt (IWARU).
- HENRICHs, M., LANGNER, J., UND UHL, M. (2016): Development of a simplified urban water balance model (WABILA). In: Water Science and Technology, 73(8), S. 1785–1795.
- KEIL, M., ESCH, T., DIVANIS, A., MARCONCINI, M., METZ, A., OTTINGER, M., VOINOV, S., WIESNER, M., WURM, M., UND ZEIDLER, J. (2015): Aktualisierung der Landnutzungs- und Landbedeckungsdaten CLC für das Jahr 2012-„Backdating“ des DLM-DE vom Referenzjahr 2009 zurück auf das Jahr 2006. UBA-Texte 36/2015. Berlin: Umweltbundesamt.

- KUTTLER W: Klimatologie. Verlag Schöningh, Paderborn, 2. Auflage, ISBN 978-3-8252-4059-2, 2013.
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg
- LEIBUNDGUT CH: Abflussdynamik – unbekannte Größe im Gewässerschutz? In: Lebensraum Gewässer – nachhaltiger Gewässerschutz im 21. Jahrhundert. Proceedings eines internationalen Symposiums. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser und Wasserwirtschaftsverband Baden-Württemberg e.V. (Hrsg), S 37-51, 1996.
- LEISTERT, H., STEINBRICH, A., SCHÜTZ, T., WEILER, M. (2018): Wie kann die hydrologische Komplexität von Städten hinreichend in einem Wasserhaushaltsmodell abgebildet werden? In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 39.18, M³ - Messen, Modellieren, Managen in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018 in Dresden. Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling, Jens Gundermann (Herausgeber). Technische Universität Dresden, Professur für Hydrologie. Dresden 20018.
- LEOPOLD LB: Hydrology for Urban Land Planning - A Guide Book on the Hydrologic Effects of Urban Landuse US Geological Survey Circular 554, 1968.
- OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A., & VOOGT, J. A. (2017). Urban climates. Cambridge University Press.
- RIES, F., KIRN, L., STEINBRICH, A., WEILER, M. (2018): Nicht jedes hundertjährige Niederschlagsereignis generiert Abfluss – Erfahrungen aus großskaligen Starkregenversuchen in Baden-Württemberg. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 39.18, M³ - Messen, Modellieren, Managen in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018 in Dresden. Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling, Jens Gundermann (Herausgeber). Technische Universität Dresden, Professur für Hydrologie. Dresden 20018.
- SOMMERHÄUSER M, SCHUMACHER H, PODRAZA P: Fließgewässertypologie und Leitbildentwicklung - Zielsetzung und Methoden. Bericht der Jahrestagung 1997 Hrsg Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Krefeld, S 86-90, 1998.
- TETZLAFF D: Hydrologische Bewertung der Abflussdynamik in urbanen Gewässern. Dissertation an der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albrecht-Ludwigs-Universität Freiburg, 2003.
- SCHERER, I., HENRICHS, M., UHL M., SCHUETZ, T., WEILER, M., HACKENBROCH, K., KÖNIG, F. UND T. FREYTAG (2017): Planungsinstrumente und Bewirtschaftungskonzepte für den Wasserhaushalt in Siedlungen, Korrespondenz Wasserwirtschaft, 4 (17), S. 221-228.
- STEINBRICH, A., LEISTERT, H., WEILER, M. (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. Environmental Earth Sciences, 75 (1423), S. 1-16.
- WHITE MD, GREER KA: The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Peñasquitos Creek, California. In: Landscape and Urban Plan 74, 125-138, 2006.
- YA L, YOUNG X, YI S: Hydrological Effects of Urbanization in the Qinhuai River Basin, China. In: Procedia Engineering, 28, pp. 767-771, 2012.
- YANG G, BOWLING LC, CHERKAUER KA, PIJANOWSKI BC, NIYOGI D: Hydroclimatic response of watersheds to urban intensity- an Observational and modeling based analysis for the White River basin, Indiana. In: Journal of Hydrometeorology 11 (1), 122-138, 2010.
- WESSOLEK, G., KAUPENJOHANN, M., RENGGER, M. (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Bodenökologie und Bodengenese Heft 40