



Europäische Union. Europäischer  
Fonds für regionale Entwicklung.  
Evropská unie. Evropský fond pro  
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.  
Interreg V A / 2014 – 2020

# Deponieworkshop Zittau-Liberec 2017

## Deponiebau - EU-Wasserrahmenrichtlinie - Stoffströme und Deponierückbau

09.-10. November 2017



# Skládkový workshop Žitava-Liberec 2017

Výstavba skládek - Směrnice EU, kterou  
se stanoví rámec pro činnost Společenství  
v oblasti vodní politiky -  
látkové proudy a odtěžování skládek

9.-10. listopadu 2017



# Modellierung der Sickerwasserrate unter rezenten und zukünftigen klimatischen Bedingungen für den urbanen Raum

## Modelování míry infiltrace za rezentních a budoucích klimatických podmínek pro zastavěné území

Sabine Meißner<sup>1</sup>; Volkmar Dunger<sup>2</sup>; Jörg Matschullat<sup>3</sup>

### Kurzfassung

Für das Stadtgebiet von Dresden wurden die Auswirkungen beobachteter und projizierter Klimaänderungen auf die Sickerwasserrate aus der ungesättigten Bodenzone analysiert und bewertet. Die Modellierung der zeitlichen und räumlichen Variabilität der Sickerwasserrate erfolgte flächendeckend und rasterbasiert unter Anwendung des Bodenwasserhaushaltsmodells BOWAM. Für die Modellierung wurden Beobachtungs- und Klimaprojektionsdaten des statistischen Regionalklimamodells WETTREG 2010 unter dem Emissionsszenario A1B verwendet.

Entsprechend der Modellierungsergebnisse kommt es im 21. Jahrhundert zu einer starken Abnahme der Sickerwasserrate und folglich zu einer Reduzierung der Grundwasserneubildung. Diese Abnahme beträgt in der Mitte des 21. Jahrhunderts 30 bis 50 % und am Ende bis zu 70 %. Ein solcher starker Rückgang der Sickerwasserrate kann auf eine höhere Verdunstung und sehr geringe Jahresniederschläge bei WETTREG 2010 vor allem gegen Ende des 21. Jahrhunderts zurückgeführt werden. Dies hat nicht nur negative Auswirkungen auf die Gewährleistung bestehender Nutzungsansprüche, sondern auch für grundwasserabhängige Ökosysteme und die Bebauung sowie die Infrastruktur einer Stadt.

### Abstrakt

Pro území města Drážďan byly analyzovány a vyhodnoceny vlivy sledovaných a projektovaných klimatických změn na míru infiltrace z nenasycené půdní zóny. Modelování časové a prostorové variability infiltrace bylo provedeno plošně na bázi rastru za použití modelu režimu půdní vody BOWAM. Pro modelování byly použity údaje ze sledování a projekce klimatu statistického modelu regionálního klimatu WETTREG 2010 a emisního scénáře A1B.

V souladu s výsledky modelování dojde v 21. století k silnému poklesu infiltrace a v důsledku toho ke snížení akumulace podzemní vody. V polovině 21. století bude tento pokles činit 30 až 50 %, na konci století pak až 70 %. Příčinou tohoto silného poklesu akumulace podzemní vody je vysoký výpar a velmi nízké roční srážkové úhrny modelované modelem WETTREG 2010 především v období kolem konce 21. století. Tato skutečnost negativně ovlivní nejen zajištění stávajícího využití, ale i ekosystémy, závislé na podzemní vodě a zástavbu a infrastrukturu měst.

<sup>1</sup>SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH Freiberg, Halsbrücker Str. 34, D-09599 Freiberg;

E-Mail: [sabine.meissner@saxonia-freiberg.de](mailto:sabine.meissner@saxonia-freiberg.de)

<sup>2</sup>TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Gustav-Zeuner-Straße 12, D-09596 Freiberg;

Tel.: ++49 / 37 31 / 39 32 27, E-Mail: [dungerv@geo.tu-freiberg.de](mailto:dungerv@geo.tu-freiberg.de)

<sup>3</sup>TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, Brennhausgasse 14, D-09599 Freiberg; E-Mail: [joerg.matschullat@ioez.tu-freiberg.de](mailto:joerg.matschullat@ioez.tu-freiberg.de)

# 1 Einleitung

Für urbane Gebiete – wie z. B. der Landeshauptstadt Dresden ist die Bestimmung der Sickerwasser- und schließlich der Grundwasserneubildung eine besondere Herausforderung. Die unterschiedlichen Nutzungsansprüche und die fortschreitende Flächeninanspruchnahme führen dazu, dass der Anteil an befestigten und versiegelten Flächen stetig zunimmt. Aufgrund der klimatologischen sowie morphologischen Besonderheiten (Lage in der Elbtalweitung) und der Überlagerung verschiedener Nutzungsansprüche ist die Situation im Dresdner Innenstadtbereich sehr komplex. Angaben über die Sickerwasserrate und über die Menge an neu gebildetem Grundwasser sind wichtig u. a. für die Abschätzung, inwiefern die vorhandenen Nutzungen auch in Zukunft unter dem Aspekt des Klimawandels noch gewährleistet werden können.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Der urbane Wasserhaushalt

Der urbane Wasserhaushalt weist gegenüber dem natürlichen Wasserhaushalt einige Besonderheiten auf. Dazu zählen z. B. die Versiegelung von Oberflächen, der Anschluss versiegelter Flächen an das Kanalnetz, die Verluste im Wasserversorgungsnetz, mögliche Ex- und Infiltrationen aus dem oder in das Kanalnetz, aber auch klimatische Besonderheiten wie der städtische Wärmeinseleffekt. Die Urbanisierung führt zu einer starken Veränderung der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten eines Gebietes. Der urban veränderte Wasserhaushalt ist in Abbildung 1 in einer vereinfachten schematischen Darstellung veranschaulicht.

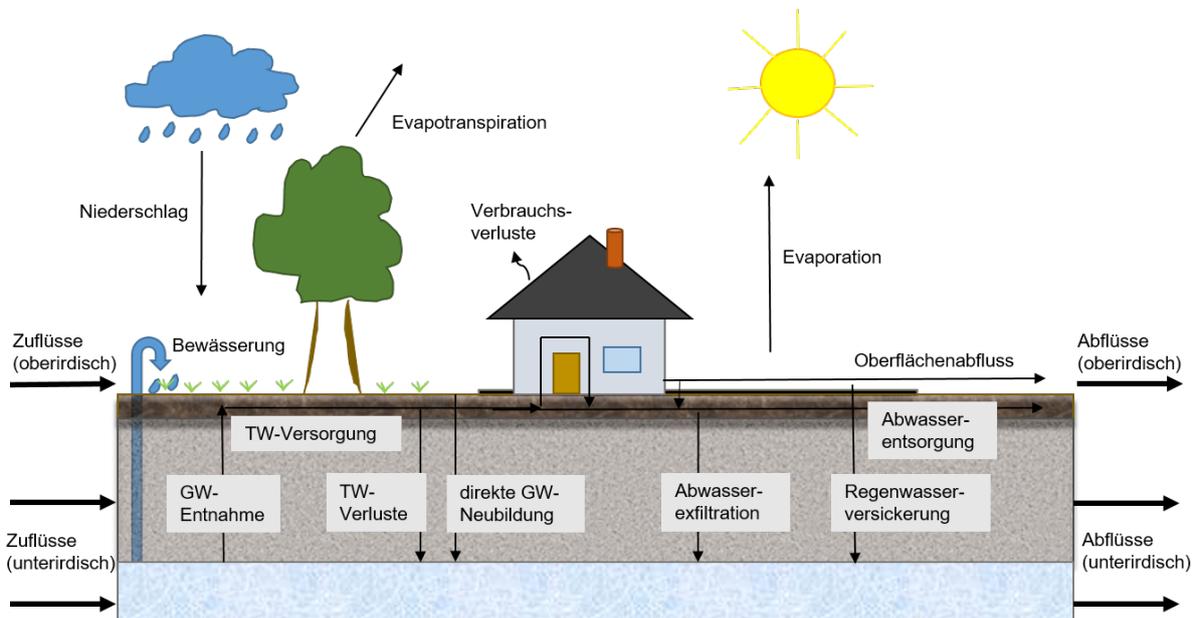


Abbildung 1: Schematische Darstellung des urbanen Wasserhaushaltes nach [1] und [2] verändert.

Für urban geprägte Gebiete ist die Wasserhaushaltsgleichung viel komplexer, da neben den natürlichen Komponenten weitere anthropogen bedingte Faktoren zu berücksichtigen sind. Folglich stellt sich die urbane Wasserhaushaltsgleichung in Anlehnung an [2] wie folgt dar:

$$N + RO_i + RU_i + Z_o + Z_u + B + V_{AW} + V_{TW} = ETR + RO + RU + A_o + A_u + GWE \quad (6)$$

Mit:  $RO_i, RU_i$  = natürliche Gebietszuflüsse (oberirdisch, unterirdisch);  $Z_o, Z_u$  = künstliche Zuleitungen (oberirdisch, unterirdisch);  $B$  = Bewässerung;  $V_{AW}, V_{TW}$  = etzverluste (Abwasser, Trinkwasser);  $RO, RU$  = natürliche Gebietsabflüsse (oberirdisch, unterirdisch);

$A_o$ ,  $A_u$  = künstliche Ableitungen (oberirdisch, unterirdisch),  $GWE$  = Grundwasserentnahme. Alle einzelnen Größen werden als Höhen in [mm] angegeben.

Die Bestimmung der einzelnen Wasserhaushaltsgrößen ist im urbanen Raum schwierig, da diese nur schwer zu erfassen und zu quantifizieren sind. Im urbanen Raum existiert gemäß [3] ein Netzwerk aus natürlichen sowie künstlichen Pfaden und Quellen. Auf lokaler Ebene müssen all diese Quellen und Senken der Neubildung identifiziert werden. Dafür sind jedoch riesige Datenmengen erforderlich. Für Untersuchungen auf regionaler Ebene ist es nicht wichtig jede einzelne Quelle zu identifizieren, sondern es ist wichtig zu zeigen, dass diese Quellen, wie z. B. Trinkwassernetzverluste existieren und folglich die urbane Grundwasser-neubildung beeinflussen [4].

## 2.2 Ansätze zur Bestimmung der Sickerwasserrate

Unter dem Sickerwasser wird gemäß [5] unterirdisches Wasser verstanden, das sich durch die Schwerkraft abwärts bewegt. Da die Versickerung innerhalb der ungesättigten Bodenzone stattfindet, handelt es sich folglich nicht um Grundwasser. Demzufolge wird unter der Sickerwasserrate die Sickerwassermenge verstanden, die an der Untergrenze der durchwurzelten Bodenzone in den Sickerwasserraum eindringt. Dabei kann maximal nur so viel Wasser die Grundwasseroberfläche erreichen und zur Grundwasserneubildung beitragen, wieviel auch vorher versickert ist. Die Versickerung stellt die Ausgangsgröße für die Grundwasserneubildung dar.

Nach [6] sind Angaben über die Sickerwasserrate nicht nur wichtig für planungsrelevante Aspekte wie der Grundwasserneubildung, sondern auch für die Abschätzung des Beregnungsbedarfs für die Landwirtschaft und der Austragsgefährdung sowie Mobilisation von Schadstoffen im Bereich des Boden- und Gewässerschutzes.

Für die Ermittlung der Sickerwasserrate aus der ungesättigten Bodenzone gibt es zahlreiche Ansätze und kombinierte Verfahren. Dazu zählen z. B. auch die Folgenden:

- Messung,
- Empirische Schätzverfahren bzw. Hydro-Pedotransferfunktionen,
- Modellierung.

Die genaueste Bestimmung der Sickerwasserrate erfolgt durch die direkte Messung mit Hilfe sogenannter Lysimetermonolithe. Diese Messungen sind nicht nur sehr zeit-, sondern auch sehr kostenintensiv und liefern nur punktuelle Informationen, sodass eine Übertragung in die Fläche mit vielen Unsicherheiten verbunden ist. Die gewonnenen Lysimeterdaten stellen für viele Berechnungsverfahren wie z. B. DÖRHÖFER und JOSOPAIT [7], SCHROEDER und WYRWICH [8] wichtige Vergleichs- und Kalibrierdaten dar. Empirische Verfahren bzw. Regressionsgleichungen ermöglichen eine indirekte Ermittlung langjähriger Mittelwerte der Wasserhaushaltskomponenten. Einfache empirische Verfahren sind z. B. die Verfahren nach BAGROV/GLUGLA [9]; [10], RENGER & STREBEL [11]; [12], DÖRHÖFER und JOSOPAIT [7], SCHROEDER und WYRWICH [8] und das TU-BGR-Verfahren [13].

Da die zu beschreibenden Prozesse nicht abgebildet werden können, sind empirische Modelle bzw. Regressionsgleichungen nur eingeschränkt anwendbar und können nicht ohne weiteres auf abweichende Rahmenbedingungen übertragen werden. Bei diesen Modellen handelt es sich um sogenannte „Black-Box-Modelle“ [14]. Im Gegensatz zu den Abfluss- und Regressionsverfahren, die Aussagen zu langjährigen Mittelwerten der Grundwasserneubildung bzw. Sickerwasserrate anhand langjähriger Messreihen liefern, erlauben Wasserhaushaltsmodelle durch ihre prozessorientierten Ansätze und instationären Berechnungsmöglichkeiten Aussagen zu speziellen Aufgabestellungen [15], sodass auch die Auswirkungen von Klimaänderungen

berücksichtigt werden können. Prozess-beschreibende deterministische Modelle umfassen physikalisch begründete und konzeptionelle Modelle, die auf den Grundsätzen der Physik basieren und als „White-Box-Modelle“ bezeichnet werden. Konzeptionelle Modelle basieren ebenfalls auf physikalischen Gesetzen, bilden diese jedoch in einer vereinfachten Form ab. Dazu zählen z. B. die Speichermodelle, die die Bodenwasserbewegung in einem vereinfachten linearen Speichermodell abbilden. Konzeptmodelle sind z. B. AKWA-M [16], SLOWCOMP [17], WaSiM-ETH [18], ArcEGMO [19] sowie das Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAM [20] und [21], das bereits in zahlreichen Projekten [21] verwendet wurde, sodass Erfahrungen hinsichtlich der Quantifizierung klimatisch bedingter Veränderungen des zukünftigen Wasserhaushaltes vorliegen.

### 2.3 Das Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAM

Bereits beobachtete und projizierte Veränderungen im Wasserhaushalt und deren spezifische Auswirkungen wurden unter Nutzung des Bodenwasserhaushaltes BOWAM untersucht. Das Modell BOWAM ein quasi-zweidimensionales konzeptionelles Bodenwasserhaushaltsmodell und dient zur Simulation des Wasserhaushaltes in der wasserungesättigten Bodenzone. Es gleicht dem Modell BOWAHALD [21] zur Simulation des Wasserhaushaltes von Oberflächensicherungssystemen von Halden und Deponien. Mit dem Modell BOWAM ist es möglich, kurz- bzw. langjährige Mittelwerte der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten, wie Evapotranspiration, Interzeption, Oberflächen- sowie Zwischenabflusses, Speicheränderungen, Schneeakkumulation sowie -schmelze, Bodenfeuchteänderungen und Tiefenversickerung durch das Bodenprofil zu bestimmen. Demzufolge ist das Modell BOWAM für komplexe Untersuchungen des Gebiets-wasserhaushaltes geeignet.

Die wichtigsten hydrologischen Prozesse und deren zugrundeliegenden Modellansätze, die mit dem Modell BOWAM simuliert werden können, zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Modellstruktur des Modells BOWAM [20].

<b>Hydrologischer Prozess</b>	<b>Ansätze</b>
Niederschlag	Gebiets- und saisonal variable Niederschlagskorrektur, Niederschlagssynthesierung (WMO, Richter)
Interzeption	Interzeptionsspeicher-Modell für Grünland, Sträucher, landwirtschaftliche Kulturen und Wald
Schneeakkumulation	Bei mittleren Temperaturen unter 0 °C
Schneesmelze	Tagesgradverfahren und Wasserabgabe aus der Schneedecke
Oberflächenabfluss/ Infiltration	US SCS Curve-Number-Verfahren
Evaporation und Transpiration	Potentielle Evaporation: Empirische Formeln von PENMAN, TURC, IVANOV und HAUDE, unter Verwendung von expositionsabhängigen Hangneigungskorrekturen  Reale Evaporation: Reduktionsfunktionen nach KOITZSCH in Abhängigkeit von Bodenfeuchte, Wurzelverteilung und Pflanzenbedeckung
Hypodermischer Abfluss	DARCY-Gesetz
Perkolation	DARCY-Gesetz für gesättigte Fließbedingungen (Piston-Flow)

Die zeitliche Diskretisierung wird durch die zeitliche Auflösung der meteorologischen Ein-

gangsdaten bestimmt. Es können tägliche oder monatliche Messwerte bzw. langjährige Monatsmittelwerte verwendet werden. Vor der Modellanwendung wird das Untersuchungsgebiet horizontal in Hydrotope, d.h. in Flächen mit sehr ähnlichen hydrologischen Eigenschaften, unterteilt. Oder die Modellierung erfolgt rasterbasiert mit einer bestimmten räumlichen Auflösung. Vertikal erfolgt die Unterteilung entsprechend der geologischen bzw. bodenphysikalischen Gegebenheiten in maximal zehn verschiedene Schichten, den sogenannten Horizonten. Diese Horizonte können anhand ihrer pedologischen Eigenschaften weiter in Teilschichten unterteilt werden.

Die Tabelle 2 vermittelt einen Überblick über die wesentlichen Eingangsgrößen des Modells BOWAM.

Tabelle 2: Wesentliche Eingangsdaten und -parameter des Modells BOWAM [20], [21].

<b>Eingangsdaten</b>	<b>Eingangsparameter</b>
Meteorologische Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lufttemperatur</li> <li>• Luftfeuchtigkeit</li> <li>• Globalstrahlung* bzw. Sonnenscheindauer*</li> <li>• Windgeschwindigkeit*</li> <li>• Niederschlagsmenge, ggf. Niederschlagsverteilung **</li> </ul>
Geographie und Morphologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geographische Breite und mittlere Höhe ü. NN</li> <li>• dominante Exposition</li> <li>• Hangneigung</li> <li>• Mittlere Hanglänge bzw. mittlere Länge bis zur hydraulischen Entlastung</li> </ul>
Pedologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (kf-Wert)</li> <li>• Sättigungswassergehalt**</li> <li>• Feldkapazität**</li> <li>• Welkepunkt**</li> <li>• Kapillarität**</li> <li>• Schichtenabfolge (vertikaler Aufbau)</li> </ul>
Landnutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Landwirtschaftliche Nutzung mit Informationen (Winter- und Sommergetreide, Hackfrüchte, Mais) bzw. ohne nähere Informationen</li> <li>• Wald: Nadel-, Laub- und Mischwald bzw. ohne nähere Informationen</li> <li>• Grünland: Dauergrünland, Wiese, Weide bzw. ohne nähere Informationen</li> <li>• unbewachsene Flächen</li> <li>• teil- bzw. vollversiegelte Flächen (Ortschaft: Wohn-, Industrie- bzw. Gewerbegebiet)</li> <li>• Gewässer</li> </ul>
Bewuchs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetationsbedeckungsgrad** bzw. Versiegelungsgrad nur bei Ortschaft</li> <li>• Bewuchssüppigkeit**</li> <li>• Durchwurzelungstiefe** und Wurzelverteilung**</li> <li>• Tiefe der Evaporationswirkung**</li> <li>• Waldaufbau** (einstöckig, mehrstöckig)</li> <li>• Waldschadensstufe**</li> </ul>

\* Eingabe ist nicht zwingend notwendig. \*\* Es werden Defaultwerte angeboten.

Weitere und ausführliche Informationen über das Modell BOWAM können der Programmdokumentation von [20] entnommen werden.

## 2.4 Charakteristik des Untersuchungsgebietes

### 2.4.1 Geographische Lage

Die Modellierung der Sickerwasserrate erfolgte zum einem für das gesamte Stadtgebiet der Landeshauptstadt Dresden (Abbildung 2) mit einer Fläche von ca. 330 km<sup>2</sup> und zum anderen für den oberen, quartären Grundwasserleiter mit einer Fläche von ca. 130 km<sup>2</sup>, der auch als „quartärer Elbtalaquifer“ bezeichnet wird. Die Landeshauptstadt Dresden ist beidseitig der Elbe in der Elbtalweitung gelegen. Innerhalb dieser länglich-ovalen Elbtalzone befindet sich der quartäre Elbtalaquifer. Dieser erstreckt sich von Südosten nach Nordosten über die Stadtgrenzen von Dresden hinaus.

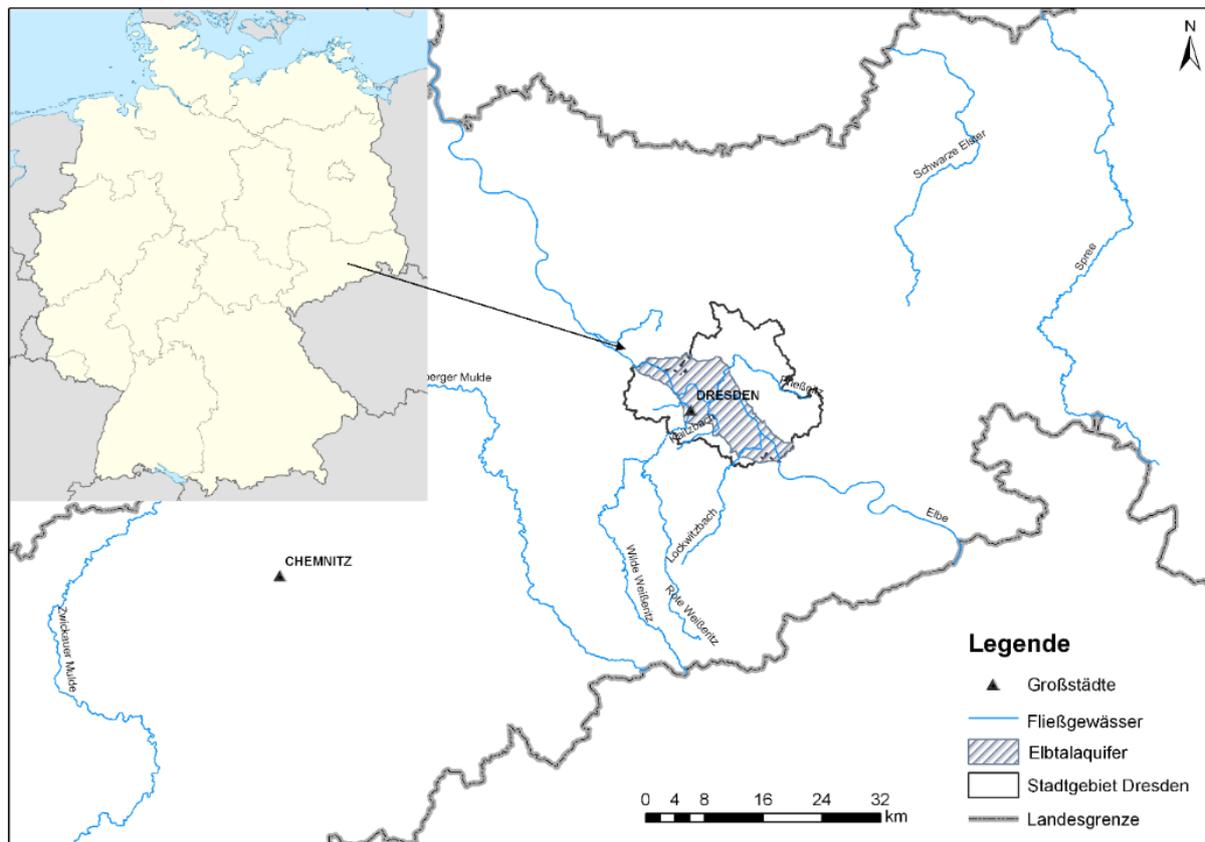


Abbildung 2: Lage des Stadtgebietes der Landeshauptstadt Dresden und des quartären Elbtalaquifers (schraffiert) im Zentrum des Freistaates Sachsen.

### 2.4.2 Morphologie

Der teilweise sehr breite sowie ebene Elbtalboden erstreckt sich zwischen Pirna und Meißen in Höhenlagen von 100 m ü. NN bis 150 m ü. NN. Die Randhöhen überragen den Elbtalboden um 150 m bis 200 m und erreichen Höhen von bis zu 350 m ü. NN. Zahlreiche einmündende und tiefeingeschnittene Seitentäler gliedern die Randhöhen und strukturieren das Gelände. Das rechte Elbufer wird von steilabfallenden Seitentälern geprägt, während die linkselbischen Elbhänge stetig zum Talboden hinabfallen und die Täler der Weißeritz und des Lockwitzbaches am tiefsten eingeschnitten sind.

### 2.4.3 Geologie

Im Norden und Osten des Dresdner Stadtgebietes bilden die Gesteine des Lausitzer Granodioritmassivs das Grundgebirge, die im Süden von dem Dohnaer Biotitgranodiorit und von

den Schiefen und Grauwacken des Elbtalschiefergebirges begrenzt werden. Das Meißner Granodioritmassiv mit Syenodioriten und Granitoiden prägen den tiefen Untergrund im westlichen Teil des Stadtgebietes. Das Grundgebirge der weitgehend ebenen und zum Teil sehr breiten Elbtalzone bilden alte Schiefergebirge und unterschiedlich alte magmatische Gesteinskomplexe. Pleistozäne Lockergesteinsablagerungen wie Kiese, Sande und Schluffe verschiedenen Alters bilden den quartären Grundwasserleiter und werden von bis zu 2 m bis 4 m mächtigen Lösslehmschichten holozänen Ursprungs überdeckt. Der südliche Teil des Dresdner Stadtgebietes wird von Ausstrichbereichen der meist mit Lösslehm bedeckten kretazischen Ablagerungen gekennzeichnet.

#### **2.4.4 Hydrogeologie und Hydrologie**

Die Stadt Dresden verfügt über reiche Grundwasservorräte, deren Verteilung besonders durch die vorhandenen geologischen und tektonischen Gegebenheiten im Untergrund beeinflusst wird. Neben dem oberen quartären Grundwasserleiter existiert noch ein weiterer tiefer gelegener Grundwasserleiter. Beide Grundwasserleiter sind über weite Bereiche hydraulisch voneinander getrennt und werden auf unterschiedliche Art und Weise genutzt. Für die öffentliche Trinkwasserversorgung wird nur das Grundwasser des oberen Grundwasserleiters gefördert, wohingegen das Grundwasser beider Grundwasserleiter der Eigenversorgung dient. Der Abstand zwischen der Geländeoberkante und der Grundwasseroberfläche wird als Grundwasserflurabstand bezeichnet. Der Bereich der Elbaue wird von Grundwasserflurabständen von 2 m bis 5 m bzw. 5 m bis 10 m gekennzeichnet. In unmittelbarer Nähe des Elbeufers und im Bereich der alten Elbarme herrschen grundwassernahe Zustände, das heißt, es treten Grundwasserflurabstände von weniger als zwei Metern auf. Die Randbereiche beiderseits des quartären Elbtalaquifers weisen deutlich größere Grundwasserflurabstände auf. Hier können die Abstände zwischen der Geländeoberkante und der Grundwasseroberfläche mehr als 60 m betragen.

Die Stadt Dresden ist nicht nur reich an Grundwasser, sondern auch an Oberflächengewässer wie Fließ- und stehenden Gewässern. In Dresden gibt es neben der Bundeswasserstraße Elbe und den großen Wasserläufen erster Ordnung wie der Vereinigten Weißeritz, dem Lockwitzbach mit dem Niedersiedlitzer Flutgraben und der Großen Röder noch über 550 kleinere Fließgewässer und über 280 stehende Gewässer. Zu den wichtigsten Fließgewässern zweiter Ordnung gehören z.B. die Prießnitz, der Kaitzbach, der Gerberbach und der Zschornerbach.

#### **2.4.5 Boden**

Die Bodenlandschaften der Dresdener Elbtalweitung werden durch die Vielfalt geologischer und geomorphologischer Verhältnisse geprägt. Durch bodenbildende Faktoren wie die Art der Ausgangsgesteine, Relief, Morphologie und die anthropogene Beeinflussung ist ein Mosaik aus verschiedenen Böden entstanden. Ausläufer des Mittelsächsischen sowie Mulde-Lösshügellandes reichen bis weit an die nordwestlichen und südlichen Grenzen der Landeshauptstadt heran, sodass linkselbisch und im Hochland von Schönfeld-Weißig vor allem Böden aus Löss, Lössderivaten und Sandlöss vorkommen, die an einigen Stellen von Tälern und Hängen periglazialer Bodenbildung und von abgelagertem Erosionsmaterial durchbrochen werden. Das Elbtal wird von lehmig-sandigen Auenböden dominiert. Im Norden des Stadtgebietes und entlang der Lausitzer Überschiebung sind sandige glaziale Substrate und flachgründige sowie schuttreiche Verwitterungsböden anzutreffen. Fast 45 Prozent der Gesamtfläche des Dresdener Stadtgebietes wurden bodengenetisch anthropogen überprägt, sodass sich anthropogene Böden die sogenannten Stadtböden gebildet haben. Diese Böden werden weiterhin stark verändert, sodass ihr Anteil stetig zunimmt. Die Stadtböden werden bodengentisch und nutzungsgeschichtlich in Technosole, Rohböden Regosole, Hortisole, Nekrosole, und in einige Mischtypen unterteilt, deren Substrate anthropogenen und/oder natürlichen Ursprungs sein

können. Im Stadtgebiet von Dresden sind vor allem Lockersyrosem-Regosole bzw. die reinen Regosole weit verbreitet. Außerdem wird das Stadtzentrum von 3 m bis 5 m mächtigen Aufschüttungen anthropogenen Ursprungs gekennzeichnet, dem sogenannten Trümmerschutt. Gartenböden, die sogenannten Hortisole, treten vor allem im Bereich der Grünflächen (Parks und Kleingartenanlagen) auf. Die Schottertrassen der Bahnkörper sind reine Syrosemi. Naturnahe Bodengesellschaften sind entlang der Elbe und teilweise im Großen Garten verbreitet, hierzu zählen insbesondere die Braunerden, Lessivés, Podsole, Stauwasser- und Grundwasserböden unterschiedlicher Bodenart. Vereinzelt treten auch Schwarzerden aus Schluff, Regosole aus Sand, Moore und sehr viele Mischtypen auf.

## 2.4.6 Landnutzung

Das Dresdner Stadtbild wird von landwirtschaftlichen Nutz- und Waldflächen dominiert (Abbildung 3), gefolgt von den Flächen der Wohnbebauung und gemischten Bauflächen sowie der Verkehrsanlagen und -flächen im innerstädtischen Bereich. Im Stadtkern treten vor allem Industrie-, Gewerbe- und Sonderflächen auf. Grünflächen und Erholungsanlagen sowie Kleingärten lockern den von starker Versiegelung geprägten Innenstadtbereich auf. Der Anteil versiegelter Flächen nimmt seit 1999 stetig zu. Die Äußere und Innere Altstadt sind dabei die Stadtteile mit den höchsten mittleren Versiegelungsgraden (ohne Verkehrsflächen). Vereinzelt sind Kleingehölze und Gebüsche vorzufinden. Grünlandflächen kennzeichnen ebenfalls das Stadtbild von Dresden. Der Grünflächenanteil hat durch Entsiegelungsmaßnahmen in den letzten Jahren deutlich zugenommen.

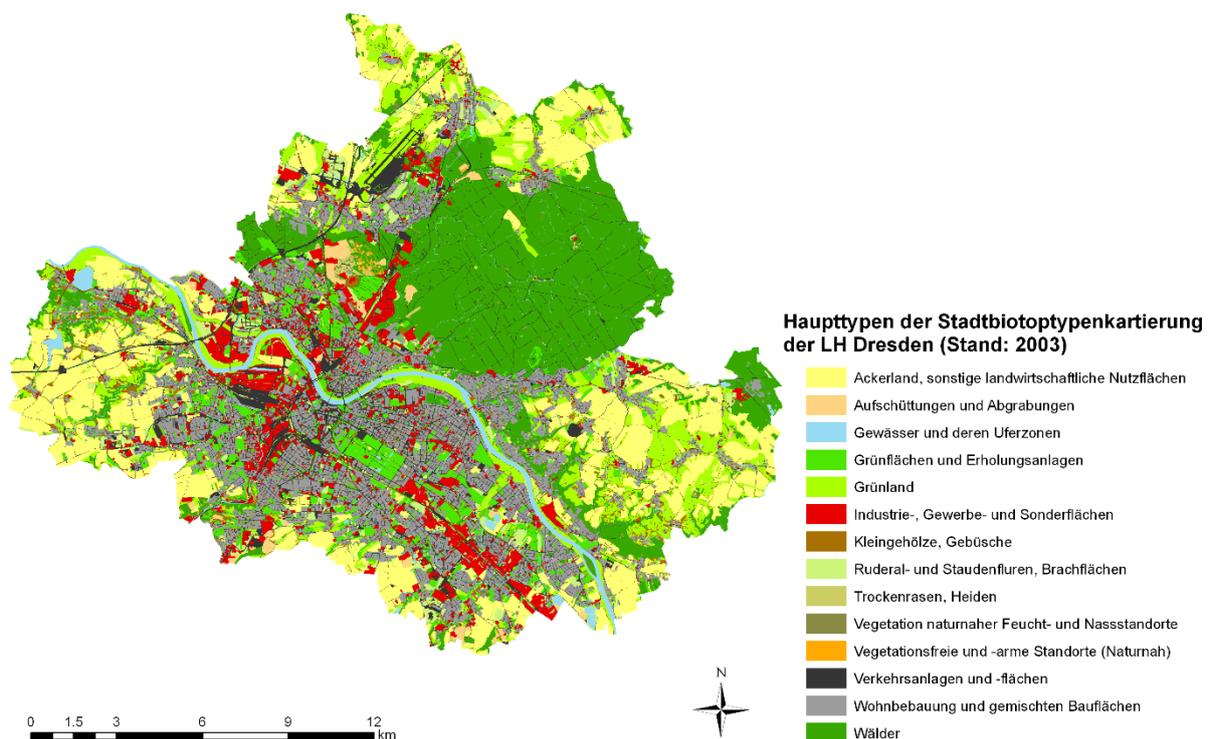


Abbildung 3: Karte mit den Stadtbioptypen der Landeshauptstadt Dresden.

## 2.4.7 Klima

Der Raum Dresden gehört gemäß der Klimaklassifikation von [22] großklimatisch zum Klimatyp Cfb, d.h. warmgemäßigtes Regenklima mit warmem Sommer. Das Klima der Stadt Dresden wird durch die Lage innerhalb der Elbtalweitung, die umgebenden Randhöhen sowie die

meist unbebauten Elbhänge bestimmt. Der Dresdener Raum zählt aufgrund der thermischen Begünstigung des Elbtalles zu den wärmsten Gegenden der Neuen Bundesländer. Zusätzlich wird das Klima im Bereich der Elbtalzone durch Bebauung, Versiegelung und Emissionen im großem Maße beeinflusst, was sich vor allem in den klimatologischen Kenngrößen Niederschlag und Temperatur widerspiegelt. Abbildung 4 zeigt das Klimadiagramm für die Stationen Dresden-Klotzsche/Wahnsdorf (Hochlage) für die Klimanormalperiode (KLINO) 1961–1990. Beim Niederschlag treten auf engstem Raum sehr große Unterschiede auf. Während im Elbtal am Stadtrand im langjährigen Mittel 646 mm Niederschlag fallen (Station Dresden–Hosterwitz, 1961–1990), betragen die mittleren Jahressummen des unkorrigierten Niederschlages auf der Hochfläche 668 mm (Station Dresden-Klotzsche/Wahnsdorf, 1961–1990). Die Herbst- und Wintermonate sind die Monate mit den geringsten Niederschlägen. Der meiste Niederschlag ist für die Station Dresden-Klotzsche/Wahnsdorf (1961–1990) in den Sommermonaten Juni und August zu verzeichnen. Das Jahresmittel der Lufttemperatur beträgt für denselben Zeitraum auf der Hochfläche (Station Dresden-Klotzsche/Wahnsdorf) 8,9 °C. Am Talboden, in Stadtrandnähe (Station Dresden-Pillnitz) ist das Jahresmittel der Lufttemperatur geringfügig höher als auf den Hochlagen am Stadtrand. Im Stadtkern von Dresden wird im Mittel eine um 0,7 K höhere Jahresmitteltemperatur gemessen als am Stadtrand am Talboden. Der wärmste Monat ist im Mittel der Juli, der kälteste der Januar (Station Dresden-Klotzsche/Wahnsdorf, (1961–1990)).

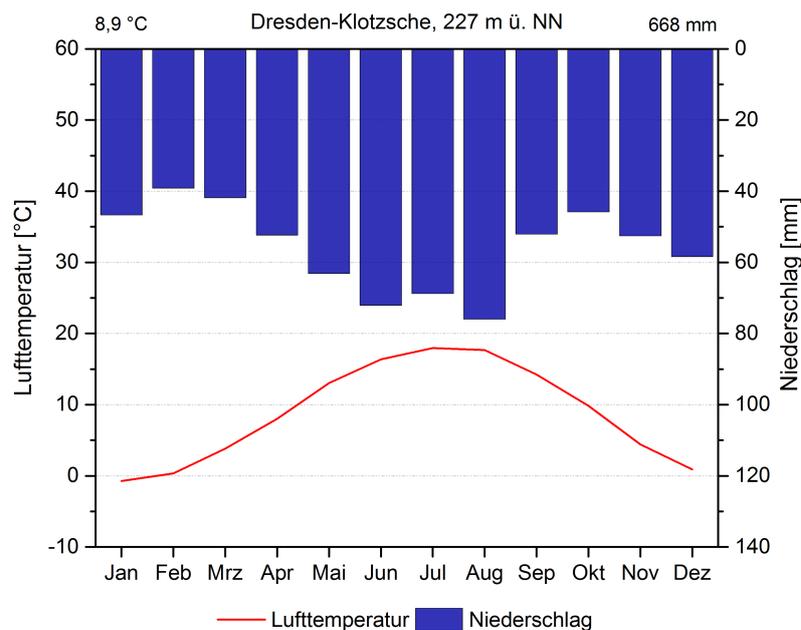


Abbildung 4: Klimadiagramm der Station Dresden-Klotzsche/Wahnsdorf für die Klimanormalperiode 1961–1990.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Meteorologische Daten

##### 3.1.1 Beobachtungsdaten

Für die Modellierung des Referenzzeitraumes (1961–1990) und des Ist-Zustandes (1991–2010) wurden Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes von 12 Klima- und 22 Niederschlagsstationen ausgewählt (Abbildung 5). Folgende meteorologischen Parameter wurden in

täglicher Auflösung für die Modellierung unter rezenten klimatischen Bedingungen verwendet:

- tägliche Niederschlagssummen (korrigiert) [mm/d],
- Tagesmittel der Lufttemperatur [°C],
- Tagesmittel der Luftfeuchtigkeit [%],
- absolute Sonnenscheindauer [h],
- Tagesmittel der Windgeschwindigkeit [m/s].

### 3.1.2 Klimaprojektionsdaten

Für die Modellierung wurde das regionale Klimamodell WETTREG 2010 verwendet, das auf dem Globalmodell ECHAM5/MPI-OM des MPI in Hamburg [23] unter den Annahmen der drei verschiedenen Emissionsszenarios A1B, B1 und A2 beruht. WETTREG 2010 ist ein statistisches, wetterlagenbasiertes Klimamodell, dessen Daten als Stationsdaten (Punktdate) vorliegen. Auf Basis des ersten Laufs des Globalmodells wurde aus den Zeitreihen des Modells WETTREG 2010 pro Szenario ein Ensemble aus zehn Realisierungen (Modellläufen) erzeugt, die alle die gleiche Wahrscheinlichkeit haben und sich auch sehr ähnlich sind. Für die Modellierung der Sickerwasserrate unter zukünftigen klimatischen Bedingungen wurden die Klimaprojektionsdaten von 25 Stationen (sechs Klima- sowie 19 Niederschlagsstationen) verwendet (Abbildung 5). Die Modellierung des Kontrollzeitraumes von 1961–2000 sowie des Projektionszeitraumes ab 2001–2100 erfolgte für alle zehn Realisierungen (00 bis 99) unter den Annahmen des Emissionsszenarios A1B.

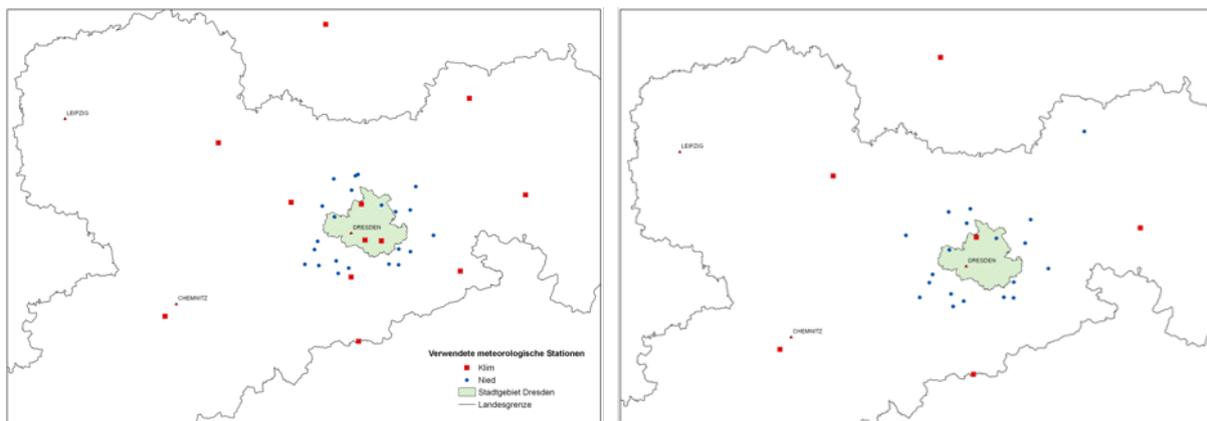


Abbildung 5: Räumliche Auflösung, Lage und Verteilung der verwendeten meteorologischen Messstationen (links) sowie der WETTREG 2010 – Stationen (rechts); die roten Quadrate symbolisieren Klimastationen und die blauen Punkte Niederschlagsstationen.

Bei den Klimaprojektionsdaten wurden die gleichen meteorologischen Parameter auf der Basis von Tageswerten verwendet wie bei den Beobachtungsdaten.

## 3.2 Bodendaten

Im Rahmen einer Wasserhaushaltsmodellierung sind Bodeninformationen weitere wichtige Eingangsdaten. Im Modell BOWAM wird jedes Hydrotop bzw. jede Rasterzelle vertikal in mehrere Bodenschichten bzw. Teilbodenschichten unterteilt. Diese vertikale Untergliederung ist für eine prozessnahe Modellierung der Verdunstung oberflächennaher Bodenschichten sehr wichtig.

Bei der Modellparametrisierung werden für jede festgelegte Boden(teil)schicht bodenphysikalische Parameter wie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, Sättigungswassergehalt, Feldkapazität benötigt. Diese Parameter können durch Feld- und Laborversuche bestimmt oder abgeschätzt werden. Stehen keine Feld- oder Laborwerte zur Verfügung, kann im Modell BO-WAM bei bekannter Bodenart auf programminterne Vorschläge (Defaultwerte) zurückgegriffen werden. Angaben zu den dominierenden Bodentypen und schließlich der Bodenart können den analogen oder digitalen Bodenkartern, die in verschiedenen Maßstäben vorliegen, entnommen werden. Das amtliche bodenkundliche Kartenwerk Sachsens ist die Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 (BK50) des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Diese befand sich zu Beginn dieser Arbeit, insbesondere für das Kartenblatt Dresden, in Bearbeitung. Daher wurde auf die digitale Fassung der 2006 aktualisierten Bodenkonzeptkarte (BK<sub>KONZ</sub>) des LfULG zurückgegriffen. Im Dresdener Innenstadtbereich weist die BK<sub>KONZ</sub> jedoch sehr viele Flächen auf (ca. 45 %), die keine Bodeninformationen enthalten (hellgraue Flächen in Abbildung 6, a)) und als „Ort“ oder „nk“ (nicht kartiert) ausgewiesen werden, da Siedlungsflächen bei den Kartierungen für die BK<sub>KONZ</sub> nicht berücksichtigt wurden. Um diese Datenlücken zu schließen, wurde eine Strategie entwickelt, bei der mehrere verschiedene „Bodenkarten“ (Abbildung 6, a) bis d)) miteinander verschnitten wurden und eine „neue“ Bodenkarte erzeugt wurde. Genauere Informationen zu dieser Vorgehensweise können z. B. [24] entnommen werden.

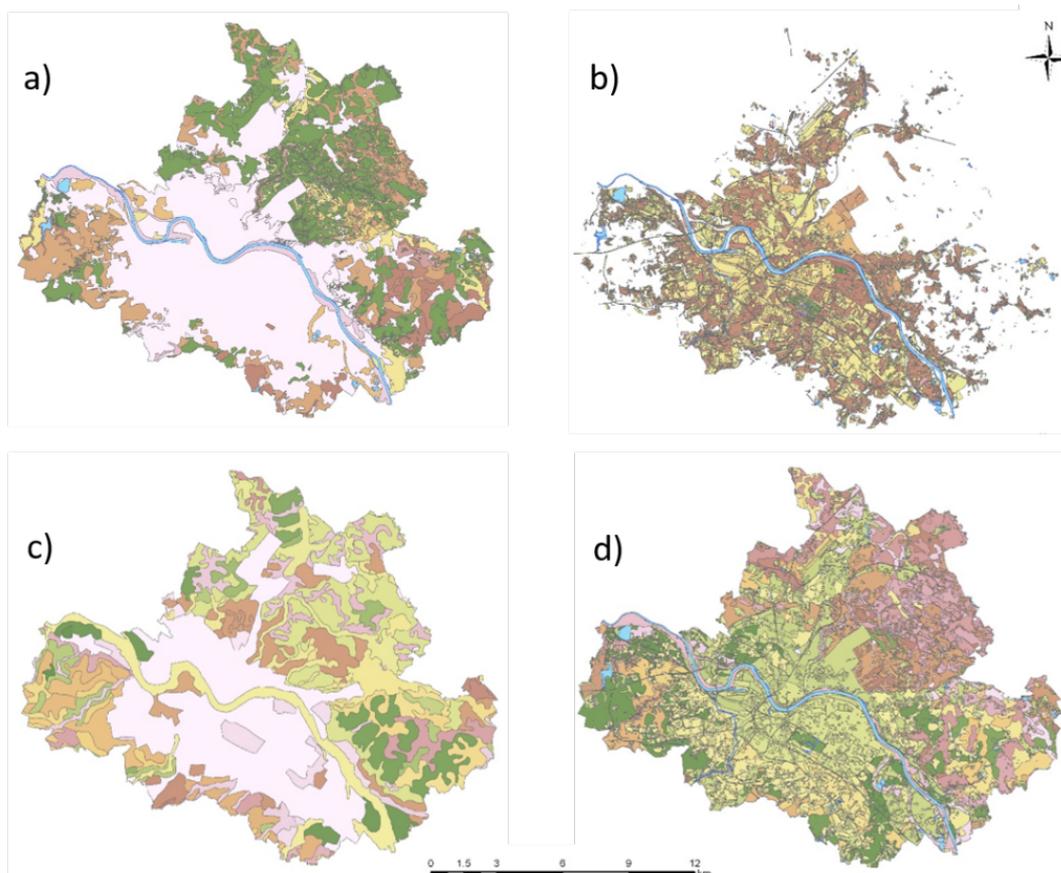


Abbildung 6: Verwendete digitale Bodenkartern für das Stadtgebiet Dresden mit a) Bodenkonzeptkarte (BK<sub>KONZ</sub>) des LfULG, Stand 2006; b) Stadtbodenkonzeptkarte (SBK<sub>KONZ</sub>) der Landeshauptstadt Dresden, Stand 2010; c) Auswertungskarte zum Bodenschutz des Bodenatlas des Freistaates Sachsen (BSA 200) des LfULG, Stand 2007 und d) „neue“ Bodenkarte, die durch die Verschneidung der drei Karten a) bis c) erzeugt wurde.

### **3.3 Weitere Datengrundlagen**

#### **3.3.1 Landnutzungsdaten**

Neben bodenkundlichen Informationen werden auch Informationen zur Landnutzung benötigt. Informationen zum Landnutzungstyp und zum Versiegelungsgrad enthält die flächendeckende Stadtbiotoptypenkartierung der Landeshauptstadt Dresden (Abbildung 3).

#### **3.3.2 Grundwasserflurabstand**

Bei der Modellierung der Sickerwassermenge aus der ungesättigten Bodenzone für grundwassernahe und grundwasserferne Standorte ist der Grundwasserflurabstand. Bei grundwassernahe Verhältnissen wird die Verdunstung durch den Aufstieg von Kapillarwasser aus dem Grundwasser stark beeinflusst. Die vom LfULG zur Verfügung gestellten Grundwasserflurabstände stellen ein Nebenprodukt der überarbeiteten und erweiterten Hydrogeologischen Grundlagenkarte Sachsens im Maßstab 1:50.000 der Blätter Dresden L4948 und anteilig Pirna L5148 dar. Beide digitalen Kartenblätter decken den Bereich des Stadtgebietes der Landeshauptstadt Dresden komplett ab und liegen in einer räumlichen Auflösung von 50 m x 50 m vor.

#### **3.3.3 Digitales Geländemodell**

Die Grundlage für die Ableitung morphologischer Eingangsparameter wie Geländehöhe, Hangneigung und Exposition bildet das digitale Geländemodell DGM25 im Maßstab 1:25.000 des Staatsbetriebes Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN).

### **3.4 Datenaufbereitung und Modellaufbau**

#### **3.4.1 Räumliche Diskretisierung und Morphologie**

Die Modellierung der Sickerwassermenge aus der ungesättigten Bodenzone für das gesamte Stadtgebiet von Dresden basiert auf einer räumlichen Auflösung von 100 m x 100 m, diese entspricht der räumlichen Diskretisierung des bestehenden Grundwassermodells des Umweltamtes der Landeshauptstadt Dresden. Auf Basis dieses Rasters ergeben sich für das gesamte Stadtgebiet 32.716 Rasterzellen. Alle verwendeten Vektor- und Rasterdaten wurden in das 100 m x 100 m Raster konvertiert. Auf Basis dieser neuen Skalierung wurden mittels GIS die mittlere Geländehöhe sowie -länge, die Hangneigung und die Exposition jeder Rasterzelle ermittelt.

#### **3.4.2 Landnutzungsdaten**

Die vorhandenen Landnutzungstypen der Stadtbiotoptypenkarte der Landeshauptstadt Dresden wurden für das Stadtgebiet von Dresden ausgewertet und entsprechend der im Modell BOWAM verfügbaren Nutzungstypen neu klassifiziert (Abbildung 7). So entstanden insgesamt 16 Landnutzungstypen. Für die teilversiegelten Flächen wurden die Versiegelungsgrade der Stadtbiotoptypenkarte verwendet und in fünf Klassen von 10 % bzw. 20 %-Schritten eingeteilt. Die festgelegte Landnutzung gemäß BOWAM wurde bei der Modellierung der Sickerwassermenge aus der ungesättigten Bodenzone unter veränderten klimatischen Bedingungen konstant gehalten.

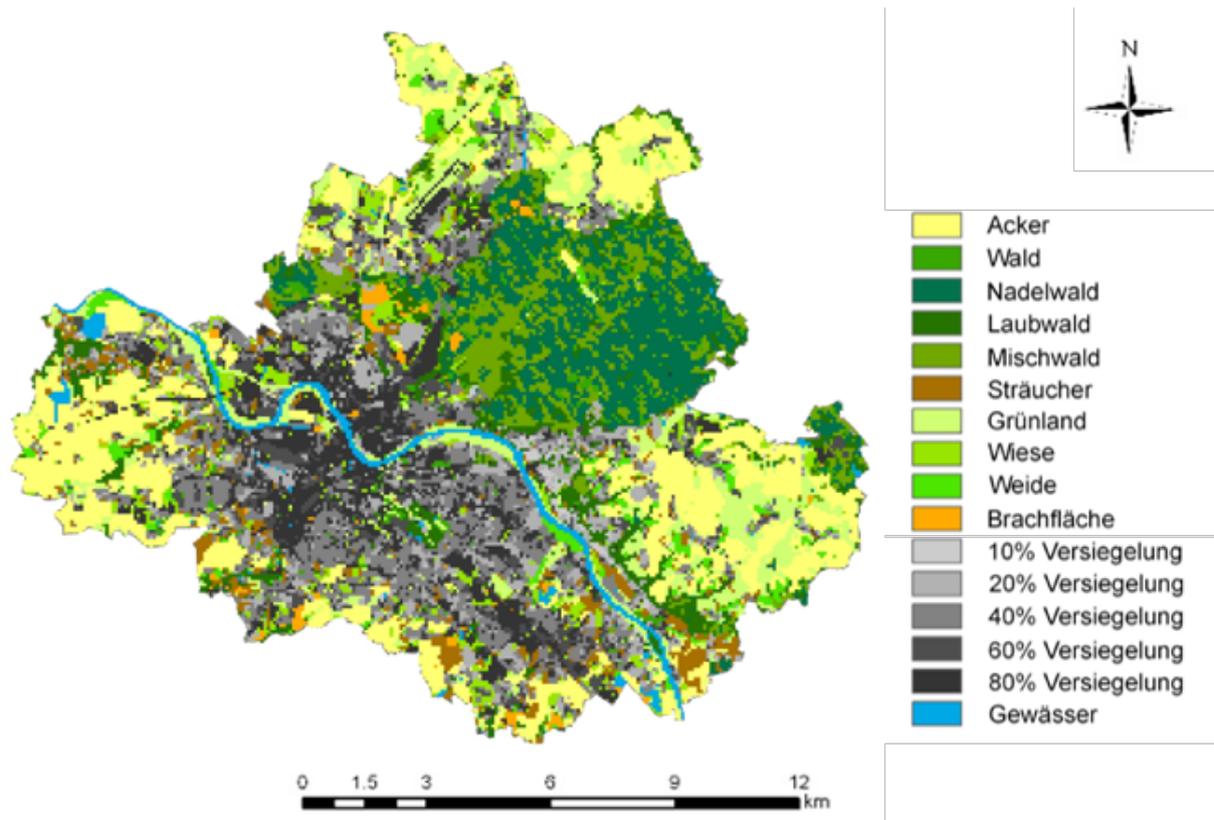


Abbildung 7: Neuklassifizierte Landnutzung im Stadtgebiet Dresden gemäß der bowam-Nutzungstypen (Quelle: Stadtbiooptypenkarte der Landeshauptstadt Dresden, Stand 2003).

Außerdem wurden für Modellierung die Grundwasserflurabstände in folgende fünf Klassen eingeteilt: < 1,0 m; 1,0 bis 1,5 m; 1,5 bis 2,0 m; 2,0 bis 2,5 m; > 2,5 m. Die Grundwasserflurabstände wurden nur bis maximal 2,50 m Tiefe berücksichtigt, da diese Tiefe der maximalen Entnahmetiefe der Evapotranspiration entspricht. Es können aber auch Grundwasserflurabstände von 60 m und tiefer auftreten.

### 3.4.3 Korrektur-und Interpolationsverfahren der meteorologischen Daten

Da der gemessene Niederschlag stets geringer ist als der tatsächliche Niederschlag, bedarf es einer Niederschlagskorrektur. Für die Modellrechnungen lagen bereits im Rahmen des REGKLAM-Projektes korrigierte, tägliche Niederschlagssummen vor, die auf einem angepassten Korrekturverfahren nach Richter basieren.

Aufgrund der riesigen Datenmengen wurde die Interpolation der Klimadaten nicht rasterbasiert, sondern, für festgelegte Teilgebiete (Abbildung 8) durchgeführt. Anhand der vorhandenen meteorologischen Stationen und mit Hilfe des digitalen Geländemodells ATKIS-DGM 25 wurde das gesamte Dresdener Stadtgebiet in sieben Teilgebiete unterteilt, die eine sehr ähnliche Morphologie aufwiesen. Folglich wurde jeder Rasterzelle das entsprechende Teilgebiet zugewiesen.

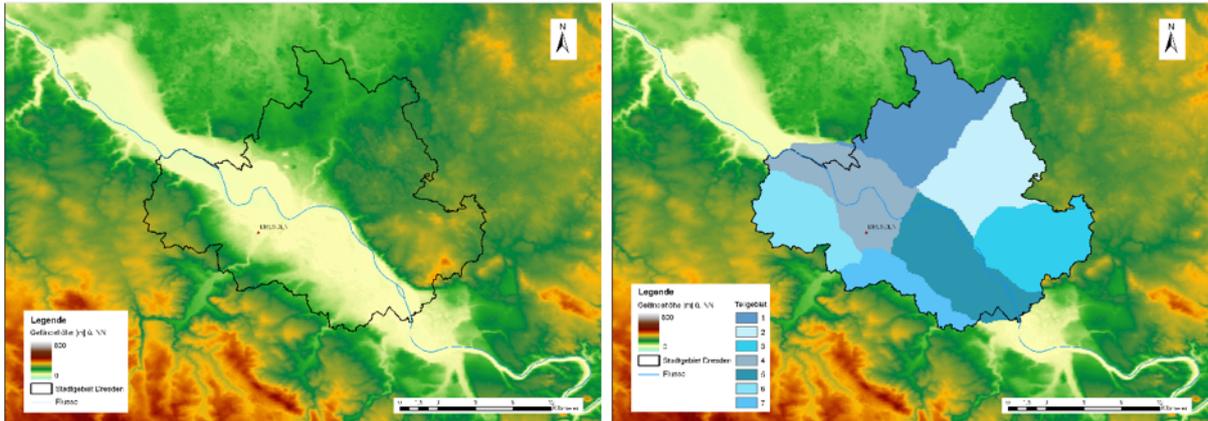


Abbildung 8: Verteilung der meteorologischen Teilgebiete über das Stadtgebiet Dresden; das digitale Geländemodell, links und die daraus sieben abgeleiteten Teilgebiete, rechts.

### 3.4.4 Festlegung von Hydrotopen

Die Modellierung der Sickerwassermenge aus der ungesättigten Bodenzone unter rezenten und zukünftigen klimatischen Bedingungen umfasst einen Zeitraum (1961–2100) von insgesamt 140 Jahren. Da Modellrechnungen über diesen Zeitraum für jede der 32.716 Rasterzellen viel zu lang dauern würden, wurden bestimmte Informationen wie z. B. die Hangneigungswerte zu Klassen zusammengefasst, um den hohen Zeitaufwand einzugrenzen. Folglich wurden die Datensätze Boden, Nutzungsart, meteorologisches Teilgebiet, Grundwasserflurabstandsklasse und Hangneigungsklasse im GIS zusammengefasst, sodass die Kombination dieser fünf Datensätze für das gesamte Stadtgebiet 5243 Hydrotope ergab. So entspricht nicht mehr eine Rasterzelle einem Hydrotop, sondern mehrere Rasterzellen mit ähnlichen Eigenschaften wurden zu einem Hydrotop zusammengefasst, sodass die ursprüngliche Rasteranzahl deutlich reduziert werden konnte und sich die Rechenzeit verkürzte.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Die Modellierung Sickerwassermenge aus der ungesättigten Bodenzone unter rezenten und zukünftig zu erwartenden Klimabedingungen wurde auf der Grundlage von hydrologischen Jahren mit einem Modellvorlauf von zwei Jahren durchgeführt, um das Modell „einzuschwingen“.

### 4.1 Verwendung eines einfachen Modells für eine komplexe Aufgabe

#### 4.1.1 Analyse des Ist-Zustandes

##### Räumliche Variabilität

Als langjähriges Mittel ist die modellierte Sickerwasserrate für die Jahres- und Halbjahressummen im Referenzzeitraum 1961–1990 (links) und im Vergleichszeitraum 1991–2010 (rechts) für das gesamte Dresdener Stadtgebiet in Abbildung 9 dargestellt. Wie zu sehen ist, variiert das Jahresmittel der modellierten Sickerwassermenge räumlich betrachtet in beiden Zeiträumen zwischen 0 mm und 425 mm (Abbildung 9, oben).

Das arithmetische Mittel der modellierten Sickerwassermenge aus allen Rasterzellen beträgt im Referenzzeitraum 1961–1990 für die beobachteten Klimadaten 198 mm. Maximale Sickerwassermengen von > 400 mm treten vereinzelt im Bereich von Brachflächen auf. Ackerbaulich und sonstige landwirtschaftlich genutzte Flächen vor allem im Norden sowie Westen bzw. im Osten des Dresdener Stadtgebietes wie z. B. das Schönfelder Hochland weisen im

langjährigen Mittel Sickerwassermengen von 130 mm bis 330 mm auf. In Bereichen mit Waldbedeckung liegt die Sickerwasserrate zwischen 80 mm und > 300 mm. Auf Grünlandflächen werden Sickerwassermengen von 90 mm bis 300 mm erreicht. Bereiche mit Kleingehölzen und Büschen weisen Sickerwassermengen zwischen 80 mm und 280 mm auf. Flächen im innerstädtischen Bereich mit geringen Versiegelungsgraden (10 % bis 20 %) zeigen Sickerwassermengen von 150 mm bis reichlich 300 mm. Auf Flächen, die bis zu 40 % versiegelt sind, treten Sickerwassermengen von 50 mm bis 270 mm und bei Flächen mit Versiegelungsgraden von bis zu 60 % sind Sickerwassermengen zwischen 140 mm und 200 mm zu verzeichnen. Industrieflächen und Flächen der Wohnbebauung mit Versiegelungsgraden > 80 % weisen im Jahresmittel Sickerwassermengen zwischen 60 mm und 100 mm auf.

Im 20-jährigen Vergleichszeitraum 1991–2010 nahm die Sickerwassermenge im Jahresmittel geringfügig um 2 mm zu. Vereinzelt sind räumliche Unterschiede zu erkennen. So wurden im Nordosten und Osten der Stadt im langjährigen Mittel des Vergleichszeitraumes mehr Sickerwasser (> 250 mm bis 350 mm) gebildet als im Referenzzeitraum mit Sickerwassermengen von > 200 mm bis 300 mm. Das Maximum lag im Vergleichszeitraum bei ca. 425 mm und wurde im Bereich von unversiegelten Flächen (Brachflächen) gebildet. Im Vergleichszeitraum unterliegt die modellierte Sickerwassermenge an der Modellbasis einer etwas größeren Schwankungsbreite (plus 10 mm) als im Referenzzeitraum.

Bei der Betrachtung von Halbjahren ist ein etwas differenziertes Bild zu erkennen. Im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) variiert die modellierte Sickerwassermenge im Referenzzeitraum zwischen -99 mm und 173 mm und beträgt im Mittel ca. 43 mm (Abbildung 9, linke Mitte). Es treten vor allem im Nordosten des Stadtgebietes wie z.B. der Dresdener Heide und entlang von Flussläufen negative Werte auf. Negative Werte bedeuten, dass kapillarer Wasseraufstieg stattfindet. Aufgrund der Evapotranspiration kommt es zu einem Entzug von Wasser aus der Bodenzone. Im Vergleichszeitraum schwanken die Sickerwasser- bzw. kapillare Aufstiegs mengen im Sommerhalbjahr zwischen -110 mm und 180 mm. Die mittlere Sickerwassermenge aus der ungesättigten Bodenzone beträgt 41 mm und ist demzufolge etwas geringer als im Referenzzeitraum. Stark negative Werte sind ebenfalls für den Nordosten des Stadtgebietes zu verzeichnen. Außerdem treten im Vergleichszeitraum mehr Flächen mit Sickerwassermengen von 1 mm bis 50 mm auf als im Referenzzeitraum. Während des hydrologischen Winterhalbjahres (November bis April) sind deutlich höhere Sickerwassermengen zu verzeichnen als im Sommerhalbjahr. Die mittleren Sickerwassermengen variieren räumlich zwischen 0 mm und 300 mm. Bei beiden Untersuchungszeiträumen sind im Nordosten bzw. Osten des Stadtgebietes deutliche Unterschiede hinsichtlich der modellierten Sickerwassermengen erkennbar, aber genau entgegengesetzt zum Sommerhalbjahr. Die mittlere Sickerwassermenge des Winterhalbjahres beträgt im Vergleichszeitraum 159 mm (Abbildung 9, rechts unten) und ist geringfügig höher als im Referenzzeitraum mit einer Sickerwassermenge von 155 mm (Abbildung 9, links unten) im Halbjahresmittel.

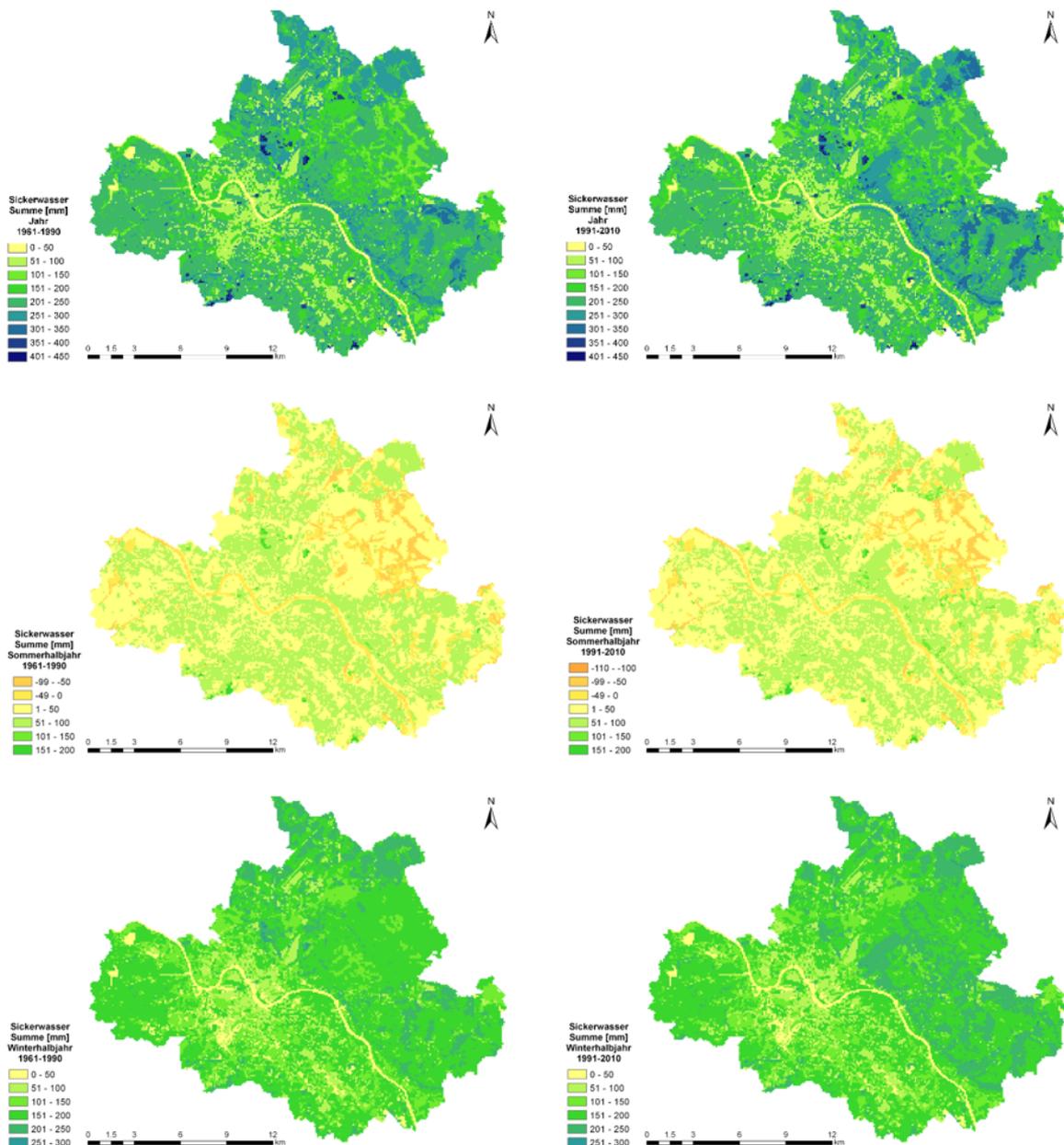


Abbildung 9: Räumliche Variabilität der simulierten Sickerwassermenge der ungesättigten Bodenzone für den Referenzzeitraum 1961–1990 (links) und den Vergleichszeitraum 1991–2010 (rechts) unter Nutzung von Beobachtungsdaten für das langjährige Mittel (oben) und das hydrologische Sommer- (Mitte) sowie Winterhalbjahr (unten).

### Saisonale Variabilität und mittlerer Jahresgang

In Abbildung 10 sind zum einen die mit BOWAM simulierten Sickerwassermengen als Box- und Whisker-Diagramme für die Jahreszeiten des Referenzzeitraumes 1961–1990 (oben, links) sowie des Vergleichszeitraumes 1991–2010 (oben, rechts) dargestellt und zum anderen sind der mittlere Jahresgang der simulierten Sickerwassermenge für den Referenzzeitraum 1961–1990 (unten, links) und dessen Änderung für 1991–2010 (unten, rechts) gegenüber 1961–1990 veranschaulicht.

Wie in Abbildung 10 (oben, links) zu sehen ist, beträgt die mittlere Sickerwassermenge im Frühjahr des Referenzzeitraumes 50 mm. Die Sickerwassermengen variieren am stärksten. Im Sommer werden im Mittel mit 16 mm die geringsten Sickerwassermengen erreicht. Während

der Herbstmonate beträgt die mittlere Sickerwassermenge 40 mm. Die Wintermonate werden von positiven Sickerwassermengen geprägt, sodass die mittlere Sickerwassermenge bei 95 mm liegt. Im Frühjahr des Vergleichszeitraumes (Abbildung 10, rechts oben) kam es gegenüber des Referenzzeitraumes 1961-1990 zu einer Abnahme der mittleren Sickerwassermenge um ca. 18 %. In den Sommermonaten des Vergleichszeitraumes ist die mittlere Sickerwassermenge in etwa gleichgeblieben, während die Gesamtspannweite der simulierten Sickerwassermengen leicht zugenommen hat. Es ist vor allem ein Anstieg bei den Maximalwerten zu verzeichnen. Dahingegen werden die Herbstmonate im Zeitraum 1991–2010 von höheren Sickerwassermengen geprägt, sodass im Mittel bis zu 20 % mehr Sickerwasser gebildet wird. In den Wintermonaten 1991–2010 hat sich die Gesamtspannweite der Sickerwassermengen gegenüber dem Mittel von 1961–1990 deutlich verringert, während sich die mittlere Sickerwassermenge geringfügig verringert hat. Die Abbildung 10 (unten, links) veranschaulicht den mittleren Jahresgang der simulierten Sickerwassermengen im Referenzzeitraum 1961–1990. Die höchsten Werte traten in den Wintermonaten auf, wobei das Maximum der mittleren monatlichen Sickerwassermenge mit 37 mm im Dezember lag. Das Minimum der mittleren monatlichen Sickerwassermenge stellte sich in den Sommermonaten ein. Der Monat mit der geringsten Sickerwasserbildung war der Juni mit 3 mm.

Demzufolge findet die Bildung von Sickerwasser überwiegend in den Wintermonaten statt. Aufgrund der eingeschränkten Verdunstung tragen die Winterniederschläge fast ausschließlich zur Sickerwasserbildung bei, sodass der Bodenspeicher wieder aufgefüllt wird. Mit Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr nimmt auch die Verdunstung wieder zu, was dazu führt, dass der Bodenspeicher vermehrt entleert wird. In den Sommermonaten kommt es unter normalen Bedingungen aufgrund des hohen Verdunstungsanspruches der Vegetation kaum zur Sickerwasserbildung, da anfallende Sommerniederschläge meist gleich wieder aufgezehrt werden. Aufgrund der Niederschlags-Maxima im Sommer und der Niederschlags-Minima im Winter zählt der Dresdener Raum zum „Sommerniederschlagstyp“, was dazu führt, dass auch während der Sommermonate Sickerwasser gebildet wird. Außerdem können Extremereignisse, wie z. B. die Hochwasser 2002 und 2010 mit Niederschlägen weit über dem Durchschnitt, zusätzlich zur Bildung von Sickerwasser beitragen. Diese beiden Hochwasserereignisse sind auch im Jahresgang des Vergleichszeitraumes (Abbildung 10, rechts unten) zu sehen, wo es im August und September zu einer deutlichen Zunahme der Sickerwasserrate kam.

Die Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungszeiträumen sind vor allem auf die Veränderungen der innerjährlichen Variabilität der gemessenen Niederschläge im 20-jährigen Vergleichszeitraum zurückzuführen. Im Vergleichszeitraum haben die mittleren Jahresniederschläge sowohl im Sommerhalbjahr, als auch im Winterhalbjahr deutlich zugenommen, wobei die Zunahme im Winterhalbjahr überwiegt. Des Weiteren kommt hinzu, dass die Anzahl trockener Tage im Sommerhalbjahr zugenommen hat und auch die Verdunstung deutlich gestiegen ist. Zu beachten ist, dass beide Untersuchungszeiträume unterschiedlich lang sind. Der Referenzzeitraum 1961–1990 umfasst 30 Jahre und der Vergleichszeitraum 1991–2010 lediglich 20 Jahre. Dies bedeutet, dass Jahre mit überdurchschnittlich hohen Niederschlägen wie z. B. 2002 und 2010 bzw. mit einer innerjährlichen Variabilität, die sehr stark von dem langjährigen Mittel des Referenzzeitraumes 1961–1990 abweicht im zehn Jahre kürzeren Vergleichszeitraum viel mehr ins Gewicht fallen.

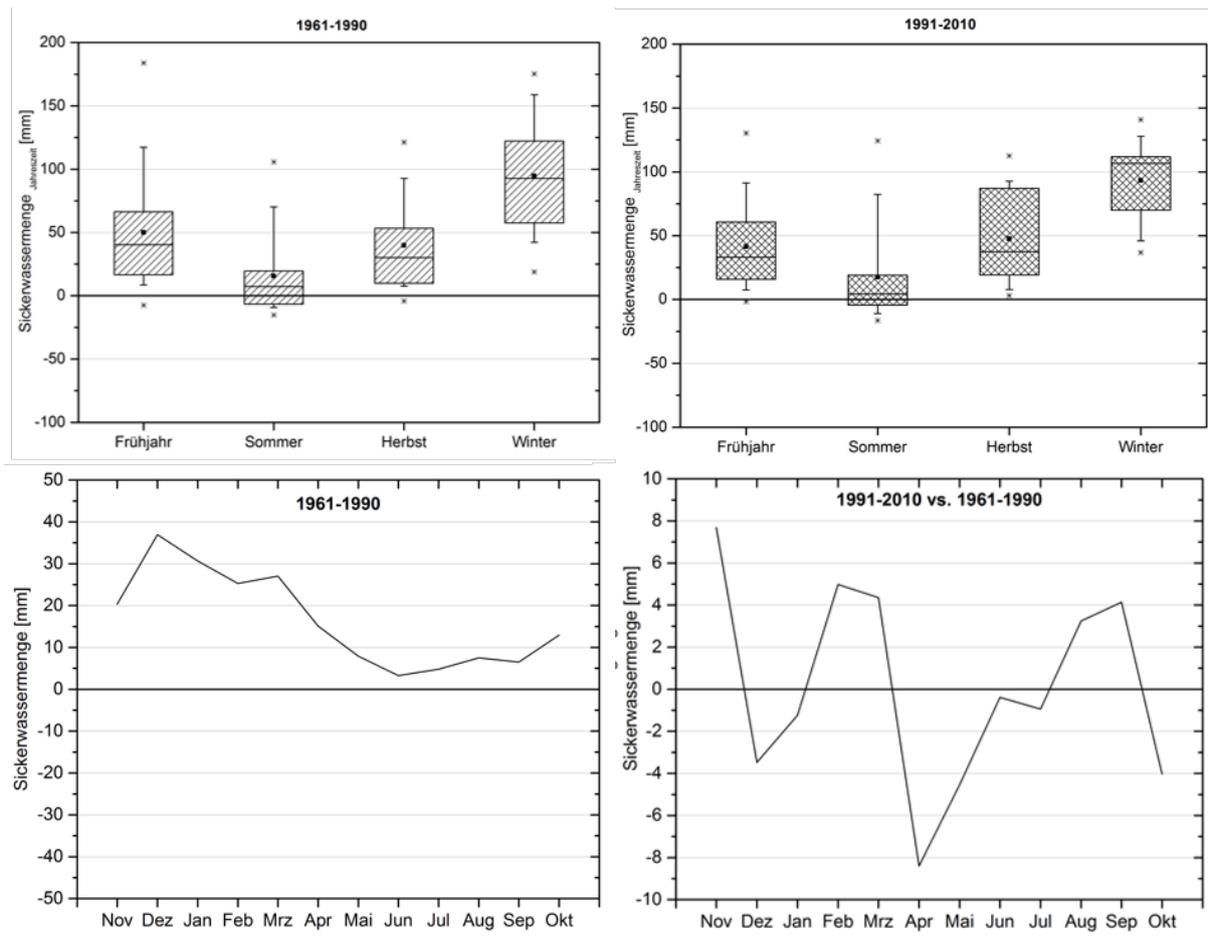


Abbildung 10: Zeitliche Variabilität der simulierten Sickerwassermengen im Beobachtungszeitraum 1961–2010 für das Stadtgebiet Dresden.

*Oben:* Saisonale Variabilität der Sickerwassermenge im Referenz- 1961–1990 (links) sowie im Vergleichszeitraum 1991–2010 (rechts).

*Unten:* Jahresgang der mittleren Monatssummen der Sickerwassermenge im Referenzzeitraum 1961–1990 (links) und die Veränderung im Jahresgang für 1991–2010 gegenüber 1961–1990 (rechts).

### Plausibilitätsanalysen

Die simulierten Sickerwassermengen aus der ungesättigten Bodenzone werden folglich für den Beobachtungszeitraum 1961–2010 bezüglich ihrer Plausibilität beurteilt. Da keine gemessenen Werte für die mittlere jährliche Sickerwasserrate für den Bereich des Dresdener Stadtgebietes existieren, wurden die erzielten Ergebnisse der simulierten langjährigen mittleren Sickerwasserrate zum einen mit wissenschaftlichen Kartenwerken [25] und zum anderen mit den Ergebnissen von Qualifizierungsarbeiten [26]; [27], die während des Projektes REGKLAM entstanden sind bzw. mit den Ergebnissen aus anderen Projekten (z. B. KLIWES) verglichen. Bei diesen Vergleichen waren jedoch nur Abschätzungen möglich, da andere Berechnungs-, Korrektur- sowie Interpolationsverfahren und auch andere Eingangsdaten verwendet wurden. Außerdem wurden teilweise auch andere Zeiträume betrachtet. Im Folgenden werden beispielhaft die mit BOWAM simulierten Sickerwasserraten mit den Ergebnissen des Projektes KLIWES verglichen.

Über das Wasserhaushaltsportal Sachsen (WHHP) können sachsenweit Daten einzelner Wasserhaushaltskomponenten wie Niederschlag, Verdunstung, Oberflächen-, Grundwasser- und Gesamtabfluss für den Ist-Zustand 1961–2005 bzw. 1961–2010 in Form von Shape-Files heruntergeladen werden. Bei den verfügbaren Wasserhaushaltsdaten handelt es sich um Er-

gebnisse des Projektes KLIWES. Die Wasserhaushaltsberechnungen erfolgten dabei mit dem hydrologischen Modell ArcEGMO auf der Basis von Flusseinzugsgebieten, sodass für fast alle sächsischen Einzugsgebiete langjährige Mittelwerte sowie Monatswerte einzelner Wasserhaushaltskomponenten vorliegen. Obwohl der Elbeschlauch bei den Modellrechnungen nicht berücksichtigt wurde, bieten die Daten des WHHP, wenn auch nicht flächendeckend, eine Möglichkeit die mit BOWAM erzielten Ergebnisse zu vergleichen und zu beurteilen. zeigt für den Beobachtungszeitraum 1961–2010 die räumliche Verteilung der langjährigen Mittelwerte des korrigierten Niederschlages ( $P_{\text{korrr}}$ ), der realen Verdunstung (ER) und des Grundwasserabflusses (RG) für die Einzugsgebiete der Oberen Elbe und der Schwarzen Elster, die den Bereich des Dresdener Stadtgebietes abdecken. Die mit BOWAM simulierten, langjährigen Mittelwerte des korrigierten Niederschlages, der realen Evapotranspiration (ETR) und der Sickerwasserrate (RU) sind zum Vergleich für das gesamte Stadtgebiet für den Beobachtungszeitraum in Abbildung 12 dargestellt. Wie zu erkennen ist, variiert der korrigierte Niederschlag des WHHP (Abbildung 11, a)) für den Bereich des Dresdener Stadtgebietes zwischen 710 mm/a und 849 mm/a und beträgt im Mittel 773 mm/a. Die korrigierten Niederschläge im Rahmen der BOWAM-Modellierung weisen mit Werten zwischen 719 mm/a und 778 mm/a eine geringere Spannweite auf (Abbildung 12, a)). Das Gebietsmittel beträgt 754 mm/a. Vor allem im Nordosten des Stadtgebietes sind die korrigierten Niederschläge des WHHP aufgrund der differenzierten Höhenabstufung 50 mm bis 70 mm höher. Die reale Verdunstung des WHHP (Abbildung 11, b)) erreicht innerhalb des Dresdener Stadtgebietes Werte zwischen 294 mm/a und knapp 900 mm/a und beträgt im Mittel 550 mm/a, während die reale Evapotranspiration bei BOWAM zwischen 151 mm/a und knapp 700 mm/a schwankt (Abbildung 12, b)). Die reale Verdunstung des WHHP wird im Bereich der Dresdener Heide und südwestlichen Stadtgebiet mit Werten von  $>800$  mm/a überschätzt. Auch wenn in diesen Bereichen des Stadtgebietes überwiegend Nadel- und Mischwaldbestände und grundwassernahe Verhältnisse vorzufinden sind, sind diese Werte extrem hoch, daher werden die BOWAM-Werte als realistischer eingeschätzt. Die räumliche Verteilung des Grundwasserabflusses des WHHP ist in Abbildung 11 (c) veranschaulicht. Es treten Werte zwischen -141 mm/a und 303 mm/a auf. Das Gebietsmittel des Grundwasserabflusses liegt bei 140 mm/a. Grundwasserabflüsse mit sehr geringen langjährigen Mittelwerten ( $< -100$  mm/a) sind in den Bereichen vorzufinden, wo die reale Verdunstung sehr hoch ist, wie z. B. im oberen Bereich der Prießnitz im Nordosten und im Bereich der Vereinigten Weißeritz im Südwesten des Stadtgebietes. Zum Vergleich dazu beträgt das Gebietsmittel der mit BOWAM simulierten langjährigen mittleren Sickerwasserrate knapp 200 mm/a und erreicht Werte zwischen 0 mm/a und 419 mm/a (Abbildung 12, c)). Da der Grundwasserabfluss nur der Teil des Sickerwassers darstellt, der auch die Grundwasseroberfläche erreicht, ist folglich die mit BOWAM simulierte Sickerwasserrate höher als der Grundwasserabfluss des WHHPs. Außerdem ist die mit BOWAM ermittelte reale Verdunstung viel geringer sind als die des WHHPs, sodass generell mehr Niederschlagswasser in den Boden infiltrieren kann und schließlich auch mehr Sickerwasser gebildet wird.

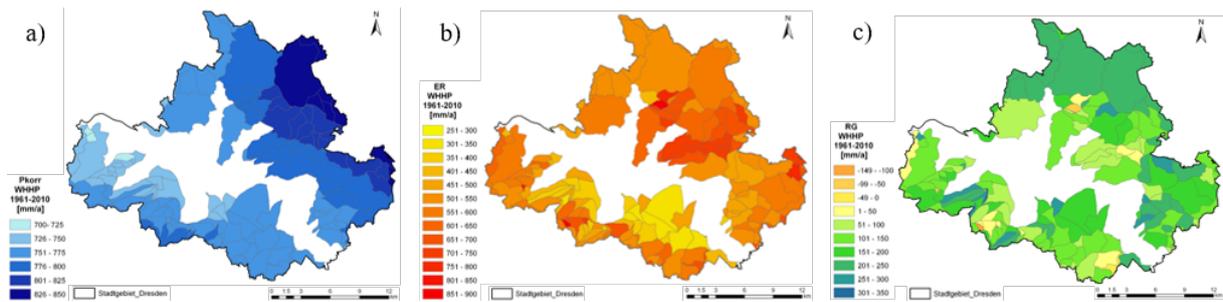


Abbildung 11: Räumliche Verteilung der langjährigen Mittelwerte der Wasserhaushaltsgrößen a) korrigierter Niederschlag, b) reale Verdunstung und c) Grundwasserabfluss im Beobachtungszeitraum 1961-2010 für die Einzugsgebiete der Oberen Elbe sowie der Schwarzen Elster des WHHPs.

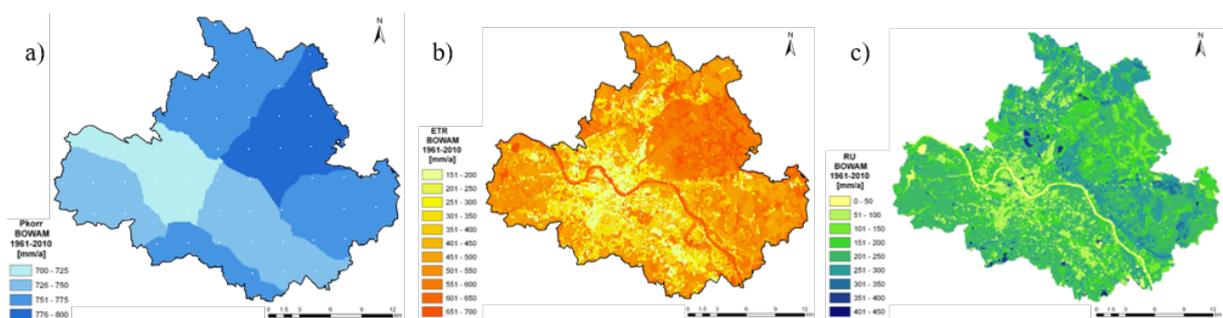


Abbildung 12: Räumliche Verteilung der mit BOWAM simulierten langjährigen Mittelwerte der Wasserhaushaltsgrößen a) korrigierter Niederschlag, b) reale Verdunstung und c) Sickerwasserrate im Beobachtungszeitraum 1961-2010 für den Bereich des Dresdener Stadtgebietes.

Die mit BOWAM simulierten Ergebnisse liegen zum größten Teil in der gleichen Größenordnung wie die Ergebnisse des WHHPs. Dies ist zeigt auch der Vergleich der beiden Abbildungen (Abbildung 11 und Abbildung 12), die eine sehr ähnliche räumliche Verteilung der erzielten Ergebnisse aufweisen.

Die Vergleiche, die im Rahmen der Plausibilitätsanalyse durchgeführt worden sind, zeigen, dass die mit BOWAM erzielten Ergebnisse als realistisch eingeschätzt werden können und gute Übereinstimmungen lieferten. Demzufolge lagen die mit BOWAM simulierten langjährigen Mittelwerte der Sickerwasserrate bzw. realen Verdunstung im Beobachtungszeitraum in der gleichen Größenordnung wie die zum Teil nur abgeschätzten Vergleichswerte anderer Studien oder Kartenwerke.

#### 4.2 Sickerwasserrate unter veränderten klimatischen Bedingungen

Die Modellierung der Sickerwassermengen aus der ungesättigten Bodenzone erfolgte unter zukünftigen klimatischen Bedingungen analog zu den Modellrechnungen unter rezenten Klimabedingungen durch die Anwendung des Bodenwasserhaushaltsmodells BOWAM auf der Basis hydrologischer Jahre mit einer Modellvorlaufzeit von zwei Jahren für den Zeitraum 1961–2100. Dabei umfassen die verwendeten Projektionsdaten Klimadaten ausgewählter Stationsdaten des statistischen Klimamodells WETTREG 2010 (10 Läufe) jeweils unter dem Emissionsszenario A1B.

#### 4.2.1 Räumliche Variabilität

Die Abbildung 13 zeigt die räumliche Verteilung der simulierten langjährigen mittleren Sickerwassermengen für die Beobachtungen und die Projektionsdaten des Klimamodells WETTREG 2010 exemplarisch für eine Realisierung (Lauf 11) im Referenzzeitraum 1961–1990 für die Jahre und das Sommer- sowie Winterhalbjahr. Die modellierte räumliche Verteilung der langjährigen mittleren Sickerwassermenge variiert für die Beobachtungen (Abbildung 13, oben) und die Klimamodelldaten (Abbildung 13, unten) zwischen 0 mm und 600 mm. Zwischen den beobachteten Klimadaten und den WETTREG 2010-Daten treten nur geringe Unterschiede auf. Das modellierte langjährige Jahresmittel der Sickerwassermenge schwankt für die Beobachtungen (Abbildung 13; oben, links) zwischen 0 mm und 416 mm und für die Projektionsdaten von WETTREG 2010 (Abbildung 13; unten, links) zwischen 0 mm und 422 mm. Das arithmetische Mittel aus allen Rasterzellen der simulierten Sickerwassermenge beträgt für die Beobachtungen 198 mm und für die WETTREG 2010-Daten 200 mm. Demnach simuliert WETTREG 2010 im langjährigen Mittel geringfügig mehr Sickerwasser als die Beobachtungen. Die räumliche Verteilung der mittleren langjährigen Sickerwassermenge wird durch die WETTREG 2010-Daten recht gut wiedergegeben.

Bei der Analyse der Halbjahre zeigt sich ein differenziertes Bild. Im Sommerhalbjahr variiert die simulierte Sickerwassermenge der Beobachtungen zwischen -99 mm und +173 mm und beträgt im Mittel 43 mm (Abbildung 13; oben, Mitte). Folglich treten in einigen Bereichen des Dresdener Stadtgebietes, wie z. B. der Dresdener Heide im Nordosten, Werte im deutlich negativen Bereich auf. Negative Werte bedeuten, dass es zu einem Entzug von Bodenwasser kommt, indem Bodenwasser entgegen der Schwerkraft kapillar bis in den Bereich der Pflanzenwurzeln aufsteigt. Auf der Grundlage der WETTREG 2010-Daten (Abbildung 13; unten, Mitte) ist die modellierte Sickerwassermenge im Sommerhalbjahr mit 31 mm (Schwankungsbreite: -104 mm bis +169 mm) im Mittel etwas geringer als die der Beobachtungsdaten. Des Weiteren sind auch die Unterschiede in der räumlichen Verteilung zwischen den WETTREG 2010- und den Beobachtungsdaten etwas größer als über das gesamte Jahr betrachtet.

Im Winterhalbjahr wird der Bodenspeicher durch zunehmende Niederschläge und einen reduzierten Verdunstungsanspruch der Vegetation langsam wieder aufgefüllt. Es kann viel mehr anfallendes Niederschlagswasser infiltrieren und bis in tiefere Bodenschichten versickern als im Sommer. Es kommt ebenfalls zu deutlichen Unterschieden in der räumlichen Verteilung zwischen den Beobachtungs- und den Modelldaten.

Während unter den beobachteten Klimadaten die mittlere langjährige Sickerwassermenge zwischen 0 mm und 254 mm schwankt und im Mittel bei 156 mm liegt (Abbildung 13; oben, rechts), variiert das langjährige Mittel der Sickerwassermenge für die Projektionsdaten zwischen 0 mm und 260 mm für WETTREG 2010 (Abbildung 13; unten, rechts). WETTREG 2010 simuliert mit 169 mm im Mittel ebenfalls etwas mehr Sickerwasser als die Beobachtungen. Die räumliche Verteilung hat sich bezüglich der WETTREG 2010-Daten genau umgekehrt, sodass letztendlich die Jahreswerte durch WETTREG 2010 im Referenzzeitraum ganz gut wiedergegeben werden können.

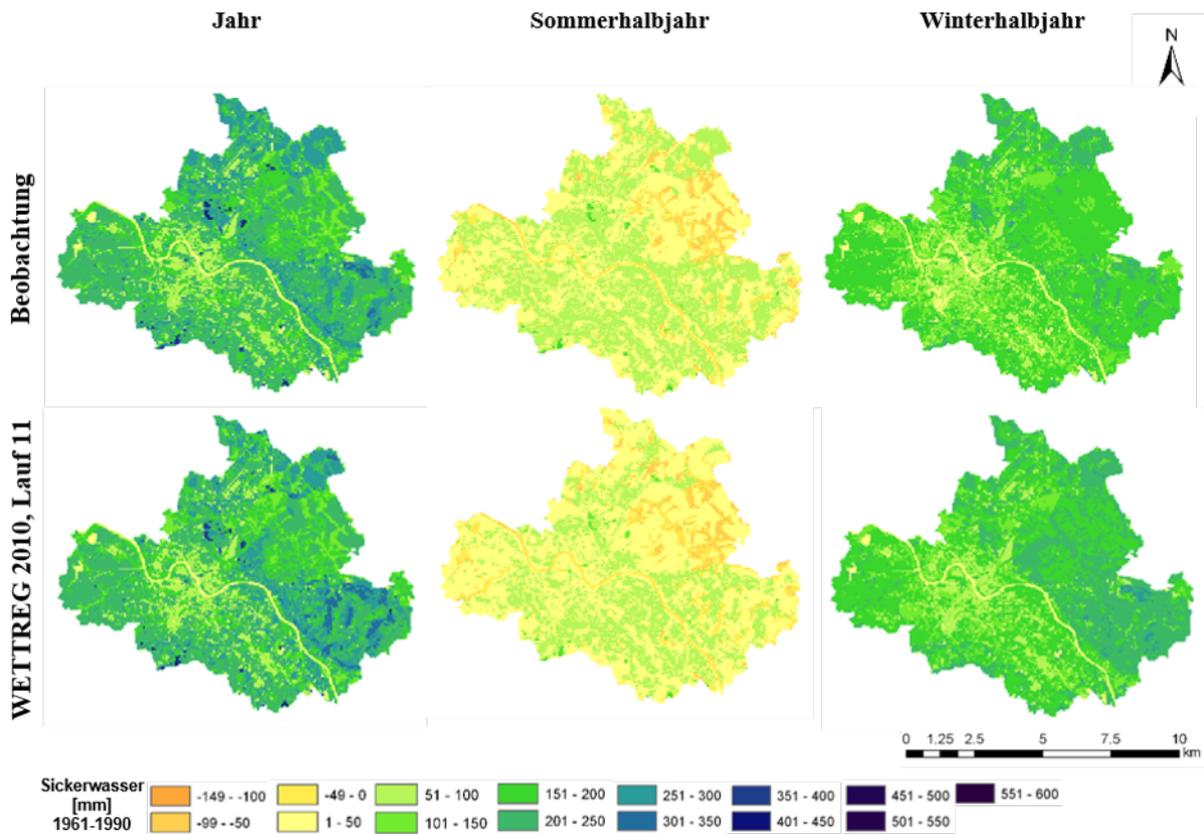


Abbildung 13: Räumliche Verteilung der simulierten langjährigen mittleren Sickerwassermenge [mm] für die Beobachtungen (oben) und die Klimamolldaten des statistischen Regionalmodells WETTREG 2010 (Lauf 11; unten) im Referenzzeitraum 1961–1990 für die Jahreswerte (links), das Sommerhalbjahr (Mitte) und das Winterhalbjahr (rechts).

Die Veränderungen in der räumlichen Verteilung der modellierten langjährigen mittleren Sickerwassermenge für die frühe Vergangenheit (1991–2020), die nahe Zukunft (2021–2050) und die ferne Zukunft (2071–2100) zeigt Abbildung 14 für WETTREG 2010 (Lauf 11) für die Jahre und Halbjahre.

Wie in Abbildung 14 veranschaulicht wird, zeichnet sich in den drei Projektionszeiträumen ein deutlicher Rückgang der langjährigen mittleren Sickerwassermenge ab. Im Zeitraum 1991–2020 ist der Rückgang im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 mit knapp 8 % noch moderat (Abbildung 14; oben). Die mittleren Jahreswerte der gebildeten Sickerwassermenge schwanken zwischen 0 mm und 411 mm und das Gebietsmittel liegt bei 185 mm. Der Rückgang betrifft beide Halbjahre, wobei die Sickerwassermenge im Sommerhalbjahr (-10 %) etwas mehr abnimmt als im Winterhalbjahr (-7 %). Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2021–2050) nimmt die Sickerwasserbildung im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 weiter deutlich ab (Abbildung 14; Mitte), sodass diese im Mittel 125 mm beträgt und zwischen -64 mm und 338 mm schwankt. Vor allem im Sommerhalbjahr ist ein sehr starker Rückgang von bis zu -74 % zu verzeichnen, der aber auch im Winterhalbjahr (-31 %) zu spüren ist. Noch deutlicher ist dieser Rückgang bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, wo das langjährige Mittel der Sickerwassermenge zwischen -245 mm und +260 mm variiert und im Mittel bei 62 mm (-69 %) liegt (Abbildung 14; unten). Dieser Rückgang findet wie auch in der nahen Zukunft (2021-2050) in beiden Halbjahren statt. Im Sommerhalbjahr ist der Rückgang jedoch besonders stark mit einer Schwankungsbreite von -330 mm bis +75 mm, treten vor allem im Nordosten bzw. vereinzelt im Osten sowie Westen des Dresdener Stadtgebietes Werte < -300 mm auf, sodass auch das Gebietsmittel (-15 mm) im negativen Bereich liegt. Der starke Rückgang der Sickerwasserbil-

dung hat vor allem aber im Winterhalbjahr drastische Folgen, da aufgrund einer reduzierten Sickerwasserbildung durch fehlende Niederschläge der Bodenspeicher während der Wintermonate nicht wieder aufgefüllt werden. Solche enormen Defizite sind besonders im Bereich der Dresdener Heide möglich, wo sandige Böden mit Laubbaumbeständen anzutreffen sind und im Bereich der zahlreichen Flüsse und Bäche grundwassernahe Verhältnisse herrschen.

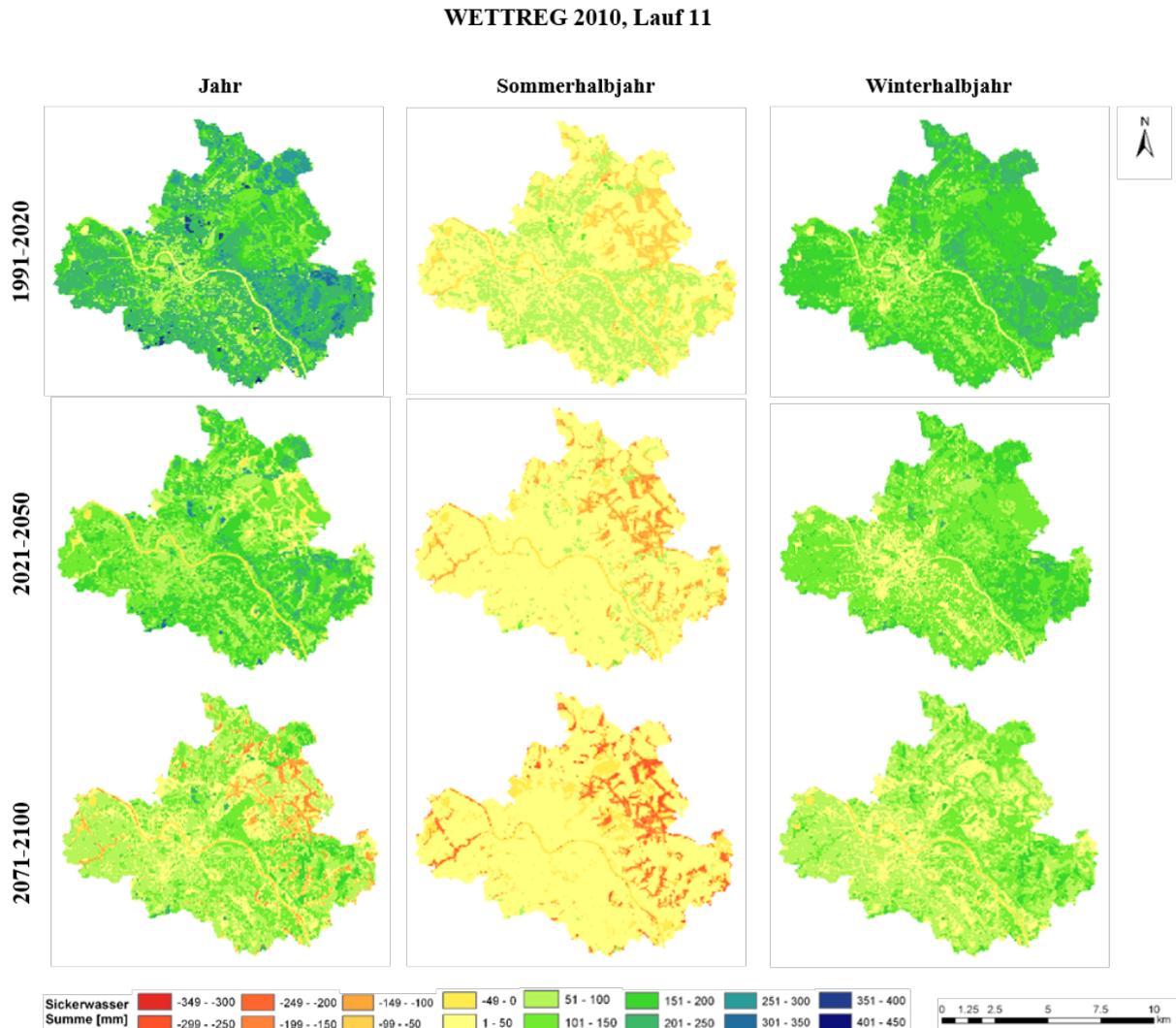


Abbildung 14: Räumliche Verteilung der simulierten langjährigen mittleren Sickerwassermenge [mm] der Klimamodelldaten des statistischen Regionalmodells WETTREG 2010 (Lauf 11) in den Zeiträumen 1991–2020 (oben), 2021–2050 (Mitte) und 2071–2100 (unten) für die Jahreswerte (links), das Sommerhalbjahr (Mitte) und das Winterhalbjahr (rechts).

Das statistische Klimamodell WETTREG 2010 (Lauf 11) projiziert bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einen deutlichen Rückgang der langjährigen mittleren Sickerwassermenge. Dieser Rückgang tritt sowohl im Sommer- als im Winterhalbjahr auf und ist besonders ausgeprägt zum Ende des 21. Jahrhunderts.

In Abbildung 15 sind die Änderungen in der räumlichen Verteilung der simulierten mittleren jährlichen Sickerwasserrate gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990 für die drei untersuchten WETTREG 2010-Läufe (00; 11; 66) dargestellt. Wie zu sehen ist, weisen die Differenzkarten der drei betrachteten Modellläufe in den einzelnen Projektionszeiträumen deutliche Unterschiede auf. Die Änderungen in der simulierten Sickerwasserrate schwanken für den Projektionszeitraum 1991-2020 zwischen -11 mm/a und +11 mm/a für Lauf 00, zwischen 0 mm/a

und -28 mm/a für Lauf 11 sowie zwischen +1 mm/a und -26 mm/a für Lauf 66. Lauf 00 (oben links) simuliert für das Dresdener Stadtgebiet im ersten Projektionszeitraum mehr oder weniger gleichbleibende Sickerwasserraten, wobei im Nordosten leicht abnehmende Sickerwasserraten zu verzeichnen sind. Bis auf den Innenstadtbereich, wo sich die zukünftigen Sickerwasserraten kaum gegenüber des Referenzzeitraumes verändern, kommt es bei Lauf 11 (oben, Mitte) im gesamten Dresdener Stadtgebiet, insbesondere im Bereich der Dresdener Heide und im östlichen Zipfel der Stadt, zu einem leichten Rückgang der zukünftigen Sickerwasserraten.

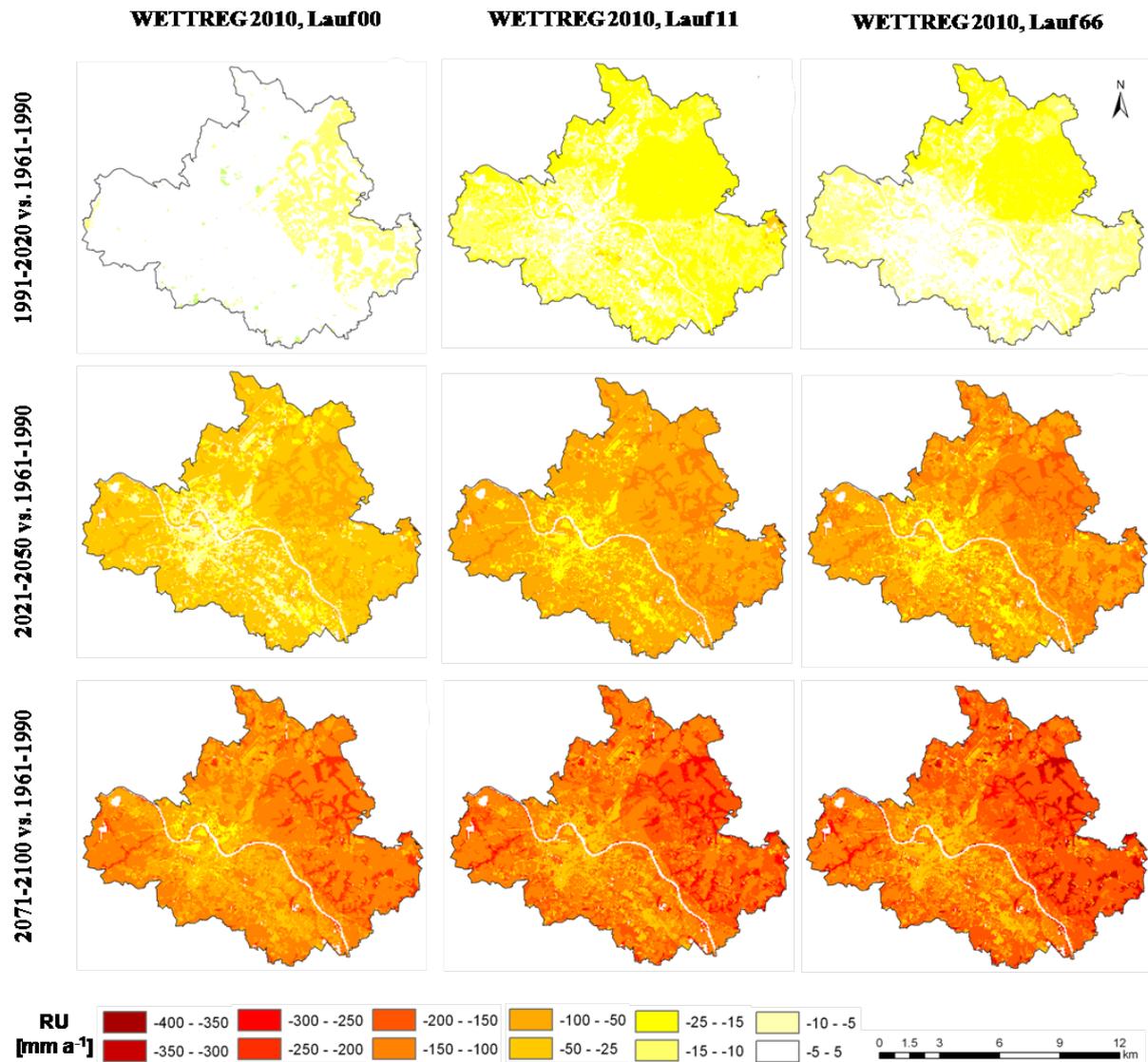


Abbildung 15: Differenzkarten der Änderungen der simulierten Sickerwasserrate RU in mm a<sup>-1</sup> für das Stadtgebiet Dresden für die Zeitscheiben 1991–2020 (oben), 2021–2050 (Mitte) sowie 2071–2100 (unten) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990 für die Läufe 00, 11 und 66 des regionalen Klimamodells WETTREG 2010; Emissionsszenario A1B.

Eher gleichbleibende Sickerwasserraten simuliert auch Lauf 66 für das Stadtgebiet, nur im Nordosten sind abnehmende Sickerwasserraten zu erkennen (oben rechts). Für die nahe Zukunft 2021-2050 simulieren alle drei Modellläufe einen deutlichen Rückgang der Sickerwasserraten gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990, sodass die Änderungen zwischen 0 mm/a und -174 mm/a schwanken. Die größten Änderungen treten in diesem Zeitraum bei Lauf 66 auf, die vor allem, wie auch bei den beiden anderen Läufen, das nordöstliche bis östliche sowie

das westliche Stadtgebiet betreffen und dabei im Bereich der Flussläufe vorzufinden sind. Im Bereich der Dresdener Innenstadt treten die geringsten Änderungen auf. Sehr große räumliche Änderungssignale im negativen Bereich (bis zu -360 mm/a) zeigen vor allem Lauf 11 und 66 in der fernen Zukunft 2071-2100. Diese starken Rückgänge hinsichtlich der zukünftigen mittleren langjährigen Sickerwasserrate treten besonders im Bereich der Flussläufe im Nordosten bis Südosten sowie im westlichen Stadtgebiet auf.

Die Unterschiede zwischen den drei Modellläufen sind vor allem auf die deutlich voneinander abweichenden Jahresniederschläge im gesamten Projektionszeitraum zurückzuführen. Der Lauf 00 wurde als ein eher „feuchter“ Lauf, Lauf 11 als ein „mittlerer“ Lauf und Lauf 66 als ein „trockener“ Lauf eingestuft. Diese Rangfolge ist auch in den einzelnen Differenzkarten für die nahe und die ferne Zukunft (2021-2050; 2071-2100) in Abbildung 15 deutlich zu erkennen.

#### **4.3 Abhängigkeiten von der Nutzungsart und dem Grundwasserflurabstand**

In der folgenden Abbildung (Abbildung 16) sind die mittleren Jahresverläufe der simulierten Sickerwasserrate für sieben Nutzungsarten in Abhängigkeit des Grundwasserflurabstandes (grundwassernah, grundwasserfern) für die Projektionsdaten des regionalen Klimamodells WETTREG 2010 (Lauf 11) unter dem SRES-Szenario A1B für den Referenzzeitraum 1961–1990 und die Zeitscheiben 1991–2020, 2021–2050 sowie 2071–2100 dargestellt.

Die unter Nutzung der WETTREG 2010-Daten simulierten monatlichen Sickerwasserraten zeigen im Referenzzeitraum 1961–1990 (Abbildung 16, ganz oben) einen sehr ähnlichen Jahresverlauf wie die Beobachtungsdaten. Es treten im Vergleich zu den Beobachtungsdaten vor allem in den Herbstmonaten September bis November, aber auch während der Wintermonate im Februar und teilweise im Dezember deutlich höhere Sickerwasserraten auf. Dagegen sind im Januar etwas geringere Sickerwasserraten zu verzeichnen. Mit Beginn der Vegetationsperiode im April kommt es zu einer starken Abnahme der Sickerwasserbildung bis hin zur Wasserzehrung vor allem bei den grundwassernahen Standorten mit Waldbeständen, aber auch landwirtschaftliche Nutzflächen und Grünlandbereiche zeigen Werte im eindeutig negativen Bereich ( $< -5$  mm pro Monat), sodass der Bodenspeicher durch den höheren Verdunstungsanspruch der Vegetation immer mehr entleert wird. Für die vegetationslosen Brachflächen und die teilversiegelten Flächen ist ebenfalls im Vergleich zu den Beobachtungsdaten ein deutlicher Rückgang der Sickerwasserbildung zu verzeichnen. Bei Standorten mit grundwasserfernen Verhältnissen kommt ebenfalls zu einer Abnahme der Sickerwasserbildung während der Sommermonate.

Für den kurzfristigen Planungshorizont bzw. die frühere Vergangenheit 1991–2020 (Abbildung 16; 2. Graphik von oben) werden auf der Grundlage der WETTREG 2010-Daten im Winterhalbjahr mit Ausnahme des Januars im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990 sowohl für die grundwassernahen als auch -fernen Standorte um bis zu -10 mm geringere Sickerwasserraten simuliert. Wohingegen in den Sommermonaten Juni und Juli höhere Sickerwasserraten auf den grundwassernahen sowie -fernen Standorten ohne Vegetation auftreten. Bei den grundwassernahen Waldstandorten hat sich der Zeitraum, wo Wasserzehrung auftritt bis in den September verlängert, sodass während der gesamten Vegetationsperiode bei grundwassernahen Standorten mit Vegetation keine Sickerwasserbildung stattfindet, sondern anfallendes Niederschlagswasser sofort wieder verdunstet wird. Die Wasserzehrung ist jedoch auf den Standorten mit Vegetation im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990 nicht so intensiv.

## WETTREG 2010, Lauf 11

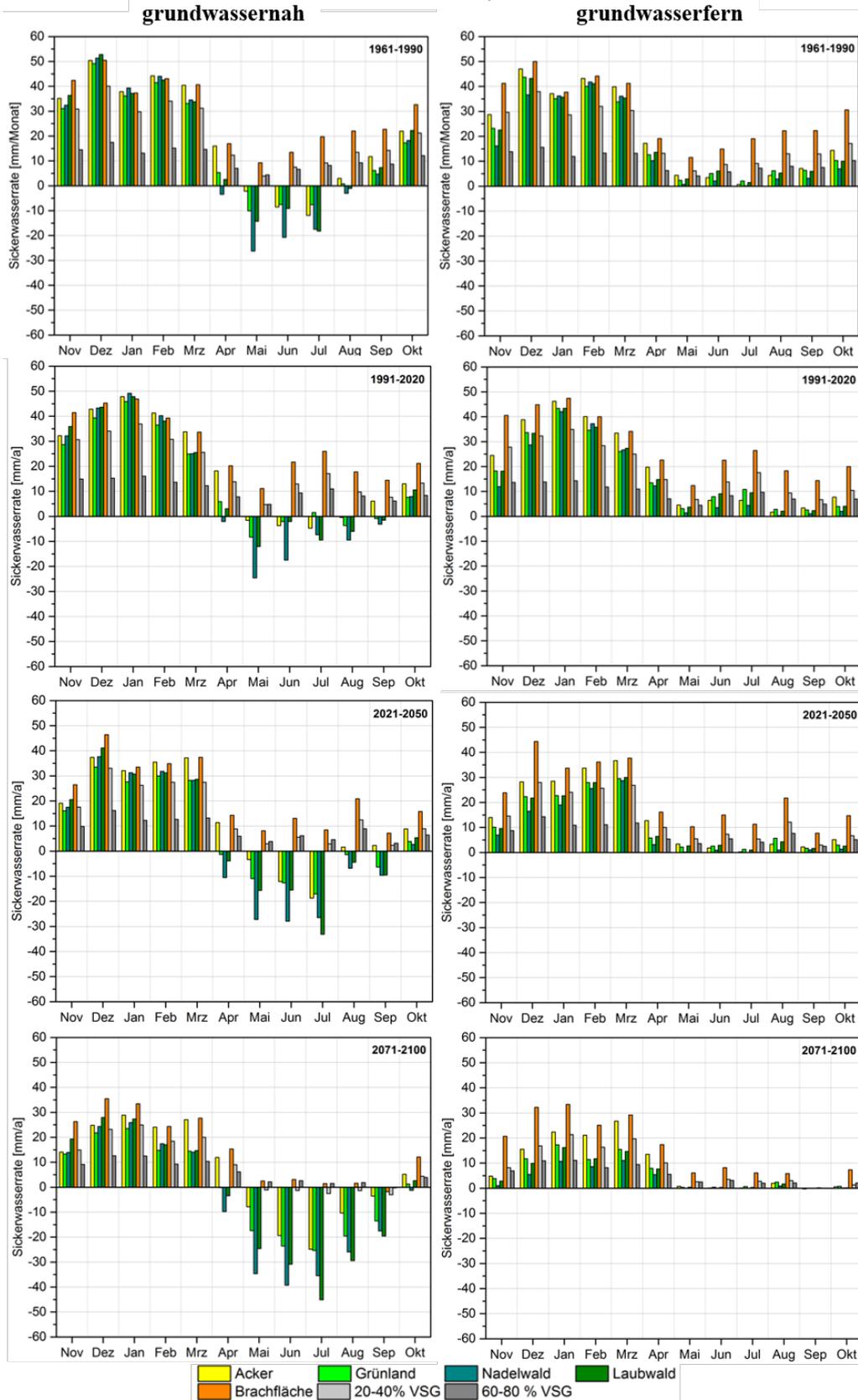


Abbildung 16: Jahrgang der simulierten Sickerwasserrate für ausgewählte Landnutzungstypen getrennt nach grundwassernahen (links) und grundwasserfernen (rechts) Standorten für die Klimamolldaten des Regionalmodells WETTREG 2010 (Lauf 11, SRES A1B) für den Referenzzeitraum 1961-1990 (oben) und die Zeitscheiben 1991-2020 (2. von oben); 2021-2050 (3. von oben) sowie 2071-2100 (unten).

Für die nahe Zukunft 2021-2050 projizieren die WETTREG 2010-Daten eine deutliche Abnahme der Sickerwasserraten im Jahresverlauf (Abbildung 16; 3. Graphik von oben). Der Jahresgang der Sickerwasserbildung ist mit Ausnahme der vegetationslosen Standorte nur gering ausgeprägt. Dies ergibt sich aus dem veränderten Niederschlagsverhalten und der höheren Temperaturen des verwendeten regionalen Klimamodells WETTREG 2010.

Während der Wintermonate treten auf den Standorten mit Vegetation deutlich geringere Sickerwasserraten auf. Mit beginnender Vegetationsperiode im April findet auf den Flächen mit Waldbestand und Grünland Wasserzehrung statt. Ab Mai kommt es auch auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen mit geringen Grundwasserflurabständen aufgrund der höheren Verdunstung zu einer ausgeprägten Wasserzehrung. Während der gesamten Vegetationsperiode zeigen die grundwassernahen Standorte mit Vegetation Werte im negativen Bereich. Besonders ausgeprägt ist die Wasserzehrung im Juli mit Werten  $< -20$  mm bzw.  $< -30$  mm auf Laubwaldstandorten. Nach der Vegetationsperiode findet im Oktober kaum Sickerwasserbildung statt – Standorte mit Vegetation weisen Sickerwasserraten  $< 10$  mm auf. Auch im November sind die Sickerwasserraten gegenüber des Referenzzeitraumes deutlich reduziert (-15 mm). Dies wirkt sich negativ auf den Bodenwasservorrat aus, der durch die geringen Sickerwasserraten verzögert bzw. nur unzureichend wiederaufgefüllt werden kann.

In der fernen Zukunft 2071–2100 (Abbildung 16; ganz unten) wirken sich die veränderten klimatischen Randbedingungen noch stärker auf die Sickerwasserbildung aus. Während der Wintermonate variieren die Sickerwasserraten in Abhängigkeit von der jeweiligen Nutzung nur noch zwischen 15 mm und knapp 30 mm pro Monat und betragen folglich zum Teil weniger als die Hälfte der für den Referenzzeitraum simulierten Sickerwasserraten. Die Brachflächen sind am wenigsten von diesen starken Rückgängen der Sickerwasserraten betroffen und weisen während der Wintermonate noch relativ hohe Sickerwasserraten auf. Der Zeitraum mit negativen Sickerwasserraten (Wasserzehrung) verlängert sich bis in den Oktober hinein, sodass von Mai bzw. April (Waldstandorte) bis September bzw. Oktober (Nadelwaldstandorte) alle grundwassernahen Flächen mit Vegetation negative Sickerwasserraten aufweisen. Für Teilversiegelte Flächen und Flächen ohne Vegetation sind die Sickerwasserraten auch gering und betragen  $\pm 3$  mm pro Monat auf grundwassernahen Standorten. Auf Standorten mit größeren Grundwasserflurabständen und mit Bewuchs (Abbildung 16; ganz unten rechts) findet im Sommerhalbjahr aufgrund der fehlenden bzw. unzureichenden Niederschläge keine Sickerwasserbildung statt, auch im Winterhalbjahr sind die Sickerwasserraten deutlich reduziert.

Die zukünftigen klimatischen Veränderungen wie sie von den WETTREG 2010-Daten (Lauf 11) projiziert werden, führen zu einem starken Rückgang der Sickerwasserraten besonders zum Ende des 21. Jahrhunderts. Durch die starke und sehr lang anhaltende Entleerung des Bodenwasserspeichers während des Sommerhalbjahres kann dieser nur sehr langsam bzw. nur unzureichend im Winterhalbjahr wieder aufgefüllt werden. Folglich kann viel weniger Sickerwasser die Grundwasseroberfläche erreichen und zur Grundwasserneubildung beitragen, was sich auch auf das zukünftige Wasserdargebot auswirkt. Am stärksten wirkt sich diese deutliche Abnahme der Sickerwasserrate auf die Standorte mit geringen Grundwasserflurabständen und Waldbestand, wie sie in der Dresdener Heide vorzufinden sind, aus. Aber auch die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Schönfelder Hochland können von der stark eingeschränkten Sickerwasserbildung und dem geringeren Wasserdargebot betroffen sein.

Da es sich bei dem ausgewählten Lauf 11 um einen „mittleren“ Lauf handelt, können die Ergebnisse auf Grundlage der anderen WETTREG 2010-Realisierungen auch anders ausfallen.

## 5 Fazit

Die Wahl des einfachen Bodenwasserhaushaltsmodells BOWAM erwies sich als sinnvoll, da schon dessen Parametrisierung aufgrund der sehr komplexen und heterogenen Standortbedingungen der Stadt Dresden sehr umfangreich war. Komplexere Modelle würden zum Teil noch deutlich umfangreichere Datengrundlagen benötigen, die zum Teil für urbane Gebiete nicht vorliegen. Insgesamt scheint dennoch der Vergleich zu den mit anderen Wasserhaushaltsmodellen erzielten Ergebnissen als sinnvoll.

Grundsätzlich hängen die modellierten Grundwasserneubildungen sehr stark von ihren Eingangsparametern ab – die Ergebnisse können nur so gut wie ihre Eingangsdaten sein. Gerade in urbanen Gebieten ist die Erhebung der Datengrundlage jedoch mit vielen Unsicherheiten behaftet.

Für das 21. Jahrhundert wird eine starke Abnahme der Sickerwasserrate projiziert. Sie beträgt 30 bis 50 Prozent für die Mitte und bis zu 70 % für das Ende des 21. Jahrhunderts. Diese enormen Rückgänge der Sickerwasserbildung sind auf eine höhere Verdunstung und auf die starke Abnahme der Jahresniederschläge bei WETTREG 2010 vor allem in der Zeitscheibe 2071–2100 zurück zu führen. Bei WETTREG 2010 ist der simulierte Rückgang der Niederschläge in den Wintermonaten teilweise sogar ausgeprägter als in den Sommermonaten, dabei tragen insbesondere die Wintermonate derzeit zum Auffüllen der in den Sommermonaten entleerten Bodenwasservorräte bei. Die Folge ist ein drastischer Rückgang des Wasserdargebots. Durch die Abnahme der Sickerwasserrate und folglich der Grundwasserneubildung ist auch zukünftig mit größeren Grundwasserflurabständen zu rechnen. Diese Grundwasserflurabstandsänderungen wirken sich nicht nur negativ auf grundwasserabhängige Ökosysteme aus, sondern auch auf die Bebauung und die Infrastruktur einer Stadt. Bereiche wie die Dresdener Heide im Nordosten mit grundwassernahen Verhältnissen, Waldbeständen und sandigen Böden, die das Niederschlagswasser nicht zurückhalten können, sind Bereiche mit besonders starken Defiziten in der Grundwasserneubildung.

Bei der Ableitung von Anpassungs- und Handlungsmaßnahmen sind vor allem die großen Unsicherheiten der Klimaprojektionsdaten zu beachten [28]. Die Beobachtung der tatsächlichen Entwicklung der Sickerwasser- und schließlich der Grundwasserneubildung auf der Grundlage neuer Klimaprojektionen hat in der Zukunft eine besonders große Bedeutung. Daher ist ein umfassendes Monitoring der tatsächlich eintretenden Veränderungen sowie robuster und vor allem flexibler Anpassungsmaßnahmen, bezüglich des Wasserdargebotes besonders wichtig. Die Mengen an neu gebildetem Sickerwasser bzw. Grundwasser stehen im direkten Zusammenhang mit der Planung neuer Entwässerungskonzepte und bilden eine Entscheidungsgrundlage hinsichtlich der zukünftigen Gewährleistung von bestehenden Nutzungsansprüchen. Denn Industrie und produzierendes Gewerbe nutzen wieder verstärkt Grundwasser als Prozess- und Kühlwasser. Außerdem gewinnt die Nutzung des Grundwassers für energetische Zwecke und zur Klimatisierung von Gebäuden immer an Bedeutung. In den Sommermonaten ist in längeren Trockenperioden mit einem steigenden Bedarf an Bewässerungswasser zu rechnen. Der errechnete Rückgang der Sickerwasserrate und damit der Grundwasserneubildung wird die Versorgungssicherheit in Dresden voraussichtlich nicht beeinträchtigen. Bereits jetzt und in den Folgejahren sind trotzdem erhöhte Anstrengungen zur Verbesserung der Sickerwasserbildung im urbanen Raum zu unternehmen. Wichtige Bausteine können dabei Flächennutzungen mit ausreichend Grün- und Freiflächen sein. Das Niederschlagswasser muss so bewirtschaftet werden, dass die Bildung von Sickerwasser gefördert wird. Außerdem sollte die Flächenversiegelung minimiert werden und wenn möglich durch wasserdurchlässige Beläge ersetzt werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] BEIER, M.: *Urbane Beeinflussung des Grundwassers: Stoffemissionen und –immissionen am Beispiel Darmstadts*. Dissertationsschrift, 2008
- [2] KLINGER, J.: *Beschreibung der Wasser- und Stoffflüsse in einem urbanen Raum unter besonderer Berücksichtigung von Kanalleckagen*. Dissertationsschrift, 2007
- [3] LERNER, D.N.: *Groundwater recharge in urban areas*. Atmospheric Environment, Part B. Urban Atmosphere 24(1): 29-33, 1990
- [4] LERNER, D.N.: *Identifying and quantifying urban recharge, a review*. Hydrogeology Journal 10(1): 143-152, 2002
- [5] *DIN 4049-3 Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994
- [6] LORZ, C. ; HAASE, D.: *Stoff- und Wasserhaushalt in Einzugsgebieten. Beiträge zur EU-Wasserrahmenrichtlinie und Fallbeispiele*. 2004
- [7] DÖRHÖFER, G. ; JOSOPAIT, V.: *Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate*. Geol. Jb., 27: 45-65, 1980
- [8] SCHROEDER, M. ; WYRWICH, D.: *Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode der flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate*. DGM, 34: 12-16, 1990
- [9] BAGROV, N. A.: *Über den vieljährigen Verdunstungsdurchschnitt von der Oberfläche des Festlandes (in russ.)*. Meteorologia i Gidrologia, 10: 20-25; Leningrad, 1953
- [10] GLUGLA, G. ; ENDERLEIN, R. ; EYRICH, A.: *Das Programm RASTER - ein effektives Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Lockergestein- Wasserwirtschaft*. Wassertechnik, 26 (11): 377-382, 1976
- [11] RENGER, M. ; STREBEL, O.: *Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften*. Wasser u. Boden, 32 (8): 362-366, 1980
- [12] RENGER, M. ; WESSOLEK, G.: *Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderung auf die Grundwasserneubildung*. Mitt. Inst. für Wasserwesen, Univ. der Bundeswehr München, 386: 295-307; München, 1990
- [13] WESSOLEK, G. ; KLUGE, B. ; NEHLS, Th. ; KOCHER, B.: *Aspekte zum Wasserhaushalt und Stofftransport urbaner Flächen*. Fachbeiträge Gewässer und Boden. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 2009, 2009
- [14] LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE: *Fachkonzept zur Berechnung des Wasserhaushalts für den Fest- und Lockergesteinsbereich in Sachsen mit dem Schwerpunkt Grundwasserhaushalt („Grundwasserhaushalt Sachsen“)*. 2008

- [15] AD-HOC-AG HYDROGEOLOGIE UND DER AD-HOC-AG BODEN DES BUND/LÄNDER-AUSSCHUSSES BODENFORSCHUNG (BLA-GEO): *Empfehlungen für die Charakterisierung und Parametrisierung des Transportpfades Boden - Grundwasser als Grundlage für die Sickerwasserprognose*. 2008
- [16] MÜNCH, A. ; DITTRICH, I. ; WAHREN, A.: *The Effects of Changes in Tree Species Composition and of Afforestation on Water Budget and Flood Dynamics Calculated with AKWA-M<sup>®</sup>, Ore Mountains*. 2007. – in: FEGGER, K.H., Wang, Y., Bernhofer, C., Seegert, J. (Eds.): *Progress in Hydro Science and Engineering, Dresden Water Center Volume 3/2007*, pp. 331 – 337, Dresden, ISBN: 978-3-86780-074-7
- [17] SCHWARZE, R. u. a.: *Regionalspezifische Untersuchungen um Wasser- und Stofffluss im Festgesteinsbereich*. 2004. – In: Becker, A., Lahmer, W. (Hrsg.) *Wasser- und Nährstoffhaushalt im Elbegebiet und Möglichkeiten zur Stoffeintragsminderung. - Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*. Weißensee-Verlag, Berlin
- [18] SCHULLA, J.: *Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaveränderungen*. Dissertation Nr. 12018, ETH Zürich, Verlag Geographisches Institut der ETH Zürich, 1997
- [19] PFÜTZNER, B.: *Modelldokumentation ArcEGMO*. 2002
- [20] DUNGER, V.: *Dokumentation des Modells BOWAM (Version 2002) zur Simulation des Wasserhaushaltes in der wasserungesättigten Bodenzone (Aerationszone) Windows-Oberfläche Eingabeteilmodell BOWAMINP - 04/2002, BOWAMINP-Oberfläche: 04/2006, Freiberg*. 2006
- [21] DUNGER, V.: *Dokumentation der Modelle BOWAM und BOWAHALD zur Simulation des Wasserhaushaltes von Böden sowie Oberflächensicherungssystemen von Halden und Deponien*. 2017
- [22] KÖPPEN, W. ; GEIGER, R.: *Handbuch der Klimatologie, Band I, Teil C: Das geographische System der Klimata*. Verlag von Gebrüder Borntraeger. Berlin,
- [23] ROECKNER, E. ; BRASSEUR, G.P. ; GIORGETTA, M. ; JACOB, D. ; JUNGCLAUS, J. ; REICK, C. ; SILLMANN, J.: *Climate projections for the 21<sup>st</sup> century*. Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, 2006
- [24] HÄNSEL, S. ; ULLRICH, K. ; SOMMER, T. ; BENNING, R. ; PRANGE, N. ; MATSCHULLAT, J.: *Regionaler Wasserhaushalt im Wandel. Klimawirkungen und Anpassungsoptionen in der Modellregion Dresden*. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 5. Rhombos-Verlag, Berlin, 2013
- [25] BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT) (HRSG. 1998, 2001, 2003): *Hydrologischer Atlas von Deutschland. 1. Lieferung (1998), 2. Lieferung (2001) und 3. Lieferung, Bonn*. 2003
- [26] FRITZSCH, D.: *Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate in der Dresdener Heide*. Unveröffentlichte Diplomarbeit. TU Bergakademie Freiberg. Fakultät Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau. Institut für Geologie, 2010
- [27] KLUCK, G.: *Modellierung des Wasserhaushaltes für den quartären Elbtalaquifer im Stadtgebiet von Dresden*. Unveröffentlichte Diplomarbeit. TU Bergakademie Freiberg. Institut für Mineralogie. 2010, 2012
- [28] BERNHOFER, C. ; MATSCHULLAT, J. ; BOBETH, A.: *Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden*. Rhombos Verl. Berlin, 2011