HYDROLOGY

Freiburg HydroNotes

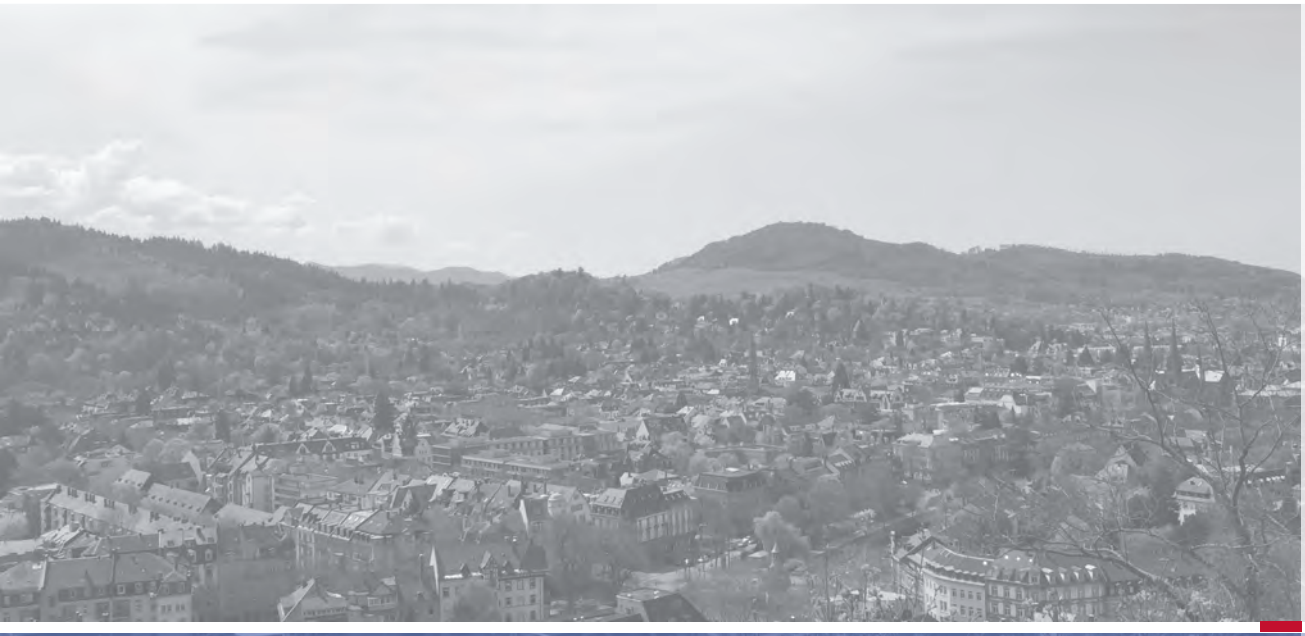
Band 5

Markus Weiler, Tobias Schütz, Axel Schaffitel,
Merle Koelbing, Andreas Steinbrich (Uni FR),
Thomas Brendt (BIT Ingenieure)

Der naturnahe Wasserhaushalt als Leitbild in der Siedlungswasserbewirtschaftung

Analyse der Langzeitauswirkungen auf Grundwasserneubildung, Verdunstung und Abflussbildung im urbanen Raum

2019
Professur für
Hydrologie



Universität Freiburg

Gefördert durch den Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz

badenova
Energie. Tag für Tag

UNI FREIBURG

Abschlussbericht	Projekt 2015-08 des Innovationsfond Klima und Wasserschutz
Titel	Der naturnahe Wasserhaushalt als Leitbild in der Siedlungswasserbewirtschaftung – Analyse der Langzeitauswirkungen auf Grundwasserneubildung, Verdunstung und Abflussbildung im urbanen Raum
Herausgeber	Professur für Hydrologie, Fakultät für Umwelt und natürliche Ressourcen, Universität Freiburg
Datum	August 2019
Autoren	Prof. Dr. Markus Weiler, Jun. Prof. Tobias Schütz, Axel Schaffitel, Merle Koelbing, Andreas Steinbrich (Universität Freiburg) Dipl. Ing. Thomas Brendt (BIT Ingenieure)
Bezug über	Professur für Hydrologie, Fakultät für Umwelt und natürliche Ressourcen, Universität Freiburg
Bildnachweis	Titelbild: Markus Weiler, Blick vom Schlossberg über Freiburg nach Südwesten

Inhalt

1. *Zusammenfassung*
2. *Einleitung*
   - *2.1 Hintergrund - Problemstellung*
   - *2.2 Stand der Technik*
   - *2.3 Zielsetzung - Forschungskonzept*
3. *Untersuchungsgebiet*
4. *Ergebnisse*
   - *4.1 Relevante Oberflächentypen im urbanen Raum*
   - *4.2 Klimatischer Wasserhaushalt im urbanen Raum*
   - *4.3 Oberflächenabfluss einzelner Stadtteile*
   - *4.4 Bodenwasserhaushalt relevanter Siedlungsflächen*
   - *4.5 Entwicklung eines GIS-Daten basierten Modells zur verteilten und kontinuierlichen Modellierung des Wasserhaushalts von Städten*
   - *4.6 Benchmark-Modellierung des Mischwasseranfalls unter verschiedenen Regenwasserbewirtschaftungskonzepten mit bestehenden Modellen*
   - *4.7 Fallstudie Landwasser - Modellanwendung RoGeR_WBM_Urban: Anwendungsbeispiel der neu erhobenen Daten und des neu entwickelten Modells*
   - *4.8 Naturnahe städtische Wasserbilanz – Synthese – Szenarien – Empfehlungen*
5. *Produkte*
6. *Schlussbemerkungen*
7. *Literaturverweise*

1. Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben befasste sich mit den Auswirkungen des Städtebaus auf den Wasserhaushalt. Es untersuchte, wie stark Faktoren der Wasserwirtschaft – zum Beispiel Verdunstung, Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss – innerhalb der Stadt variieren und wie deutlich sie sich von der natürlichen Umgebung unterscheiden. Der Fokus der Arbeiten lag vor allem darauf, welchen Einfluss Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung auf die langjährige Entwicklung der Grundwasserneubildung und der Verdunstung haben. Über einen Zeitraum von 3.5 Jahren wurde ein aufwendiges Forschungsprogramm im Freiburger Stadtgebiet durchgeführt: Auf verschiedenen Referenzflächen wurde über drei Jahre hinweg gemessen, wie dort Regenwasser verdunstet oder versickert, sich auf Stadtklima und Grundwasser auswirkt und wie effizient das Kanalsystem und bestehende Versickerungsmaßnahmen sind. Anhand der Daten wurde ein anwendungsgeeignetes und frei verfügbares Modell zur räumlich hochaufgelösten kontinuierlichen Simulation des Siedlungswasserhaushaltes entwickelt. Der Vergleich des Siedlungswasserhaushalts mit unbebauten Naturflächen erlaubt Rückschlüsse darauf, wie naturnah der Freiburger Wasserkreislauf ist.

2. Einleitung

2.1 Hintergrund - Problemstellung

Seit dem 1. Januar 1999 gibt das Wassergesetz von Baden-Württemberg die Umsetzung nachhaltiger Maßnahmen der Siedlungswasserbewirtschaftung vor, um das Ziel einer naturnahen Wasserbilanz auch für Gewässer innerhalb von Siedlungsräumen zu erreichen. Diese Vorgabe orientiert sich dabei am potentiellen Wasserhaushalt von Landschaften/Siedlungsräumen unter Annahme einer natürlichen/ursprünglichen Landnutzungsform. Eine Hauptannahme ist hierbei, dass die dominante Ursache für die Diskrepanz zwischen ursprünglicher und urbaner Wasserbilanz der hohe Anteil versiegelter Flächen innerhalb von Siedlungsräumen ist. Die dadurch verstärkt anfallenden Oberflächenabflüsse verändern die typische Struktur des Wasserhaushalts grundlegend: Der Anteil von Grundwasserneubildung und Verdunstung am Wasserhaushalt nimmt aufgrund der verringerten Infiltrationsleistung innerhalb von Siedlungsflächen langfristig ab. Um u. A. diesem Effekt entgegenzuwirken, schreibt das Gesetz zentrale bzw. dezentrale Maßnahmen zur Versickerung der anfallenden Abflüsse vor, soweit dies schadlos möglich ist (WG, 2005). Dies kann zwar einerseits den Oberflächenabfluss reduzieren, aber andererseits auch die Grundwasserneubildung überproportional erhöhen, so dass die naturnahe Wasserbilanz auch nicht erreicht werden kann, bzw. es sogar durch die erhöhte Grundwasserneubildung zu sekundären Problemen kommen kann. Diese Prozesse können auch im Zusammenhang mit der angeschlossenen Kanalisation Bedeutung erlangen: zum einen wird der anfallende Oberflächenabfluss in Mischsystemen potentiell verringert, zum anderen kann eine erhöhte Grundwasserneubildung zu einem verstärkten Fremdwasseranfall führen. Außerdem ist die Quantifizierung des vorangestellten Leitbildes einer naturnahen Wasserbilanz bisher nicht eindeutig gelöst: Die hohe räumliche und zeitliche Variabilität des Klimas und damit auch des Wasserhaushaltes bedingt für jeden Ort einen spezifischen naturnahen Wasserhaushalt der durch lokale Faktoren wie die Topographie oder auch die lokale, ursprüngliche Landnutzung bestimmt wird.

Auch auf den unversiegelten und teilversiegelten Flächen innerhalb von Siedlungen können die Wasserhaushaltskomponenten Grundwasserneubildung und Verdunstung durch verschiedene Ursachen stark verändert sein: z.B. in Grünanlagen und Parks, sowie in Privatgärten wird in der Regel zusätzlich bewässert und damit die Wasserverfügbarkeit beeinflusst. Unter Rasenpflasterflächen oder Fugenpflasterflächen findet zwar verstärkt Infiltration statt, es ist jedoch unklar ob die teilversiegelte Fläche des Pflastersteins die Verdunstung unterbindet oder durch direkte Wärmeleitung zusätzliche Verdunstungsenergie zur Verfügung stellt. Auch zentrale Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse können sowohl die Grundwasserneubildung als auch die aktuelle Verdunstung durch die hohe verfügbare Wassermenge nachhaltig verändern. Allgemein sind nur wenige Messdaten der Wasserbilanz für unversiegelte und teilversiegelte Flächen innerhalb von Siedlungen verfügbar und es ist daher nicht bekannt wie sich der Wasserhaushalt dieser Flächen speziell auf die beiden Komponenten Grundwasserneubildung und aktuelle Verdunstung für gesamte Siedlungen oder Städte auswirken.

Die geschilderte Problematik ist für verschieden Akteure des öffentlichen Lebens von großer Relevanz: Im Bereich der Stadtplanung und Siedlungsentwässerung ist die Umsetzung eines naturnahen Wasserhaushalts bisher nur unter der Annahme möglich, dass alle anfallenden Niederschläge im Stadtgebiet zurückgehalten werden sollen. Die durch den Einsatz nachhaltiger Maßnahmen der Siedlungsentwässerung erhöhte Verdunstung kann durch Kühlungseffekte einen Einfluss auf das Stadtklima bewirken. Hier scheint es möglich ein Steuerungspotential zu erschließen, das bisher ungenügend genutzt wird. Neben den Planungsansätzen ist jedoch die Frage der raumzeitlichen Dynamik der Grundwasserneubildung unter Städten und ihrer Quantifizierung eine wichtige Frage für die Umsetzung des nachhaltigen Grundwassermanagements im Bereich der Trinkwasserversorgung. Dies betrifft jedoch nicht nur die Frage der verfügbaren Wassermengen, sondern auch die potentiellen Gefahren der Verunreinigung durch verstärkte Schadstoffeinträge aus dem urbanen Raum ins Grundwasser. Gerade dezentrale und zentrale Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse müssen hier gesondert betrachtet werden, da sich aufgrund der großen, angeschlossenen Flächen nicht nur die lokalen Wasserumsatzmengen erhöhen, sondern auch eine erhöhte Verschmutzungsgefahr besteht. In diesem Zusammenhang kann es u. A. auch zu erhöhten Grundwasserständen und den damit verbundenen Risiken erhöhter Schadstoffeinträge kommen.

Neben der Gestaltung von Trennkanalisationen stellt sich in diesem Zusammenhang auch für Betreiber von bestehenden Mischwassersystemen die Frage wie dezentrale und zentrale Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen den Mischwasseranfall verändern und damit Kosten verursachen oder sparen (potentiell verringerter Mischwasseranfall ggü. einem potentiellen Anstieg des Fremdwasseranteils).

In Rahmen des Projektes *Der naturnahe Wasserhaushalt als Leitbild in der Siedlungswasserbewirtschaftung – Analyse der Langzeitauswirkungen auf Grundwasserneubildung, Verdunstung und Abflussbildung im urbanen Raum* wurden in diesem Zusammenhang über drei Jahre durch kontinuierliche Datenerhebung und die Entwicklung und Anwendung eines geeigneten und frei-verfügbaren Modells folgende Fragenkomplexe bearbeitet:

- Lässt sich der „naturnahe Wasserhaushalt“ für bestimmte Siedlungsräume bestimmen? Wie stark variiert der Wasserhaushalt innerhalb einer Stadt und wie deutlich unterscheidet er sich vom natürlichen Wasserhaushalt auf Referenzflächen in der Umgebung? Wie groß ist in diesem Zusammenhang der Einfluss zentraler und dezentraler Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse auf den Wasserhaushalt von Siedlungsräumen
- Wie groß ist die aktuelle Verdunstung im urbanen Raum? Wie beeinflussen zentrale und dezentrale Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse die Verdunstung (Evaporation und Transpiration) innerhalb des Siedlungsraumes durch erhöhte Wasserverfügbarkeit? Lässt sich der Einfluss dieser Maßnahmen auf die Energiebilanz und damit das Stadtklima quantifizieren?
- Wie groß ist die Grundwasserneubildung unter unversiegelten Flächen im urbanen Raum und wie groß ist sie auf Flächen die der zentralen oder dezentralen Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse dienen? Trägt eine verbesserte Quantifizierung der Verdunstung von relevanten Oberflächentypen im urbanen Raum zur verbesserten Bestimmung der Grundwasserneubildung ganzer Städte/Siedlungen bei?
- Lässt sich in diesem Zusammenhang ein Einfluss des „naturnahen Wasserhaushalts“, bzw. des Einsatzes von nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen auf den Anfall von Oberflächenabflüssen im Trennsystem und den Mischwasseranfall für Mischkanalisationen quantifizieren? Besteht ein Zusammenhang zwischen der eingesetzten Form der Regenwasserbewirtschaftung und dem Fremdwasseranfall? Kann die höhere Informationsdichte zum urbanen Wasserhaushalt dazu beitragen lokale wasserwirtschaftliche Fragestellungen/Probleme zu lösen?

2.2 Stand der Technik

Die Wasserbilanz im urbanen Raum wird aufgrund mehrerer Aspekte, wie z.B. der Klimavariabilität innerhalb eines Siedlungsraumes (Topographie, Architektur) oder der kleinräumigen Variabilität der verschiedenen städtischen Oberflächen, und dem sehr unterschiedlichen hydrologischen Verhalten (Abbildung 1), in der Regel durch Energie- und/oder Wasserbilanzmodelle bestimmt (z.B. Grimmond et al., 1986, Grimmond und Oke, 2002 oder Mitchell et al., 2008), die die auftretende Variabilität der städtischen Oberflächen nur vereinfachend berücksichtigen. Neben der Abflussbildung ist die Beschreibung der Verdunstung in der Regel der wichtigste Aspekt (Fletcher et al., 2013, Mitchell et al., 2007). Der Fokus vieler Anwendungen liegt dabei auf der detaillierten Beschreibung der Strahlungs- oder Energiebilanz zur Bestimmung der Evaporation des urbanen Raums unter Berücksichtigung des Aspekts des „Urban heat islands“ der städtischen Wärmeinsel (z. B. Arnfield, 2008 oder Järvi et al., 2011). Zur Beschreibung der Verdunstung sind die wichtigsten Parameter Lufttemperatur, Feuchtedefizit, Globalstrahlung und Ventilation. Auch auf kleineren zeitlichen Skalen als Tageswerten (z. B. Skidmore et al., 1969, Xu and Singh, 1998) lässt sich dieser Zusammenhang nachweisen. Für die räumliche Parametrisierung der Eingangsparameter werden u. A. auch empirische Ansätze verwendet: so konnte z.B. der Kühlungseffekt von Bäumen (Lufttemperatur) durch Beschattung mit

einem empirischen Modell quantifiziert werden (Shashua-Bar und Hoffmann, 1999). Aufgrund der geringen Flächenanteile der Vegetation in Städten erfolgte die Bestimmung der städtischen Verdunstung unter Berücksichtigung der Transpiration erst in der jüngeren Vergangenheit (z. B. Grimmond et al., 2010) unter der Verwendung des Penman-Monteith-Modells (Monteith, 1965). Andere Wasserbilanzgrößen wie die Grundwasserneubildung oder die Interzeption der Vegetation werden in den meisten Studien nur oberflächlich betrachtet (Fletcher et al., 2013) oder mit stark vereinfachten Ansätzen beschrieben (z. B. Göbel et al., 2004). Im Gegensatz dazu wurde in Feldstudien schon die besondere Bedeutung von Stadtbäumen für die Interzeption nachgewiesen (Asadian und Weiler, 2009; Endbericht Vaubanprojekt, 2013).

Gerade im Zusammenhang mit der nachhaltigen Wasserbewirtschaftung von Siedlungsflächen scheint dieser Aspekt von besonderer Bedeutung zu sein. So wurde vom Senat für Stadtentwicklung und Umwelt der Stadt Berlin für die gesamte Stadt die Wasserbilanz in einer räumlichen Auflösung <5 m berechnet (http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/din_213.htm). Die Berechnung der Evapotranspiration erfolgte dabei mit dem Bagrov/Glugla-Verfahren (semi-empirisch) (Glugla und Tiemer, 1971). Die Verdunstung im Stadtgebiet variiert dabei zwischen 0 und 400 mm im Jahr (Kartenblatt 2.13.5) und beeinflusst damit die Wasserbilanz mit räumlich unterschiedlicher Intensität.

Trotz der räumlich hohen Auflösung der für Berlin vorliegenden Informationen beruht auch dort die Bestimmung der Grundwasserneubildung auf einem einfachen Abschätzverfahren, das flächengewichtet die Grundwasserneubildung als Bilanzdefizit zwischen langjähriger mittlerer Sickerrate und langjährigen mittleren Abflüssen berechnet. Daher besteht ein großer Bedarf an aktuellen Messdaten und raumzeitlich hochauflösbaren Modellen, die die Variabilität der Wasserbilanzgrößen Grundwasserneubildung und aktuelle Verdunstung in ihrer räumlichen und zeitlichen Dynamik für unterschiedliche Flächen im Städtischen Raum beschreiben.

Neben den natürlichen, den teilversiegelten und den versiegelten Flächen innerhalb von Siedlungen, deren Wasserhaushalt in erster Linie von den vertikalen Wasserflüssen (N, GWN, ET) und dem Abfließen der Oberflächenabflüsse bestimmt wird, sind die dezentralen und zentralen Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse gesondert zu betrachten. So sind sie als technische Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung entsprechend den jeweiligen Vorgaben umgesetzt, und damit teilweise unabhängig von den lokalen Gebietseigenschaften (Geologie und Pedologie) parametrisierbar. Dies erlaubt zwar eine verbesserte Übertragung/Vorhersage des hydrologischen Verhaltens solcher Flächen (z.B. anhand eines Datensatzes des „Sickerverhaltens durchlässiger befestigter Siedlungsflächen“ (Illgen, 2009), bedingt aber auch die genauere Analyse der langfristigen Dynamik der durch die verstärkte Infiltrationsleistung beeinflussten Wasserhaushaltskomponenten, wie z. B. der Evaporation aus dem Raum unterhalb einer Pflasterdecke. Zur Quantifizierung der Verdunstung aus Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung gibt es bisher nur wenige, gesicherte Erkenntnisse (Fletscher et al., 2013.). Neuere Ansätze zur Erfassung dieser Prozesse sind z. B. die direkte Messung der Verdunstung aus gepflasterten Flächen anhand innovativer Messtechniken (Starke et al., 2011). Es wurden bisher jedoch noch keine langfristigen oder hoch aufgelösten Datensätze zur Verdunstung aus der Regenwasserbewirtschaftung dienenden Flächen publiziert. In diesem Zusammenhang zeigen sich auch die Schwierigkeiten, die bei der Bestimmung des Grundwasserneubildung unter Versickerungsflächen auftreten: Die Kombination/Bilanzierung von Informationen zu Niederschlags- und Infiltrationsleistung mit der direkten Modellierung der Verdunstung liefert eher einen Schätzwert der aktuellen Grundwasserneubildung, als eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Beschreibung der Dynamik der relevanten Prozesse (z. B.: Göbel et al., 2004; Fletscher et al., 2013). Andere Effekte die z. B. für Pflasterflächen die längerfristige Vorhersage der Wasserhaushaltskomponenten erschweren, sind Alterungseffekte wie das so genannte „Clogging“ oder zu Deutsch Kolmatierung (z. B.: Lucke und Beecham, 2011, Sansalone et al., 2012). Nichts desto trotz sind gerade permeable Pflasterflächen ein weit verbreitetes Tool zur Implementierung der nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftung von Siedlungsflächen, da sich u. A. in Kombination mit Geotextil und ähnlichen Materialien zusätzliche positive Effekte für die Hebung der Wasserqualität des Grundwassers erzielen lassen (Imran et al., 2013).

Neben den dezentralen Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung heben sich die zentralen Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung auch noch in anderer Hinsicht von nicht-regenwasserbewirtschafteten Siedlungsflächen ab: Der Wasserhaushalt dieser Flächen wird um eine laterale

Komponente erweitert – das angeschlossene Einzugsgebiet, dessen Niederschläge in der Maßnahme versickert werden sollen. Dies hat natürlich zur Folge, dass der positiv eingehende Anteil des Wasserhaushalts stark ansteigt. Die hohe Sickerleistung dieser Anlagen gewährleistet zwar in der Regel den Rückhalt der anfallenden Wassermengen, es ist jedoch auch hier nicht eindeutig wie sich die langfristige Verdunstungsbilanz und damit auch die Grundwasserneubildung dieser Flächen durch die hohe Wasserverfügbarkeit ändert (Fletscher et al., 2013). Dazu kommt das üblicherweise die Auswirkung der Regenwasserbewirtschaftung auf die Wasserbilanz auf der Zeitskale von einzelnen Niederschlags-Abflussereignissen betrachtet wird (z.B. Holmann-Dodds et al., 2003 oder Petrucci et al., 2011) und damit die eher langfristigen Komponenten wie Grundwasserneubildung und Verdunstung schlechter bewertet werden können. Die künstliche Erhöhung der Grundwasserneubildung kann positive Effekte auf den Basisabfluss haben, diese sind jedoch schwer nachzuweisen (Hamel et al., 2013). Laut Göbel et al. (2004) kann die lokal verstärkte Infiltration aber auch zur Überkompensation der in der Umgebung verringerten Grundwasserneu-bildung führen, die sich durch aufgestautes oberflächennahes Grundwasser auswirkt. Dabei entstehen weitere Risiken die die Beeinträchtigung der Wasserqualität des Grundwassers betreffen (Clark und Pitt, 2007; Göbel et al., 2008.).

Eine genaue und langfristige Bestimmung der zeitlichen Dynamik aller Wasserhaushaltskomponenten von zentralen und dezentralen Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse ist auch vor dem Hintergrund der verursachten Kosten Ziel führend: z. B. erfolgt die Evaluierung solcher Maßnahmen bezüglich Ihrer Effektivität oder der Kosten bisher meist über die Quantifizierung ihrer Auswirkungen auf die Gewässernetze während Spitzenabflüssen (z.B. Fassmann, 2006; Lee et al., 2012). Dabei zeigt sich, dass vor allem dezentrale Maßnahmen, wie z. B. Gründächer oder kleinere Rückhaltevolumen einen hohen Flächenanteil aufweisen müssen um ihre Wirkung zu entfalten (Petrucci et al., 2011).

2.3 Zielsetzung - Forschungskonzept

Aus den eingangs entwickelten Fragenkomplexen und den festgestellten Forschungsdefiziten wurden innerhalb des Projektes folgende Arbeits-Hypothesen bearbeitet:

a) Der Wasserhaushalt innerhalb von Siedlungsräumen lässt sich, unter Berücksichtigung seiner räumlichen Variabilität, vom Wasserhaushalt naturnaher Referenzflächen klar abgrenzen und kann somit für die Stadtplanung bewertet werden.

b) Der Einfluss der aktuellen Verdunstung von Städten auf die Energiebilanz und das Stadtklima (Kühlungseffekt) kann unter Berücksichtigung aller relevanten Oberflächentypen, sowie zentraler und dezentraler Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse, quantifiziert werden.

c) Die aktuelle Grundwasserneubildung von Städten kann unter Berücksichtigung aller relevanten Oberflächentypen, indirekter Quellen (Oberflächengewässer), sowie zentraler und dezentraler Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse, quantifiziert werden.

d) Die Anwendung verbesserter Wasserhaushaltsmodelle zur Quantifizierung des urba-nen/„naturnahen“ Wasserhaushalts von Siedlungsräumen erlaubt eine genauere Bestimmung anfallender Oberflächenabflüsse in Trenn- und Mischkanalisationen.

e) In Abhängigkeit der umgesetzten Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung lässt sich zwischen der zeitlichen Dynamik der Grundwasserneubildung und der Dynamik des Fremdwasseranfalls ein Zusammenhang quantifizieren.

f) Räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Informationen zum Siedlungswasserhaushalt können direkt als Werkzeug zur Bearbeitung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen eingesetzt werden.

Die Verifizierung/Falsifizierung dieser Hypothesen wurde in sechs parallelen Arbeitsprogrammen (AP), die direkt aufeinander aufbauten bzw. miteinander verknüpft waren, durchgeführt:

AP I Relevante Oberflächentypen im urbanen Raum

AP II Klimatischer Wasserhaushalt im urbanen Raum

AP III Oberflächenabfluss einzelner Stadtteile

AP IV Bodenwasserhaushalt relevanter Siedlungsflächen

AP V Die städtische Wasserbilanz

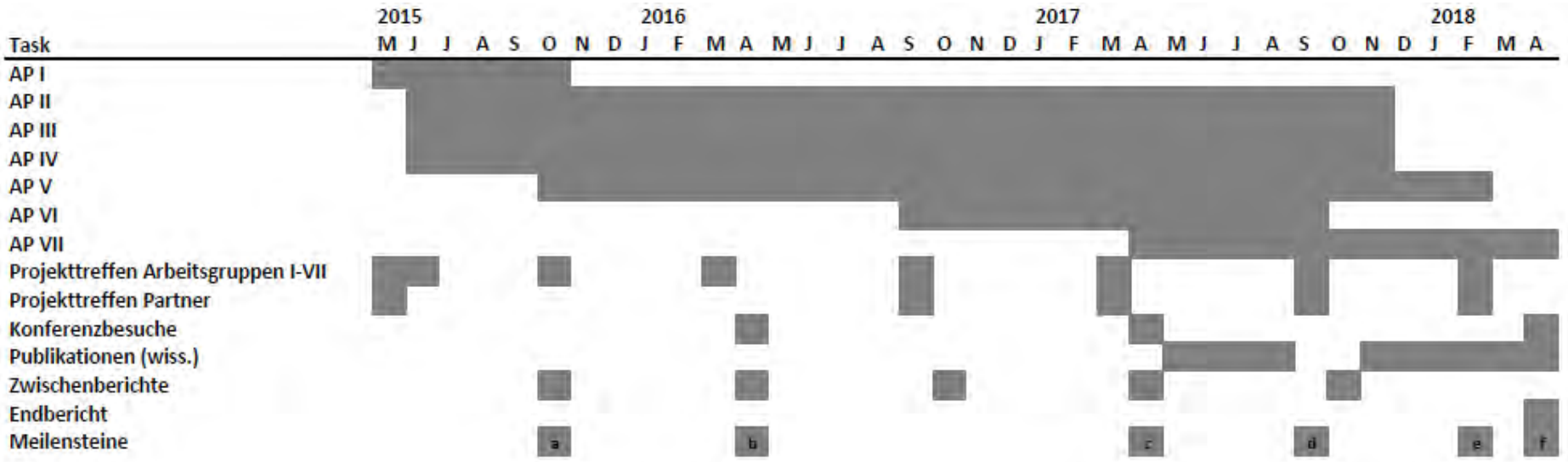
a) Entwicklung des GIS-Daten basierten Modells (RoGeR_WBM_Urban)

b) Benchmark-Modellierung des Regenwasserabflusses mit den in Freiburg bisher eingesetzten Modellen Hystem-Extran/KOSIM

AP VI Fallstudie Landwasser

AP VI Naturnahe städtische Wasserbilanz – Synthese – Szenarien – Empfehlungen

Tabelle 1: Zeitplanung und Meilensteine



Meilensteine

a Fertigstellung der Messnetze AP II - IV

b Fertigstellung Datensatz relevanter Siedlungsflächen inkl. Bodenphysikalischer Parameter

c Abschluss Modellentwicklung - erste Modellierung Wasserhaushalt Freiburg

d Abschluss Fallstudie Landwasser

e Modellierung Wasserhaushalt Freiburg für den gesamten Datensatz/Zeitraum - Benchmark-Vergleich

f Ende des Projekts - Publikation Endbericht und Ergebnisse

3. Untersuchungsgebiet

Abbildung 1: Luftbild des Untersuchungsgebiets – Freiburg im Breisgau (aus: P. Gabelmann, 2012)

Als Untersuchungsgebiet wurde die Stadt Freiburg ausgewählt (Abb. 1), jedoch kann das neu entwickelte Modell, bzw. können die Projektergebnisse auch in anderen Städten angewandt und auch auf andere Städte übertragen werden. Freiburg eignet sich hinsichtlich mehrerer Aspekte als Untersuchungsgebiet: Zunächst wurden im Stadtteil Vauban verschieden Konzepte zum nachhaltigen Siedlungswasserhaushaltsmanagement umgesetzt, die innerhalb des Innovationsfondprojektes: “Evaluierung der Regenwasserbewirtschaftung im Vaubangelände, Freiburg i. Br.“ u. A. gemessen, evaluiert und modelliert wurden. Dadurch sind schon relevante Vorarbeiten und einzigartige Datensätze vorhanden, die in diesem Projekt weiter ausgewertet werden. Zusätzlich sind im ganzen Stadtbereich verschiedene zentrale und dezentrale Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse umgesetzt. Die Siedlungsentwässerung in der Stadt Freiburg erfolgt teilweise im Misch- und teilweise im Trennsystem.

Direkt am Stadtrand liegen mit dem Mooswald und der Flugplatzwiese naturnahe Flächen, die in der ursprünglichen Planung zur Nutzung als Referenzflächen vorgesehen waren: Die vorhandene Landnutzung Wald / Wiese entspricht einem möglichen Mix der „ursprünglichen“ Landnutzung der Region (Auwald (fernere Vergangenheit) bzw. landwirtschaftliche Felder/ Wiesen (jüngere Vergangenheit)). Im Verlauf des Projektes wurde dieser Ansatz jedoch in anderer Form umgesetzt: Zwar wurde die Messstation am Flugplatz für die Bestimmung des Wasserhaushaltes unter Grasflächen genutzt, der Referenzwasserhaushalt wurde jedoch anhand einer neuentwickelten Methode (Steinbrich et al., 2018) für ganz Freiburg anhand des Wasserhaushaltes des Landnutzung-Mixes auf den der Stadt Freiburg vergleichbaren Böden in der Freiburger Bucht berechnet, da dieser Ansatz eine weit höhere Repräsentativität verspricht, als nur die Berücksichtigung der Vegetation am Flugplatz (siehe APVII).

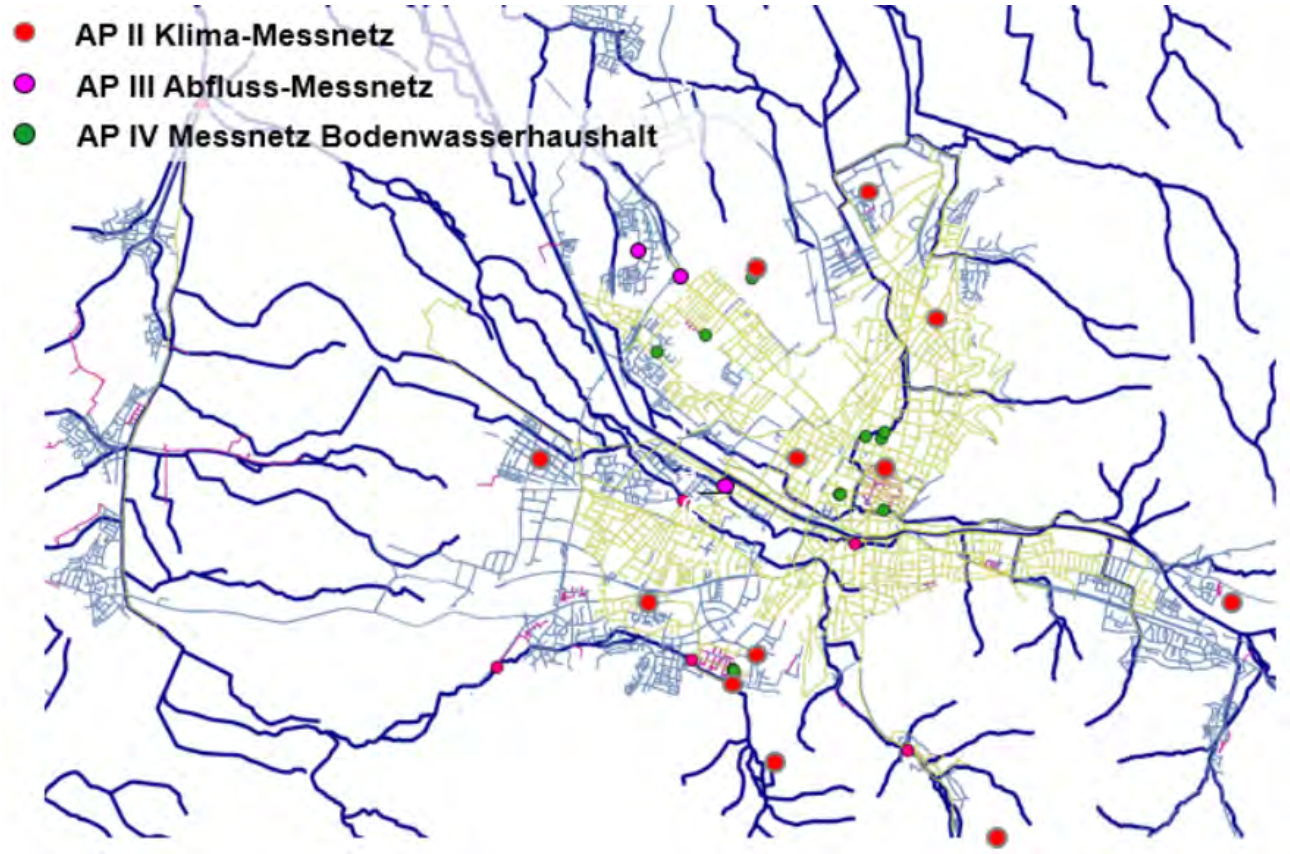


Abbildung 2: Innerhalb des Projektes verfügbares und erstelltes Messnetz der jeweiligen Arbeitspakete.

4. Ergebnisse

4.1 Relevante Oberflächentypen im urbanen Raum

In AP I wurden die für das Gesamt-Projekt relevanten Oberflächeneigenschaften von typischen, im urbanen Raum vorhandenen Flächen definiert und klassifiziert. AP I bildet die Grundlage für die darauf aufbauenden AP III + IV und wurde zu Beginn des Forschungsprojektes umgesetzt. In AP I sind alle Akteure des Projektes beteiligt (Informationsaustausch – gemeinsame Wissensbasis). Auf der Basis vorhandener Kartierungen und Klassifizierungen (ESE Luftbildauswertung 2009) wurden für alle Flächenklassen die Flächenanteile für Freiburg bestimmt (GIS-Analyse) und anhand Ihrer Relevanz priorisiert. Dabei wurde auch nach Art des hydrologischen Inputs unterschieden werden: z.B. Flächen mit rein vertikalem Niederschlagsinput und Flächen mit lateralen Zuflüssen. Zur notwendigen Berücksichtigung der Interzeptionsprozesse und der Einstrahlung (Überschattung) der Bäume wurde ein an der Professur für Hydrologie entwickelter GIS-Datensatz (Baumflächen) genutzt.

Des Weiteren musste zunächst ein Überblick über bestehendes Kartenmaterial erlangt werden und der Zugang ermöglicht werden. Folgende Geodatensätze wurden recherchiert:

- GIS-Datensatz abflusswirksamer Flächen in Freiburg (Stand September 2015)
- Rasterdaten zum Oberflächen-Versiegelungsgrad (räumliche Auflösung 1x1 m) (Quelle: WaBoA)
- Kanalnetzplan der Stadt Freiburg
- Daten des automatisierten Liegenschaftskatasters (Lage von Gebäuden und Flurstücken)

- Luftbilder vom Siedlungsgebiet Freiburg von 2014 (Auflösung 10 cm) und 2013 (Auflösung 6 cm)
- Digitales Höhenmodell (räumliche Auflösung 1x1 m)
- Räumliche Lage von Stadtbäumen im Untersuchungsgebiet
- Bodenübersichtskarte 1:50.000
- Klimatopkartierung (Landschaftsplan 2020 Freiburg i. Br.)
- Unterteilung des Untersuchungsgebiets in Stadtbezirke

Der Datensatz zu abflusswirksamen Flächen beinhaltet räumliche Informationen zu Versiegelungsart und Befestigungsmaterialien im Untersuchungsgebiet. Grundlage bilden Erhebungen im Zuge der Einführung der gesplitteten Abwassergebühr. Unversiegelte Flächen sind dabei überwiegend nicht klassifiziert.
Abbildung 2 zeigt die im Datensatz gelisteten Versiegelungsarten im Untersuchungsgebiet.

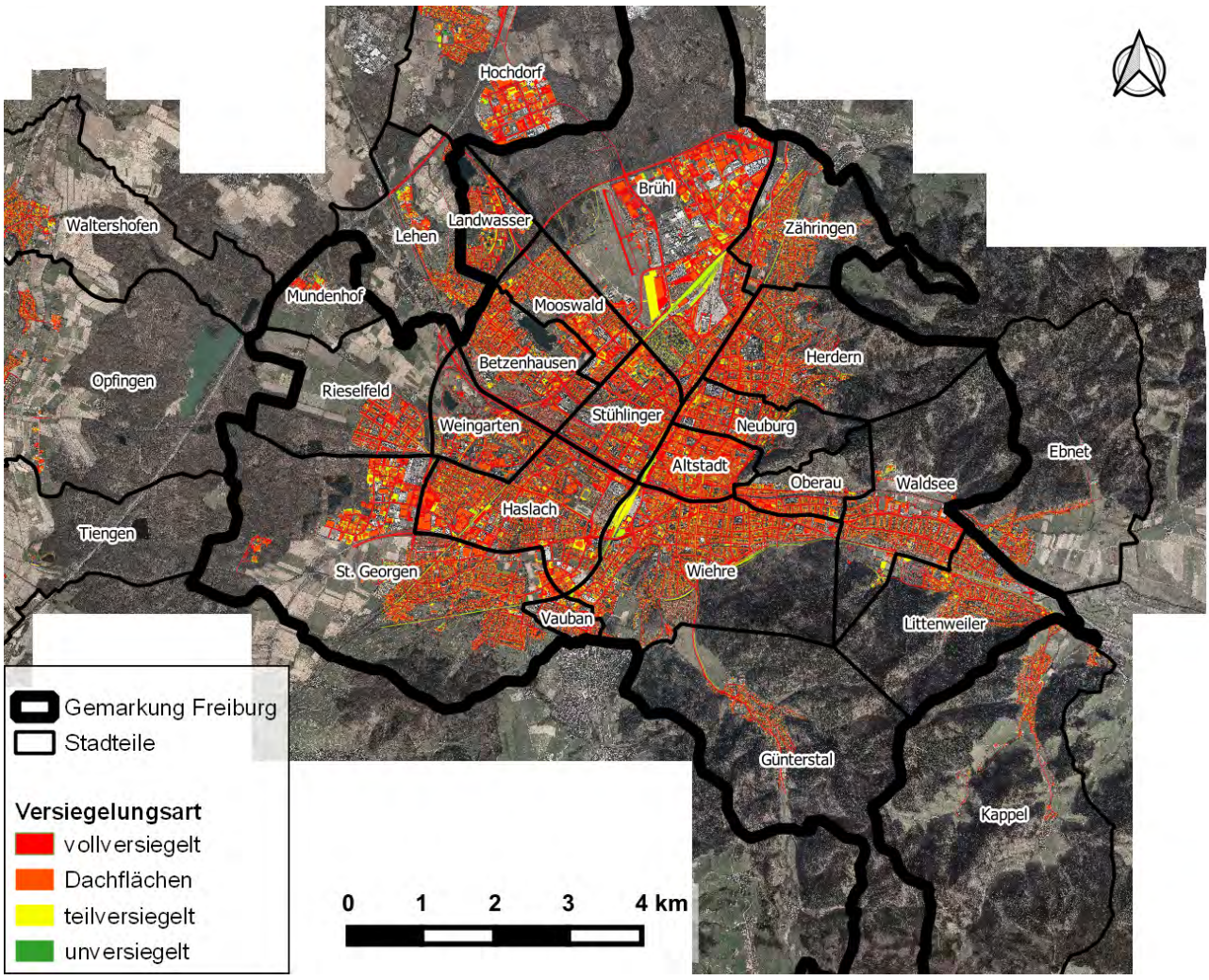


Abbildung 3: Datensatz der abflusswirksamen Flächen sowie Gemarkungs- und Stadtteilgrenzen

Anhand des Datensatzes wurde der Versiegelungsgrad sowie die Relevanz verschiedener Befestigungsarten auf Gemarkungsebene ausgewertet. Dabei wurde die unversiegelte Fläche Flurstück bezogen als Differenz zwischen Gesamtgröße und Summe der gelisteten versiegelten Flächen abgeleitet.
Abbildung *4* zeigt die Ergebnisse der Versiegelungsanalyse für die in der Gemarkung Freiburg gelisteten Flurstücke.

Der Analyse der Versiegelungs- und Befestigungsarten sind durch fehlende Detailangaben und Ungenauigkeiten im GIS-Datensatz Grenzen gesetzt. Nichtsdestotrotz lassen sich charakteristische Eigenschaften des Untersuchungsgebiets anhand des Datensatzes analysieren. So zeigt sich die Dominanz von konventionellen Dächern gegenüber Gründächern, welche nur rund 2% der versiegelten Oberfläche bedecken. Des Weiteren wird deutlich, dass der größte Anteil der versiegelten Oberfläche vollversiegelt ist. Dies verdeutlicht das Potential von durchlässigen Oberflächenbelägen zur Verbesserung der urbanen Wasserbilanz. Gleichzeitig stellen Pflasterflächen die größte Kategorie der bestehenden teilversiegelten Oberflächen dar. Anhand dieser Ergebnisse wurde eine Vorauswahl der in Arbeitspaket IV zu beprobenden Flächenklassen getroffen. In Frage kommende Standorte der einzelnen teilversiegelten Flächenklassen wurden anhand des GIS-Datensatzes und Standort-Begehungen ermittelt.

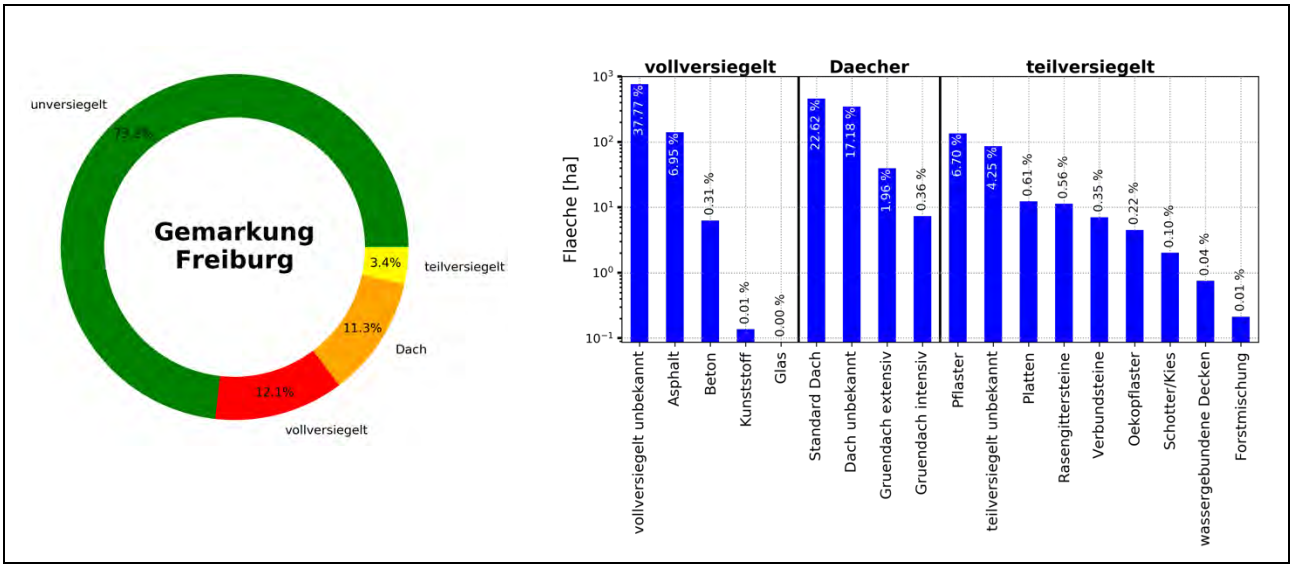


Abbildung 4: Versiegelungsgrade (links) und Befestigungsarten (rechts) innerhalb der Gemarkung der Stadt Freiburg (die Anteile der einzelnen Befestigungsarten beziehen sich auf die Gesamtfläche von versiegelter und teilversiegelter Oberfläche). Die Fläche ist logarithmisch aufgetragen, um die extrem hohen Unterschiede deutlich zu machen.

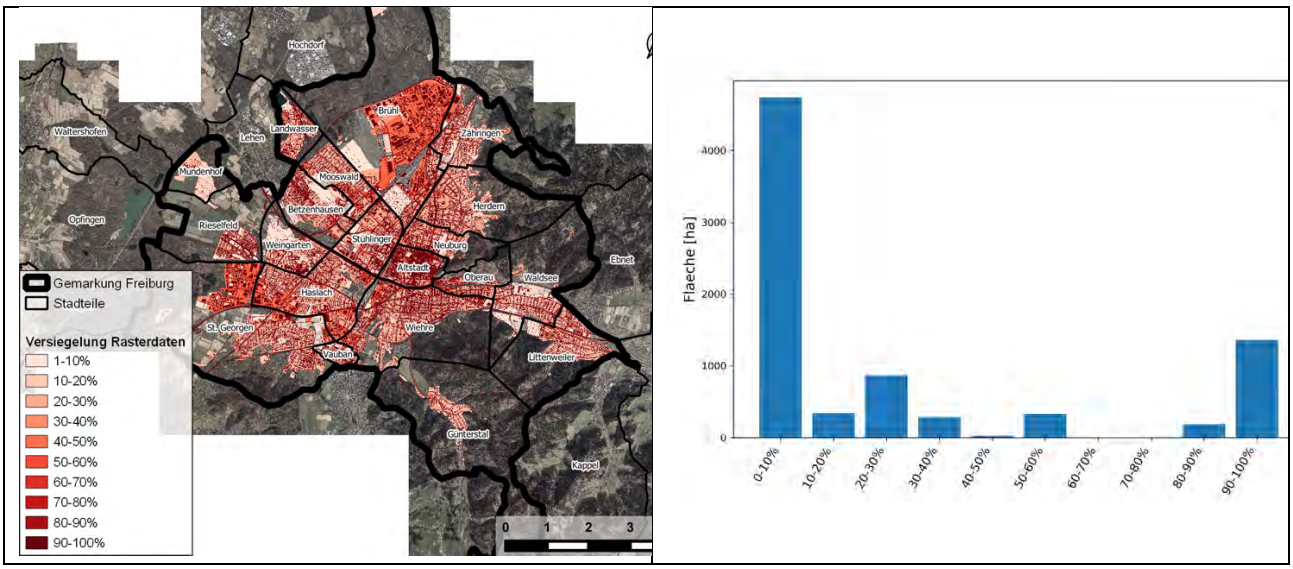


Abbildung 5: Rasterdaten zum Oberflächen-Versiegelungsgrad (links) und Auswertung des Versiegelungsgrades (rechts)

Zusätzlich wurden die Rasterdaten des Oberflächen-Versiegelungsgrads (WaBoA) für die Gemarkung Freiburg ausgewertet (
Abbildung). Dabei stellt die geringste Versiegelungskategorie (0-10% Oberflächenversiegelung) den größten Flächenanteil auf Gemarkungsebene dar (58% Flächenanteil). Mit einem Flächenanteil von 17% stellt die Versiegelungskategorie 90-100% den zweit größten Flächenanteil dar. In Vorbereitung für die geplanten Modellanwendungen wurde die Häufigkeitsverteilung der Oberflächentypen und Versiegelungsarten für die verschiedenen Stadtteile/-gebiete getrennt ausgewiesen (Tab. 2 und Abbildung 6) und Zielcluster für die Modellvalidierung gebildet. Dabei konnten Stadtteile mit ähnlicher Oberflächenstruktur (z. B. Vauban und Mooswald-West) sowie Stadtteile mit stark abweichender Oberflächenstruktur quantitativ ausgewiesen werden (z.B. Haslach-Haid).

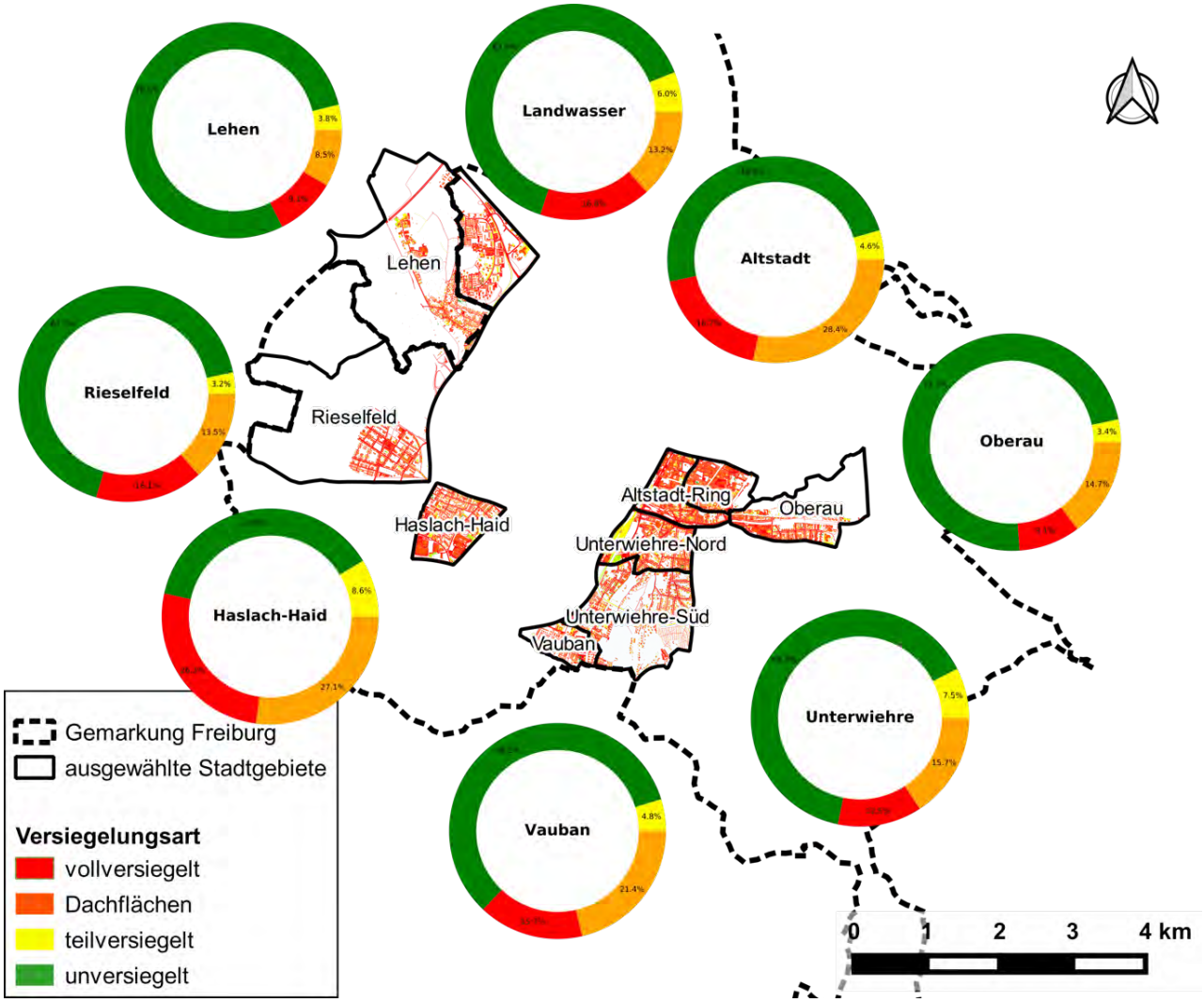


Abbildung 6: Analyse des Versieglungsgrads für ausgewählte Stadtbereiche.

Für die Modellanwendung zeigte sich jedoch, dass die größte Komplexität der Anwendung der bestehenden Datensätze für die Ziele des Projektes, nicht wie im Vorlauf angenommen in mangelnder Diversität und Abstufung der Oberflächeneigenschaften lag, sondern in der teilweise (auf sehr vielen Grundstücken) fehlenden räumlichen Zuordnung gerade der teilversiegelten Flächen und der dezentralen Maßnahmen zur Versickerung. Für die verteilte, flächenscharfe Modellierung des Wasserhaushaltes stehlt dies jedoch ein besonderes Hindernis dar. Daher wurde der Schwerpunkt der Arbeit in AP I auf die Entwicklung eines vielversprechenden Ansatzes zur Umgehung dieser, für Daten die zur Bestimmung der gesplitteten Abwassergebühr erhoben wurden sehr typischen Eigenschaft

(→ auch in andere Städte übertragbar!) gelegt. In Abb. 7 ist dieser Ansatz skizziert (die grünen Polygone sind Platzhalter für die nicht räumlich zuordenbaren Oberflächeneigenschaften und –Anteile): Aufgrund ihrer hydrologischen Eigenschaften werden die bekannten und unbekannten Flächen innerhalb einzelner Katasterflächen in Abflussquellen und Abflusssenken unterteilt. Die auf den nicht direkt an das Kanalnetz angeschlossenen Teilflächen entstehenden Abflüsse werden dann zunächst innerhalb der Katasterfläche auf die als Senken identifizierten restlichen Flächen umverteilt um dann dort entsprechend zum Wasserhaushalt beizutragen. Dieser Ansatz lässt sich automatisiert umsetzten, was eine zwingende Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Ansatzes auf der Skale ganzer Stadtteile oder Städte darstellt.

Tabelle 2: Flächengröße [ha] der einzelnen Versieglungsarten in den einzelnen Stadtbezirken

	teilversiegelt [ha]	**unversiegelt [ha]**	**vollversiegelt [ha]**	**Dachflächen [ha]**
Alt-Betzenhausen	4.6	77.0	9.4	14.2
Alt-Stühlinger	4.5	45.8	16.2	21.0
Altstadt-Mitte	2.8	20.9	10.5	24.1
Altstadt-Ring	4.3	54.9	17.8	19.9
Betzenhausen-Bischofslinde	5.9	108.6	18.3	20.2
Brühl-Beurbarung	4.8	36.1	4.2	5.6
Brühl-Güterbahnhof	12.1	82.9	21.2	16.5
Brühl-Industriegebiet	31.1	764.2	113.3	76.4
Ebnet	3.0	137.8	8.1	10.9
Guenterstal	2.9	809.9	8.3	9.0
Haslach-Egerten	6.1	78.4	21.0	20.7
Haslach-Gartenstadt	6.7	54.8	23.8	22.5
Haslach-Haid	7.3	32.0	22.2	22.9
Haslach-Schildacker	5.3	20.7	10.0	10.4
Herdern-Nord	6.5	87.9	16.3	21.3
Herdern-Süd	5.2	59.9	14.5	20.7
Hochdorf	21.1	369.0	47.7	46.4
Kappel	3.5	324.8	9.4	12.4
Landwasser	7.1	75.7	19.8	15.7
Lehen	6.9	141.6	16.3	15.3
Littenweiler	9.0	232.0	21.1	27.0
Mittelwiehre	5.1	553.6	9.1	15.1
Mooswald-Ost	5.1	57.5	11.7	15.9
Mooswald-West	6.3	65.4	10.8	18.8
Mundenhof	1.3	66.5	3.7	2.4
Munzingen	5.8	71.3	12.8	16.5
Neuburg	8.4	92.0	17.0	23.6
Oberau	4.0	86.1	10.8	17.4
Oberwiehre	4.7	65.3	11.7	18.9
Opfingen	8.3	132.7	19.4	25.8
Rieselfeld	3.9	82.3	19.7	16.5
Stühlinger-Eschholz	5.5	69.9	19.6	21.5
Tiengen	6.8	77.4	14.0	17.2
Unterwiehre-Nord	11.5	60.3	17.1	18.7
Unterwiehre-Süd	10.6	129.9	19.9	27.9
Vauban	2.1	25.1	6.8	9.2
Waldsee	7.6	672.3	21.0	24.1
Waltershofen	4.8	42.8	10.1	13.4
Weingarten	7.0	104.6	24.4	19.6

Zähringen	11.3	133.9	25.8	32.1

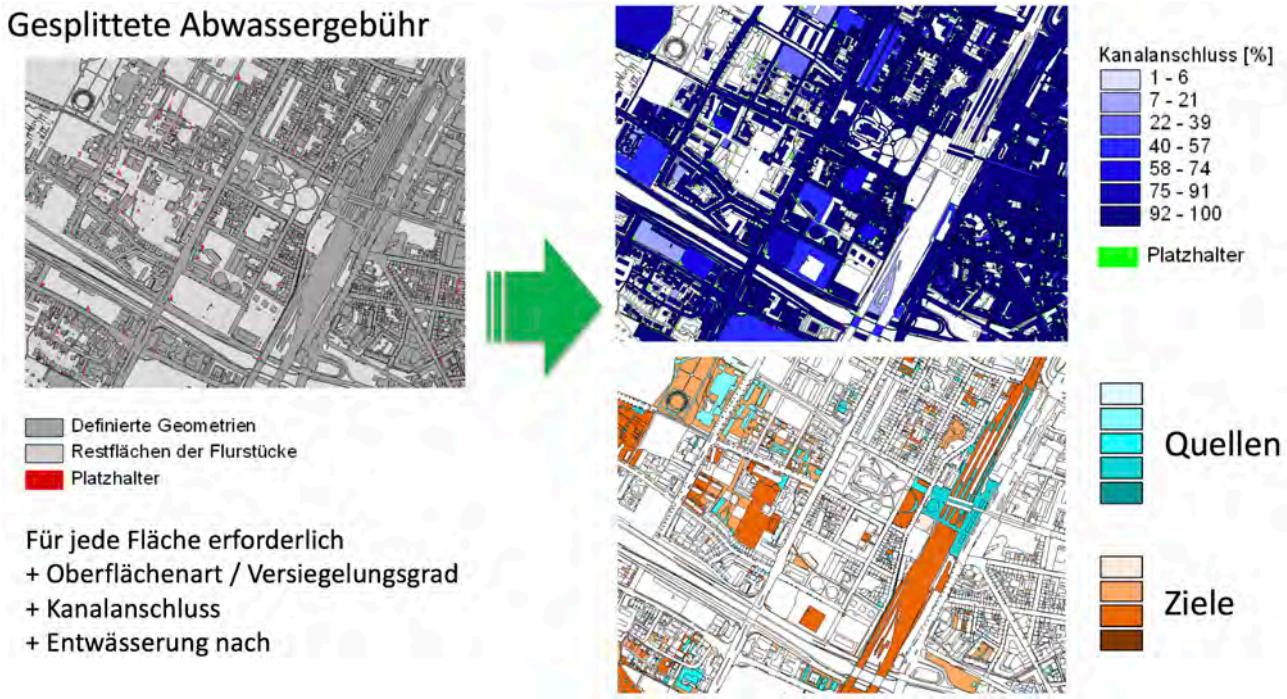


Abbildung 7: Ansatz zur lateralen Umverteilung entstandener Abflüsse innerhalb von Katasterflächen auf Basis der Informationen von der gesplitteten Abwassergebühr. Bereich Bahnhof und Stühlinger in Freiburg.

4.2 Klimatischer Wasserhaushalt im urbanen Raum

In AP II wurden Erkenntnisse über die raumzeitliche Variabilität der für den Wasserhaushalt relevanten Klimaparameter innerhalb der Stadt gewonnen. Anhand über den gesamten Stadtbereich verteilter Klimastationen wurde die raumzeitliche Variabilität der für die Verdunstung relevanten Klimaparameter analysiert. Die für die Bestimmung der potentiellen Verdunstung relevanten Klimaparameter sind Globalstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit (Windrichtung).

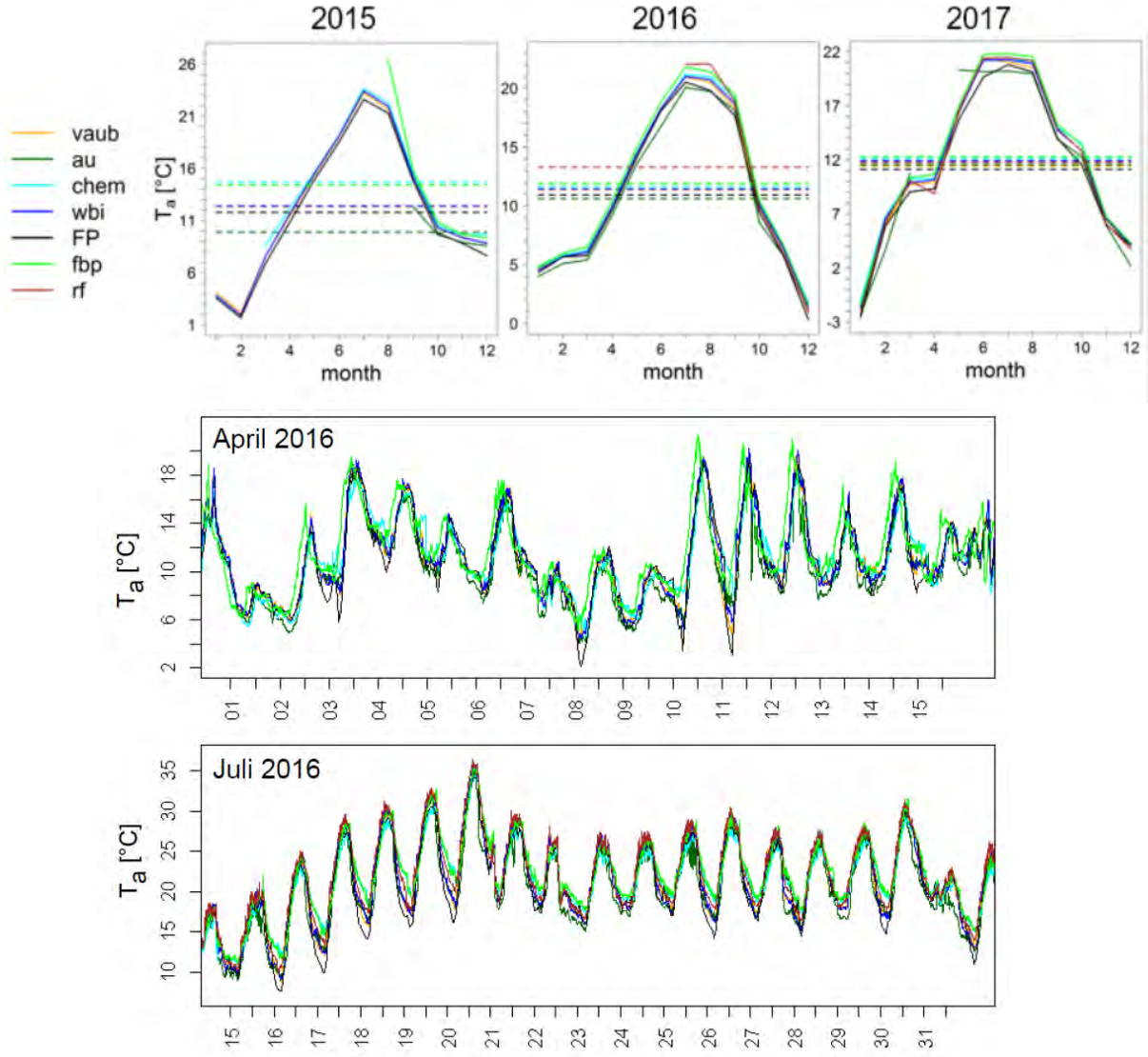
Im Rahmen des beantragten Projektes wurde dabei zum Großteil auf bestehende Ressourcen, wie z.B. DWD Wetterstationen (St. Georgen, Flughafen, Stefan-Meier-Straße), Universitätseigene (Vauban, Referenzfläche 1: Flugplatzwiese), Stationen des Eigenbetriebs Stadtentwässerung ESE (6), oder des Weinbauinstitutes zurückgegriffen werden. Das bestehende Netz wurde im Rahmen dieses Projektes um weitere Stationen (Niederschlag, Lufttemperatur/ –feuchte, Windgeschwindigkeit/-richtung, Globalstrahlung) sinnvoll ergänzt: (Rieselfeld).

Auf Basis dieses Stationsnetzes sollten räumliche Datensätze des Niederschlags, der Lufttemperatur und –feuchte, der Globalstrahlung und der Windgeschwindigkeit und –richtung in hoher zeitlicher Auflösung (< 1 Std) als Modelleingangsdaten für das gesamte Stadtgebiet erstellt werden. Die zur Berechnung der räumlichen Verteilung der Klimaparameter angewendeten Interpolationsverfahren (IDW/Kriging) werden durch Faktoren zur Berücksichtigung der Ventilation und der Beschattung ergänzt. Die Ventilations-bedingungen sollen über die Bebauungsdichte, Exponierung und Straßenausrichtung berücksichtigt werden (Kooperation Stadtklima/Luftqualität). Zur weiteren Verbesserung der räumlichen Interpolation der Klimaparameter stehen GIS-Datensätze zur Beschattung innerhalb Freiburgs (LIDAR-Datensatz) zur Verfügung. Dabei soll anhand des vorhandenen LIDAR-Datensatzes auf Basis üblicher GIS-Tools (ArcGIS) die Beschattung in der Stadt bestimmt werden (-> Beschattung Ja/Nein und wann). Des Weiteren sollte aus dem LIDAR-Datensatz sowohl die Windabschattung als auch die potentielle langwellige Ausstrahlung der Umgebung bestimmt werden (Entfernung, Höhe und %-Hausfläche im Umkreis einer Raster-Zelle). Aus diesen Faktoren soll

durch Regressionsverfahren ein lokal variabler Korrekturfaktor zur Verbesserung der räumlichen Interpolation der Klimaparameter empirisch bestimmt werden (anhand des Vergleichs der Standorte der Klimastationen). Zusätzlich wurden im Rahmen einer Projekt-Studie mit Studenten räumlich verteilte Klimaparameter in hoher Auflösung erhoben, die zusätzlich zur Validierung der Klimaparameter-Interpolation dienen werden. Die Quantifizierung der Interzeptionsprozesse innerhalb der Stadt, wird auf der Basis am Lehrstuhl für Hydrologie in der Vergangenheit durchgeführter Feldkampagnen zur Erfassung der Interzeptionprozesse in Stadtbäumen berechnet werden.

Zusammenfassend lieferte AP II Datensätze der Klimavariablen, die in AP III als Inputdaten zur Bestimmung der Bildung von Oberflächenabflüssen genutzt wurden, sowie in AP IV zur Bestimmung der Grundwasserneubildung, der aktuellen Evapotranspiration und der Energie-bilanz ausgewählter Oberflächentypen. In AP V werden die Datensätze als Inputdaten zur Bestimmung/Modellierung der Städtischen Wasserbilanz und ihrer räumlichen Variabilität genutzt.

Im Rahmen der Modellentwicklung des Wasserhaushaltsmodells (APV) wurden hier einige Verbesserungen gegenüber der ursprünglichen Planung umgesetzt, die die Schwerpunkte der Analysen in AP II verschoben: Die ursprünglich als Modelleingangsdaten eingeplanten Raum-Zeit-Grids aller Klimavariablen erwiesen sich für das Modell als zu Rechenzeit-intensiv, als dass sie für eine praktikable Modellanwendung umsetzbar waren. Daher wurde die räumliche Interpolation des klimatischen Inputs in das Modell eingegliedert. D. h. das Modell verlangt nun Zeitreihen des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung auf Dachniveau für die jeweils verfügbaren Klimastationen, die zugehörige räumliche Interpolation (IDW) kann im Modell umgesetzt werden (das Modell kann jedoch auch mit den Daten nur einer einzelnen Klimastation betrieben werden.



Tage

Abbildung 8: Vergleich hochauflösender Messungen sowie der mittleren monatlichen Lufttemperaturen für die Stationen Vauban, Au, Chemie Hochhaus (Uni), Weinbau Institut, Flugplatz, Fahnenbergplatz und Rieselfeld. Die Jahresmittelwerte basieren teilweise auf unvollständigen Jahren und sind nicht immer direkt vergleichbar.

Um nun die räumliche Anpassung potentiellen Verdunstung an die Umgebung und die Berücksichtigung der Abschattungseffekte der urbanen Strukturen in das Modell einzugliedern wurde das geplante studentische Projekt zur Erhebung der raumzeitlichen Variabilität der Klimaparameter innerhalb städtischer Strukturen zum Kernpunkt des Arbeitspaketes: d.h. der geplante Messaufwand wurde hier deutlich erhöht: hierzu wurde neben dem Mess-Betrieb und der Datenerhebung an den festen Klimastationen die mikro-klimatische Variabilität und deren Einfluss auf die Verdunstung im innerstädtischen Bereich in einer Nord-Süd-orientierten Straße und einer benachbarten Ost-West-orientierten Straße (Freiburg i. Br., Stadtteil Wiehre) mittels mikroklimatischer Messungen mit einer mobilen Klimastation untersucht. Der untersuchte Straßenzug weist bei vergleichbarer Bebauung einen vegetationsfreien Abschnitt und einen Abschnitt mit Baumbestand auf. Die Bebauung bleibt dabei vergleichbar. Innerhalb jeder Straße wurden an acht Standorten im April und Juli 2016 in einem rotierenden System wiederholt Messungen durchgeführt wurden (Anzahl Kampagnen). Anhand der gemessenen Klimavariablen wurde die potentielle ET nach FAO für alle Standorte berechnet. Die Ergebnisse wurden mit den Klimavariablen und der Verdunstung eines Referenzstandortes (Dachstation Vauban) verglichen.

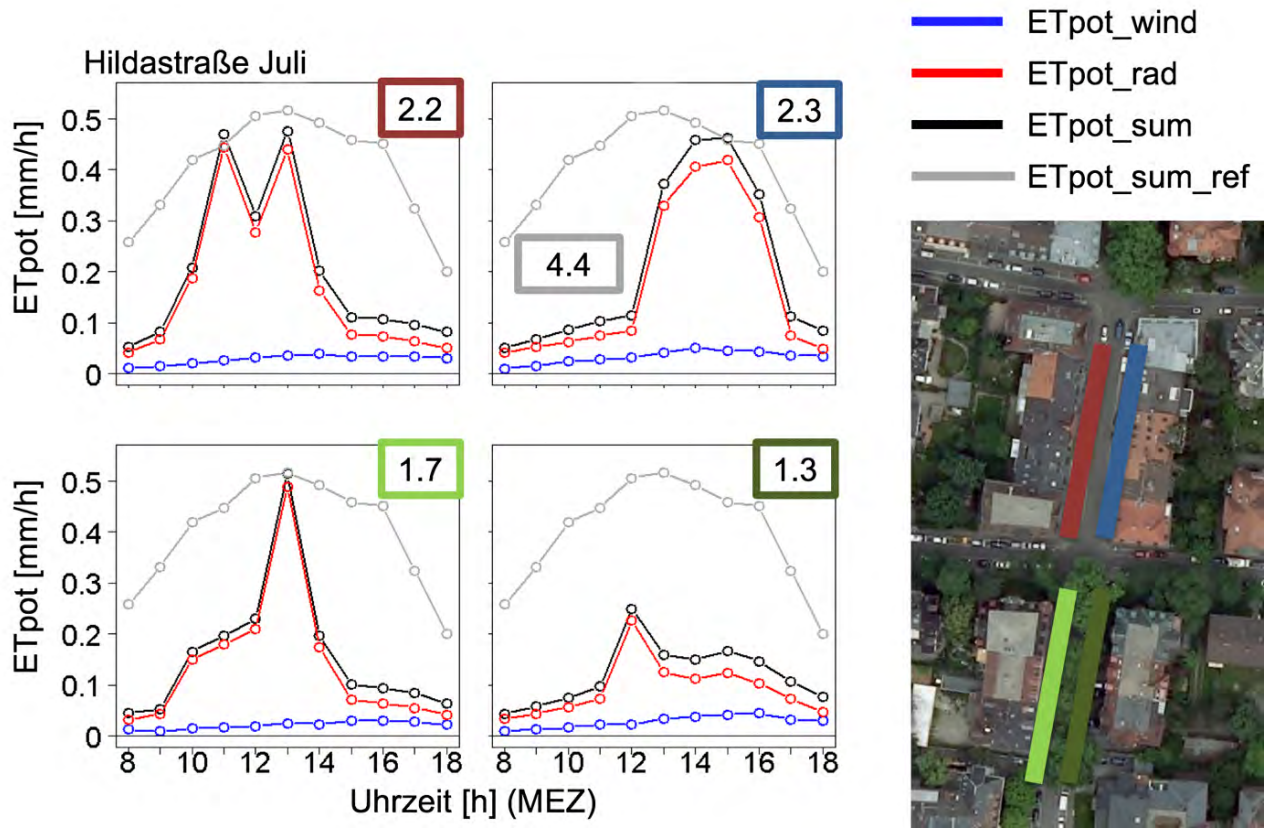
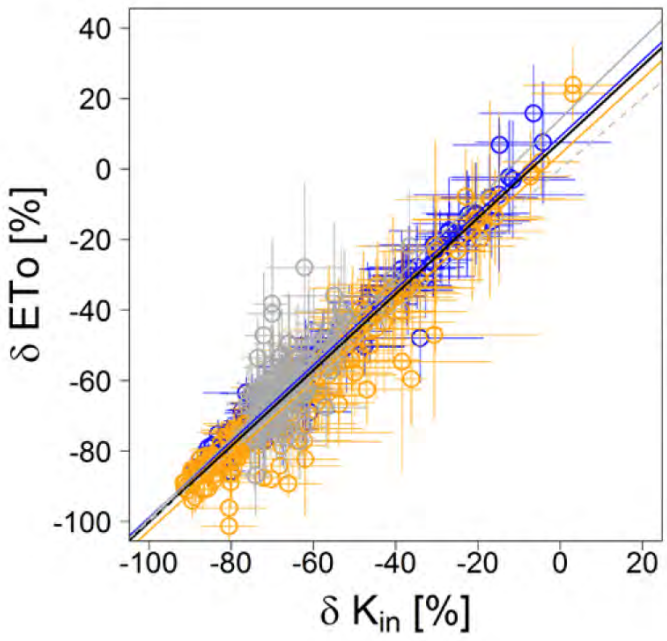


Abbildung 8: Variabilität der potentiellen Verdunstung im Tagesgang innerhalb einer Nord-Süd-ausgerichteten Straße. In der echten oberen Ecke ist jeweils die Tagessumme der potentiellen Verdunstung in den Straßenabschnitten im Vergleich zur Referenzstation (grauer Kasten) angegeben.



	Frühling	Sommer	Winter	Gesamt
Slope:	1.08	1.07	1.13	**1.08**
Intercept:	0.09	0.04	0.14	**0.08**
R^2:	0.97	0.93	0.53	**0.91**

Abbildung 9: Prozentuales Verhältnis der Abschattung der kurzwellige Einstrahlung in der Straßenschlucht (δKin [%]) zur Abweichung der potentiellen Verdunstung auf Straßenniveau von der potentiellen Verdunstung der Referenzstation auf Dachniveau (δETo [%]) insgesamt und gruppiert nach Jahreszeit (der Parameter *Slope* beschreibt die Steigung der Regressionsgeraden, der Parameter *Intercept* den Schnittpunkt mit der Ordinate).

In der Hildastraße (Nord-Süd-Straße) wurde im vegetationsfreien Abschnitt auf beiden Straßenseiten eine mittlere Tagesverdunstung (9:00-19:00 MESZ) von 2.2 / 2.1 mm (Ost/West, Referenzstandort 4 mm) bestimmt. Im Abschnitt mit Baumbestand verringerte sich diese Summe auf 1.5 bzw. 1.7 mm. Die Maximalwerte der Verdunstung mit nur minimalen Abweichungen zur Referenzstation wurde an allen Standorten um die Mittagszeit ermittelt, während in den Vormittags- und Nachmittagsstunden deutliche Unterschreitungen der Verdunstung des Referenzstandorts auftraten. Die Reduzierung der Verdunstungssumme wird durch die Abschattung durch die Gebäude und Bäume verursacht. Zur Mittagszeit konnte eine Überlagerung der kontrollierenden Prozesse beobachtet werden: Im Tagesverlauf wurde für alle Kampagnen und alle Standorte zu keiner Stunde die volle Referenzglobalstrahlung erreicht, da es im Stundenmittel immer zu einer Abschattung durch die Umgebung kam. Aufgrund der zur Referenzstation relativ höheren Lufttemperatur und der gegenüber der atmosphärischen Gegenstrahlung erhöhten langwelligen Einstrahlung durch die Gebäude, wird in Stunden mit maximaler kurzwelliger Einstrahlung dennoch die Verdunstung Referenzstation erreicht.

In der Summe konnten für die meisten Standorte deutliche Abweichungen der potentiellen Verdunstung in der Straßenschlucht von der potentiellen Verdunstung der Referenzstation auf Dachniveau beobachtet werden. Die Messungen wurden über 2.5 Jahre in Frühling Sommer und Winter durchgeführt. Die Auswertung (Statistik, Sensitivitätsanalyse) ergab besonders zwei wichtige Faktoren: 1. Den Haupteinfluss auf die Abweichung der potentiellen Verdunstung zwischen Dach und Straße übt die Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung durch Abschattung aus (Im Winter teilweise auch die Langwellige Ausstrahlung). 2. Der Vergleich von Abschattung und Verdunstungsreduktion ergibt einen signifikanten, linearen Zusammenhang, der zur räumlichen Übertragung der Variabilität der potentiellen Verdunstung in der Stadt genutzt werden kann (Abb. 9). Um diese Übertragung durchführen zu können wird ein digitales Geländemodell mit Gebäudeinformationen benötigt: Anhand üblicher GIS-tools (ArcGIS) lässt sich für jeden Punkt in der Stadt für jeden Tag im Jahr in Abhängigkeit der geographischen Lage und der umgebenden Gebäudestrukturen der Anteil an der verfügbaren kurzwelligen Einstrahlung berechnen (Abb. 10).

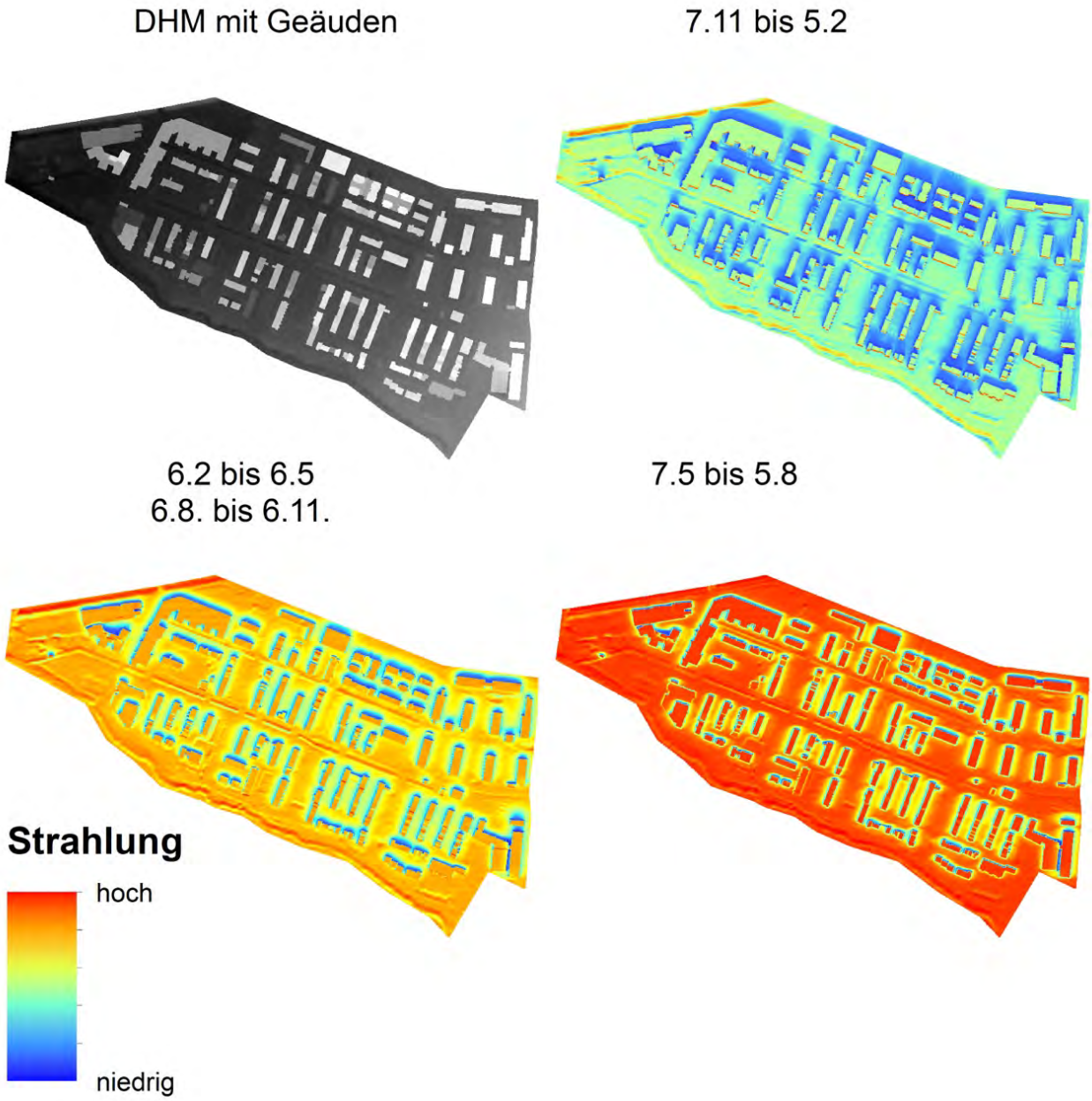


Abbildung 10: Auswirkung der Beschattung auf die kurzwellige Einstrahlung für verschiedene Jahreszeiten im Stadtteil Vauban

In Verbindung mit den in Abb. 9 präsentierten Modellparametern ließ sich so für die verschiedenen Jahreszeiten für jeden Punkt in der Stadt die Reduktion der potentiellen Verdunstung beschreiben. Um auch hier eine Optimierung der Rechenzeit zur erreichen wurden die mittleren Zustände um die Äquinoktien und das Winter- und Sommersolstitium berechnet und im drei monatigen Wechsel in den Modellierungen der langfristigen Wasserbilanz berücksichtigt (Abb. 10).

4.3 Oberflächenabfluss einzelner Stadtteile

In Arbeitsprogramm III wurden die Oberflächenabflüsse und der Mischwasseranfall im Kanalnetz einzelner Stadtteile zeitlich hoch aufgelöst quantifiziert. Im Antrag war es vorgesehen das bestehende Pegelnetz (6 Pegel) des ESE, in dem die Wasserstände verschiedener Freiburger Gewässer aufgezeichnet werden, durch ein paralleles Pegelnetz (jeweils Bach auf- oder Bach abwärts (6 Pe-

gel)) zu ergänzen um für die dazwischenliegenden Stadtteile/Einzugsgebiete die anfallenden Oberflächenabflüsse direkt quantifizieren zu können. Zusätzlich sollten zwei ausgewählte, im Mischsystem entwässerte Stadtteile eine Pegelstation in der Mischkanalisation erhalten, die neben Abflussereignissen auch die Dynamik des kontinuierlich anfallenden Schmutz- und Fremdwassers aufzeichnen.

Diese Planung erwies sich vom organisatorischen Aufwand her als sehr zeitaufwendig (Zwischenbericht Nr. 2). Die hier entstandene Verzögerung konnte durch bereits bei bnNETZE im Betrieb befindliche Pegelstationen aus dem Kanalnetz der Stadt Freiburg ausgeglichen werden. Da das bnNETZE Stationsnetz sowohl Misch- als auch Trennkanalisationen beinhaltet, erfüllen diese Stationen im Verbund mit den im Stadtteil Vauban betriebenen Messstationen im Mulden-Rigolen-System und im Vorfluter (Abb. 11) alle für die Fragestellungen des Projektes relevanten Anforderungen und konnten daher auch wie geplant für die Modellvalidierung genutzt werden. Der Fokus der Messstationen in der Vauban lag dabei auf Wasserstands- und Bodenfeuchtemessungen in den Mulden sowie Pegelmessungen im Vorfluter.

Abbildung 11: Lage ausgewählter Messstellen im Stadtteil Vauban

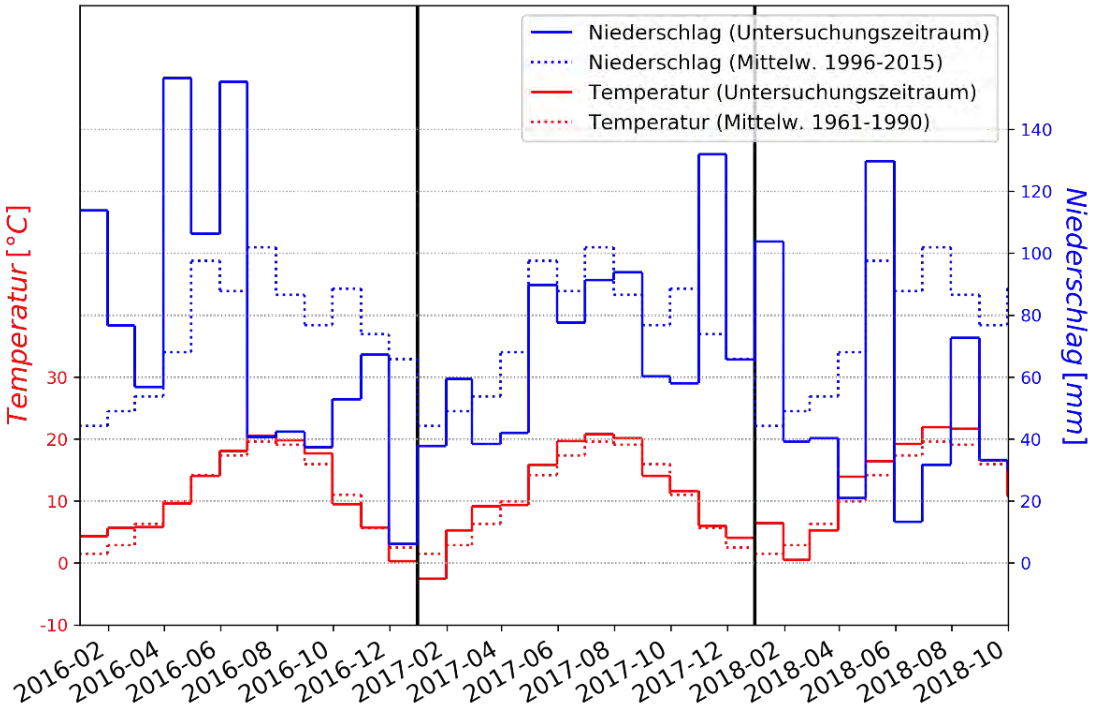


Abbildung 12: Monatliche Niederschlagssumme und mittlere Temperatur im Verglich zum langjährigen Mittel für die Klimastation DWD. Verändert nach Schaffitel et. al. 2019

Für die Datenanalyse und die Anwendung in der Modellvalidierung mussten die abflussbezogenen Messdaten zum Teil aufwendig aufbereitet werden: Abflüsse aus der Mischwasserkanalisation mussten nur hinsichtlich des Schmutzwassertagesganges korrigiert werden, während die Abflüsse im Regenwasserkanal teilweise sehr hohe Fremdwasseranteile sowie Schmutzwasseranteile (Landwasser) enthielten. Dieser Aufbereitungsaufwand galt auch für die Abflussinformationen (Wasserstände) aus dem zentralen Mulden-Rigolen-System in der Vauban. Für die Auswertung mussten hier vor Allem die einzelnen Niederschlagsereignisse und die zugehörigen Reaktionen des Entwässerungssystems ermittelt werden. Abb. 12 zeigt die an der Klimastation des DWD gemessenen Niederschlagssummen und mittleren Temperaturen über den Versuchszeitraum im Vergleich zum langjährigen Mittel. Anhand der gemessenen Niederschlags-Zeitreihen wurden einzelne Niederschlagsereignisse separiert. Niederschlags-Ereignisse, welche zu einem Anstieg der Bodenfeuchte in einer der Messtiefen führten, wurden als Bodenfeuchte-Ereignis (BF-Ereignis) klassifiziert. Abbildung 13 zeigt die gemessenen Bodenfeuchte-Zeitreihen sowie die klassifizierten Niederschlags- und BF-Ereignisse. Von den 231 klassifizierten Niederschlagsereignissen führten 92 zu einem Anstieg der Bodenfeuchte am Messstandort BG (Boulevardgraben), während am Standort NG (Nordgraben) 73 BF-Ereignisse klassifiziert wurden.

Zur Messung des Mulden-Wasserstandes wurden unterschiedliche Drucksonden eingesetzt. So erfolgte die Messung an den Standorten „BG“ und „NG“ mittels dem Wasserstansrecorder DWLR compact (Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH Dresden) während an den Messstandorten „NG_Auslass“ und „Gebietsauslass“ die Drucksonde DiverBaro mini (Schlumberger Water Services) eingesetzt wurde. Während der Wasserstandsrecorder DWLR compact über eine interne Luftdruck-Kompensation verfügt, wurde diese bei der Drucksonde DiverBaro mini über eine zusätzliche Messsonde erreicht. Die erhobenen Zeitreihen wiesen eine Drift sowie abrupte Sprünge im Basislevel auf.

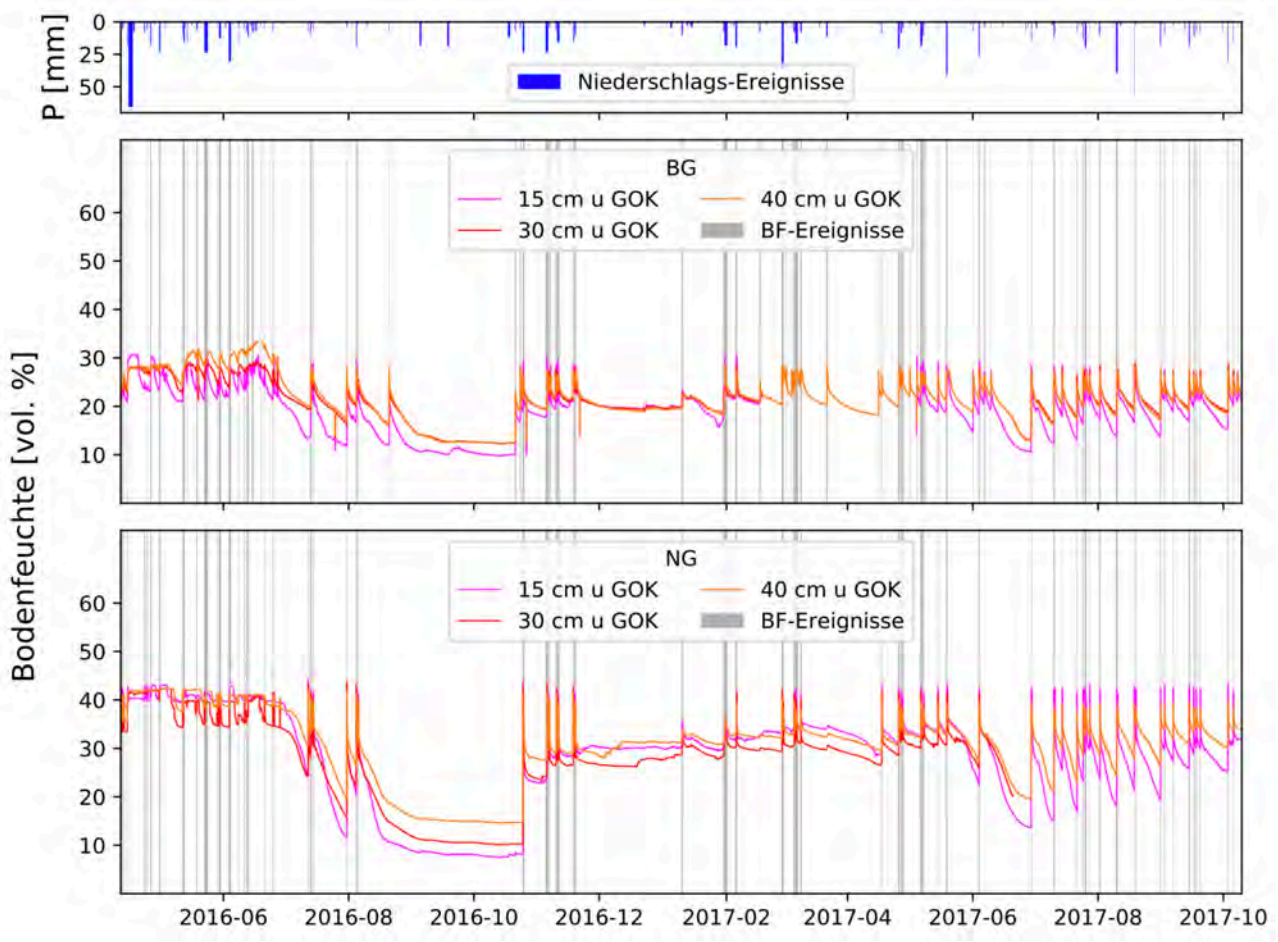


Abbildung 13: Gemessen Bodenfeuchte in den Mulden Nordgraben (NG) und Boulevardgraben (BG) des Stadtteils Vauban und daraus klassifizierte Bodenfeuchte-Ereignisse (BF-Ereignisse) sowie Niederschlagssummen klassifizierter Niederschlags-Ereignisse.

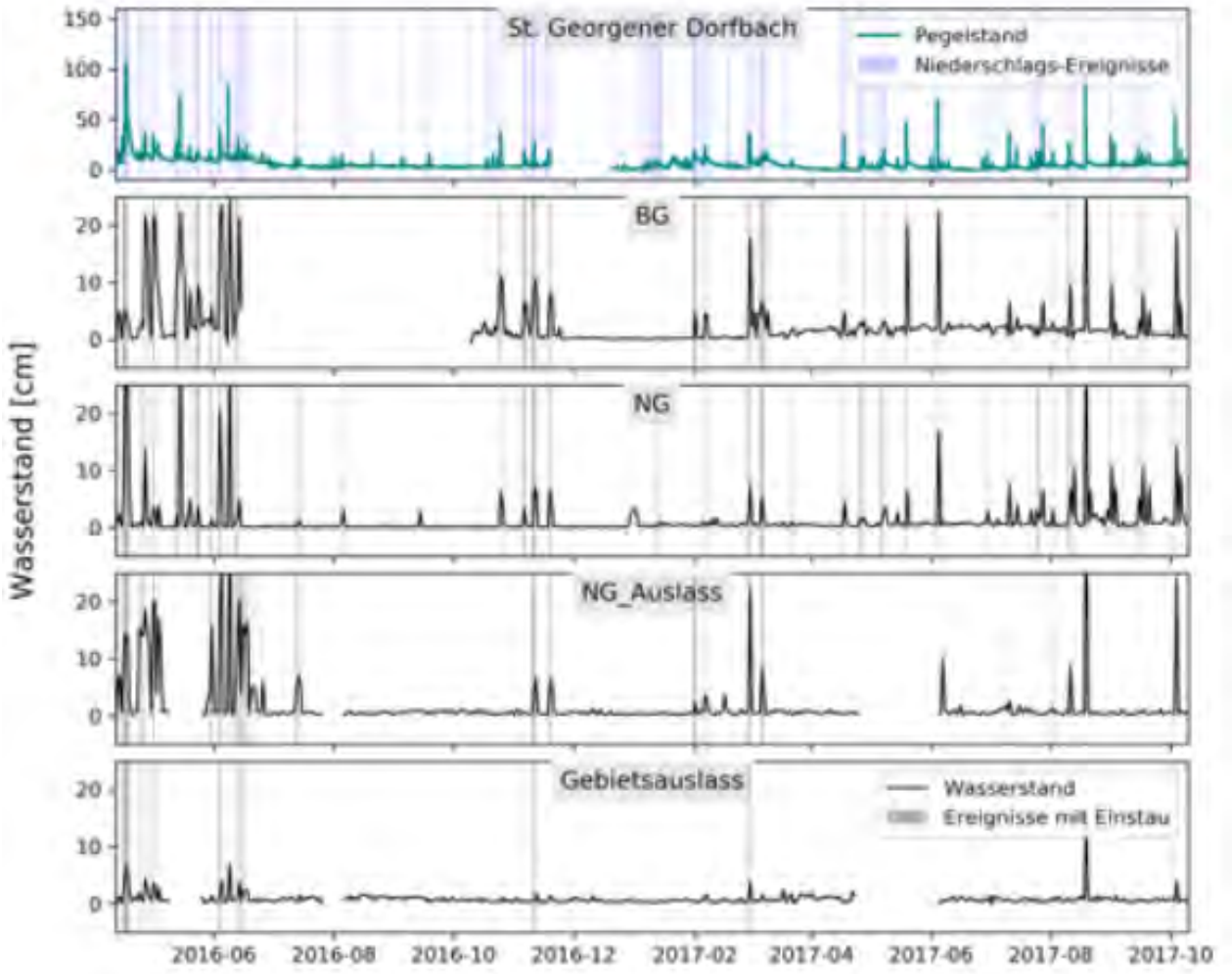


Abbildung 14: Aufbereitete Daten der Wasserstandsmessungen in den Mulden mit daraus abgegrenzten Ereignissen mit Einstau sowie Pegelstandsmessungen am Vorfluter und klassifizierte Niederschlagsereignisse.

Zudem zeigte sich eine Zunahme des Rauschens über die Zeit. Daher wurden die Sonden mehrfach ausgetauscht und eine Aufbereitung der Daten war erforderlich. Anhand der aufbereiteten Daten erfolgte eine Abgrenzung von Ereignissen mit Mulden-Einstau. zeigt die aufbereiteten Daten und die daraus abgegrenzten Einstau-Ereignisse sowie die Pegelmessung „St. Georgener Dorfbach“ und die abgegrenzten Niederschlags-Ereignisse. Aus Abbildung 14 wird deutlich, dass nur ein sehr geringer Teil der Niederschlagsereignisse zu einem Wassereinstau in den Mulden führte. So führten 72 Ereignisse zu einem Einstau am Messstandort „NG“, während ein Einstau am Gebietsauslass nur bei 18 Ereignisse klassifiziert wurde. Dies zeigt die Effizient des eingesetzten Entwässerungskonzepts im Rückhalt von Regenwasser innerhalb des Stadtteils.

4.4 Bodenwasserhaushalt relevanter Siedlungsflächen

In Arbeitsprogramm IV wurden die Grundwasserneubildung und die aktuelle Verdunstung für die in AP I definierten Siedlungsflächen ermittelt.

Die Ergebnisse aus AP IV dienen zur Parametrisierung des Wasserhaushaltsmodels (AP V). Ein weiteres Ergebnis aus AP IV sind die zeitlich hochaufgelösten Datensätze der Wasserbilanz für relevante Siedlungsoberflächen selbst: Sowohl die Wasserbilanzen als auch die gewonnenen Modellparameter können für Stadtplaner/ Entwässerungsplaner als Grundlagen genutzt werden, da vergleichbare, auf Messdaten basierende Datensätze und Modellparameter bisher nicht verfügbar sind (Schaffitel et al., 2019-in Vorbereitung).

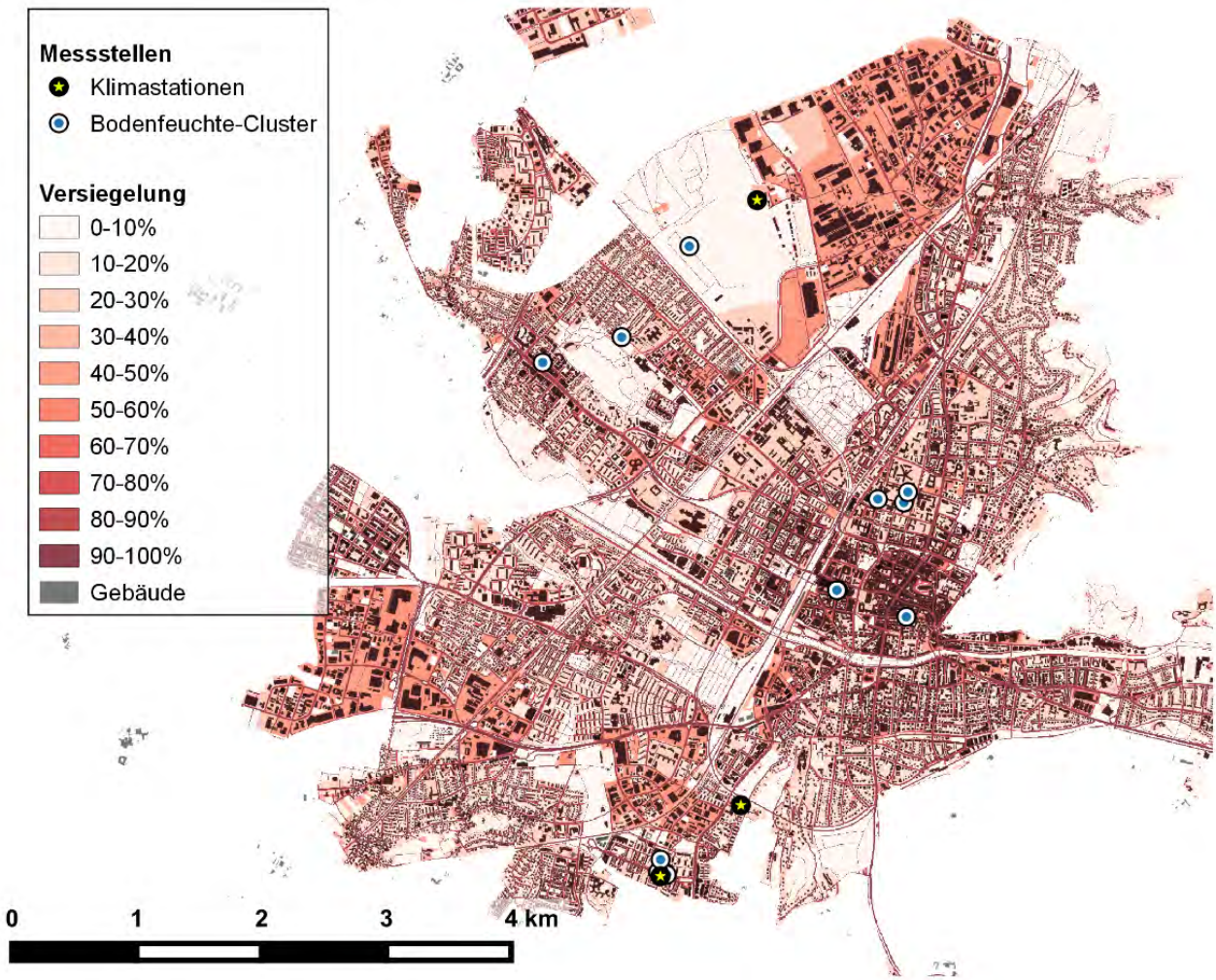


Abbildung 15: Lage der eingerichteten Bodenfeuchte-Cluster im Untersuchungsgebiet und Oberflächen-Versiegelungsgrad (WaBoA 2008).

Die Ergebnisse von API heben Pflasterflächen als wichtigste teilversiegelte Befestigungsart (1.79%, ca. 130 ha) hervor und standen daher zwischen den beiden Extremen unversiegelt-begrünt und vollversiegelt im Fokus von APIV. Ziel des Arbeitspakets war es für diese Flächen die Grundwasserneubildung und die aktuelle Verdunstung relevanter Siedlungsflächen zu ermitteln. Dazu wurden zahlreiche gepflasterte Oberflächen mit Bodenfeuchtesonden instrumentiert. Geeignete Standorte wurden in Zusammenarbeit mit dem Garten-und Tiefbauamt der Stadt Freiburg ausgewählt. Um möglichst vergleichbare Rahmenbedingungen zwischen verschiedenen Oberflächentypen zu erreichen, wurden bevorzugt Standorte mit mehreren eng beieinanderliegenden, unterschiedlichen Flächenbelägen (Distanz zwischen Einzelflächen kleiner 1 m) ausgewählt und zu Clustern zusammengefasst. Abbildung 15 zeigt die Lage der eingerichteten Bodenfeuchte-Cluster im Untersuchungsgebiet.

Die einzelnen Messflächen wurden mit Bodenfeuchte-Sonden in jeweils 2-3 Tiefen instrumentiert. Der gewonnene Datensatz umfasst 18 gepflasterte und 4 unversiegelte urbane Oberflächen und erstreckt sich über einen Zeitraum von 24 Monaten (weitere Messstandorte existierten, finden aber aufgrund mangelnder Datenqualität oder Datenlücken keine Berücksichtigung). Abbildung 6 zeigt die Instrumentierung eines Clusters mit Bodenfeuchte-Sonden und die an einer Messfläche erhobenen Zeitreihen.

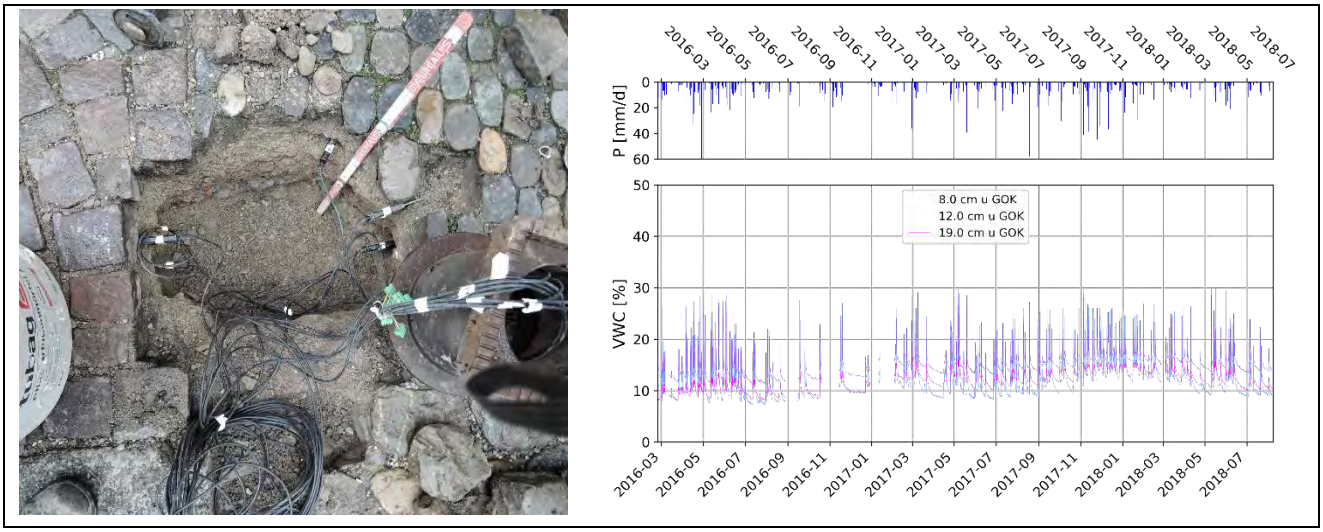


Abbildung 16: Instrumentierung des Clusters „Gerberau“ sowie Messzeitreihen von Bodenfeuchte (VWC – Volumetric water content)) an einer der Messflächen und Niederschlag (P) an der Klimastation WBI.

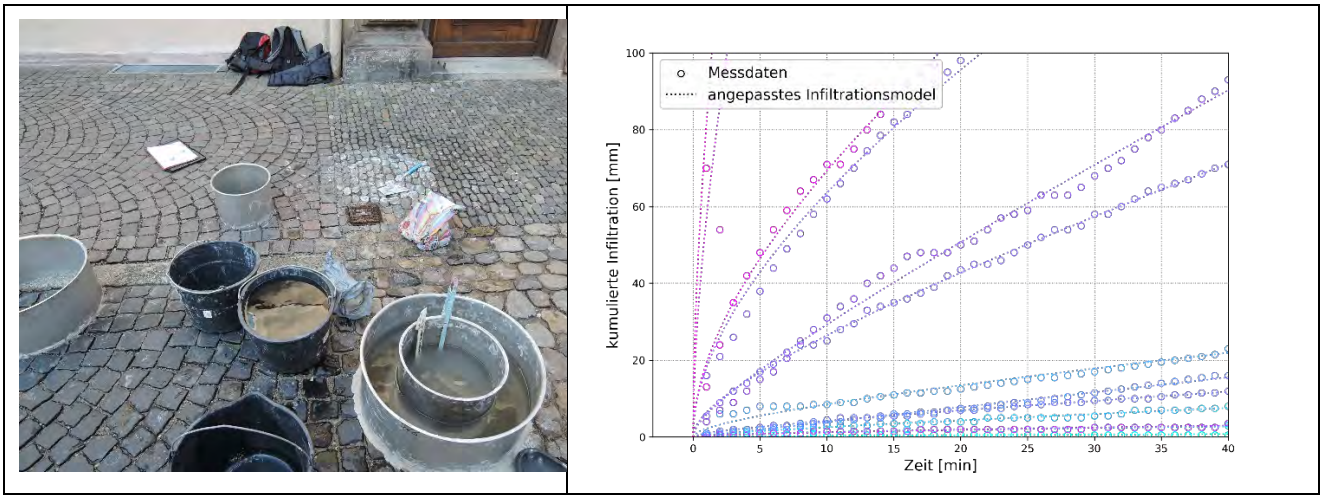


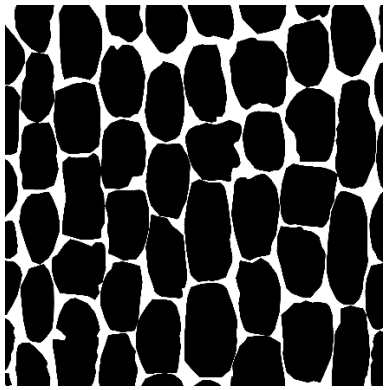
Abbildung 17: Infiltrationsversuche am Cluster „Gerberau“ und Beispiele der gemessenen Infiltrationsverläufe.

Zusätzlich wurden Bodenproben an den jeweiligen Sondenpositionen entnommen und hinsichtlich Bodenart und Korngrößen analysiert. Die unter den Messstandorten vorgefundenen Stadtböden zeichneten sich durch ein hohes Feststoffvolumen sowie einen hohen Anteil an Bodenskelett aus. Aufgrund dieser wenig festen Struktur war weder die geplante Entnahme von Stechzylindern, noch die Entnahme von Bohrprofilen möglich. Neben der Einrichtung der Messstellen wurden mehr als 30 Infiltrationsversuche auf den verschiedenen Pflasterflächen durchgeführt. Abbildung 17 zeigt die Durchführung von Infiltrationsversuchen an einem der Messcluster sowie gemessene Infiltrationsverläufe.

Die gemessenen Infiltrationsverläufe variieren sehr stark zwischen den untersuchten Flächen und die Datenanalyse ergab verschiedene kontrollierende Faktoren. Diese waren u. A. Pflastertyp, Anteil der Fugenfläche an der Gesamtfläche und Fugen-Füllmaterial. Ein zusätzlicher erklärender Parameter ist der Wartungs-Zustand der verschiedenen Flächen.

Die erhobenen Daten dienten zur Erstellung eines Datensatzes relevanter Siedlungsflächen inkl. deren bodenphysikalischer Parameter, welcher im weiteren Projektverlauf zur Parametrisierung des neu entwickelten Wasserhaushaltsmodells RoGeR_WBM_Urban herangezogen wurde. Dabei wurde der Grad der Versiegelung mittels Bildanalyse und die gesättigte Leitfähigkeit (k_s) anhand der Infiltrationsversuche ermittelt (Abbildung 18).

Die für die verschiedenen Pflasterflächen im Mittel als typisch ermittelte Mächtigkeit des Oberbaus entspricht den Richtlinien zur Erstellung von gepflasterten Oberflächen (Borgwardt 2001; FGSV 2012-->Tab. 3). Die nutzbare Feldkapazität (nFK), die Luftkapazität (LK) und das Porenvolumen (PV) wurden aus den gewonnenen Bodenproben und den Bodenfeuchte-Messungen abgeleitet. Tabelle 3 zeigt die ermittelten Parameter für die im GIS-Datensatz differenzierten teilversiegelten Oberflächenarten.



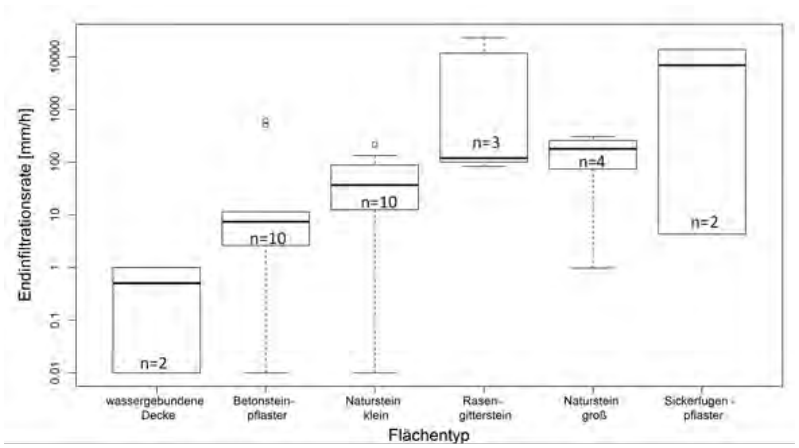


Abbildung 18: Bestimmte Endinfiltrationsraten differenziert nach Pflastertypen (Siebert 2016) und Beispiel der Bildanalyse zur Ermittlung des Versiegelungsgrads.

Tabelle 3: Aus den Messdaten gewonnene Parameter für die untersuchten Pflastertypen

Pflastertyp	Versiegelung [%]	K_s [mm/h]	nFK[2] [mm]	LK[2] [mm]	PV [vol. %]	Mächtigkeit Oberbau [cm]
Platten	95	0,5	63	181	37	70
Verbundpflaster	91	2,0	62	180	37	70
Natursteinpflaster [1]	85	14,8	62	178	37	70
Ökopflaster/Rasenfugen	80	19,1	61	177	37	70
Rasengittersteine	40	70,9	58	166	37	70
Forstmischung	0	2,0	42	79	37	40
Schotter, Kies	0	30,0	32	97	37	40
Wassergebundene Decke	0	1,0	42	79	37	40

[1] im GIS-Datensatz zu abflusswirksamen Oberflächen als Pflaster spezifiziert

[2] bezogen auf die gesamte Mächtigkeit des Oberbaus

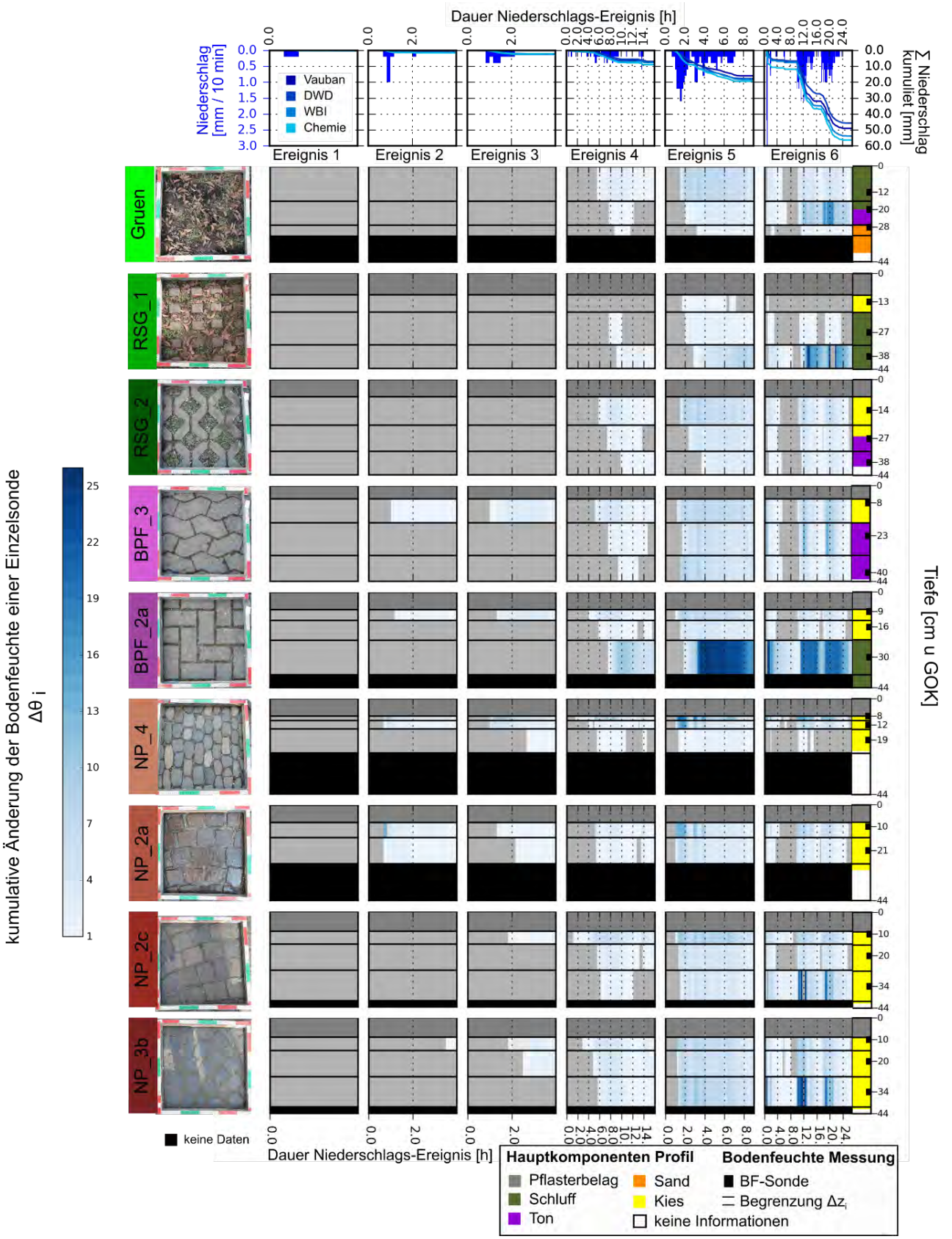


Abbildung 19: Beispielhafter Darstellung der Dynamik des Bodenwasserhaushalts unter ausgewählten urbanen Oberflächen. Die Intensität der Blaufärbung gibt die Stärke der Änderung im Bodenwasserhaushalt an. Im oberen Bereich der Abbildung sind typische Niederschlagsereignisse aus dem Beobachtungszeitraum abgebildet. Verändert nach (Schaffitel et al. 2017).

Die erhobenen Bodenfeuchte-Zeitreihen stellen einen einzigartigen Datensatz dar und eine Veröffentlichung in der Fachzeitschrift „Earth System Science Data“ ist in Vorbereitung (Schaffitel et al., 2019-in Vorbereitung). Im Rahmen der durchgeführten Analysen wurde die Reaktion des Bodenwasserspeichers während einzelner Niederschlagsereignisse untersucht (Abbildung und Abbildung 20). Dabei zeigte sich, dass die Messflächen unterschiedliche Dynamiken aufweisen. So zeigte der Bodenwasserspeicher der Grünfläche und der Rasengittersteine keine Reaktion auf geringe Niederschlagsereignisse, während bei den konventionellen Pflasterflächen bereits eine Reaktion stattfand. Dieses Verhalten resultiert aus einer schneller voranschreitenden Infiltrationsfront auf gepflasterten

Oberflächen im Vergleich zu Grünflächen. Grund dafür ist die Kanalisierung der Infiltration auf Fugenräume sowie die fehlende Vegetations-Interzeption und eine deutlich geringere Speicherkapazität der verwendeten Baustoffe. Zudem zeigten sich Abweichungen im Drainageverhalten der Standorte, was auf unterschiedlichen Bodeneigenschaften zurückgeführt wurde. So ging die Entleerung des Bodenwasserspeichers an Standorten mit geringen Anteilen an bindigen Bodenarten deutlich langsamer vonstatten als an Standorten mit höheren Anteilen an bindigen Bodenarten. Dabei zeigten fast alle gepflasterten Oberflächen eine schnelle Drainage aus dem Bodenwasserspeicher, was den Anforderungen des Oberbaus entspricht (Borgwardt 2001; FGSV 2012). Lediglich an einem Cluster (4 Messstandorte) weisen die gemessenen Bodenfeuchte-Daten auf einen temporären Wasser-Einstau nach starken Niederschlagsereignissen hin, während die Drainage bei den übrigen Messstellen frei verläuft.

Zur Berechnung der kompletten Wasserbilanz, wurde ein Daten-basierter Modellansatz entwickelt, welcher es ermöglicht, die Wasserbilanz urbaner Flächen mithilfe von Bodenfeuchtedaten kontinuierlich zu berechnen (Veröffentlichung geplant in der Fachzeitschrift „Geoscientific Model Development“ – Schaffitel et al., 2019b in Vorbereitung). Dabei wurde die gemessene Bodenfeuchteänderung auf die Prozesse Infiltration, Evaporation und Drainage aufgeteilt und durch Kombination mit einem Infiltrationsmodel wurde die Wasserbilanz berechnet.
Abbildung zeigt die Ergebnisse des Daten-basierten Modellansatzes für 15 gepflasterte Oberflächen über den Versuchszeitraum.

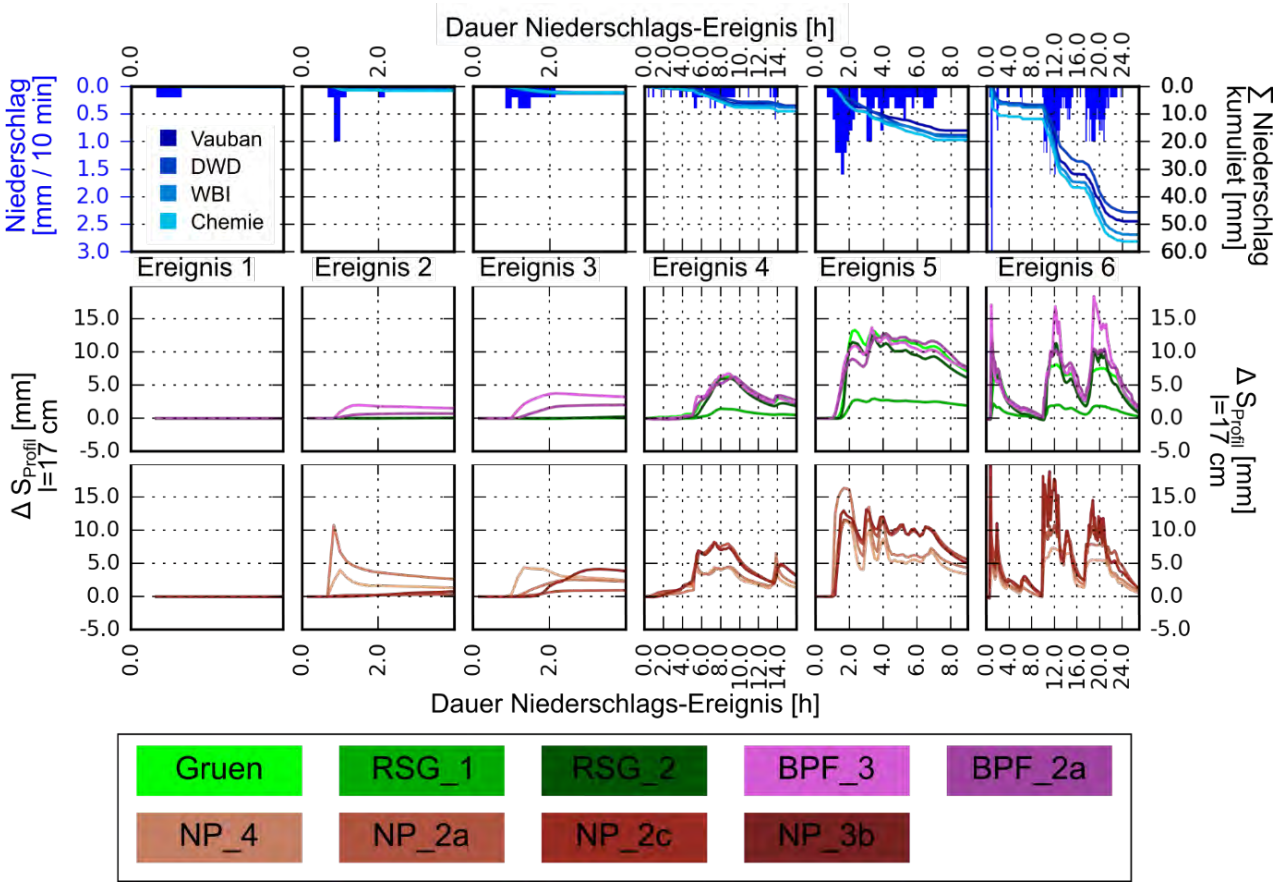


Abbildung 20: Reaktion des Bodenwasserspeichers an verschiedenen Messflächen während Niederschlags-Ereignissen.

Die Ergebnisse des Daten-basierten Modellansatz zeigen, dass Oberflächenabfluss nur bei einzelnen Pflasterflächen auftrat, während er bei einer Mehrzahl der untersuchten Flächen vernachlässigbar bzw. nicht beobachtet werden konnte. Dies zeigt das Potential von Pflasterflächen, den Oberflächenabfluss von befestigten Siedlungsflächen maßgeblich zu verringern. Relevanter Oberflächenabfluss war nur für die Pflasterflächen mit sehr geringem Fugenanteil und stark kolmatierten Fugen in der Simulation abbildbar. Mehrere Studien zeigen die Abhängigkeit der Infiltrationsleistung vom Oberflächenzustand (z.B. Flöter 2006; Boogaard et al. 2014; Lucke & Beecham 2011) und den positiven Einfluss von Wartung auf die Infiltrationsleistung (z.B. Razzaghmanesh & Beecham 2018; Winston et al. 2016).

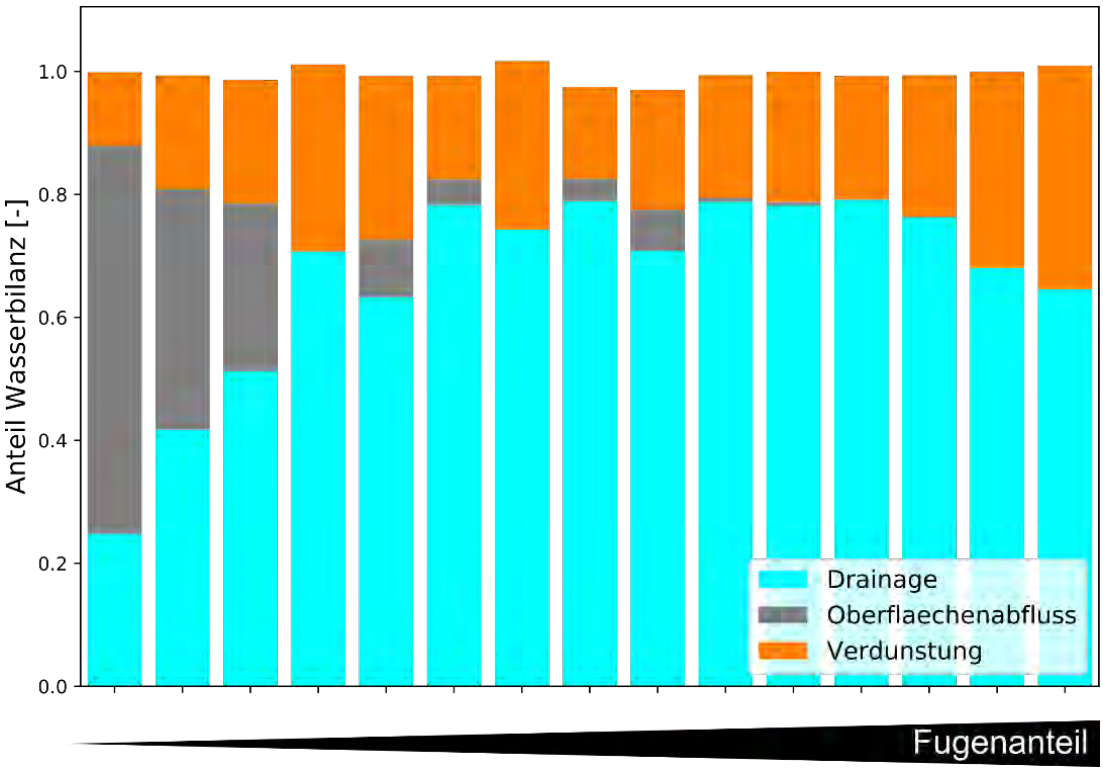


Abbildung 21: Bodenwasserbilanz von 15 gepflasterten Oberflächen über den gesamten Messzeitraum berechnet mittels Daten-basiertem Modellansatz. Der Fugenanteil der Flächen nimmt von links (gefügedichtes Rechteckpflaster) nach rechts (Rasengittersteine) kontinuierlich zu.

Während sich die Verdunstung bei vollversiegelten Oberflächen auf Anfangsverluste (Muldenspeicher und Benetzungskapazität) beschränkt, umfasst sie auf Pflasterflächen auch Bodenverdunstung sowie auf Flächen mit begrünten Zwischenräumen auch Transpiration. Somit weisen Pflasterflächen eine höhere Verdunstung auf, als vollversiegelte Oberflächen. Nichtsdestotrotz ist die Verdunstung deutlich geringer als unter natürlichen Bedingungen (Zum Vergleich: laut Steinbrich et al. (2018) beträgt die Verdunstung im Untersuchungsgebiet unter natürlichen Bedingungen 71% der Jahresbilanz). Dies konnte v.a. durch die fehlenden/verringerten Transpiration von gepflasterten Oberflächen erklärt werden. Die höchste modellierte Verdunstung tritt auf der Fläche mit Rasengittersteinen auf (37 % der Jahresbilanz), während die gefügedichten Rechteckpflaster die geringste Verdunstung aufweisen (12 % der Jahresbilanz). Ursache für die höhere Verdunstung unter Rasengittersteinen ist sowohl der größere Interzeptionsspeicher der Oberfläche, als auch die zusätzliche Transpiration.

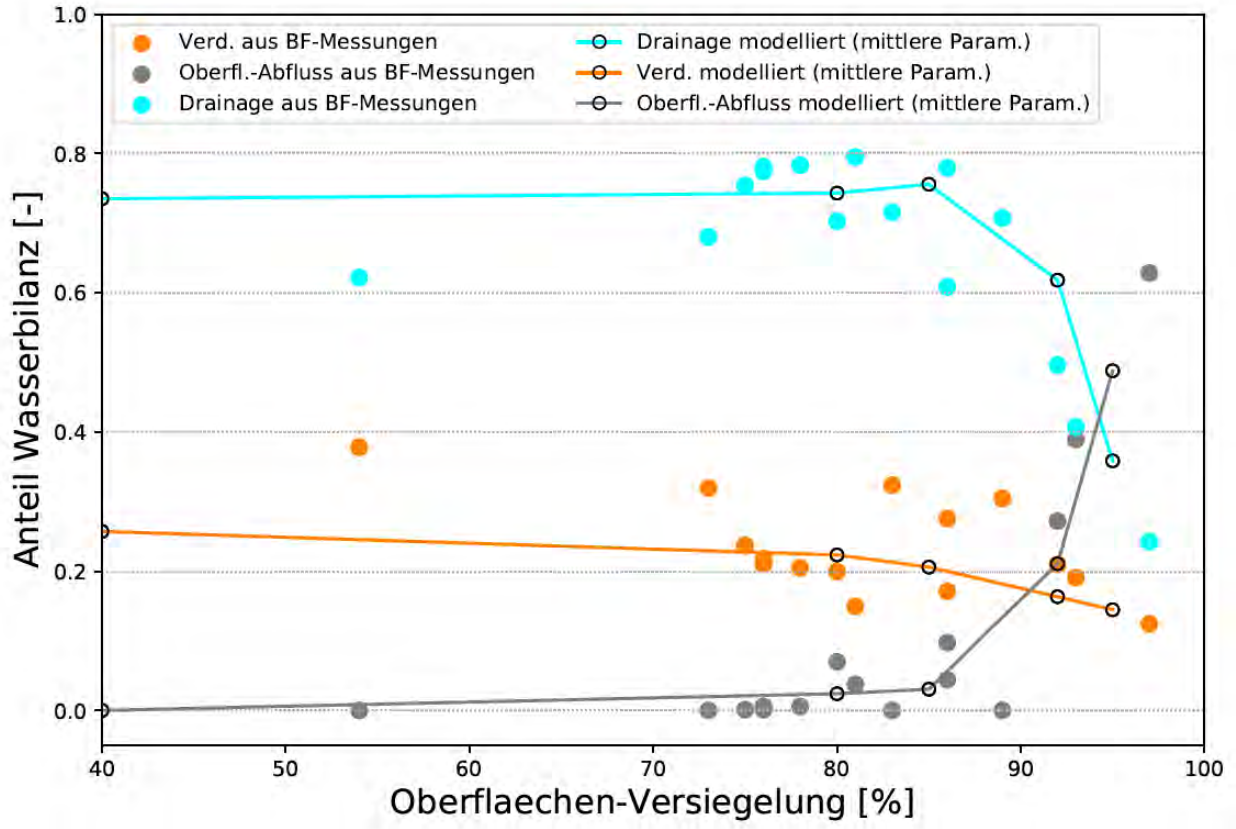


Abbildung 22: Vergleich der Ergebnisse von RoGeR_WBM_Urban und der daten-basierten Modellierung.

Insbesondere die verringerte Verdunstung führt zu einer erhöhten Drainage von gepflasterten Oberflächen. Auf den untersuchten Messflächen betrug diese im Mittel 64% des gesamten Niederschlags-Inputs. Bei Ausführung der Pflasterflächen ohne Planums-Entwässerung führt diese Drainage zu Grundwasserneubildung. Im Vergleich zu Steinbrich et al. (2018) beträgt die Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet unter natürlichen Bedingungen nur rund 27% des Niederschlags. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen dagegen, dass diese auf gepflasterten Oberflächen bis zu drei Mal so hoch sein kann.

Die Ergebnisse des daten-getriebenen Modellansatzes wurden genutzt um RoGeR_WBM_Urban für teilversiegelte Oberflächen zu validieren. Während standortspezifische Messdaten in den Daten-basierten Modellansatz eingehen (z.B. Bodenfeuchte-Zeitreihen), finden diese bei urban RoGeR keine Berücksichtigung. Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Modellansätze für die in
Abbildung dargestellten Messflächen. Für die Modellierung mit RoGeR_WBM_Urban wurde dabei auf standortspezifische Daten verzichtet, die Parametrisierung des Wasserhaushaltsmodells wurde nur anhand der Parameter aus Tab. 3 für die jeweiligen Flächenklassen abgeleitet.

Der Vergleich zeigt, dass die Ergebnisse der beiden Ansätze (empirisches Wasserbilanzmodell für teilversiegelte Flächen basierend auf Zeitreihen der Bodenfeuchte vs. mesoskalig anwendbares Wasserhaushaltsmodell mit im Projekt entwickelten Standardparametern) weitgehend konsistent sind. So zeigt die Verdunstung in urban RoGeR eine lineare Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad. Diese ist auch im Daten-basierten Model erkennbar, wobei die Ergebnisse stärker streuen. Diese Streuung ist u.a. auf unterschiedliche Standorteigenschaften (z.B. Beschattung, Windverhältnisse, Albedo) der Messflächen zurückzuführen welche in die Daten-basierte Modellierung miteingehen, während sie aufgrund der Skalenübergreifenden Anwendbarkeit bei RoGeR_WBM_Urban keine Berücksichtigung finden können.

4.5 Entwicklung eines GIS-Daten basierten Modells zur verteilten und kontinuierlichen Modellierung des Wasserhaushalts von Städten

AP V diente in erster Linie der Modellentwicklung und –Erweiterung: Es soll ein bestehendes, am Lehrstuhl für Hydrologie entwickeltes, auf GIS-Eingangsdaten basierendes Abflussbildungsmodell RoGeR, Weiler und Steinbrich, 2011) auf Basis der Ergebnisse aus AP III (Bildung von Oberflächenabflüssen), AP IV (Verdunstungsmodelle/Bodenwasserhaushalt) und der zugrunde liegenden Konzepte des Web-Modells FreWaB zur Simulation des Wasserhaushaltes nachhaltiger Maßnahmen der Siedlungsentwässerung (Vauban-Projekt) dahingehend erweitert werden, dass das gesamte Spektrum Siedlungswasserhaushaltes mit dem Modell abbildbar ist (RoGeR_WBM_Urban). Die Erweiterung des RoGeR-Modells zielte darauf ab, den Wasserhaushalt der Stadt Freiburg in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu bestimmen.

Das GIS-basierte N-A-Modell RoGeR wurde bisher zur Modellierung von Hochwasserereignissen eingesetzt. Die Besonderheiten des Modells sind die sehr hohe zeitliche und räumliche Auflösung der Simulation, die besondere Berücksichtigung der relevanten Abflussbildungsprozesse (Infiltration, Makroporen, Interflow) und die GIS-basierte (nicht kalibrierte) Parametrisierung der Teilflächen. Durch die Implementierung eines Verdunstungsmoduls (Penman-Monteith) wurde eine kontinuierliche Modellierung der relevanten Prozesse unter Beibehaltung der raumzeitlichen Auflösung möglich sein (während Niederschlagsfreie Tage im Tageszeitschritt modelliert werden, können die Abflussbildungsprozesse während Niederschlagsereignissen zeitlich hoch aufgelöst modelliert werden). Zusätzliche Module zur Beschreibung des Wasserhaushalts nachhaltiger Maßnahmen der Siedlungsentwässerung sollten ursprünglich dem bestehenden Web-Modell (FreWaB, Vaubanprojekt, siehe Endbericht Innovationsfond und http://www.naturnahe-regenwasserbewirtschaftung.info) entnommen werden. Um jedoch eine deutlich detailliertere Beschreibung der am Wasserhaushalt beteiligten Prozesse in Maßnahmen zur Siedlungswasserbewirtschaftung zu ermöglichen, wurden die notwendigen Sub-Routinen komplett neu entworfen und programmiert. Dies gewährleistet, dass sowohl die räumliche Wasser-Umverteilung durch die Maßnahmen zur Siedlungsentwässerung, als auch die daraus resultierenden veränderten vertikalen Wasserflüsse verbessert abgebildet werden können.

Anhand des verbesserten Wasserhaushaltsmodells, der in Teilprojekt I definierten und charakterisierten Flächen und der in den Teilprojekten II – IV erhobenen Eingangsdaten war es geplant sowohl in hoher zeitlicher (<10 min) als auch in hoher räumlicher (< 5 m x 5 m) Auflösung kontinuierlich den Wasserhaushalt urbaner Räume (hier: Freiburg) zu simulieren. Die Anwendung des neu entwickelten Modells erlaubte und verlangte es jedoch in einer deutlich höheren Auflösung (1*1 m, um die räumlichen Einflüsse der Siedlungsstrukturen auf die potentielle Verdunstung berücksichtigen zu können, ist diese deutlich höhere Auflösung notwendig) die Wasserbilanz (N-Q-V-GWN=0) für jeden beliebigen Standort (lokal oder auch einzelne Stadtteile) in ihrer raumzeitlichen Dynamik zu quantifizieren und darzustellen. Dies ermöglicht es gerade auch die räumliche Variabilität der Wasserbilanz im Hinblick auf die unterschiedlichen Entwicklungsstadien des Siedlungsentwässerungssystems in Freiburg zu betrachten und das gesamte Spektrum möglicher Wasserbilanzen innerhalb einer Stadt zu bewerten (Beispiel in Abb. 23).

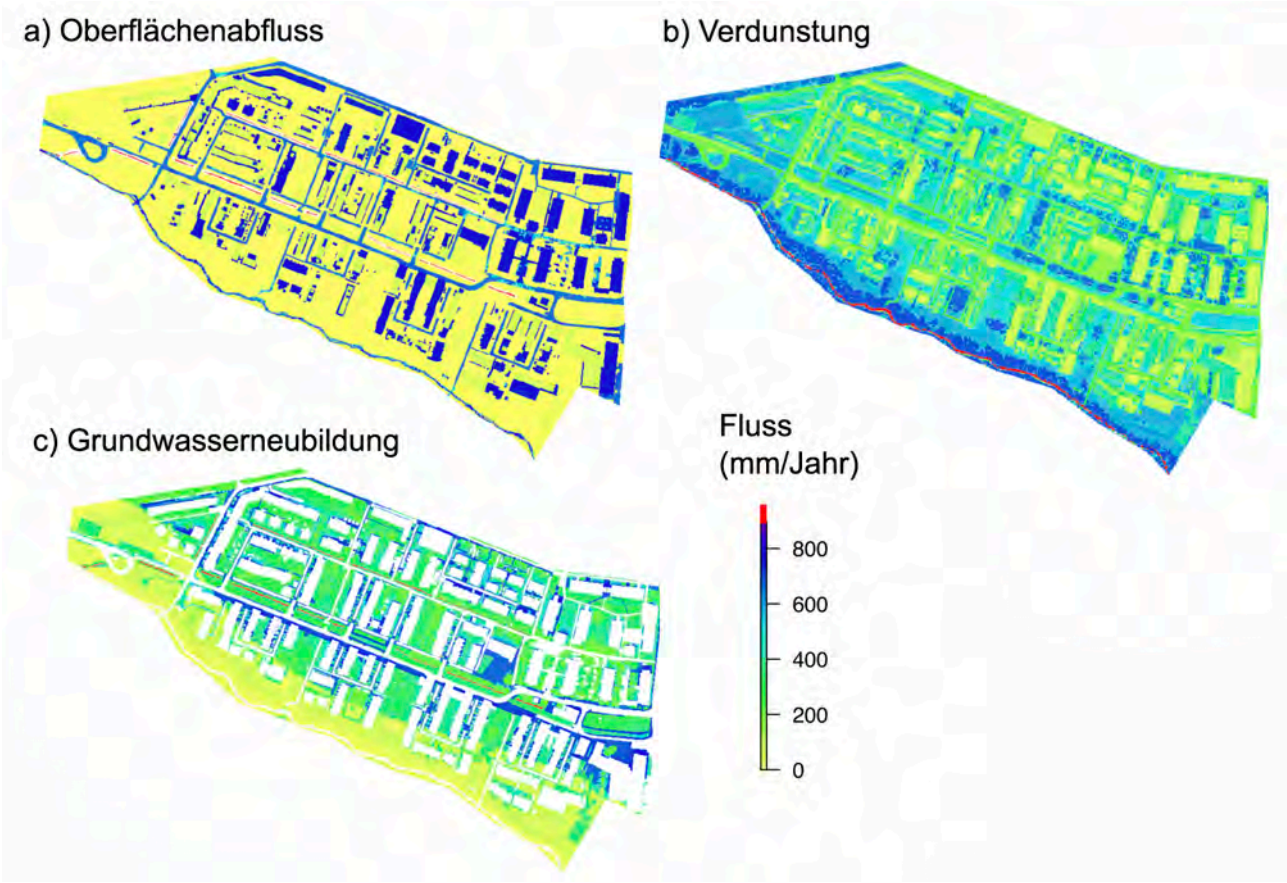


Abbildung 23: Räumlich hoch aufgelöste Modellierung des Oberflächenabflusses, der Verdunstung und der Grundwasserneubildung für den Stadtteil Vauban. Gut erkennbar ist die sehr hohe GWN unter der zentralen Mulden-Rigolen-Versickerungsanlage (rot). Auch die deutlich erhöhte GWN, bzw. reduzierte Verdunstung auf der Nordseite vieler Gebäude aufgrund der dort verringerten Verdunstung ist gut erkennbar.

Die Entwicklung des stadthydrologischen Modells RoGeR_WBM_Urban ist abgeschlossen und die geplanten Simulationen wurden durchgeführt. 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 Versickerungsanlangen geleitet wird. Die Funktion solcher Versickerungsanlagen wird genauso abgebildet wie die Auswirkung verschiedener urbaner Oberflächen (Pflaster, Rasengittersteine, etc.) oder der Wirkung von Gründächern. Außerdem werden die Interzeption und die Verdunstung von Stadtbäumen sowie die Wirkung der Beschattung durch Gebäude auf die Verdunstung berücksichtigt.

Urban-RoGeR muss nicht kalibriert werden, braucht aber aufgrund der lateralen Beziehung zwischen den 1m^2 großen Rasterzellen entsprechend viel Rechenzeit. Wie im Modellvergleich (APVb) gezeigt liefert das Modell ganz ohne Kalibrierung vergleichbare Ergebnisse wie kalibrierte Modelle aus der Praxis. Es besteht natürlich noch Raum die Parametrisierung einzelner Oberflächenklassen in der Zukunft zu verbessern. Ein Teil der im Rahmen des Projektes erhobenen Messdaten von der Plot-Skale (AP IV), über die Stadtteilskale (AP III) bis hin zur gesamten Stadt (AP II) wurde für die Validierung des neu entwickelten/verbesserten Wasserhaushaltsmodells RoGeR_WBM_Urban auf allen implementierten Prozessskalen genutzt. Dabei konnte die Verlässlichkeit und Anwendbarkeit des Modells nachgewiesen werden (Leistert et al., 2018).

So wurden für mehrere Stadtteile die langfristige Entwicklung der Wasserbilanz bestimmt und der Einfluss der Wasserbewirtschaftung auf die Wasserbilanz quantifiziert: z. B. konnte im Vergleich der Stadtteile Landwasser (Trennsystem) und Mooswald (Mischsystem) ein im Mittel um 10 % niedriger Abflussbeiwert für den Stadtteil Landwasser bestimmt werden. Zusätzlich erlaubt der Vergleich von Modell-Simulationen und beobachtetem Abwasseranfall die Anteile von Fremd- und Schmutzwasser im Abwasser auszuweisen: Für den Stadtteil Mooswald waren dies im Kalenderjahr 2016 39.1 %.

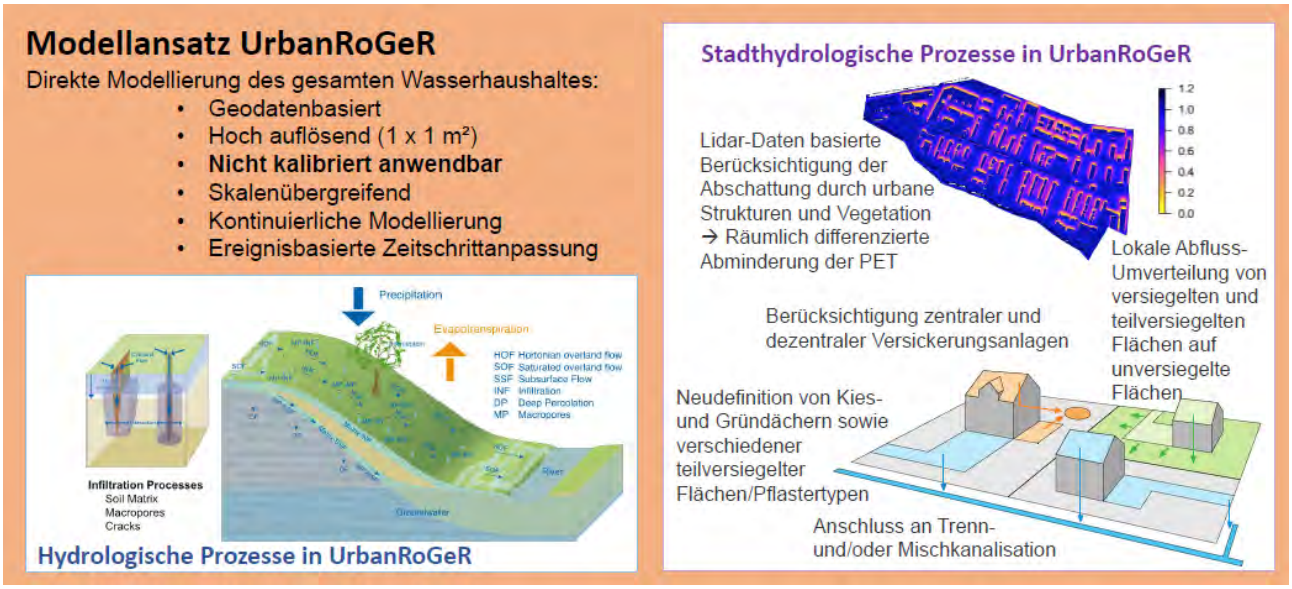


Abbildung 24: In RoGeR_WBM_Urban implementierte Prozesse und Modelleigenschaften

4.6 Benchmark-Modellierung des Mischwasseranfalls unter verschiedenen Regenwasserbewirtschaftungskonzepten mit bestehenden Modellen

Um die Ergebnisse der Modellentwicklung (RoGeR_WBM_Urban) gegen die aktuelle Praxis zu prüfen, wurden mit dem Niederschlags-Abfluss-Model **KOSIM 6.3** XL und dem hydrodynamischen Abflussbildungs- und Abflusstransportmodell **Hystem-Extran (ITWH)** zunächst anhand bestehender Flächenklassierungen und mit herkömmlichen Ansätzen zur Niederschlagscharakterisierung die Teileinzugsgebietsabflüsse und der Mischwasseranfall bzw. -abfluss (AP III) simuliert. In einem zweiten Schritt werden die innerhalb des Projektes entwickelten Flächenklassifizierungen, die Bodenparameter und die in hoher räumlicher Auflösung gemessenen Input-Daten in die Modelle eingesetzt.

Der Einfluss des Siedlungsentwässerungssystems und der im jeweiligen Stadtteil eingesetzten dezentralen Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung auf den Anfall von Oberflächenabflüssen /Mischwasser kann so direkt quantifiziert werden.

Vorgehensweise

Für die Stadt Freiburg liegt aus dem Generalentwässerungsplan (ERNST+CO / BIT Ingenieure + itwh, 2004) ein hydrodynamisches Kanalnetzmodell vor. Darüber hinaus ist aus der Überrechnung der Regenentlastungsanlagen im Einzugsgebiet des Abwasserzweckverbandes Breisgauer Bucht (BIT Ingenieure, 2015/2017) ein Schmutzfrachtmodell vorhanden. Diese beiden Modelle dienen als Grundlage für die Durchführung von „Benchmark-Berechnungen“ zur Validierung des Modells Urban RoGeR.

Die Berechnungen wurden mit gemessenen Niederschlägen für das komplette Jahr 2016 durchgeführt. Im Wesentlichen wurden die Abflussganglinien an den Systemauslässen der beiden betrachteten Gebiete Landwasser und Mooswald aufgezeigt, welche als Vergleichsgrundlage für die gemessenen Durchflüsse und die Modellergebnisse aus Urban RoGeR genutzt wurden.

Berechnete Varianten

Die verschiedenen Varianten unterscheiden sich in der Flächengrundlage und den verwendeten Modellen. Im ersten Schritt wurde das Modell des Generalentwässerungsplans mit den damals erhobenen Flächen verwendet. In nächsten Schritt wurden die seitens der Professur für Hydrologie im

Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Flächen angesetzt. Die grundlegende Parametrisierung wurde dabei übernommen.

Neben der Verwendung der vorhandenen in der Praxis etablierten siedlungswasserwirtschaftlichen Modelle wurde eine kombinierte Berechnung durchgeführt, bei der die Hydrologie mittels RoGeR_WBM_Urban und der Kanalabfluss mit Extran berechnet wurde. Dabei wurden die gelieferten Abflüsse der den einzelnen Haltungen zugeordneten Flächen geliefert und diese in das Wellendatenformat von Extran überführt.

Tabelle 4: Überblick über die berechneten Modellvarianten

Variante	Flächen	Hydrologie	Kanalabfluss
V1	GEP	Hystem 6.5	Extran 6.5
V2	Uni neu	uban roger	Extran 6.5
V3a	Uni neu	Hystem 6.5	Extran 6.5
V3b	Uni neu	Hystem 6.5	Extran 7
V4	GEP	Kosim 6	Kosim 6
V5	Uni neu	Kosim 6	Kosim 6

Modelle

Hydrodynamisches Kanalnetzmodell

Als Berechnungsprogramm kommt das Softwarepaket Hystem-Extran (V6.5 und V7.9) vom Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie, Hannover, zum Einsatz. Das Programm ist getrennt in die zwei Modelle zur Oberflächenabflussermittlung und Abflusstransportberechnung. Der Oberflächenabfluss beschreibt die Abflussvorgänge an der Oberfläche vom Auftreffen des Regens auf den Boden bis zum Eintritt des Wassers in das Kanalnetz und wird durch das hydrologische Modell Hystem ermittelt. Die anschließende Berechnung des Kanalabflusses erfolgt mit dem hydrodynamischen Modell Extran.

Da das Modell aus dem Generalentwässerungsplan in der Version 6.5 vorhanden war, erfolgten die meisten Simulationen ebenfalls mit dieser Programmversion. Es wurde lediglich ergänzend eine Variante gerechnet, in der der Kanalabfluss mit der neueren Extran-Version simuliert wurde, die Abflussbildung jedoch identisch ist mit den vorangegangenen Berechnungen mit Hystem (6.5).

Hystem (6.5) beinhaltet grundsätzlich (nur) die zwei Flächentypen „undurchlässig“ und „durchlässig“. Die verwendeten Parameter sind nachfolgend aufgeführt:

<u>Undurchlässige Flächen:</u>

Benetzungsverlust	0,7 mm
Muldenverlust	1,8 mm
Anteil der abflusswirksamen Fläche zu Beginn der Muldenauffüllphase	25 %
Anteil der abflusswirksamen Fläche am Ende der Muldenauffüllphase	68 %
Fließzeitparameter	8,8

<u>Durchlässige Flächen:</u>

Muldenverlust	5 mm
Bodenklasse	4
Anfangswassergehalt	10 mm
Anteil der abflusswirksamen Fläche	20 %
Fließzeitparameter	2,3

Die wesentlichen Eingangsgrößen bei der Kanalabflussmodellierung sind nicht physikalischer Natur, sondern numerische Parameter. Die Angabe über die Rohrreibung wird bei der Berechnung für das ganze Kanalnetz gleich angesetzt. Für den Rauhigkeitsansatz nach Prandtl-Colebrook ist der Standardwert von 1,5 mm vorgegeben. Darüber hinaus wird für jeden Schacht eine individuelle Schachtoberfläche ermittelt. Weiterhin wurden die Simulationen mit Wasserrückführung durchgeführt. Für

den Fall des Überstaus gelangt das aus dem Netz austretende Wasser nach Beendigung des Überstauzustandes wieder ins Kanalnetz.

Schmutzfrachtmodell

Es wurde das Schmutzfrachtmodell KOSIM (Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie, Hannover) verwendet. Hierbei handelt es sich um ein rein hydrologisches Modell, das hauptsächlich der Dimensionierung / dem Nachweis von Speicherbauwerken derselben mit Hilfe der kontinuierlichen Langzeitsimulation dient.

Mit der Langzeitsimulation wird der Abflussprozess im Kanalsystem mathematisch nachgebildet, der sich aus der Folge der in den Regenreihen befindlichen Einzelregen ergibt. Dabei wird berücksichtigt, dass bei Ereignisbeginn gegebenenfalls die Benetzungs- und Muldenverluste (des vorherigen Regenereignisses) noch nicht abgetrocknet sind und somit ein größerer Anteil des aktuellen Niederschlagsereignisses zum Abfluss kommt.

Zur Durchführung der Langzeitsimulationen ist zunächst die Entwicklung eines Modells erforderlich, welches die in der Realität herrschenden Zustände näherungsweise widerspiegelt. Dieses Modell ist prinzipiell eine Art Grobnetz, welches die wesentlichen Eigenschaften des detaillierten Kanalnetzes besitzt, aber dennoch stark vereinfacht ist.

Gebiete und Bauwerke werden über Verbindungen in Form von Sammlern (Grobnetz) logisch verbunden. Diesen wird eine Fließzeit zugeordnet. Den Gebieten werden Flächen zugeordnet, wobei zwischen undurchlässigen Flächen, durchlässigen Flächen und natürlichen Flächen unterschieden wird. Weitere Unterscheidungskriterien sind die Entwässerungsart, Gebietsart (Wohngebiet, Industriegebiet), Einwohnerdichte und Trockenwetterparameter.

In KOSIM werden ausschließlich die undurchlässigen Flächen einbezogen; deren angesetzten Parameter sind untenstehend aufgelistet:

Undurchlässige Flächen:

Benetzungsverlust	0,5 mm
Muldenverlust	1,8 mm
Anfangsabflussbeiwert	25 %
Endabflussbeiwert	68 %

Berechnungsergebnisse

Die für den Benchmark-Vergleich simulierten Stadtteile sind die Stadtteile Mooswald und Landwasser (Abb. 25). Es ist zu berücksichtigen, dass im Gebiet Landwasser Trennkanalisation und in Mooswald Mischwasserkanalisation vorhanden ist. Um die Berechnungsergebnisse vergleichbar machen zu können, wurde sowohl aus den Modellen als auch aus den beobachteten Abflussdaten der Schmutz- und Fremdwasseranteil anhand statistischer und grafischer Analysen entfernt.

Alle eingesetzten Modelle waren prinzipiell fähig die beobachteten Regenwasserabflüsse beider Stadtteile für den simulierten Zeitraum mit akzeptabler Güte abzubilden (Abb. 26). Die Modellgüte wurde anhand des mittleren Fehlers (Root Mean Square Error – RMSE), des Bestimmtheitsmaßes (R^2) sowie anhand der Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) bestimmt. Die absolut erreichten Modellgüten lagen nicht für alle Güte-Maße im Idealbereich. Dies war jedoch erwartbar, da einerseits für den Benchmark-Vergleich weder die Modelle aus der Praxis noch das neuentwickelte Wasserhaushaltsmodell einer Modelloptimierung unterzogen wurden (Vergl. Tab. 5), zum anderen zeigten die verfügbaren Niederschlagsstationen zum Teil Abweichungen zu den Abflussganglinien: Ein Teil der z. B. am Flughafen beobachteten Niederschläge zeigte keine zeitgleiche Abflussreaktion in den simulierten Stadtteilen, ebenso wurden nicht für alle beobachteten Abflussereignisse zugehörige Niederschlagsevents gemessen.

Im Vergleich der Simulationsergebnisse konnte für den Stadtteil Mooswald mit dem neuentwickelten Modell sogar die im Vergleich beste Modellgüte erreicht werden. Für den Stadtteil Landwasser wurde eine generell schlechtere Güte erreicht, dies lässt sich jedoch durch einen hohen Fremdwasseranteil mit saisonal variablen Schmutzwasserkomponenten erklären (typische Tagesgänge in der Niederschlagsfreien Zeit). Durch grafische Korrekturen waren die Fremdwassersignale klar abtrennbar, je nach gewähltem Verfahren profitierten entweder KOSIM bzw. Hystam oder das Wasserhaushaltsmodell. Bei einer kompletten Abtrennung aller Fremdwasserkomponenten war das N-A-Modell

KOSIM 6.3 unabhängig von der gewählten Parametrisierung (Vergl. Tab. 5) am besten in der Lage die anfallenden Regenwasserabflüsse für den Stadtteil Landwasser vorherzusagen (Abb. 27).

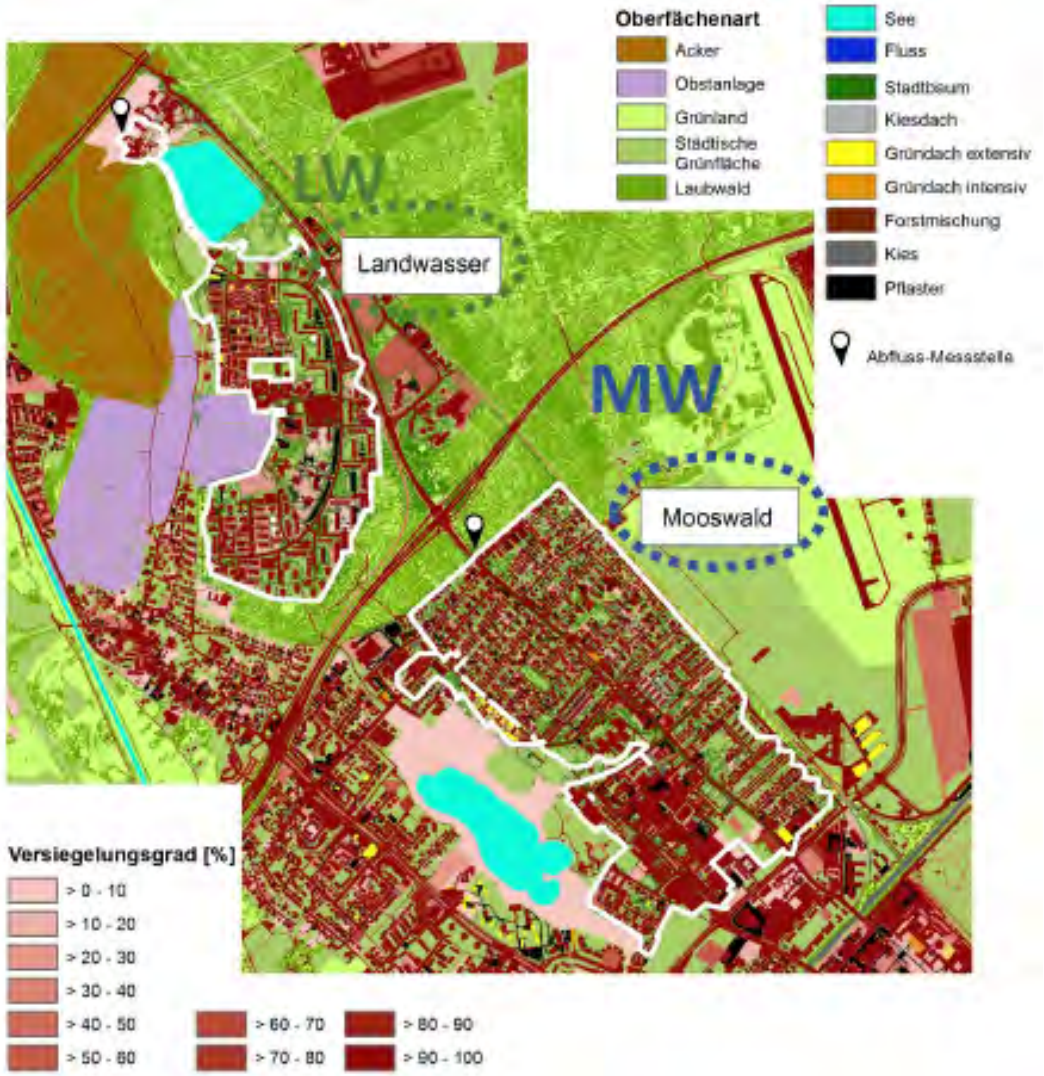


Abbildung 25: Räumlich detaillierte Darstellung der Modellgebiete (das Dreieck kennzeichnet die Abfluss-Messstelle im Mischwasserkanal).

Tabelle 5: Vergleich der Modellergebnisse für die Stadtgebiete Mooswald und Landwasser.

Mooswald	UrbanRoGeR_Extran *Flächen_Neu*	Hystem_Extran *GEP*	Hystem_Extran *Flächen_Neu*	Kosim *GEP*	Kosim *Flächen_Neu*	Regenwasser-Abfluss (Kanal)
Abflussbeiwert	**0.33**	0.22	0.24	0.16	0.17	**0.36**
RMSE	65	**46**	49	59	62	-
R²	**0.20**	0.19	0.19	0.06	0.06	-
NSE	**0.66**	0.32	0.39	0.59	0.62	-
Landwasser						
Abflussbeiwert	0.19	0.13	0.13	**0.09**	**0.09**	**0.10**
RMSE	34	**22**	**22**	25	25	-
R²	0.001	0.001	0.001	**0.01**	**0.01**	-
NSE	-2.19	-0.29	-0.3	-0.69	-0.69	-

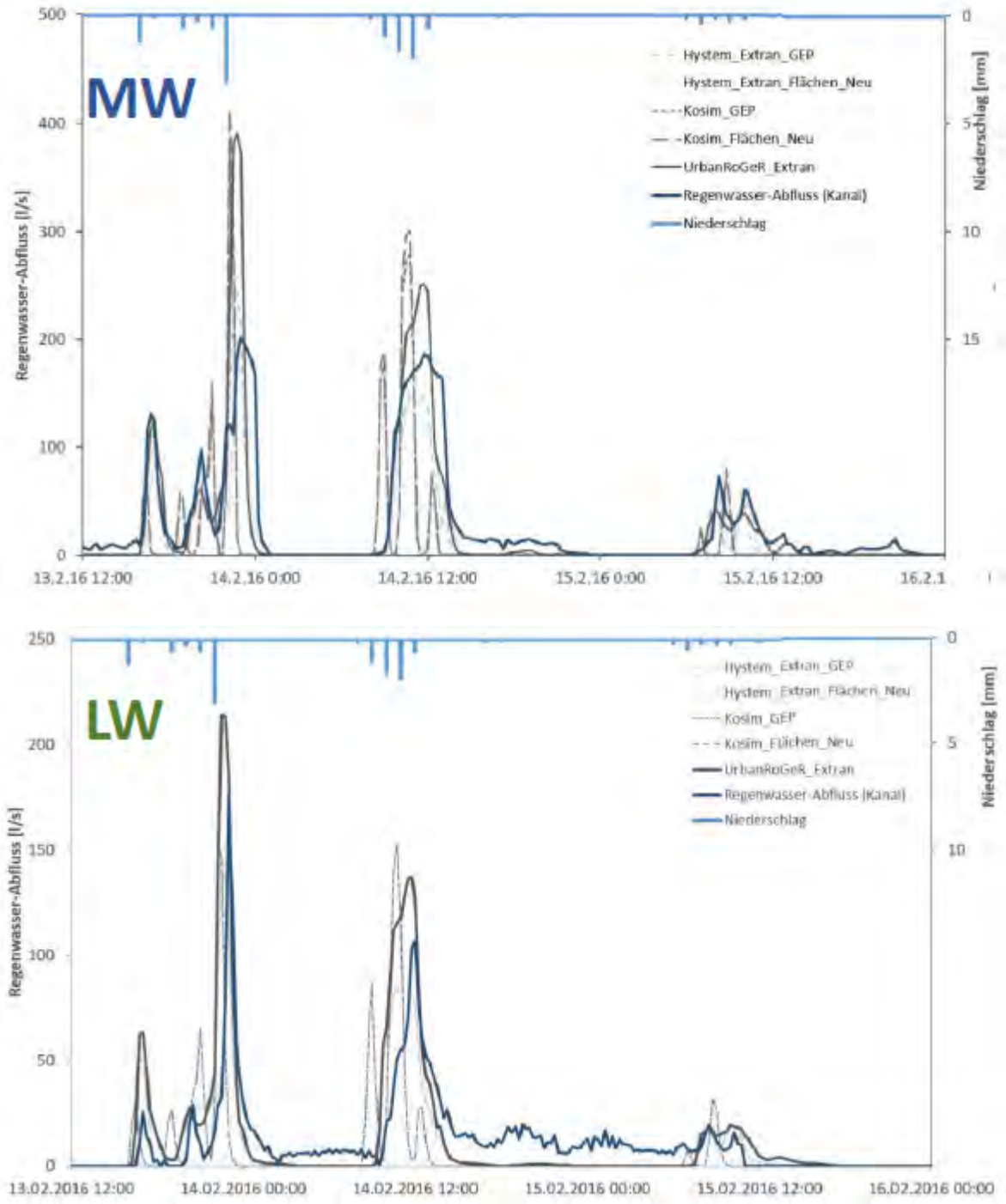


Abbildung 26: Beobachteter Regenwasseranfall in der Kanalisation und simulierter Niederschlags-Abfluss für die Stadtteile Mooswald (MW) und Landwasser (LW) beispielhaft für die Ereignisse vom 13.2.16-16.2.16. Die weitgehende Übereinstimmung von beobachteten und simulierten Ereignissen wird deutlich. Während die Modelle aus der Ingenieurspraxis die Abflussspitzen besser treffen, zeichnet das Wasserhaushaltsmodell besser die Dynamik der Ereignisse nach.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der im Rahmen des Projektes neuentwickelte Ansatz zur prozessnahen und räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Modellierung der urbanen Wasserbilanz (RoGeR_WBM_Urban) neben den zusätzlichen Komponenten des Wasserhaushaltes durchaus vergleichbare Ergebnisse für die simulierten Oberflächenabflüsse erzielt, wie in der Ingenieurs-Praxis genutzte reine N-A-Modelle. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Transformation der mit RoGeR_WBM_Urban simulierten Oberflächenabflüsse in Abflussganglinien an bestimmten Positionen im Kanalnetz nur unter Zuhilfenahme eines zusätzlichen Kanalnetzmodells (hier: Extran) erfolgen kann.

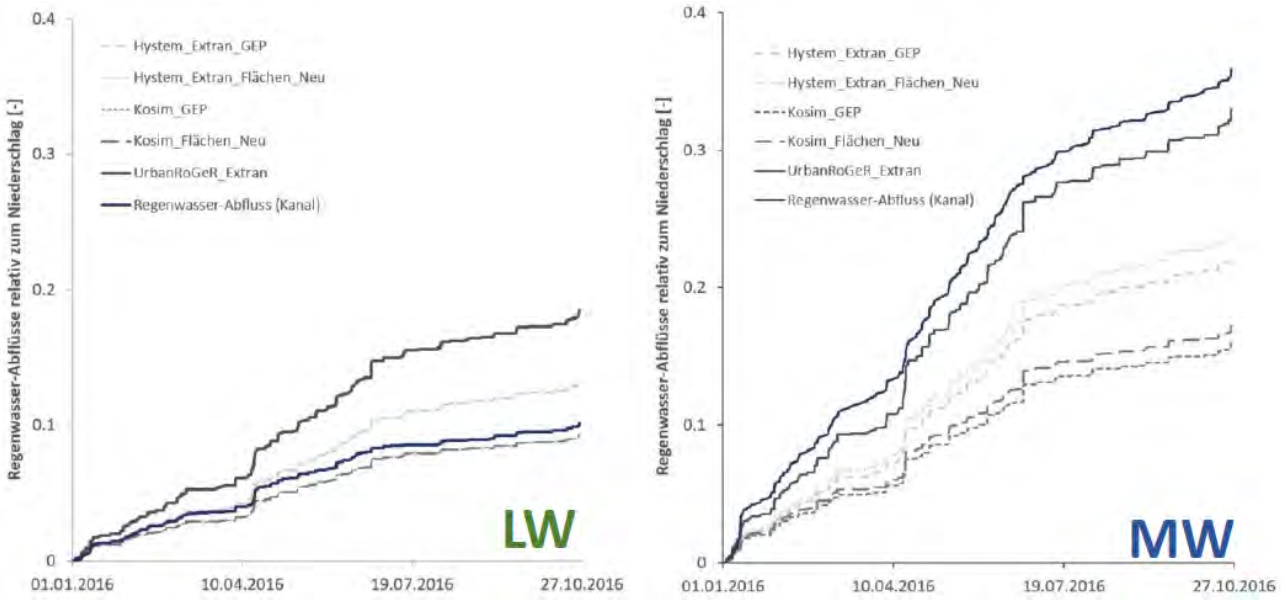


Abbildung 27: Beobachteter Regenwasseranfall in der Kanalisation und simulierter Niederschlags-Abfluss für die Stadtteile Mooswald (MW) und Landwasser (LW) kumulativ für das Jahr 2016.

4.7 Fallstudie Landwasser - Modellanwendung RoGeR_WBM_Urban: Anwendungsbeispiel der neu erhobenen Daten und des neu entwickelten Modells

Die Anwendbarkeit von RoGeR_WBM_Urban auf aktuelle Fragen der Siedlungswasserwirtschaft wird an einem Praxisfall innerhalb Freiburg demonstriert: Die Ursachen des ansteigenden Grundwasserspiegels im Stadtteil Landwasser sollen mithilfe der kontinuierlichen Simulation der Grundwasserneubildung über die letzten 30 Jahre für den Stadtteil Landwasser beleuchtet werden. Aufgrund der in RoGeR_WBM_Urban einsetzbaren räumlichen und zeitlichen Auflösung der Modellierung des urbanen Wasserhaushalts kann die langfristige Entwicklung der Grundwasserneubildung im Stadtteil im Detail analysiert werden. Zusammen mit langjährigen Zeitreihen der Grundwasserstände im und um den Stadtteil herum, sowie Informationen zu den Pegeln der umliegenden Oberflächengewässer und im Stadtteil durchgeführten wasserbaulichen Maßnahmen sollen über eine Zeitreihenanalyse mögliche Ursachen und Einflussfaktoren für den Anstieg der mittleren und maximalen Grundwasserstände identifiziert, bzw. ausgeschlossen und quantifiziert werden.

AP VI <u>vorhanden:</u>

- Informationen zu baulichen/ wasserwirtschaftlichen Maßnahmen in und um Landwasser
- Zeitreihen relevanter Grundwasserpegel
- Zeitreihen Wasserstand Flückinger See und Moosweiher

<u>zu entwickeln:</u>

- Test der Anwendbarkeit der entwickelten Tools auf aktuelle wasserwirtschaftliche Fragestellungen.

Meilenstein d wurde erreicht: Die Fallstudie Landwasser wurde erfolgreich durchgeführt. Anhand des stadthydrologischen Modells RoGeR_WBM_Urban konnten hochaufgelöste langfristige Zeitreihen des Siedlungswasserhaushalts für den Stadtteil Landwasser berechnet werden. Grundsätzlich zeigen Modell und beobachtete Grundwasserstände eine hohe Übereinstimmung. Eine Abweichung in der Dynamik kann allenfalls für den Zeitraum von 2009 – 2014 kostatiert werden. (leicht erhöhter beobachteter Grundwasserstand → siehe Abb. 3). Im Zeitraum 2005 – 2017 betrug die mittlere jährliche Grundwasserneubildung im Stadtteil Landwasser 287 mm.

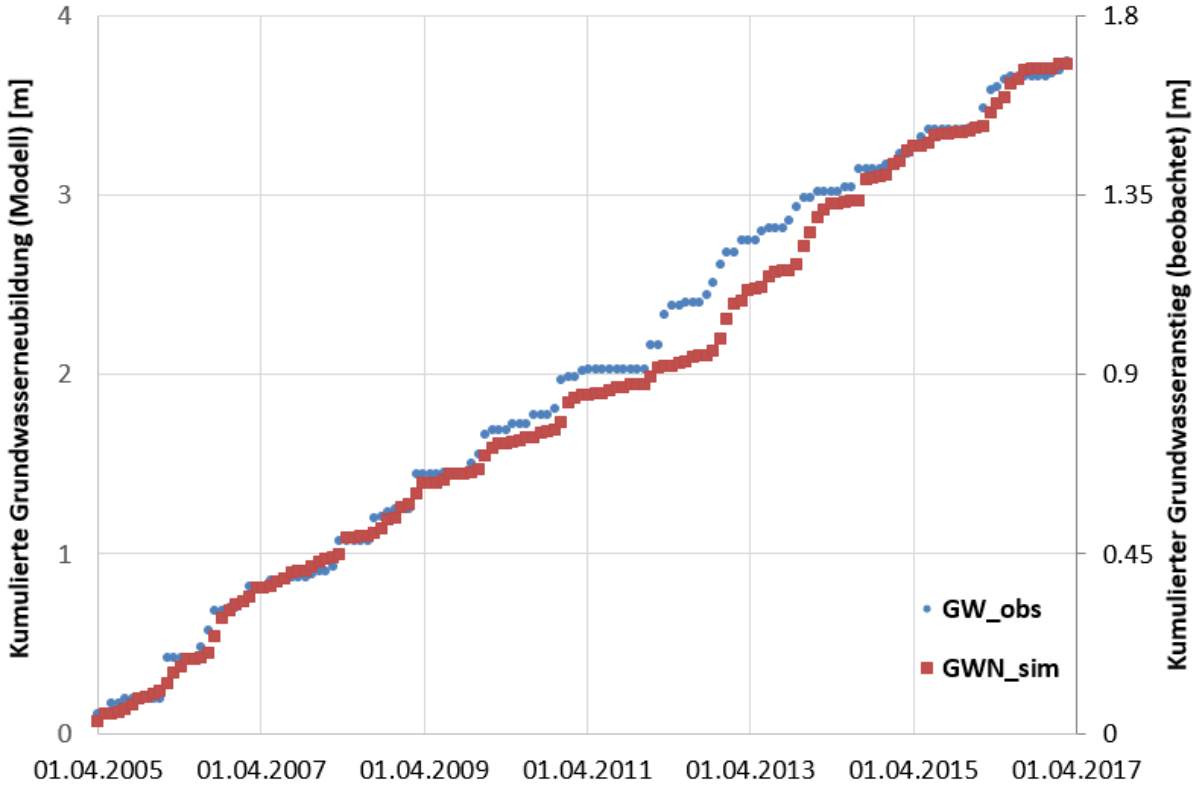


Abbildung 28: Beobachtete aufsummierte (positive) Grundwasserstandsänderungen der Grundwassermessstelle GW_MSt_2176_069_08 im Vergleich zur simulierten aufsummierten mittleren Grundwasserneubildung des Vergleichsbereichs im Stadtteil Landwasser (Lage siehe Abbildung 1)

4.8 Naturnahe städtische Wasserbilanz – Synthese – Szenarien – Empfehlungen

Im Rahmen von AP VII wurde die Synthese der einzelnen Teilprojekte und die Bewertung der vorliegenden Ergebnisse durchgeführt. Zunächst soll das neu entwickelte Siedlungswasserhaushaltsmodell RoGeR_WBM_Urban (AP V a) mit den Ergebnissen der Benchmark-modellierung (AP V b) bewertet werden. Dabei soll sowohl die Qualität der Modellierung des Siedlungswasserhaushalts als auch die berechneten und gemessenen Oberflächenabflüsse verglichen werden. In einem zweiten Analyse-Schritt werden die Ergebnisse der Modellierungen inhaltlich bewertet: Wie beeinflusst die in den verschiedenen Stadtteilen eingesetzte Form der Siedlungswasserbewirtschaftung die Abflussbildungsprozesse und den Anfall von Oberflächenabflüssen oder Mischwasser? Können für die bemessenen Stadtteile (AP III) signifikante Unterschiede identifiziert werden? Besteht ein Zusammenhang zwischen der zeitlichen Variabilität der Grundwasserneubildung und dem Fremdwasseranfall in der Mischkanalisation?

Auf Basis der Ergebnisse wurde RoGeR_WBM_Urban dann zur Szenarien-Rechnung genutzt: auf Basis der in AP II, III und IV erhobenen Daten/Wasserbilanzen der Referenzflächen (Mooswald,

Flugplatzwiese) wird das Modell für den ausgewählte Stadtteile des gesamten Freiburger Raum parametrisiert und mit den beobachteten Klimavariablen gerechnet (Abbildung 29). Besonders die laterale Umverteilung von Wasser von Quellflächen zu den Zielflächen und der Anteil der Flächen die an die Kanalisation angeschlossen sind, ist sehr unterschiedlich für die untersuchten Stadtteile (Abbildung 30)

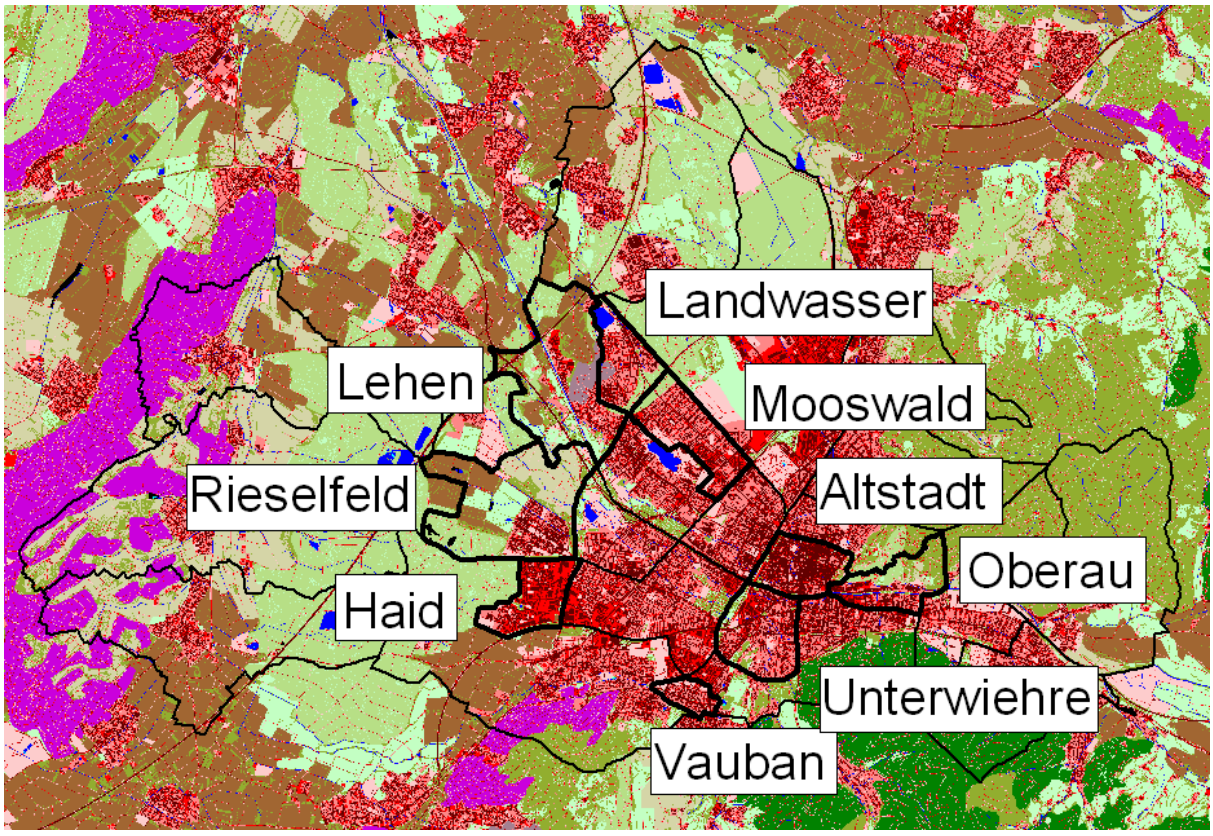


Abbildung 29: Lage und Ausdehnung der ausgewählten Stadtteile in Freiburg, die für den Vergleich herangezogen wurden.

Das Ergebnis stellt die naturnahe Wasserbilanz für die betrachteten Landnutzungsarten unter Berücksichtigung der topographischen Effekte auf den klimatischen Input dar. Um die natürliche Variabilität des Klimas besser zu berücksichtigen werden die Szenarien für einzelne Stadtteile (Vauban) über einen längeren Zeitraum modelliert und mit vorhandenen Zeitreihen (ab 2010) verglichen. Im Vergleich der Ergebnisse aus AP V (raum-zeitlich hoch aufgelöste Wasserbilanzen für Freiburg) mit den berechneten Szenarien können die Differenzen zwischen dem Wasserhaushalt der einzelnen Stadtteile direkt quantifiziert werden (Abbildung 31). Dabei fällt in Verbindung zur Abbildung 30 auf, dass besonders die Stadtteile, die einen hohen Anteil von Flächen, die an die Kanalisation angeschlossen sind (Altstadt, Oberau, Haid) auch eine hohen Oberflächenabfluss haben. Die Verdunstung ist eher unabhängig dieser Größe, sondern stärker von der Vegetationsbedeckung der Stadtteile abhängig, so haben besonders Lehen und Landwasser eine höhere Verdunstung.

Abbildung 32 zeigt im Detail die räumliche Variation des relativen Anteils der Grundwasserneubildung vom Niederschlag für die ausgewählten Stadtteile der Stadt Freiburg im Untersuchungszeitraum. Es zeigt sich, dass die kleinräumige Variation sehr viel grösser ist als die Variation zwischen den einzelnen Stadtteilen. Somit kann durch eine kluge Wahl von Flächen das Verhalten eines Stadtteils oder einer ganzen Stadt recht gut beeinflusst werden. Abbildung 33 zeigt die gleiche Information, aber für den Verdunstungsanteil. Hier sticht besonders die Innenstadt hervor, mit recht großflächigen geringen Anteilen der Verdunstung, bedingt, durch die relativ geringen Grünanteile und der hohe Anteil von Pflasterflächen, die zwar den Oberflächenabfluss noch reduzieren, aber das Wasser schnell nach unten leiten und somit die Grundwasserneubildung erhöhen, aber die Verdunstung drastisch reduzieren.

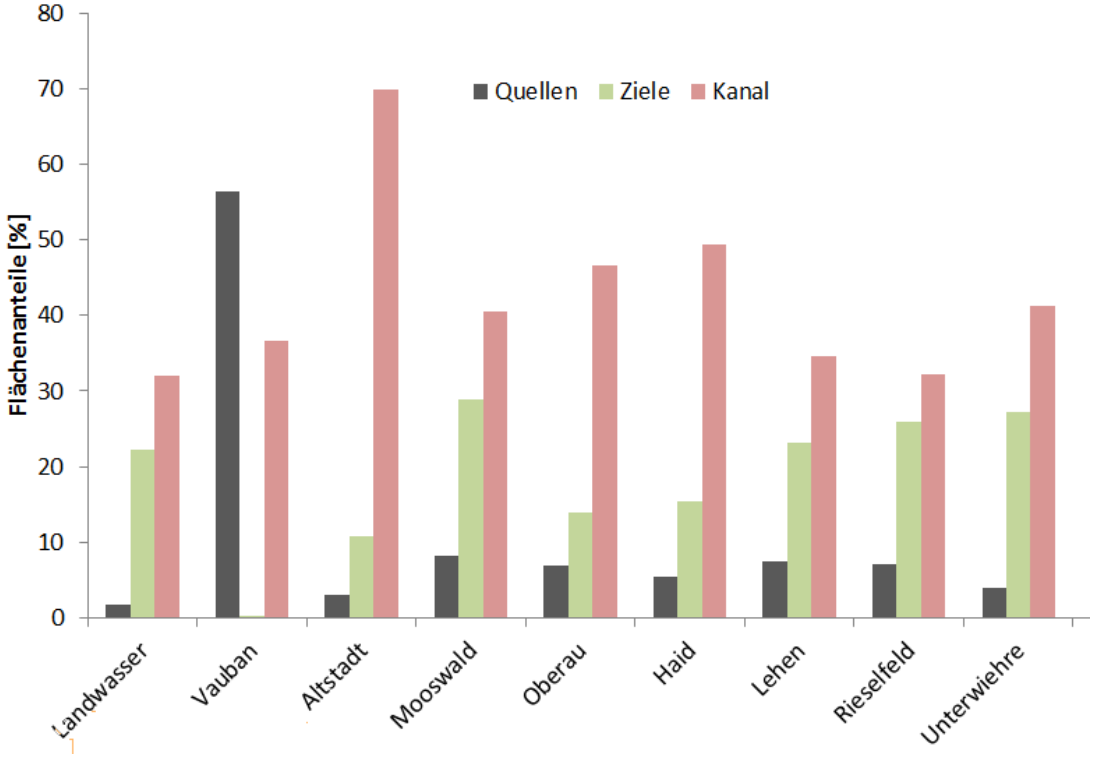


Abbildung 30: Anteile der Flächen die in umgebende Flächen entwässern (Quellen), in die entwässert wird (Ziele) und Flächenanteile die in die Kanalisation entwässern für die ausgewählten Stadtteile

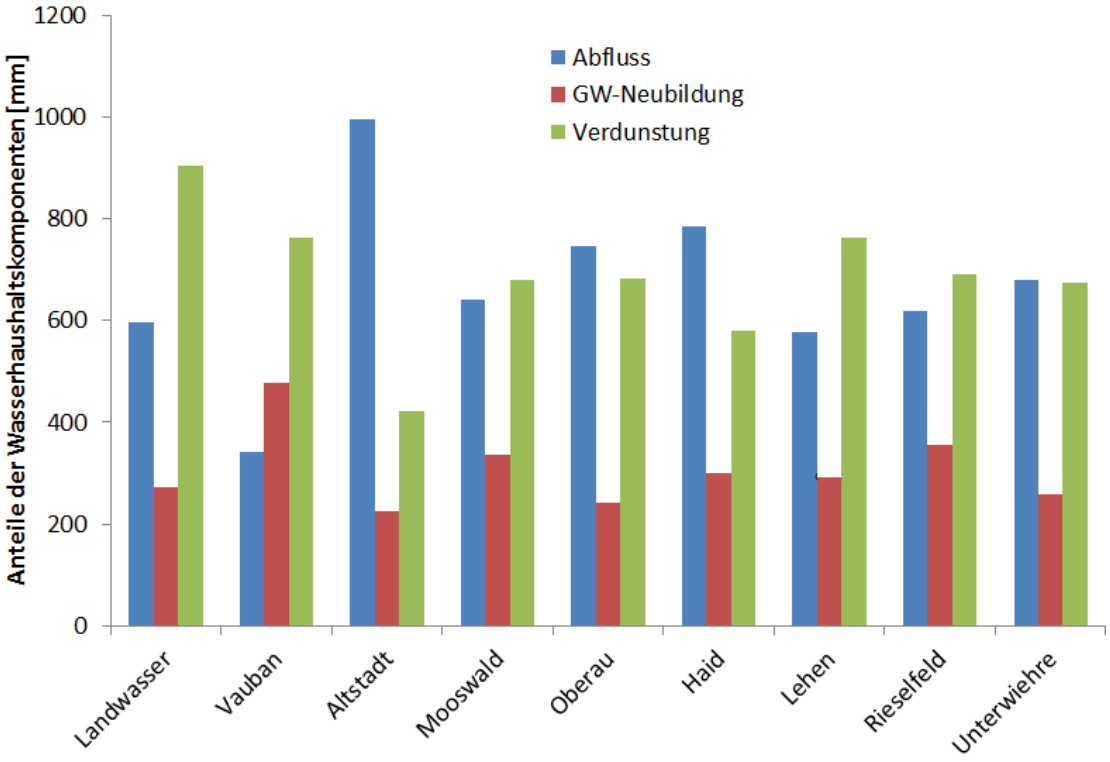


Abbildung 31: Quantifizierung des Wasserhaushaltes für die ausgewählten Stadtteile der Stadt Freiburg im Untersuchungszeitraum

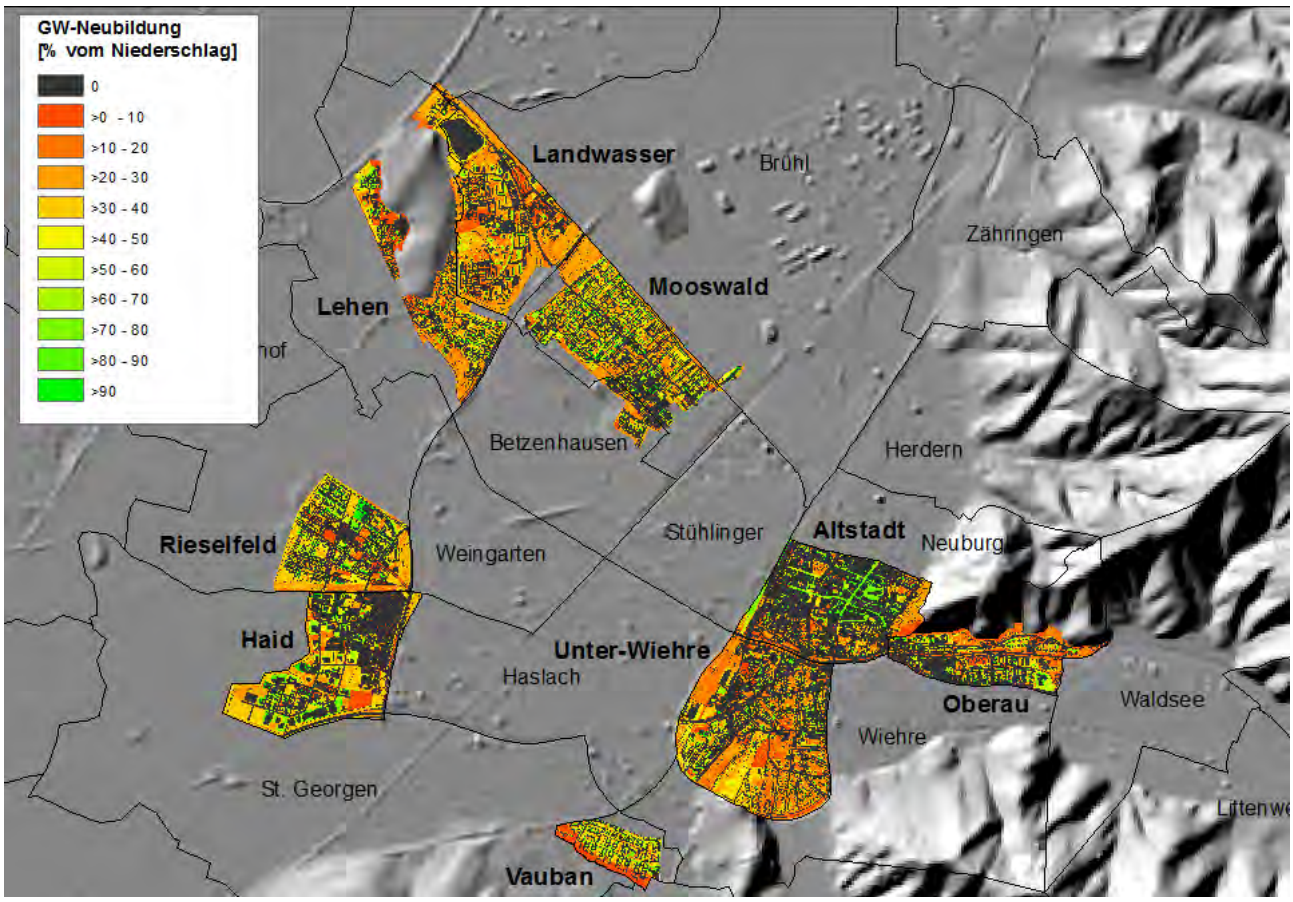


Abbildung 32: Räumlichen Dynamik des relativen Anteils der Grundwasserneubildung vom Niederschlag für die ausgewählten Stadtteile der Stadt Freiburg im Untersuchungszeitraum

Daraus lässt sich dann auch direkt ableiten, welche Stadtteile in ihrer Wasserbilanz der naturnahen Wasserbilanz entsprechen bzw. davon abweichen (Abbildung 34). Der naturnahe Wasserhaushalt wurde dabei nach dem neuen Verfahren von Steinbrich et al. (2018) bestimmt. 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 Berechnungsansatz für Referenzwerte des Wasserhaushaltes nutzt Boden-, Nutzungs-, Niederschlags- und Klimadaten und ist deutschlandweit einheitlich anwendbar. Für die Freiburger Bucht ergibt sich daraus einen Anteil von ca. 66% für die Verdunstung und 30% für die Grundwasserneubildung. Die Anteile der anderen Stadtteile sind im Vergleich im Dreiecksplot dargestellt und sind zum Teil sehr weit weg vom Referenzzustand. Jedoch zeigt sich auch, dass die neueren Stadtteile (Rieselfeld und Vauban) eine bessere Lage im Vergleich zur Referenz haben. Wenn die Möglichkeiten der Verdunstung in den Städten noch besser ausgenutzt werden würde (Gründächer, Bäume, Wasserflächen), könnte heutzutage auch ein Stadtteil gebaut werden, der fast dem natürlichen referenzzustand entsprechen würde.

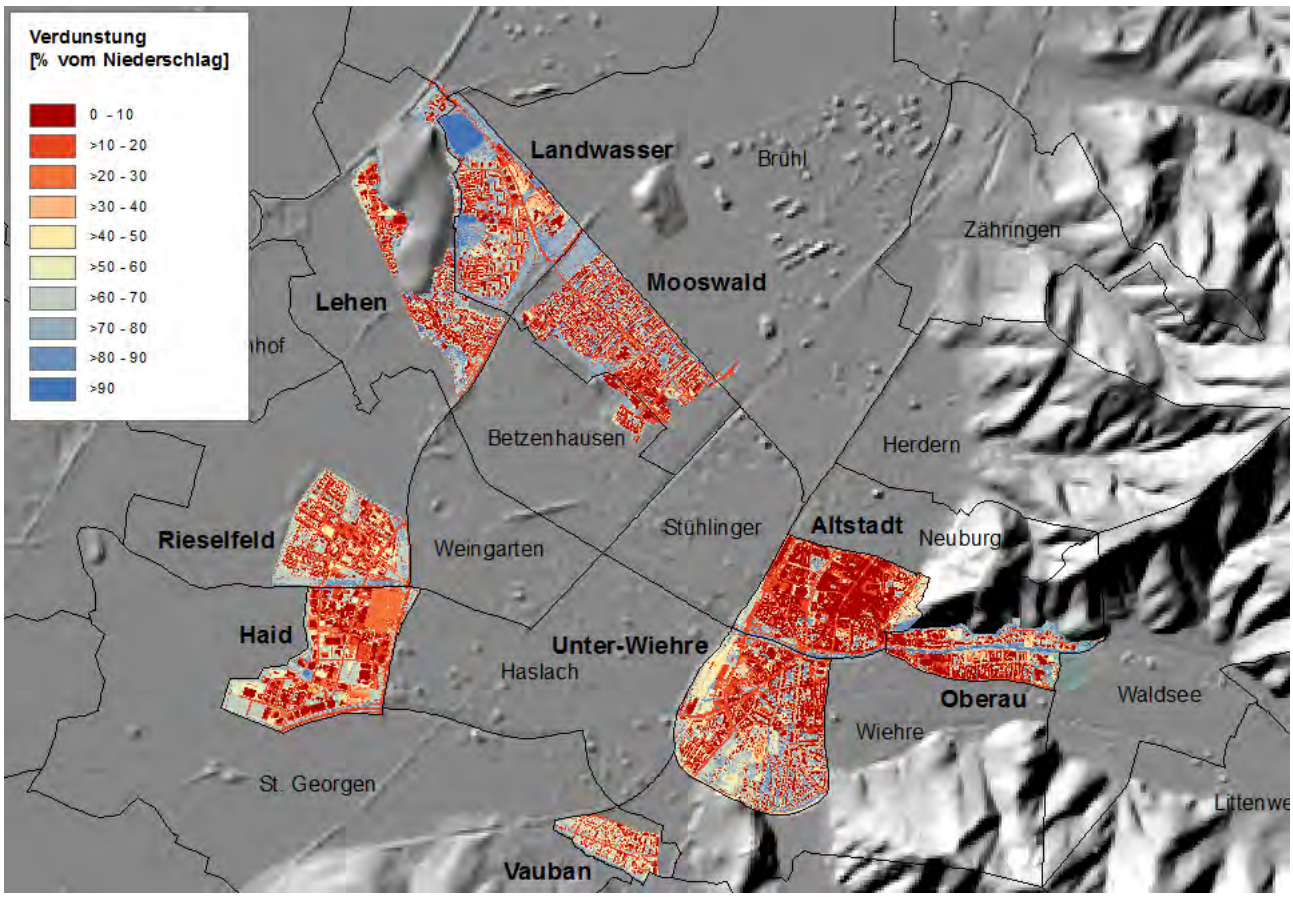


Abbildung 33: Räumlichen Dynamik des relativen Anteils der Verdunstung vom Niederschlag für die ausgewählten Stadtteile der Stadt Freiburg im Untersuchungszeitraum

Auf Basis des aktuellen Wasserhaushaltes und der Klimadaten kann dann auch der Kühlungseffekt für die Energiebilanz und das Stadtklima bestimmt werden (Quantifizierung des turbulenten Stroms latenter Wärme) werden. Gerade für die Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse kann so auch ihr Einfluss auf das Stadtklima bestimmt werden. Durch die erhöhte Wasserverfügbarkeit dieser Flächen wird erwartet, dass ein hoher Energieumsatz stattfindet und die aktuelle Verdunstung nahe der potentiellen Verdunstung liegt. Die Ergebnisse dieser Analyse wurde in Abbildung für drei Stadtteile in Freiburg dargestellt. Dazu wurde die Energiemenge berechnet, die an einer Oberfläche im Vergleich zu einer bewässerten Grasfläche (Grasreferenzverdunstung) für die Erwärmung der Luft zur Verfügung steht. Positive Werte bedeuten somit, dass diese Bereiche im Vergleich sich erwärmen, negative Werte, dass ein Abkühlungseffekt zu beobachten ist. Wie zu erwarten, sind die dicht besiedelten und versiegelten Flächen der Altstadt starke Wärmeinseln, wo sich die Luft besonders im Sommer zusätzlich erwärmen kann. Die Dreisam und die Bächle führen zu einer leichten Abkühlung, jedoch sind diese Flächen im Vergleich sehr klein und somit ist der Effekt maximal lokal zu spüren. Die Waldflächen sind im Vergleich auch etwas wärmer, da sie nicht bewässert werden und im Sommer sich auch etwas stärker erwärmen als die bewässerte Vergleichsfläche.

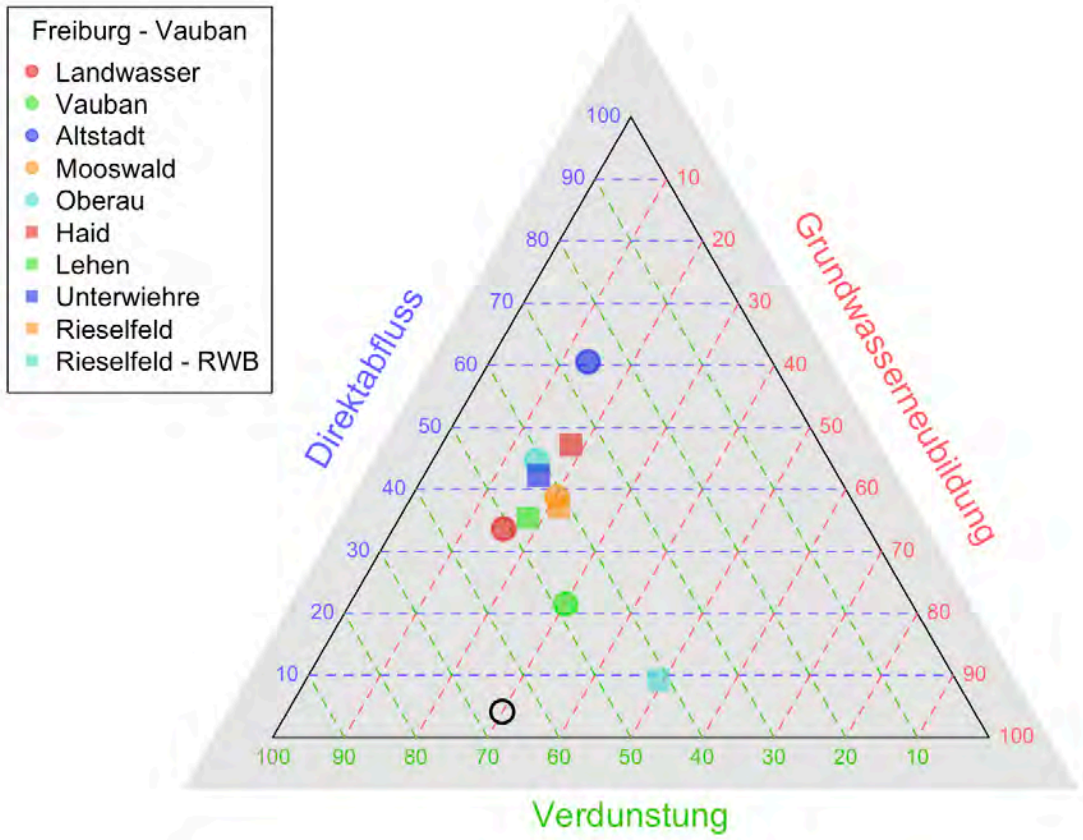


Abbildung 34: Vergleich der Anteile Direktabfluss, Verdunstung und Grundwasserneubildung der einzelnen Stadtteile mit dem Referenzzustand (offener Kreis) eines naturnahen Wasserhaushalts für Freiburg (Steinbrich et al., 2018) - Modellierung 2015/2016 // DWD-Klimastation Flugplatz // Niederschlag 1666 mm.

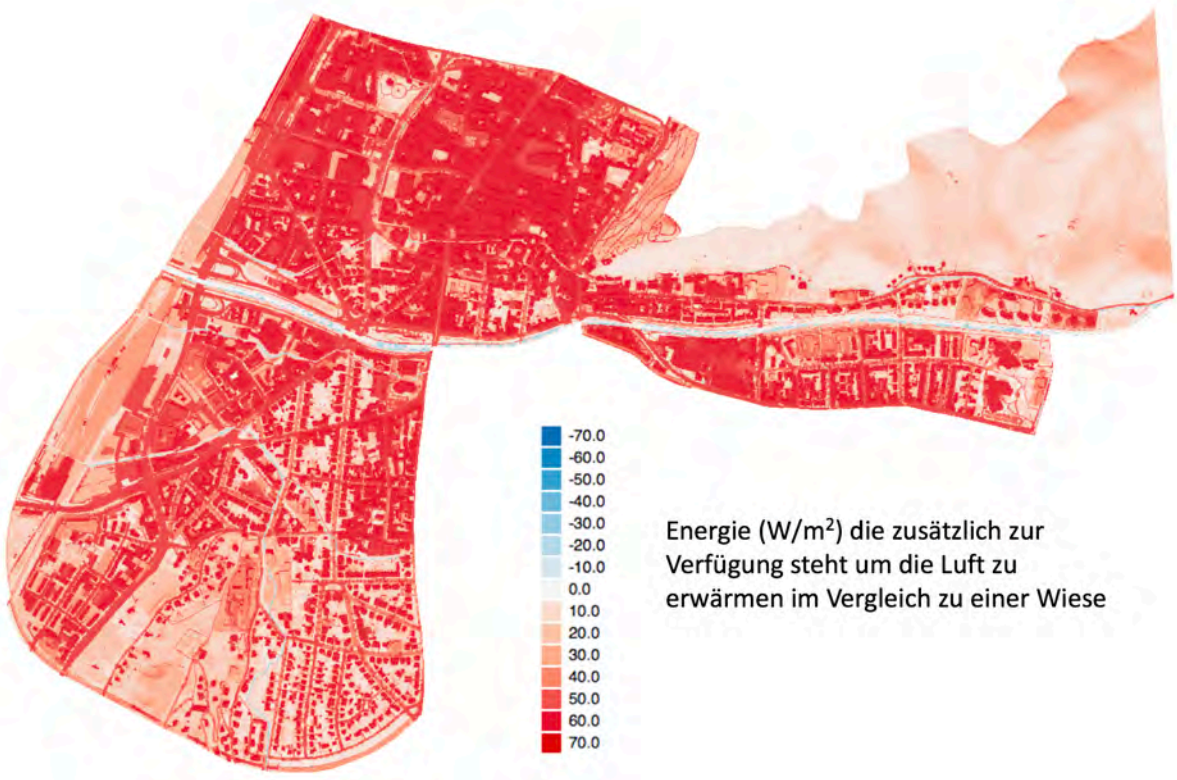


Abbildung 35: Energiemenge die durch fehlende Verdunstung im Vergleich zu einer bewässerten Grasfläche vorhanden ist um die Luft zu erwärmen für die Stadtteile Altstadt, Oberau und Unterwiehre.

5. Produkte & Veröffentlichungen

Allgemeine / übertragbare Ergebnisse

- Quantitative Orientierungsmöglichkeiten zur Bestimmung des naturnahen, städtischen Wasserhaushalts (Publikation des GIS-Modells als Tool für die Stadtplanung - http://www.hydrology.uni-freiburg.de/roger/)
- Bestimmung des Spektrums (Raum/Zeit) des urbanen Wasserhaushalts im Vergleich zum Spektrum des Wasserhaushaltes naturnaher Referenzflächen (Allgemein übertragbare Referenzwerte für die Stadtplanung)
- Veröffentlichung der für den Wasserhaushalt (GWN, ET, Q) relevanter urbaner Oberflächenklassen nötigen Bodenparameter (Referenzdatensatz für urbane Böden) (Schaffitel et al., in Vorbereitung ESSD)
- Veröffentlichung auf Messungen basierender kontinuierlicher Datensätze der Grundwasserneubildung und der aktuellen Verdunstung für relevante Oberflächenklassen in Siedlungsräumen (Referenzdatensatz als Grundlage für die Stadtplanung, die Planung von Stadtentwässerungen, das Grundwassermanagement, Wasserversorger)→ nicht übertragbar
- Auf Messdaten basierende Modellparameter zur Übertragung der Grundwasserneubildung und der aktuellen Verdunstung für relevante Oberflächenklassen in Siedlungsräumen in andere Regionen und Gemeinden (Referenzparameter als Grundlage für die Modellierung des urbanen Wasserhaushalts)
- Allgemeine Bewertung des Potentials spezieller zentraler und dezentraler Maßnahmen zur Bewirtschaftung niederschlagsbürtiger Abflüsse zur gezielten Beeinflussung der Energiebilanz und des Stadtklimas durch Kühlungseffekte (Grundlage für die Stadtplanung)

Spezifische Ergebnisse für Freiburg

- Quantifizierung des Wasserhaushaltes der Stadt Freiburg im Untersuchungszeitraum
- Bewertung des städtischen Wasserhaushalts (auch einzelner Stadtteile) im Hinblick auf das Leitbild des naturnahen Wasserhaushalts
- Quantifizierung der zeitlichen und räumlichen Dynamik der Grundwasserneubildung für Freiburg
- Quantifizierung der zeitlichen und räumlichen Dynamik der aktuellen Verdunstung für Freiburg
- Quantifizierung der Oberflächenabflussbildung (Modellierung) und des Gesamtabflusses (Messung) einzelner Stadteile
- Quantifizierung des Einflusses zentraler und dezentraler Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse auf die Grundwasserneubildung und die aktuelle Verdunstung
- Quantifizierung des Kühlungseffektes zentraler und dezentraler Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse für das Stadtklima
- Verbesserung/Validierung der in Freiburg eingesetzten Werkzeuge zur Quantifizierung des Mischwasseranfalls in Freiburg

6. Schlussbemerkungen

Auf der Basis der in den vergangenen drei Jahren erhobenen Daten, entwickelten Simulationswerkzeugen und-Verfahren sowie der durchgeführten Analysen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Kontinuierliche Betrachtungen zur raum-zeitlichen Variabilität der vertikalen Komponenten des Siedlungswasserhaushaltes (N, GWN, ET) stellen gerade vor dem Hintergrund des zunehmenden Druckes zur Expansion der sogenannten „Schwarmstädte“ und den damit einhergehenden Umwandlungen natürlicher/naturnaher Landschaften in Siedlungsräume, sowie der sich auch in Deutschland immer stärker wahrnehmbaren Veränderungen des aktuellen Klimas und seiner möglichen Einflüsse auf Siedlungsräume einen wichtigen Beitrag zum verbesserten Siedlungswassermanagement dar. Die anhand der im Projekt entwickelten Simulationswerkzeuge und der nun neu verfügbaren Betrachtungsskalen erlauben es die zeitliche Dynamik des Wasserhaushaltes sowohl für die natürlichen, die teilversiegelten und die versiegelten Flächen, sowie für die dezentralen und zentralen Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse gesondert zu betrachten und in Ihrer Wirkung auf den gesamten Wasserhaushalt des Siedlungsraumes zu bewerten. Dies erlaubt nun auch die genauere Analyse der langfristigen Dynamik der durch die verstärkte Infiltrationsleistung beeinflussten Wasserhaushaltskomponenten sowie deren Rückkopplung mit dem angeschlossenen Einzugsgebiet.
- Eine genaue und langfristige Bestimmung der zeitlichen Dynamik aller Wasserhaushaltskomponenten von zentralen und dezentralen Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse ist auch vor dem Hintergrund der verursachten Kosten Ziel führend: z. B. erfolgt die Evaluierung solcher Maßnahmen bezüglich Ihrer Effektivität oder der Kosten bisher meist ausschließlich über die Quantifizierung ihrer Auswirkungen auf die Gewässernetze während Spitzenabflüssen. Anhand des vorliegenden Modells lässt sich der Einfluss von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen auf den Wasserhaushalt innerhalb von Siedlungsräumen nun zusätzlich auch in seiner Abweichung vom Wasserhaushalt naturnaher Referenzflächen klar quantifizieren und kann somit für die Stadtplanung und die Erreichung der Ziele des Wasserhaushaltsgesetzes bewertet werden.
- Die Quantifizierung anfallender Oberflächenabflüsse in Trenn- und Mischkanalisationen unter Anwendung eines hochaufgelösten Wasserhaushaltsmodells, wie in diesem Projekt entwickelt, ist mit gängigen N-A-Modellen der Ingenieurs-Praxis vergleichbar, aber es bietet gleichzeitig noch weiter Vorteile zur Bestimmung der Wasserhaushaltkomponenten, was mit den N-A-Modellen normalerweise nicht möglich ist.
- Die Verfügbarkeit von Wasser an urbanen Oberflächen für die Verdunstung kann durch gezieltes Management als potentielles Mittel zur Abminderung der Erwärmung städtischer Innenräume durch den Klimawandel beitragen. Um dies zu erreichen ist jedoch die genaue Analyse des Wasserhaushaltes aller relevanten Oberflächentypen, sowie zentraler und dezentraler Maßnahmen zur Versickerung niederschlagsbürtiger Abflüsse notwendig. Die im Projekt entwickelten Werkzeuge stellen dazu einen ersten Schritt dar auf dem weitere Entwicklungen aufbauen können.

7. Literatur

Arnfield, A. J. (2003), Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island, International Journal of Climatology, 23(1), 1-26.

Asadian, Y., and M. Weiler (2009), A new approach in measuring rainfall interception by urban trees in coastal British Columbia, Water quality research journal of Canada, 44(1), 16.

Brena Naranjo, J. A., M. Weiler, and K. Stahl (2011), Sensitivity of a data-driven soil water balance model to estimate summer evapotranspiration along a forest chronosequence, Hydrol. Earth Syst. Sci., 15(11), 3461-3473.

Boogaard, F., Lucke, T. & Beecham, S., 2014. Effect of age of permeable pavements on their infiltration function. Clean - Soil, Air, Water, 42(2), pp.146–152.

Borgwardt, S., 2001. Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen (der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV) Kommentierung mit ausführlichen Hinweisen für die Planung und Ausführung versickerungsfähiger Bauweisen mit Betonpflas-ter, Fachvereinigung Betonprodukte für Straßen-, Landschafts- und Gartenbau.

Clark, S. E., and R. Pitt (2007), Influencing factors and a proposed evaluation methodology for predicting groundwater contamination potential from stormwater infiltration activities, Water Environment Research, 79(1), 29-36.

DWA-M, 2007. Merkblatt DWA-M 153, Handlungsempfehlung zum Umgang mit Regenwasser,

Fassman, E. A. (2006), Improving effectiveness and evaluation techniques of stormwater best management practices, Journal of Environmental Science and Health Part A, 41(7), 1247-1256.

FGSV, 2012. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus RStO12,

Fletcher, T. D., H. Andrieu, and P. Hamel (2013), Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art, Advances in water resources, 51(0), 261-279.

Flöter, O., 2006. Wasserhaushalt gepflasterter Strassen und Gehwege. Universität Hamburg.

Glugla, G., and K. Tiemer (1971), Ein verbessertes Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung, Wasserwirtschaft u. Wassertechnik, 21, 349-353.

Göbel, P., H. Stubbe, M. Weinert, J. Zimmermann, S. Fach, C. Dierkes, H. Kories, J. Messer, V. Mertsch, and W. F. Geiger (2004), Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions, Journal of Hydrology, 299(3), 267-283.

Göbel, P., J. Zimmermann, C. Klinger, H. Stubbe, and W. G. Coldewey (2008), Recommended urban storm water infiltration devices for different types of run-off under varying hydrogeological conditions, Journal of Soils and Sediments, 8(4), 231-238.

Grimmond, C., T. Oke, and D. Steyn (1986), Urban water balance: 1. A model for daily totals, Water Resources Research, 22(10), 1397-1403.

Grimmond, C., and T. R. Oke (2002), Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS), Journal of Applied Meteorology, 41(7), 792-810.

Grimmond, C., M. Blackett, M. Best, J. Barlow, J. Baik, S. Belcher, S. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, and A. Dandou (2010), The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49(6), 1268-1292.

Hamel, P., E. Daly, and T. D. Fletcher (2013), Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanisation on baseflow: A review, Journal of Hydrology in press.

Holman-Dodds, J. K., A. A. Bradley, and K. W. Potter (2003), Evaluation of hydrologic benefits of infiltration based urban storm water management1, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 39(1), 205-215.

Illgen, M. (2009), Das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und seine urbanhydrologische Quantifizierung.

Imran, H., S. Akib, and M. R. Karim (2013), Permeable pavement and stormwater management systems: a review, Environmental Technology (ahead-of-print), 1-8.

Järvi, L., C. S. B. Grimmond, and A. Christen (2011), The Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS): Evaluation in Los Angeles and Vancouver, Journal of Hydrology, 411(3-4), 219-237.

Lee, K., H. Kim, G. Pak, S. Jang, L. Kim, C. Yoo, Z. Yun, and J. Yoon (2012), Cost-effectiveness analysis of stormwater best management practices (BMPs) in urban watersheds, Desalination and Water Treatment, 19(1-3), 92-96.

Lucke, T., and S. Beecham (2011), Field investigation of clogging in a permeable pavement system, Building Research & Information, 39(6), 603-615.

Mitchell, V., H. Duncan, M. Inman, M. Rahilly, J. Stewart, A. Vieritz, P. Holt, A. Grant, T. Fletcher, and J. Coleman (2007), State of the art review of integrated urban water models, NOVATECH 2007.

Mitchell, V., H. Cleugh, C. Grimmond, and J. Xu (2008), Linking urban water balance and energy balance models to analyse urban design options, HYDROLOGICAL PROCESSES, 22(16), 2891-2900.

Monteith, J. (1965), Evaporation and environment, paper presented at Symp. Soc. Exp. Biol.

Petrucci, G., J.-F. d. r. Deroubaix, B. de Gouvello, J.-C. Deutsch, P. Bompard, and B. Tassin (2012), Rainwater harvesting to control stormwater runoff in suburban areas. An experimental case-study, Urban Water Journal, 9(1), 45-55.

Razzaghmanesh, M. & Beecham, S., 2018. A review of permeable pavement clogging investigations and recommended maintenance regimes. Water (Switzerland), 10(3).

Sansalone, J., X. Kuang, G. Ying, and V. Ranieri (2011), Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage, Water Research.

Schaffitel, A., Schuetz, T. & Weiler, M., 2017. Untersuchungen zum Infiltrationsverhalten verschiedener teilversiegelter urbaner Flächen. In Den Wandel messen - Wie gehen wir mit Nichtstationarität in der Hydrologie um? Beiträge zum Tag der Hydrologie am 23./24 März 2017 an der Universität Trier Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 38.17. pp. 75–87.

Shashua-Bar, L., and M. Hoffman (2000), Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees, Energy and Buildings, 31(3), 221-235.

Siebert, C., 2016. Untersuchungen zur Infiltrationsleistung von Pflasterflächen. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Skidmore, E., H. Jacobs, and W. Powers (1969), Potential evapotranspiration as influenced by wind, Agronomy Journal, 61(4), 543-546.

Sprenger, M., B. Gralher, and M. Weiler (2013), Identifying flow processes in catchments with porewater isotope profiles, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15(EGU2013-460-1), EGU General Assembly 2013.

Sprenger, M., Volkmann, T. H. M., Blume, T., and Weiler, M.: Estimating flow and transport parameters in the unsaturated zone with pore water stable isotopes, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 11, 11203-11245, doi:10.5194/hessd-11-11203-2014, 2014.

Starke, P., P. Gobel, and W. Coldewey (2011), Effects on evaporation rates from different water-permeable pavement designs, Water Science & Technology, 63(11), 2619-2627.

Steinbrich, A. et al., 2018. Ermittlung eines naturnahen Wasserhaushalts als Planungsziel für Siedlungen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 62(6), pp.28–37.

WaBoA, 2008. Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, Ministry of Environment Baden-Württemberg.

Weiler, M., and A. Steinbrich (2011), How can a non-calibrated, distributed rainfall-runoff model help balance between model uncertainty and model complexity?, paper presented at AGU Fall Meeting 2011.

WG (2008), Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Januar 2005 edited, Oktober.

Winston, R.J. et al., 2016. Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate – The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. Journal of Environmental Management, 169, pp.132–144. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479715304412.

Xu, C., and V. Singh (1998), Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods, HYDROLOGICAL PROCESSES, 12(3), 429-442.