

**Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM -**  
Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden

## **Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

## **Zitiervorschlag:**

HÄNSEL, S.; ULLRICH, K.; SOMMER, T.; BENNING, R.; PRANGE, N.; MATSCHULLAT, J. (Hrsg.):  
Regionaler Wasserhaushalt im Wandel. Klimawirkungen und Anpassungsoptionen in der Modellregion  
Dresden. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 5. Rhombos-Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-944101-14-9.

## **Impressum**

### **REGKLAM-Publikationsreihe**

Erarbeitet im Rahmen des BMBF-geförderten Verbundvorhabens REGKLAM –  
*Entwicklung und Erprobung eines integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms  
für die Modellregion Dresden (Juli 2008 – Dezember 2013).*

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert REGKLAM im Rahmen seines  
Forschungsprogramms „KLIMZUG – Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“  
([www.klimzug.de](http://www.klimzug.de)).

Förderkennzeichen: FKZ 01LR0802  
Internet: [www.regklam.de](http://www.regklam.de)

### **Herausgeber:**

Dr. Stephanie Hänsel (verantwortlich)  
Dr. Kirsten Ullrich  
Dr. Thomas Sommer  
Raphael Benning  
Norbert Prange  
Prof. Dr. Jörg Matschullat

### **Redaktionsschluss:**

Oktober 2013

### **Titelbild:**

Foto: Umweltamt Landeshauptstadt Dresden

### **Verlag:**

RHOMBOS-VERLAG  
Kurfürstenstraße 17  
D-10785 Berlin  
Internet: [www.rhombos.de](http://www.rhombos.de)

### **Druck und Bindung:**

dbusiness.de GmbH, Berlin

Printed in Germany

### **© 2013 RHOMBOS-Verlag, Berlin**

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, verboten.

Kein Teil dieses Werkes darf außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes  
ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm  
oder ein anderes Verfahren) reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme  
gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verarbeitet werden.

**ISBN: 978-3-944101-14-9**

# **Regionaler Wasserhaushalt im Wandel Klimawirkungen und Anpassungsoptionen in der Modellregion Dresden**

Stephanie Hänsel, Kirsten Ullrich, Thomas Sommer,  
Raphael Benning, Norbert Prange, Jörg Matschullat

(Hrsg.)

## **Autoren** (Kapitel bzw. Abschnitte)

TU Bergakademie Freiberg (TUBAF)

Stephanie Hänsel (► 1.2, 2, 4.1 & 5)

Sabine Tesch (► 2.1, 3.3 & 4.3.1)

Daniel Leistner (► 4.1)

Volkmar Dunger (► 4.1)

Jörg Matschullat (► 6)

Anne Schucknecht (► 1)

TU Dresden (TUD)

Norbert Prange (► 2.1, 2.4, 3.1 & 4.2.1)

Raphael Benning (► 3.2 & 4.2.2)

Ruben Müller (► 5.1)

Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V. (DGFZ)

Thomas Gottschalk (► 3.4 & 4.3.2)

Uwe Stodolny (► 4.3.2)

Thomas Sommer (► 1.2, 4.3.2 & 5)

Landeshauptstadt Dresden (LHD)

Kirsten Ullrich (► 1.2, 5.2 & 5.3)



# Ergebnisse des Verbundvorhabens REGKLAM

## Klimaanpassungsprogramm

Das Integrierte Regionale Klimaanpassungsprogramm für die Region Dresden ist ein zentrales Ergebnis des Netzwerkvorhabens REGKLAM.

Das Programm beschreibt die wichtigsten klimatischen und gesellschaftlichen Grundlagen, formuliert programmatische Ziele und beschreibt mehr als 160 Maßnahmen für die sektorübergreifende Anpassung an die Folgen des Klimawandels in der Region Dresden. Ausgewählte Handlungsoptionen sind in Maßnahmenblättern vertiefend behandelt.

Das kurzgefasste Strategiekonzept gibt einen Überblick über die wichtigen Themen der Klimaanpassung in der Region.



[www.regklam.de/Klimaanpassungs-programm/](http://www.regklam.de/Klimaanpassungs-programm/)

## Projektinformationen

Alle Ergebnisse des REGKLAM-Vorhabens sind anschaulich auf der Projekt-Homepage aufbereitet:

- Ergebnisse aus den Teilprojekten
- Informationen über das Projekt und seine Partner
- Das REGKLAM-Diskussions-Forum

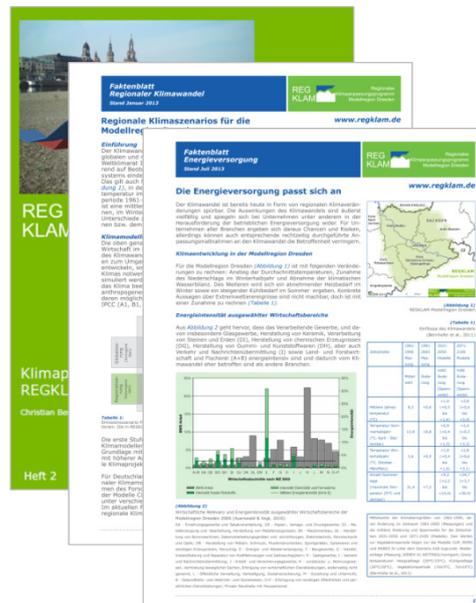


[www.regklam.de](http://www.regklam.de)

## Projektergebnisse

Einzelne Ergebnisse des REGKLAM-Vorhabens liegen in verschiedenen Formaten vor:

- Hefte der REGKLAM-Publikationsreihe
- Faktenblätter zum regionalen Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen
- Forschungsberichte (REGKLAM-Produkte)
- Weitere Publikationen



[www.regklam.de/publikationen/](http://www.regklam.de/publikationen/)

# REGKLAM - Publikationsreihe

In dieser Reihe liegen folgende Bände vor (Stand Oktober 2013):

**Heft 1 Das Klima in der REGKLAM-Modellregion Dresden**

BERNHOFER, C.; MATSCHULLAT, J.; BOBETH, A. (Hrsg.) (2009): Das Klima in der REGKLAM-Modellregion Dresden. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 1. Rhombos-Verlag, Berlin. 128 Seiten, ISBN: 978-3-941216-22-8.

**Heft 2 Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden**

BERNHOFER, C.; MATSCHULLAT, J.; BOBETH, A. (Hrsg.) (2011): Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 2. Rhombos-Verlag, Berlin. 120 Seiten, ISBN: 978-3-941216-71-6.

**Heft 3 Gebäude unter den Einwirkungen des Klimawandels**

WELLER, B.; NAUMANN, T.; JAKUBETZ, S. (Hrsg.) (2012): Gebäude unter den Einwirkungen des Klimawandels. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 3. Rhombos-Verlag, Berlin. 154 Seiten, ISBN: 978-3-941216-96-9.

**Heft 4 Gebäudeertüchtigung im Detail für den Klimawandel**

WELLER, B.; FAHRION, M.-S.; NAUMANN, T. (Hrsg.) (2013): Gebäudeertüchtigung im Detail für den Klimawandel. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 4. Rhombos-Verlag, Berlin. 158 Seiten, ISBN: 978-3-944101-04-0.

**Heft 5 Regionaler Wasserhaushalt im Wandel**

HÄNSEL, S.; ULLRICH, K.; SOMMER, T.; BENNING, R.; PRANGE, N.; MATSCHULLAT, J. (Hrsg.) (2013): Regionaler Wasserhaushalt im Wandel. Klimawirkungen und Anpassungsoptionen in der Modellregion Dresden. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 5. Rhombos-Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-944101-14-9.

**Heft 6 Grundlagen für eine klimawandelangepasste Stadt- und Freiraumplanung**

WENDE, W.; RÖBLER, S.; KRÜGER, T. (Hrsg.) (in Vorbereitung): Grundlagen für eine klimawandelgerechte Stadt- und Freiraumplanung, REGKLAM Publikationsreihe, Heft 6. Rhombos-Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-944101-15-6.

**Heft 7 Integriertes Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Region Dresden  
Grundlagen, Ziele und Maßnahmen**

REGKLAM-KONSORTIUM (Hrsg.) (2013): Integriertes Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Region Dresden. Grundlagen, Ziele und Maßnahmen. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 7. Rhombos-Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-944101-17-0.

## Vorwort zu Heft 5

Physischer Klimawandel, ob global oder regional, hat neben der Veränderung des atmosphärischen Temperatursignals seine stärksten Auswirkungen in der Veränderung hydrologischer Parameter. Während der Band 1 der REGKLAM-Reihe die aktuelle Meteorologie und Klimatologie der Modellregion Dresden beschreibt (Bernhofer et al. 2009) und Band 2 die modellbasierten Projektionen bis in das Jahr 2100 darstellt (Bernhofer et al. 2011), widmet sich dieser Band, darauf aufbauend, dem hydrologischen Wandel in der Region. Hydrologische Analysen orientieren sich im Normalfall nicht an administrativen Grenzen – wie denen der REGKLAM-Modellregion Dresden – sondern werden auf Einzugsgebiete-ebenen vorgenommen. Daher liegt der Fokus dieses Bandes auf ausgewählten kleinen Einzugsgebieten innerhalb der Modellregion Dresden mit vergleichsweise guter Datengrundlage. Deren Ergebnisse sind weitgehend übertragbar auf die Gesamtregion.

Im REGKLAM-Projekt beschäftigten sich innerhalb des Teilmoduls 3.2 „Wassersysteme“ mehrere Teilprojekte mit den Veränderungen im regionalen Wasserhaushalt und dem daraus erwachsenden Anpassungsbedarf sowie den eher technischen Anpassungsaspekten der Wasserver- und -entsorgung. Dieser Band konzentriert sich auf die Darstellung der wesentlichen Ergebnisse der Teilprojekte 3.2.1 „Wasserhaushalt im Einzugsgebiet von Talsperren“ und 3.2.2 „Wasserhaushalt Stadt-Umland“. Die in den Teilprojekten 3.2.3 „Wasserversorgung“ und 3.2.4 „Abwasserentsorgung“ erarbeiteten Anpassungsbedarfe und (ingenieurtechnischen) Maßnahmen sind unter anderem im 7. Band dieser Reihe (REGKLAM-Konsortium 2013) zusammengefasst, wo auch weitere Ausführungen zu den Anpassungsmaßnahmen im Bereich des Wasserhaushalten nachzulesen sind.

Der Fokus dieses Bandes liegt auf dem Oberflächen- und dem Grundwasser. Unter Nutzung von vier ausgewählten Impaktmodellen werden der (Oberflächen-)Wasserhaushalt von städtischen und Talsperren-Einzugsgebieten sowie der Grundwasserhaushalt der Stadt Dresden quantifiziert

und deren für das 21. Jahrhundert erwartete Veränderungen abgeschätzt. Dabei werden auch qualitative Aspekte betrachtet.

Die in diesem Band dargelegten Impaktanalysen basieren weitgehend auf den Projektionen der beiden regionalen Klimamodelle WETTREG 2010 und CLM. Durch die von den Modellen für das 21. Jahrhundert sehr unterschiedlich projizierte Niederschlagsentwicklung in der Modellregion ergibt sich eine große Bandbreite zukünftig möglicher Entwicklungen des regionalen Wasserhaushaltes, die robuste und/ oder flexible Anpassungsmaßnahmen verlangt. Die sich aus der Wahl des Klimamodells, des Emissions-szenarios und des Wirkmodells ergebenden Unsicherheiten werden im Heft an verschiedener Stelle thematisiert. Zudem wird der Einfluss der weiteren für die Impaktmodellierung notwendigen Geobasisdaten auf die Simulationsergebnisse thematisiert. Diese liegen selbst in so hochentwickelten Ländern wie Deutschland nicht immer in der erforderlichen Qualität und Quantität vor und müssen zum Teil mühsam aus verschiedensten Quellen zusammengepuzzelt oder abgeschätzt werden.

Der vorliegende Band 5 der REGKLAM-Publikationsreihe entstand aus der Zusammenarbeit von Mitarbeitern der Projektpartner TU Bergakademie Freiberg, TU Dresden, Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V. und Landeshauptstadt Dresden. Zudem wurden im Verlauf der Projektarbeit vielfältige weitere assoziierte Praxispartner eingebunden, um die Analysen möglichst bedarfs-, praxis- und umsetzungsge-recht zu gestalten.

Wir danken allen an der Entstehung dieses Bandes Beteiligten für ihre intensive, zum Teil recht kurzfristige Mitarbeit und die oft sehr kreativen Beiträge. Großer Dank für die langfristige Förderung des REGKLAM-Projektes gebührt ferner dem BMBF.

Stephanie Hänsel & Jörg Matschullat  
(TU Bergakademie Freiberg)



<b>1</b>	<b>Hydrologischer Wandel</b> .....	<b>1</b>
1.1	Wasserkreislauf und Wasserhaushalt .....	1
1.2	Wasserhaushalt des Stadtgebietes Dresden .....	2
1.3	Klima- und Landnutzungswandel, Hydrologie .....	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1	Das Klima der Modellregion .....	5
2.2	Meteorologische Beobachtungsdaten .....	6
2.3	Klimaprojektionsdaten.....	7
2.4	Umgang mit Unsicherheiten .....	10
2.5	Regionaler Klimawandel.....	14
<b>3</b>	<b>Wirkmodelle</b> .....	<b>25</b>
3.1	WaSiM-ETH.....	25
3.2	SWAT.....	28
3.3	BOWAM.....	30
3.4	PCGEOFIM .....	34
<b>4</b>	<b>Simulierte Änderungssignale</b> .....	<b>37</b>
	Vorbemerkungen	
4.1	Urbane Fließgewässer .....	38
4.2	Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet von Talsperren.....	56
4.2.1	Änderungen im Wasserhaushalt von Talsperren-Einzugsgebieten, einschließlich der Bewertung von Unsicherheiten .....	56
4.2.2	Stoffausträge aus einem mesoskaligen Talsperren-Einzugsgebiet .....	76
4.3	Grundwasser.....	88
4.3.1	Grundwasserneubildung .....	88
4.3.2	Grundwasserbilanzen und Grundwasserstände .....	106
<b>5</b>	<b>Mögliche Auswirkungen und Anpassungsoptionen</b> .....	<b>125</b>
	Vorbemerkungen	
5.1	Talsperrenbewirtschaftung .....	127
5.2	Grundwasserbewirtschaftung.....	143
5.3	Umwelt- und Prozessmonitoring.....	153
<b>6</b>	<b>Zusammenfassende Gesamtbetrachtung und Bewertung</b> .....	<b>155</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>165</b>
<b>Anhang</b>	.....	<b>172</b>



# 1 Hydrologischer Wandel

## 1.1 Wasserkreislauf und Wasserhaushalt

Anne Schucknecht (TUBAF)

Der Wasserkreislauf, auch hydrologischer Kreislauf genannt, umfasst den Transport und die Speicherung von Wasser auf, über und unter der Erdoberfläche (Abb. 1.1-1) und wird durch die Sonnenenergie angetrieben. Beim Übergang des Wassers von einem zu einem anderen Speicher wirken verschiedene physikalische Prozesse, wie Verdunstung (Evaporation) und Transpiration, Kondensation, Niederschlag, Infiltration, Oberflächen- und Grundwasserabfluss. Das Wasser kann dabei verschiedene Aggregatzustände (fest, flüssig, gasförmig) annehmen.

Das über Meer und Festland verdunstende Wasser steigt in der Atmosphäre auf, kühlt ab und kondensiert, sobald der Taupunkt erreicht ist – es bilden sich Wolken. Das in der Atmosphäre

gespeicherte Wasser wird durch den Wind transportiert. Kühlt sich die mit Wasser gesättigte Luft weiter ab, fällt Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel) zur Erde. Bei entsprechend niedrigen Temperaturen kann der Niederschlag in Form von Eis und Schnee zwischengespeichert werden. Ansonsten fließt das Wasser oberflächlich ab oder infiltriert in den Boden, wo es entweder lateral abfließen oder Grundwasser bilden kann. Über den Abfluss der Flüsse und des Grundwassers gelangt das Wasser dann wieder ins Meer; kann auf seinem Weg dorthin jedoch auch in Seen zwischengespeichert werden. Ein wichtiger Teilbereich des Wasserkreislaufes ist die Aufnahme durch Pflanzen, die einen Teil des Wassers über Transpiration wieder an die Atmosphäre abgeben.



Abb. 1.1-1: Der Wasserkreislauf (Quelle: <http://ga.water.usgs.gov/edu/wcpagesize/german.html>).

Der Wasserhaushalt beschreibt die Aufnahme, Abgabe und Speicherung von Wasser in einem definierten Gebiet und repräsentiert eine Quantifizierung der Wasserkreislaufelemente Niederschlag, Evapotranspiration, Abfluss (unter- und oberirdisch) sowie Speicheränderung. Der Was-

serhaushalt kann z.B. für Kontinente, Länder, Regionen und Einzugsgebiete bestimmt werden. Der Wasserhaushalt einer Region gibt zudem Auskunft über die Verfügbarkeit von Wasser und bestimmt direkt die Bewirtschaftungsmöglichkeiten eines Gebietes.

## 1.2 Wasserhaushalt des Stadtgebietes Dresden

*Stephanie Hänsel (TUBAF), Kirsten Ullrich (LHD), Thomas Sommer (DGFZ)*

Als Grundlage für die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Änderungen im regionalen Wasserhaushalt wird in diesem Abschnitt der rezente Wasserhaushalt im Stadtgebiet von Dresden quantifiziert (Abb. 1.2-1). Zudem werden die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten und die entsprechenden Wasserflüsse dargestellt. Die folgenden Abschätzungen und Beschreibungen der Wassermengen und -flüsse basieren auf den Ausführungen im „Umweltbericht Grundwasser“ der Landeshauptstadt Dresden (2010b).

Ausgehend von einer mittleren Jahresniederschlagssumme von 697 mm steht im Stadtgebiet Dresden durchschnittlich eine Wassermenge von  $627.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  zur Verfügung. Ein Teil davon wird von der Vegetation aufgenommen und über Transpiration wieder abgegeben – ein weiterer Teil verdunstet direkt von den benetzten Oberflächen bzw. den Gewässern. Die Evapotranspiration wird insgesamt auf circa 390 mm geschätzt. Das entspricht einer Menge von  $351.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ . Der Rest des Niederschlagswassers fließt entweder oberirdisch im natürlichen Gewässernetz ab, wird nach oberflächlichem Abfluss von der Kanalisation gefasst (ca.  $75.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) oder versickert und kann damit zur Grundwasserneubildung beitragen ( $125.400 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ).

Oberflächengewässer sowie Grundwasser fließen durch das Stadtgebiet von Dresden und beeinflussen durch ihre Zu- und Abflussmengen den Wasserhaushalt der Region. Die Elbe, welche das Stadtgebiet auf einer Länge von ca. 30 km durchfließt, hat mit einer durchschnittlichen Abflussmenge von etwa 28 Mio.  $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$  ( $324 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) den größten Beitrag am oberirdischen Zufluss in das sowie am Abfluss aus dem Stadtgebiet. Die Gewässer erster Ordnung Weißeritz und Lockwitz führen mit  $280.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  durchschnittlich nur circa ein Hundertstel der durch die Elbe transportierten Wassermengen in das Stadtgebiet. Noch deutlich geringer fällt mit etwa  $51.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  der Beitrag der Gewässer zweiter Ordnung zum Gebietszufluss aus. Über den quartären Grundwasserleiter werden dem Stadtgebiet rund  $9.200 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  zugeführt.

Während die Gewässer erster Ordnung ihr Wasser in die Elbe abgeben, führen die Gewässer zweiter Ordnung etwa  $82.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  aus dem Stadtgebiet von Dresden in die Gewässersysteme

der Großen Röder und der Wesenitz ab. Der obere, quartäre Grundwasserleiter gibt an der nordwestlichen Stadtgrenze ca.  $3.900 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  in Richtung Meißen ab. Unterirdisch zugeführt werden diesem Grundwasserleiter über seine Ränder circa  $46.500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ . Aus dem gespannten unteren Kreide-Grundwasserleiter kommen weitere rund  $2.900 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  hinzu. In die Elbe strömen aus dem quartären Grundwasserleiter über die gesamte Flusslänge innerhalb der Stadtgrenzen im Mittel rund  $112.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  ab. Weitere  $30.500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  strömen in kleinere Gewässer ab.

Der untere Kreidegrundwasserleiter wird mit etwa  $6.500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  durch die Grundwasserneubildung gespeist. Die Neubildungsflächen liegen am südlichen Stadtrand von Dresden zwischen Lockwitz und Briesnitz. Auf Grund der unterirdischen Morphologie des Kreide-Grundwasserleiters fließen an der Stadtgrenze rund  $1.800 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ , davon rund  $1.400 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  in Richtung Pirna und  $400 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  in Richtung Radebeul/Meißen. Im Bereich des Lockwitztales gibt der Kreide-Grundwasserleiter etwa  $1.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  in den Vorfluter Lockwitz ab.

Neben den soeben beschriebenen mehr oder weniger natürlichen Größen wird der Wasserhaushalt urbaner Gebiete durch anthropogene Einflüsse modifiziert. Die Intensität der Bebauung und Versiegelung von Flächen beeinflusst stark die soeben beschriebenen Mengen des Oberflächenabflusses sowie die Versickerungs- und damit Grundwasserneubildungsraten. Zudem wird Regenwasser in die Kanalisation abgeleitet. Wasserentnahmen erfolgen zur Sicherung des Trink- und Brauchwasserbedarfs.

Im Regelbetrieb speisen die DREWAG Stadtwerke Dresden GmbH  $100.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  Trinkwasser in das Netz ein. Zur Deckung dieses Bedarfs ist die natürliche Grundwasserneubildung auf der Fläche des quartären Grundwasserleiters (ca.  $42.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) bei weitem nicht ausreichend. Derzeit werden circa  $64.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  aus den Talsperrren des Erzgebirges zugeleitet. Die restlichen  $36.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  werden aus dem quartären Grundwasserleiter gewonnen, davon mehr als die Hälfte ( $19.500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) aus Uferfiltrat der Elbe. Der Kreide-Grundwasserleiter wird derzeit nicht für die Trinkwassergewinnung genutzt und bildet eine – vor Beeinträchtigungen zu schützende –

städtische Reserve für die Versorgung in Notzeiten. Von der gesamten aufbereiteten Trinkwassermenge werden etwa  $12.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  an Versorgungsnetze außerhalb von Dresden abgegeben. Neben der Trinkwasserversorgung wird Grundwasser auch für Brauchwasserzwecke genutzt. So werden circa  $22.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  aus dem quartären Grundwasserleiter entnommen. Nur ein kleiner Teil des Brauchwassers ( $1.400 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) wird in den quartären Grundwasserleiter zurückgeführt. Dabei handelt es sich vor allem um energetisch genutztes Wasser von Grundwasserwärmepumpen und Klimatisierungsanlagen.

Der Wasserhaushalt des quartären Grundwasserleiters wird zudem durch die unterirdischen Leitungssysteme (Trinkwassernetz und Kanalnetz) beeinflusst. Durch Rohrnetzverluste aus dem öffentlichen Trinkwassernetz gelangen schätzungsweise  $18.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  und aus der Kanalisation etwa  $8.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  in das Grundwasser. Jedoch nimmt die Kanalisation – in Be-

reichen in denen sie im Grundwasser liegt – bis zu  $28.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  Grundwasser auf.

Der Kläranlage Kaditz fließen insgesamt circa  $225.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  an Mischwasser zu. Etwa 15% davon ( $34.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) kommen aus Netzen außerhalb von Dresden (Freital, Radebeul und Pirna) und ca. 38% ( $86.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) sind in die Kanalisation in Dresden abgeleitetes Abwasser. Der Rest des Mischwassers besteht aus von versiegelten Flächen abfließendem Niederschlagswasser, Ableitungen aus Oberflächengewässern ( $10.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) sowie den schon genannten Grundwasserzuflüssen.

In der Zukunft wird aller Voraussicht nach neben einer generellen Änderung des Wasserangebotes auch mit Verschiebungen zwischen den Wasserströmen zu rechnen sein. Die umfassende Erhebung wasserhaushaltlicher und -wirtschaftlicher Datengrundlagen ist daher für die Anpassung an zukünftige Veränderungen unverzichtbar.

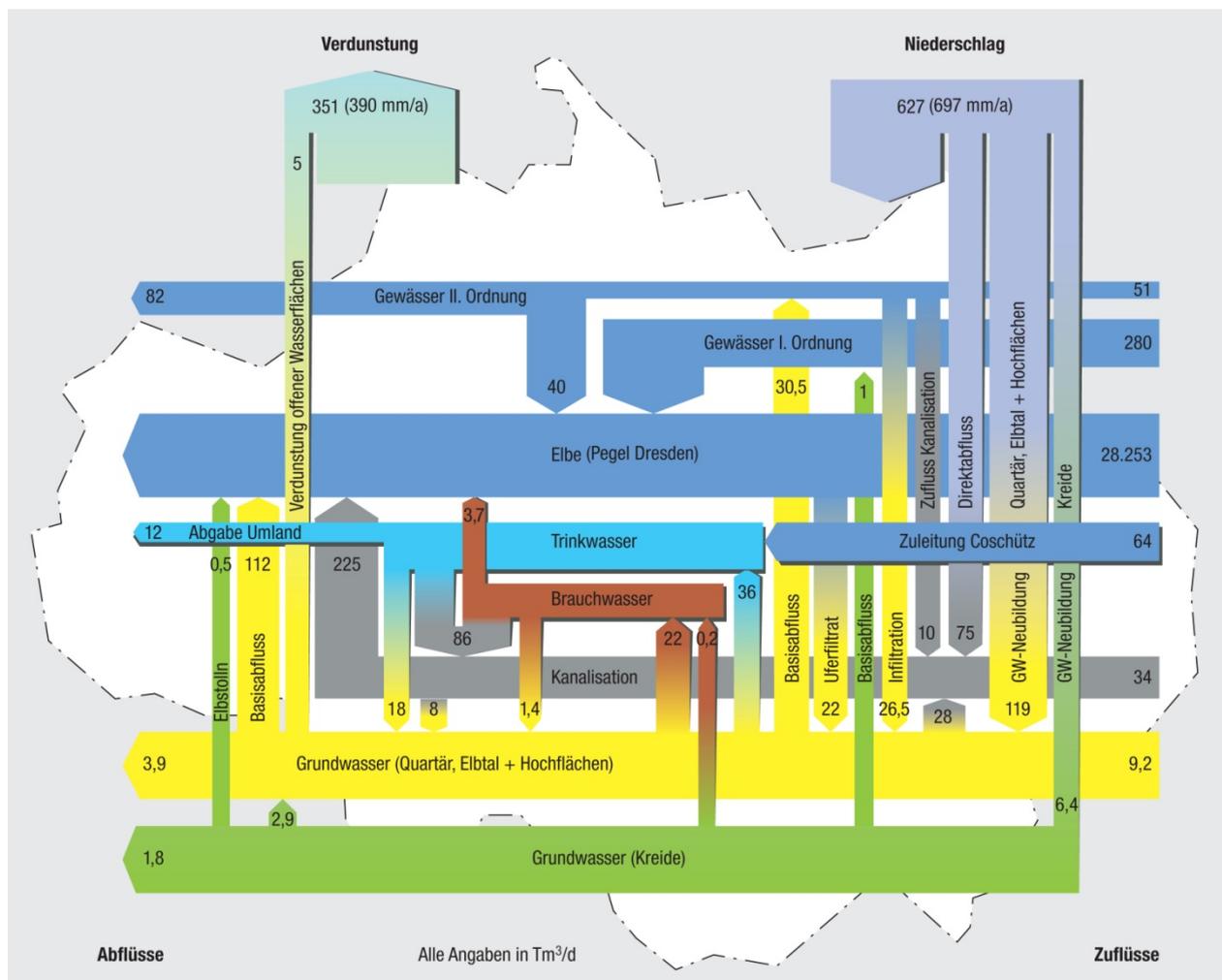


Abb. 1.2-1: Übersicht über den aktuellen Wasserhaushalt des Stadtgebietes Dresden (Landeshauptstadt Dresden 2010b); alle Angaben sind in  $\text{Tm}^3 \text{ d}^{-1}$ .

### 1.3 Klima- und Landnutzungswandel, Hydrologie

Anne Schucknecht (TUBAF)

Beobachtungen zeigen, dass sich das Klima in den letzten hundert Jahren global und regional verändert hat, wobei sich die Veränderungsraten seit ca. 1970 deutlich intensiviert haben. Klimamodelle projizieren eine weitere Veränderung des Klimas im 21. Jahrhundert (IPCC 2007). Temperaturveränderungen gehören dabei zu den offensichtlicheren und einfach zu messenden Veränderungen. Jedoch verändern sich auch andere Klimakenngrößen wie Luftfeuchtigkeit und Niederschlag. Die Veränderungen sind dabei zum Teil an Verschiebungen in der atmosphärischen Zirkulation gekoppelt.

Der globale Klimawandel wirkt sich regional sehr unterschiedlich aus (IPCC 2007). Für die REGKLAM-Modellregion Dresden (Abb. 2.1-1) wurde im Zeitraum 1991–2005 ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 0,6 K und ein Anstieg des Jahresniederschlages um circa 4% im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 beobachtet. Der Niederschlagsanstieg stand jedoch im Zusammenhang mit einem Starkregenereignis (August 2002), welches den allgemeinen Abnahmetrend des Niederschlags im Frühjahr und Sommer überlagerte (Bernhofer et al. 2009). Im Auftreten von Extremereignissen deuten sich ebenfalls Veränderungen an. So nahmen Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden von April bis Juni zu; Starkniederschlagsereignisse traten im Sommer häufiger auf (Franke & Bernhofer 2009; Hänsel 2009; SMUL 2005).

Die im REGKLAM-Projekt verwendeten Klimaprojektionen simulieren eine Fortsetzung der bisher beobachteten Trends. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird mit einem weiteren Temperaturanstieg von ca. 2,5 bis 3,5°C gerechnet. Aufgrund der größeren natürlichen Variabilität des Niederschlags in Raum und Zeit sind dessen Trends mit größeren Unsicherheiten behaftet als diejenigen der Temperatur. Die Modelle projizieren eher eine Abnahme der Sommer- und eine Zunahme der Winterniederschläge. Detaillierte Aussagen zum gegenwärtigen und zukünftigen Klima der REGKLAM Modellregion Dresden finden sich u.a. in den REGKLAM-Heften 1 & 2 (Bernhofer et al. 2009, 2011) sowie in Abschnitt 2.1 dieses Bandes.

Klimaveränderungen beeinflussen auch den natürlichen Wasserkreislauf. Veränderungen des

Strahlungsflusses an der Erdoberfläche wirken sich auf den dortigen Wärme und Feuchtehaushalt aus. Höhere Temperaturen führen z.B. zu einem Anstieg der Wasserspeicherfähigkeit der Atmosphäre und einer Zunahme der Verdunstungsleistung von Oberflächen. Dies kann – zusammen mit einer sich verändernden Zirkulation – eine Veränderung der Niederschlagscharakteristik (Menge, Häufigkeit, Intensität, Dauer, Art) bewirken (IPCC 2007). Dies beeinflusst wiederum das Niederschlags-Abflussverhalten, die Sickerwasser- und Grundwasserneubildung sowie den Grundwasserhaushalt. Klimatische Veränderungen können sich demnach auf alle Komponenten des Wasserhaushaltes (Aufnahme, Abgabe, Speicherung) einer Region auswirken. Die Charakteristik des Einzugsgebietes beeinflusst dabei das tatsächliche Ausmaß des Einflusses veränderter klimatologischer Randbedingungen auf den Wasserhaushalt.

Hydrologische Prozesse werden neben dem Klima direkt und indirekt durch Landbedeckung und -nutzung beeinflusst. Beides hat z.B. Auswirkungen auf Evaporation, Bodenfeuchte, Infiltration und Abflussbildung. Die Bedeckung der Landoberfläche hängt u.a. von den klimatischen Bedingungen einer Region ab und kann sich im Zuge des Klimawandels verändern. Daneben spielt der Mensch eine entscheidende Rolle bei der Ausgestaltung der Landoberfläche. Veränderungen der Landbedeckung und -nutzung wirken sich – unabhängig von ihrer Ursache – auf den hydrologischen Kreislauf aus und können unter bestimmten Bedingungen deutliche Effekte auf Wasserqualität und Wassermengen haben. Veränderungen in Quantität und Qualität regionaler Wasserressourcen sowie in der Wasserverfügbarkeit beeinflussen wiederum direkt die Landnutzungsmöglichkeiten (wie Land- und Forstwirtschaft), sowie Wasserversorgung und Wasserentsorgung eines Gebietes und können zu Nutzungskonflikten führen.

In diesem Band werden die Auswirkungen des regionalen Klimawandels (und weniger diejenigen von Landnutzungsveränderungen) auf den ruralen und urbanen Wasserhaushalt der Modellregion Dresden untersucht, die Konsequenzen für verschiedene Wassernutzungsbereiche dargestellt und mögliche Anpassungsmaßnahmen präsentiert.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Das Klima der Modellregion

*Norbert Prange (TUD), Sabine Tesch (TUBAF)*

Die **Modellregion Dresden** befindet sich nach der genetischen Klimaklassifikation von Neef (Weiterentwicklung der Klassifikation von Flohn 1954) im Übergangsklima der gemäßigten Klimazone. Das Klima wird maßgeblich durch außertropische Westwinde mit Zyklonen und Antizyklonen bestimmt. Maritim und kontinental geprägte Witterungsabschnitte wechseln sich ab. Im Vergleich zu den westlichen Teilen Deutschlands ist jedoch eine stärkere Kontinentalität zu verzeichnen.

Geprägt ist das Klima durch einen jahreszeitlichen Verlauf einzelner Klimagrößen, insbesondere der Temperatur und des Niederschlages. Charakteristisch sind deutliche Tag- und Nachtunterschiede in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Die Temperatur ist im Winter nahe oder leicht unter dem Gefrierpunkt und erreicht ihr Maximum in den Sommermonaten. Niederschläge fallen ganzjährig und erreichen ein leichtes Maximum im Sommer. Aufgrund der relativ großen Höhendifferenzen im Untersuchungsgebiet gibt es im lokalen Klima deutliche Unterschiede. Die Höhenabhängigkeit spiegelt sich auch im Pflanzenwachstum, dem Beginn der phänologischen Phasen, der Schneeakkumulation und Schneeschmelze wider. Der Wasserhaushalt des Gebietes wird maßgeblich durch die Höhenabhängigkeit der genannten Parameter beeinflusst.

Das **Stadtklima** von Dresden wird in großem Maße von der Elbtalweitung bestimmt. Aufgrund der thermischen Begünstigung des Elbtales,

gehört der Raum Dresden zu den wärmsten Gegenden der Neuen Bundesländer. Zusätzlich wird der Bereich der Elbtalzone durch Bebauung, Versiegelung und Emissionen stark beeinflusst, was sich vor allem in den klimatologischen Kenngrößen wie Niederschlag und Lufttemperatur widerspiegelt.

Der Niederschlag ist durch große Unterschiede auf engstem Raum gekennzeichnet. Während im Elbtal die mittleren Jahressummen des Niederschlages meist weniger als 600 mm betragen (Station Dresden Strehlen/Mitte, 1951–1980), liegen auf der Hochfläche die mittleren Jahressummen unkorrigiert bei knapp 670 mm (Station Wahnsdorf/ Dresden-Klotzsche, 1961–1990). In den Herbst- und Wintermonaten fallen die geringsten Niederschläge, während die höchsten innerhalb der Sommermonate zu verzeichnen sind. Das Jahresmittel der Lufttemperatur ist im Stadtkern (Talboden) mit 9,9°C (Dresden-Strehlen/Mitte, 1951–1980) um ca. 1 K höher als auf der Hochfläche (Dresden-Klotzsche, 1961–1990, 8,9°C). Die Sonnenscheindauer beträgt für das gesamte Stadtgebiet 1550 bis 1600 Stunden pro Jahr, wobei lokal sehr große Differenzen durch unterschiedliche Expositionen auftreten. Das Zusammenwirken von Landnutzung und Topographie führt zu differenzierten Windgeschwindigkeiten mit niedrigen Windgeschwindigkeiten in Wald-, Siedlungsgebieten sowie Tälern von etwa  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  und erhöhten Windgeschwindigkeiten von mehr als  $4 \text{ m s}^{-1}$  auf Hochflächen und freien Lagen.

## 2.2 Meteorologische Beobachtungsdaten

Stephanie Hänsel (TUBAF)

Beobachtete und projizierte Veränderungen im Wasserhaushalt und deren spezifische Auswirkungen (Impakte) wurden unter Nutzung verschiedener hydrologischer Modelle (► 3) untersucht. Als Grundlage für diese Impaktmodellierung – insbesondere für die Validierung und Kalibrierung der Modelle sowie die Bestimmung des IST-Zustandes – wurden meteorologische Beobachtungsdaten aus der REGKLAM-Klimadatenbank verwendet. Diese Datenbank wurde vom REGKLAM-Teilprojekt 2.1 erstellt und ist den Projektbeteiligten über eine graphische Benutzeroberfläche zugänglich. Sie umfasst Datensätze des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Tschechischen Hydrometeorologischen Dienstes (CHMI). Diese in Tagesauflösung vorliegenden Stationsdaten für die Klimaelemente Niederschlag, Tagesmitteltemperatur, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung wurden durch Interpolationsverfahren auf das vom jeweiligen Wirkmodell benötigte Gitter (Grid) umgerechnet. Spezifischere Beschreibungen dieser Verfahren sind in den einzelnen Ergebniskapiteln nachzulesen.

Innerhalb des Zeitraums 1951–2010 stehen in der REGKLAM-Modellregion 80 Niederschlags- und 15 Klimastationen zur Verfügung (Abb. 2.1-1). Jedoch weisen nur wenige Stationen vollständige Datenreihen auf – zum Teil liegen die Messreihen nur für wenige Jahre vor. Für das erweiterte Datengebiet erhöht sich die Zahl der verfügbaren Klimastationen auf 60 und die der Niederschlagsstationen auf 259. Wirklich nutzbar im Sinne von langen, ununterbrochenen, homogenen Datenreihen ist jedoch nur ein Teil (ca. 10–30% je nach Element und Untersuchungsgebiet) dieser Datensätze. Ein weiterer Teil der Daten ist erst nach weitergehender Bearbeitung – z.B. dem Auffüllen von Lücken oder der Homogeni-

sierung – nutzbar. Ein Teil der Datenreihen ist für klimatologische Betrachtungen zu kurz. Damit ist die Datenlage – insbesondere beim zeitlich und räumlich hochvariablen Niederschlag – grundsätzlich als suboptimal für Betrachtungen des Wasserhaushalts zu bewerten. Die Modellierer(innen) hydrologischer Prozesse haben jedoch gelernt mit diesen Herausforderungen und Unsicherheiten umzugehen.

Für jedes der Teiluntersuchungsgebiete (z.B. Stadtgebiet Dresden und verschiedene Einzugsgebiete in der Modellregion Dresden) wurde separat geprüft, welche Stationen als Eingangsdaten für die jeweiligen Wirkmodelle verwendet werden. Teilweise wurden weitere Bearbeitungen der Datenreihen vorgenommen. Die spezifischen Datengrundlagen und verwendeten Interpolationsverfahren werden in den jeweiligen Ergebniskapiteln 1.1 bis 4.3 kurz dargestellt.

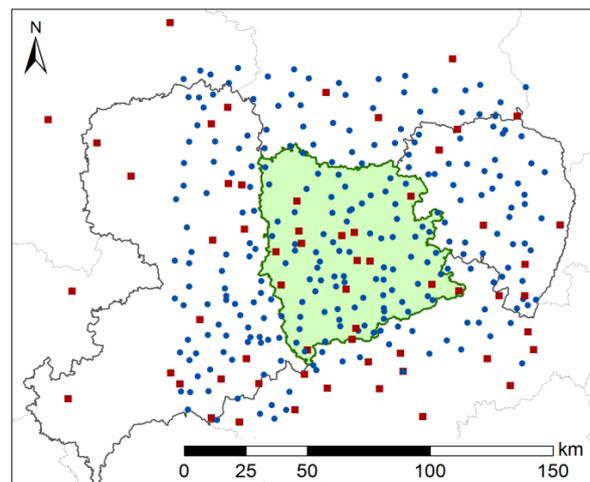


Abb. 2.1-1: In der REGKLAM-Datenbank verfügbare Niederschlags- (blau) und Klimastationen (rot); die REGKLAM-Modellregion ist in grün gekennzeichnet.

## 2.3 Klimaprojektionsdaten

Stephanie Hänsel (TUBAF)

„REGKLAM-Modelle“. Als Grundlage für die Simulation der zukünftig zu erwartenden Veränderungen im Wasserhaushalt wurden regionale Klimaprojektionen aus der REGKLAM-Datenbank verwendet. In dieser Datenbank stehen die Projektionen für fünf regionale Klimamodelle unter drei verschiedenen Emissionsszenarios (A1B, B1 und A2) zur Verfügung, die alle auf dem Globalmodell des MPI-Hamburg (ECHAM5/MPI-OM T63L31; Roeckner et al. 2003, 2006) beruhen. Die Regionalmodelle umfassen dynamisch-physikalische (CLM, REMO) sowie statistische (WETTREG 2006, 2010; WEREX IV) Downscaling-Ansätze. Die Modelle haben unterschiedliche räumliche Auflösungen. Für weiterführende Informationen zur Klimamodellierung, den verwendeten regionalen Klimamodellen sowie den Hintergründen der Emissionsszenarios siehe Bernhofer et al. (2011).

Die in diesem Band dargestellten Wasserhaushaltsuntersuchungen basieren im Wesentlichen auf den beiden Modellen CLM (als dynamisch-physikalischer Ansatz) und WETTREG 2010 (als statistisches, wetterlagenbasiertes Verfahren; Tabelle 2.3-1). Hinsichtlich des Emissionsszenarios konzentrieren sich die Analysen auf das Szenario A1B, das derzeit als recht realistisches Szenario angesehen wird. Zudem unterscheiden sich die verschiedenen Szenarios bis zur Mitte

des 21. Jahrhunderts nur geringfügig hinsichtlich der projizierten Temperaturentwicklung. Zum Ende des 21. Jahrhunderts kommen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Emissionsszenarios stärker zum Tragen, jedoch sind die szenariobedingten Differenzen immer noch vergleichsweise klein gegenüber den Signalen verschiedener Klimamodelle.

Abb. 2.3-1 zeigt die räumliche Auflösung für CLM und WETTREG 2010. In Abhängigkeit der räumlichen Auflösung kann die Höhenabhängigkeit verschiedener Klimakenngrößen unterschiedlich gut wiedergegeben werden. Insbesondere CLM unterschätzt aufgrund der vergleichsweise geringen räumlichen Auflösung der Rasterzellen die topographische Klimavariabilität im Untersuchungsgebiet.

**ENSEMBLES-Modelle.** Zur Einordnung der beiden verwendeten Modelle hinsichtlich der für das 21. Jahrhundert projizierten Niederschlagsänderungen wurden im Abschnitt 2.5.2 weitere regionale Klimamodelle aus dem EU-Projekt ENSEMBLES (van der Linden & Mitchell 2009) hinzugezogen, welche verschiedene Globalmodellantriebe (Tabelle 2.3-2) unter dem Emissionsszenario A1B verwenden. Alle zwölf dynamischen Modelle haben eine räumliche Auflösung von ca. 25 km x 25 km (Abb. 2.3-2).

Tabelle 2.3-1: Übersicht über die verwendeten Klimamodelle (abgewandelt nach Feske et al. 2010).

Modell	CLM	WETTREG 2010
<b>Betreiber</b>	COSMO	CEC-Potsdam
<b>Typ</b>	Dynamisches Model (nicht hydrostatisch)	Statistisch-dynamisches Modell
<b>Prinzip</b>	numerische Simulation des Atmosphärensystems unter geänderten Randbedingungen	Ableitung von meteorologischen Zeitreihen aus Veränderungen der Häufigkeit von Wetterlagen
<b>Globalantrieb</b>	ECHAM5/MPI-OM T63, Lauf 1 und 2	ECHAM5/MPI-OM T63, Lauf 1
<b>Räumliche Auflösung</b>	0,2 x 0,2° (~18 km), Rasterdaten	abhängig von Stationsdichte, Punktdaten
<b>Zeitliche Auflösung</b>	Tageswerte	Tageswerte
<b>Kontroll-Läufe</b>	2 x 20C (1960-2000)	10 x 20C (1961-2000)
<b>Projektions-Läufe</b>	2 x A1B (2001-2100) 2 x B1 (2001-2100)	10 x A1B (2001-2100) 10 x B1 (2001-2100) 10 x A2 (2001-2100)

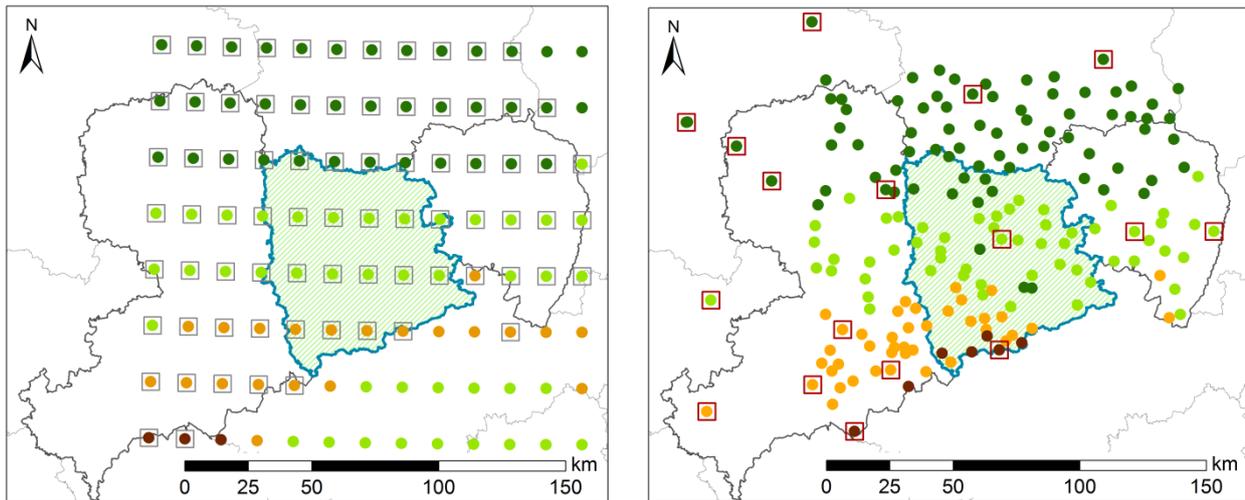


Abb. 2.3-1: Räumliche Auflösung der regionalen Klimamodelle CLM (links; die grauen Quadrate zeigen die Gitterpunkte für welche bias-korrigierte Niederschlagsdaten vorliegen) und WETTREG 2010 (rechts; die roten Quadrate zeigen die Klimastationen); die Farben der Punkte symbolisieren die Höhenstufen der Datenpunkte (**dunkelgrün**:  $\leq 150$  m, **hellgrün**: 150-350 m, **orange**: 350-650 m, **dunkelrot**:  $\geq 650$  m).

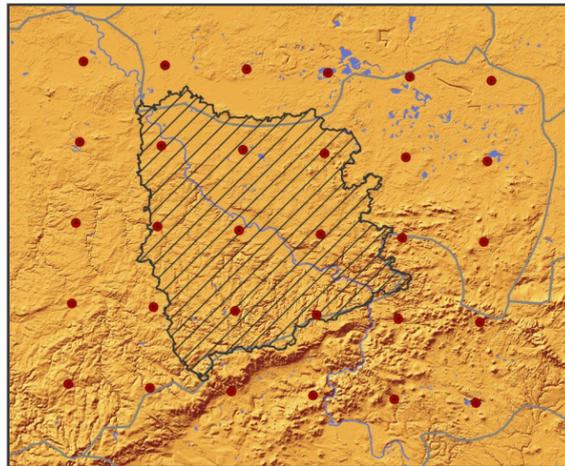


Abb. 2.3-2: Räumliche Auflösung der ENSEMBLES-Modelle.

Tabelle 2.3-2: Übersicht über die verwendeten regionalen Klimamodelle aus dem EU-Projekt ENSEMBLES.

Institut	Land	Globalmodell	Regionalmodell	Akronym
ETHZ	CH	HadCM3Q0	CLM	CLM_HadCM3
HC	GB	HadCM3Q16	HadRM3Q0	HadRM_HadCM3
C4I	IRL	HadCM3Q16	RCA3.0	C41-RCA_HadCM3
SMHI	S	HadCM3Q3	RCA3.0	RCA_HadCM3
SMHI	S	BCM	RCA3.0	SMHI-RCA_BCM
SMHI	S	ECHAM5/ MPI-OM	RCA3.0	RCA_MPEH5
MPI	D	ECHAM5/ MPI-OM	REMO	REMO_MPEH5
ICTP	I	ECHAM5/ MPI-OM	RegCM3	RegCM3_MPEH5
KNMI	NL	ECHAM5/ MPI-OM	RACMO2	RACMO_MPEH5
DMI	DK	ECHAM5/ MPI-OM	HIRHAM5	HIRHAM_MPEH5
DMI	DK	CNRM-CM3	HIRHAM5	HIRHAM_CNCM3
CNRM	F	CNRM-CM3	RM5.1	RM_CNCM3

**Systematische Modellabweichungen (Bias).**

Die von globalen und regionalen Klimamodellen simulierten Klimakenngrößen zeigen oft erhebliche, systematische Abweichungen von den Beobachtungsdaten. Dadurch sind die Klimamodell-  
daten (insbesondere jene aus dynamisch-physikalischen Modellen) oft nicht als direkte Eingaben für Wirkmodelle verwendbar. Sie würden beispielsweise bei Wasserhaushaltsmodellen dazu führen, dass diese in einem so stark von der Realität abweichenden Zustand operieren, dass aufgrund der Nicht-Linearität der Zusammenhänge in den komplexen Systemen Fehlschlüsse möglich sind.

Die Korrektur dieser systematischen Abweichungen (Bias) zwischen den Modellergebnissen und den gemessenen Daten wird im Allgemeinen als Bias-Korrektur bezeichnet. Die bei der Bias-Korrektur verwendeten Ansätze beruhen auf der Analyse von Klimadaten aus der Vergangenheit und sind in ihrer Übertragbarkeit auf die Zukunft, in ihrer Methodik sowie in ihrer Auswirkung auf die Konsistenz und Unschärfe der erzeugten Eingaben für Wirkmodelle nur in Ansätzen erforscht (NKGCF 2010). Daher wird gegenwärtig noch untersucht, wie Bias-Korrekturen am besten durchzuführen sind (Mudelsee et al. 2010).

Insbesondere beim Niederschlag treten zum Teil erhebliche systematische Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und den Messdaten auf – so auch beim hier verwendeten Regionalmodell CLM. Die kleinräumigen Prozesse, welche zur Niederschlagsbildung führen, können

aufgrund der „groben“ räumlichen Auflösung der Regionalmodelle nicht abgebildet werden – Parametrisierungen werden notwendig. Das Klimamodell CLM überschätzt für die meisten Gebiete in der Modellregion die Niederschlagssummen und lässt es zu häufig regnen. Daher wurde in der REGKLAM-Datenbank eine bias-korrigierte Version des CLM-Datensatzes bereitgestellt (nicht für alle Datenpunkte verfügbar; siehe Abb. 2.3-1). Auf statistischen Downscaling-Verfahren basierende Regionalmodelle – wie WETTREG 2010 – weisen verfahrensbedingt i.d.R. nur einen geringen Bias auf. Diese Verfahren wurden bewusst darauf ausgelegt, die beobachteten Zusammenhänge statistisch möglichst genau wieder zu geben.

**Bewertung der Plausibilität.** Da die Klima- und Wirkmodelle der bisher einzige Weg sind, Aussagen über zukünftige Entwicklungen ableiten zu können, ist es bedeutend, dass sie plausible – sprich glaubwürdige – Ergebnisse liefern. Der Bewertung der Plausibilität von Modellen liegt die Annahme zu Grunde, dass eine Projektion, welche die Vergangenheit gut abbildet, auch für die Zukunftsprojektionen belastbar ist. Um dies zu beurteilen werden verschiedene durch das Modell simulierte Kenngrößen mit Messdaten hinsichtlich verschiedener statistischer Parameter (z.B. Mittelwerte, Häufigkeitsverteilung, Extremwerte, Trends) verglichen. Inwieweit die zugrundliegende Annahme belastbar ist, ist hingegen kaum abschätzbar. Möglicherweise gelten die im Modell angenommenen Bedingungen und Zusammenhänge in der Zukunft nicht mehr.

## 2.4 Umgang mit Unsicherheiten

*Stephanie Hänsel (TUBAF), Norbert Prange (TUD),*

### 2.4.1 Ursachen der Unsicherheiten

**Klimamodelle.** Bei der Verwendung von Klimaprojektionsdaten in der Impaktmodellierung sind neben den Unsicherheiten der Wirkmodelle auch die den Klimaprojektionsdaten inhärenten Unsicherheiten zu berücksichtigen. Grundsätzlich werden verschiedene Ursachen der Unsicherheiten von Klimaprojektionsdaten unterschieden:

- 1) **Natürliche Klimavariabilität:** Das Klima variiert aufgrund natürlicher Triebkräfte und vielfältiger, nichtlinearer Wechselwirkungen innerhalb des Klimasystems auf allen Zeit- und Raumskalen. Das Wetter ist nur als eine mögliche Realisation des Klimas zu verstehen. Wird ein Klimamodell unter den gleichen Randbedingungen (z.B. Emissionsszenario, Landnutzung, physikalische Parametrisierung, etc.) mehrfach mit nur minimal veränderten Anfangsbedingungen (die nie zu 100% genau festgelegt werden können) gestartet, so entsprechen alle Modellrealisierungen einem möglichen zukünftigen Klima und verdeutlichen somit die natürliche Klimavariabilität.
- 2) **Emissionsbedingte Bandbreite:** Um Aussagen über das Klima der Zukunft treffen zu können, werden verschiedene Annahmen hinsichtlich plausibler Entwicklungspfade der menschlichen Gesellschaft getroffen (sogenannte sozioökonomische Szenarios). Mit diesen Entwicklungen sind unterschiedliche Mengen an Treibhausgasemissionen verbunden. Beschrieben wird diese potenzielle Entwicklung der Emission von Treibhausgasen durch verschiedene Emissionsszenarios (z.B. A1B, B1, A2; Nakićenović & Swart 2000).
- 3) **Modellbedingte Variabilität:** Modelle stellen immer eine Vereinfachung der komplexen Wirklichkeit dar und sind somit immer mit einem gewissen Schätzfehler verbunden. Nicht alle relevanten Prozesse und Wechselwirkungen innerhalb des Erdsystems sind bekannt und von denen, die weitgehend verstanden sind, kann nur ein Teil in das Modell implementiert werden. Die Verwendung verschiedener Modellansätze (z.B. Unterschied in der horizontalen und vertikalen Modellauflösung, der Implementierung physikalischer

Gesetzmäßigkeiten, der Parametrisierung nichtaufgelöster Prozesse, etc.) führt somit zu einer modellbedingten Bandbreite des für die Zukunft simulierten Klimas.

Genauere Ausführungen zu den Quellen der Unsicherheit in der Klimamodellierung sind im REGKLAM Heft 2 (Bernhofer et al. 2011) nachzulesen. Grundsätzlich lassen sich diese Unsicherheiten nur zum Teil verringern. So kann die modellbedingte Variabilität durch Weiterentwicklungen der Klimamodelle und verbesserte Downscaling-Verfahren verringert werden. Auch die emissionsbedingte Bandbreite kann mit fortschreitender Entwicklung auf einem der angenommenen Pfade eingeengt werden. Die auf die natürliche Variabilität des Klimas zurückzuführende Unsicherheit ist jedoch nicht verringerbare. Hier gilt es, die potenziell mögliche Bandbreite des zukünftigen Klimas in die Entwicklung robuster Anpassungsstrategien einzubeziehen.

**Impaktmodelle.** Zusätzlich zu den genannten, aus der Anwendung von Klimaprojektionsdaten resultierenden Unsicherheiten ergeben sich weitere Unsicherheiten aus der hydrologischen Modellierung. Es liegt eine Vielzahl von hydrologischen Modellansätzen vor, die von konzeptionellen bis hin zu physikalischen Ansätzen reicht. Analog zur Klimamodellierung können in hydrologischen Modellen wesentliche physikalische Prozesse und insbesondere Rückkopplungseffekte im System Boden-Pflanze-Atmosphäre nicht umfassend berücksichtigt werden. Verschiedene Modellansätze bilden die Prozesse unterschiedlich ab – nutzen beispielsweise unterschiedlich detaillierte Prozessbeschreibungen und unterschiedliche räumliche Gliederungen – und liefern somit unterschiedliche Ergebnisse.

Auch unterschiedliche Parametrisierungen tragen zu den Unsicherheiten der hydrologischen Modellierung bei. So können mehrere unterschiedliche Parametersätze zu ähnlich guten Ergebnissen führen. Beven (2002) weist dabei auf eine „Äquifinalität“ von Modellstruktur und Modellparametern hin, d.h. von unterschiedlichen Startpunkten aus kann das System den gleichen Endzustand erreichen. Daraus ergeben sich erhebliche

che Unsicherheiten, Extrapolationen außerhalb des Modellkalibrierungszeitraumes durchzuführen, insbesondere dann, wenn zusätzlich sich ändernde Randbedingungen (z.B. Klima) zu berücksichtigen sind.

Weitere Unsicherheiten ergeben sich aus der fehlenden Betrachtung von Änderungen der Landnutzung und von Gebietscharakteristiken. Zusätzlich konnten für einige Untersuchungsgebiete weder zukünftige, noch aktuelle oder rezente Fruchtfolgenwechsel berücksichtigt werden, obwohl diese von großer Bedeutung für den Stoff- und Wasserhaushalt sind. Für einige Gebiete lagen zumindest für die Vergangenheit konkrete Daten zu Fruchtfolgen und Bewirtschaftung auf Schlagebene vor und konnten z.B. in das SWAT-Modell (► 3.2) eingearbeitet werden.

#### **2.4.2 Anwendung von Klimaprojektionsdaten in der Klimafolgen- und Anpassungsforschung**

Zu hohe Erwartungen hinsichtlich der Genauigkeit von Klimamodellen offenbaren sich bei vielen Nutzern der Klimamodelldaten in der anwendungsbezogenen Forschung. Aufgrund der soeben beschriebenen Unsicherheiten, die automatisch mit der Verwendung von Klimaprojektionsdaten verbunden sind, ist von der Verwendung eines einzigen Modelles für die Ableitung von Aussagen zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels und notwendigen Anpassungsmaßnahmen abzuraten. In der Klimawissenschaft hat sich die Arbeit mit Multimodellansätzen und sogenannten Ensembles durchgesetzt. Dabei werden verschiedene (globale und/ oder regionale) Klimamodelle und Modellkombinationen analysiert und verglichen. Der Mittelwert dieses Ensembles wird dann als bester Schätzer verwendet, was jedoch immer auch mit einer Angabe zur gesamten Bandbreite der Ergebnisse verknüpft werden sollte, um Fehlanpassungen zu vermeiden.

Zudem sollten sich die Anwender immer vor Augen führen, dass Entscheidungen zur Notwendigkeit und Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen gesellschaftspolitische Entscheidungen sind. Die dafür von der Wissenschaft bereitgestellte Entscheidungsgrundlage wird auch in den kommenden Jahren unsicher bleiben. Gesellschaftliche Akteure müssen in allen Bereichen Entscheidungen unter Unsicherheit treffen und tun dies auch nach bestem Wissen und Gewissen. Im Hinblick auf den Klima-

Die Ergebnisse einer „klassischen“ hydrologischen Modellierung können mögliche Änderungen des Wasserhaushaltes aufzeigen, die aus der Eingabe der projizierten Klimaszenarios resultieren. Dabei können jedoch weder die Unsicherheiten der Klimaprojektionen noch der Einfluss des Klimawandels auf die prozessbestimmenden Charakteristiken des Einzugsgebietes explizit in die hydrologische Modellierung einbezogen werden. Dementsprechend ist eine realitätsnahe Abbildung der Abflussbildung und -konzentration eines von Klimawandel geprägten Systems kaum möglich, was die Aussagekraft des so berechneten Wasserhaushalts der unterschiedlichen Teilflächen und damit des gesamten Gebietes erheblich einschränkt.

wandel kommen folgende Aspekte erschwerend hinzu: Zunächst sind bei Klimawandel längere Zeitskalen betroffen, als bei vielen anderen Entscheidungen. Dadurch erfolgt eine gewisse Entkopplung der heutigen Handlungen von ihren (unsicheren jedoch in ihrer generellen Richtung klaren) Konsequenzen in der Zukunft. Zum anderen ist Klimawandel mit hohen Risiken (z.B. abrupte Klimaveränderungen aufgrund von vielfältigen, komplexen, oft nicht-linearen Rückkopplungen im Klimasystem) verbunden, deren Eintrittswahrscheinlichkeit aus heutiger Sicht jedoch schwer abzuschätzen ist.

Wichtig ist die Abwägung der positiven und negativen Nebeneffekte vorgeschlagener Anpassungsmaßnahmen vor dem Hintergrund weiterer gesellschaftlicher Zielstellungen. Eine per-se erfolgreiche Klimaanpassung erscheint nicht möglich, da sich der Zielzustand des künftigen Klimas nur recht unscharf definieren lässt. Suboptimale Anpassungen – gern auch als Fehler bezeichnet – werden weiterhin unvermeidbar bleiben. Die Angst vor diesen „Fehlern“ sollte jedoch keinesfalls lähmend wirken, schließlich lässt sich aus Fehlern lernen. Durch die andauernde, gezielte Überwachung des Klimazustandes und der implementierten Maßnahmen können die Anpassungsmaßnahmen bedarfsgerecht nachjustiert werden. Klimaanpassung ist somit als nie abzuschließender Prozess zu verstehen.

Detailliertere Informationen zum empfohlenen Umgang mit den innerhalb des Projektes zur Verfügung gestellten Klimaprojektionsdaten sind

### 2.4.3 Praktische Vorgehensweise

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden lediglich die Kombinationen aus einem Globalmodell (ECHAM5/MPI-OM T63, Lauf 1) und zwei regionalen Klimamodellen verwendet. Dabei wurden zehn Realisierungen eines statistischen Downscaling-Verfahrens – WETTREG 2010 – und zwei Realisierungen eines dynamischen Downscaling-Verfahrens – CLM – berücksichtigt. Dadurch ist die Abschätzung der modellbedingten Variabilität stark eingeschränkt. Daher ist es wichtig, die Ergebnisse klimatologischer Untersuchungen eines größeren Ensembles von Klimamodellen in die Bewertung der Änderungssignale einzubeziehen. Für den Niederschlag – als eine der wichtigsten und zudem zeitlich und räumlich variabelsten Klimakenngrößen für hydrologische Modellierungen – sind die Ergebnisse einer Multimodell-Untersuchung in Kapitel 2.5.2 dargestellt. Die Einordnung der verwendeten regionalen Klimamodelle in die durch ein deutlich größeres Ensemble aus verschiedenen Global-Regionalmodell-Kombinationen aufgespannte Bandbreite zukünftiger Niederschlagsentwicklungen, erlaubt eine spezifischere Interpretation und evtl. auch Relativierung der erhaltenen Ergebnisse der Impaktmodellierung.

Durch die Konzentration einiger Untersuchungen auf ein einziges Emissionsszenario (A1B) kann die emissionsbedingte Bandbreite der projizierten Veränderungen im Wasserhaushalt nicht dargelegt werden. Untersuchungen von Bernhofer et al. (2011) für die REGKLAM-Modellregion Dresden haben jedoch gezeigt, dass die emissionsbedingte Bandbreite im Vergleich zu der durch die Nutzung unterschiedlicher Modelle bedingten Bandbreite gering ist. Zudem wird in einigen Teiluntersuchungsgebieten die Sensitivität der Ergebnisse hydrologischer Modellierungen hinsichtlich der Emissionsszenariowahl getestet, indem die Analysen für mehrere Szenarios (A1B, B1 und für WETTREG 2010 teilweise auch A2) durchgeführt werden.

Nach dem Vorbild der Klimamodellierung wäre zur Bewertung der aus dem hydrologischen Modell resultierenden Unsicherheiten ein Multimodell-Ensemble-Ansatz hilfreich. Die Umsetzung gestaltet sich jedoch als schwierig, da schon die Einrichtung eines einzelnen hydrologi-

im REGKLAM-Heft 2 (Bernhofer et al. 2011) nachzulesen.

schen Modells für ein Einzugsgebiet und dessen Kalibrierung mit großem Aufwand verbunden ist. Für die vorliegende Untersuchung wurde für die jeweilige Fragestellung jeweils nur ein Wirkmodell eingesetzt, was die Bewertung der aus der Wahl des hydrologischen Modells resultierenden Unsicherheiten stark einschränkt.

Eine andere Strategie um den zuvor beschriebenen Mängeln einer klassischen hydrologischen Modellierung zu begegnen, ist die Entwicklung und Anwendung neuartiger Ansätze im Bereich der Einzugsgebietshydrologie. So ist z.B. von pflanzenphysiologischen Wachstumsmodellen zu erwarten, dass diese eine realitätsnähere Abbildung des Wasserhaushaltes unter veränderten klimatischen Randbedingungen ermöglichen.

Zur Erfassung der aus der Parametrisierung des hydrologischen Modells resultierenden Unsicherheiten werden für die Projektion des Wasserhaushaltes bis 2100 mehrere pareto-optimale Parametersätze, die aus einer multikriteriellen Optimierung resultieren, verglichen (► 4.2.1).

Die sich aus der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der einzelnen Klimamodelle (Punktdaten im statistischen Modell WETTREG 2010 und Rasterdaten im dynamischen Modell CLM) ergebenden Unsicherheiten lassen sich kaum quantifizieren und werden daher „nur“ qualitativ diskutiert. Gleiches gilt für die sich aus einer statischen Landnutzung ergebenden Unsicherheiten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Ergebnisse hinsichtlich der zukünftigen Änderung im Wasserhaushalt der REGKLAM-Modellregion großen Unsicherheiten unterliegen, die in vielen Fällen kaum quantifiziert werden können. Eine dementsprechend „vorsichtige“ Interpretation der Ergebnisse der Impaktmodellierungen ist angeraten. Wichtige Punkte sind dabei:

- a) Die Verwendung mehrerer (möglichst verschiedener) Klimaprojektionsdatensätze als Input für die hydrologische Modellierung, um die Bandbreite zukünftiger Wasserhaushaltsänderungen möglichst realistisch abschätzen zu können (modellbedingte Variabilität – Klimamodelle).

- b) Die Einordnung der verwendeten Klimamodelle in ein größeres Klimamodellensemble, welches verschiedene globale Klimamodelle einschließt, da für den Großteil der Untersuchungen nur ein bis zwei regionale Klimamodelle verwendet wurden, die beide auf dem gleichen Globalmodell basieren (erweiterte modellbedingte Variabilität – Klimamodelle).
- c) Die Abschätzung der Sensitivität der Wirkmodelle gegenüber unterschiedlichen Inputparametern und Modellparametrisierungen zur Bewertung der aus der Wahl des Wirkmodells resultierenden Unsicherheit (modellbedingte Variabilität – Wirkmodelle).
- d) Die statistische Interpretation der Ergebnisse in 30-Jahresscheiben unter Einbeziehung der beobachteten und modellierten (Klima)Variabilität (natürliche Klimavariabilität).
- e) Die Einbeziehung von Überlegungen zum möglichen Einfluss unterschiedlicher Emissionsszenarios auf die Resultate bzw. wo möglich auch dessen Quantifizierung, wobei die Zeithorizonte der Betrachtungen berücksichtigt werden sollten (szenariobedingte Variabilität).
- f) Die Abschätzung des Einflusses von Landnutzungsveränderungen auf den zukünftigen Wasserhaushalt der Region.

## 2.5 Regionaler Klimawandel

*Stephanie Hänsel (TUBAF)*

Beobachtete und für das 21. Jahrhundert projizierte Klimaveränderungen in der REGKLAM-Modellregion wurden ausführlich in den beiden ersten REGKLAM-Heften (Bernhofer et al. 2009, 2011) beschrieben. Hier werden kurz die Entwicklungen für die beiden wesentlichen Klimaelemente – Temperatur und Niederschlag – zusammengefasst. Insbesondere werden die innerhalb dieses Bandes verwendeten Modellläufe der Regionalmodelle CLM und WETTREG 2010 beschrieben und gegenübergestellt. Für den Niederschlag als wesentliche Größe des Wasserhaushaltes erfolgt eine detailliertere Darstellung

### 2.5.1 Temperatur

#### **Mittlere Temperaturen**

Systematische Abweichungen der Klimamodelle von den Beobachtungswerten werden für den Referenzzeitraum (1961–1990) bewertet. Beispielfhaft werden hier die Ergebnisse für die Klimastation Dresden Klotzsche gezeigt (Abb. 2.5-1, oben links). Für das dynamische Modell CLM wird die Rasterzelle, in der die Station liegt (GP\_084\_123), dargestellt.

Generell zeigt das statistische Regionalmodell WETTREG 2010 eine geringere Abweichung von den Beobachtungsdaten als das dynamische Modell CLM, das deutlich kältere Temperaturen als beobachtet simuliert. Dies trifft insbesondere auf die Sommer bis Herbstmonate zu, während in den Winter und Frühlingsmonaten CLM die Beobachtungsdaten von Dresden Klotzsche recht gut wiedergibt. Aufgrund der auftretenden systematischen Abweichungen zwischen den Klimamodell- und den Beobachtungsdaten werden die Änderungssignale für das 21. Jahrhundert nicht als Absolutwerte dargestellt, sondern als relative Änderungssignale im Vergleich zu den Werten des Modells im Referenzzeitraum.

Änderungssignale werden hier beispielhaft für die Station Dresden Klotzsche und das Emissionsszenario A1B dargestellt. Zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2021–2050) sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Emissionsszenarios noch recht gering ausgeprägt – sie kommen erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) deutlich zum Tragen. Für die Mitte

– auch im Hinblick auf die zu erwartenden Entwicklungen bei den Starkniederschlägen sowie den Nass- und Trockenperioden. Dabei werden die in diesem Band verwendeten Klimaprojektionen in ein größeres Ensemble aus regionalen Klimamodellen eingeordnet. Dies erlaubt eine umfassendere Interpretation der erzielten spezifischen Simulationsergebnisse für die zukünftigen Veränderungen im Wasserhaushalt der Modellregion Dresden. Aufgrund der teilweise unterschiedlichen Entwicklungen im Jahresverlauf erfolgen die Darstellungen differenziert nach einzelnen Monaten bzw. Jahreszeiten.

des 21. Jahrhunderts projizieren die Klimamodelle einen Temperaturanstieg von ca. 1,5°C gegenüber 1961–1990 (Abb. 2.5-1, Mitte links). Für das Ende des 21. Jahrhunderts erhöht sich der Anstieg der mittleren Jahresdurchschnittstemperatur auf ca. 3,5°C über dem Niveau in der Referenzperiode (Abb. 2.5-1, unten links).

Die mittleren Temperaturänderungssignale sind für die beiden betrachteten Regionalmodelle ähnlich groß – im Jahresgang ergeben sich jedoch leichte Unterschiede. Im Vergleich zum Vorläufermodell WETTREG 2006 wurde WETTREG 2010 dahingehend modifiziert, die vom Globalmodell (ECHAM5/MPI-OM) vorgegebene Temperaturentwicklung besser umzusetzen. Dadurch projiziert WETTREG 2010 größere Temperaturänderungssignale als WEREX IV oder WETTREG 2006 (vgl. Bernhofer et al. 2011) und ist in den Temperaturentrends den dynamischen Klimamodellen CLM und REMO ähnlicher. Grundsätzlich werden in beiden Zeitscheiben die größten Änderungssignale für den Sommer und den Winter projiziert, während die Temperaturerhöhung im Frühjahr am geringsten ausfällt. Ende des 21. Jahrhunderts werden für die Sommermonate Monatsmitteltemperaturen von bis zu ca. 4,5°C über dem Referenzwert simuliert, für die Wintermonate projiziert WETTREG 2010 sogar Temperaturanstiege um bis zu 5,5°C.

Die für Dresden Klotzsche dargestellten Änderungssignale liegen auch für andere Stationen

bzw. über die gesamte REGKLAM-Modellregion gemittelt auf ähnlichem Niveau. Grundsätzlich ist die Temperatur als Eingangsgröße für hydrologische Modellierungen als recht unkritisch zu

betrachten, da sie geringeren räumlichen Schwankungen unterliegt als andere Klimakenngrößen, wie z.B. der Niederschlag.

**Klimatologische Kenntage**

Die Häufigkeit der Überschreitung hoher Tages- und Nachttemperaturen, wie sie durch verschiedene warme Kenntage (Heiße Tage, Sommertage und Tropennächte) wiedergegeben wird, steigt innerhalb des 21. Jahrhunderts in den

verwendeten regionalen Klimaprojektionen deutlich an. Dementsprechend geht die Häufigkeit kalter Kenntage (z.B. Eistage, Frosttage und kalte Tage) deutlich zurück.

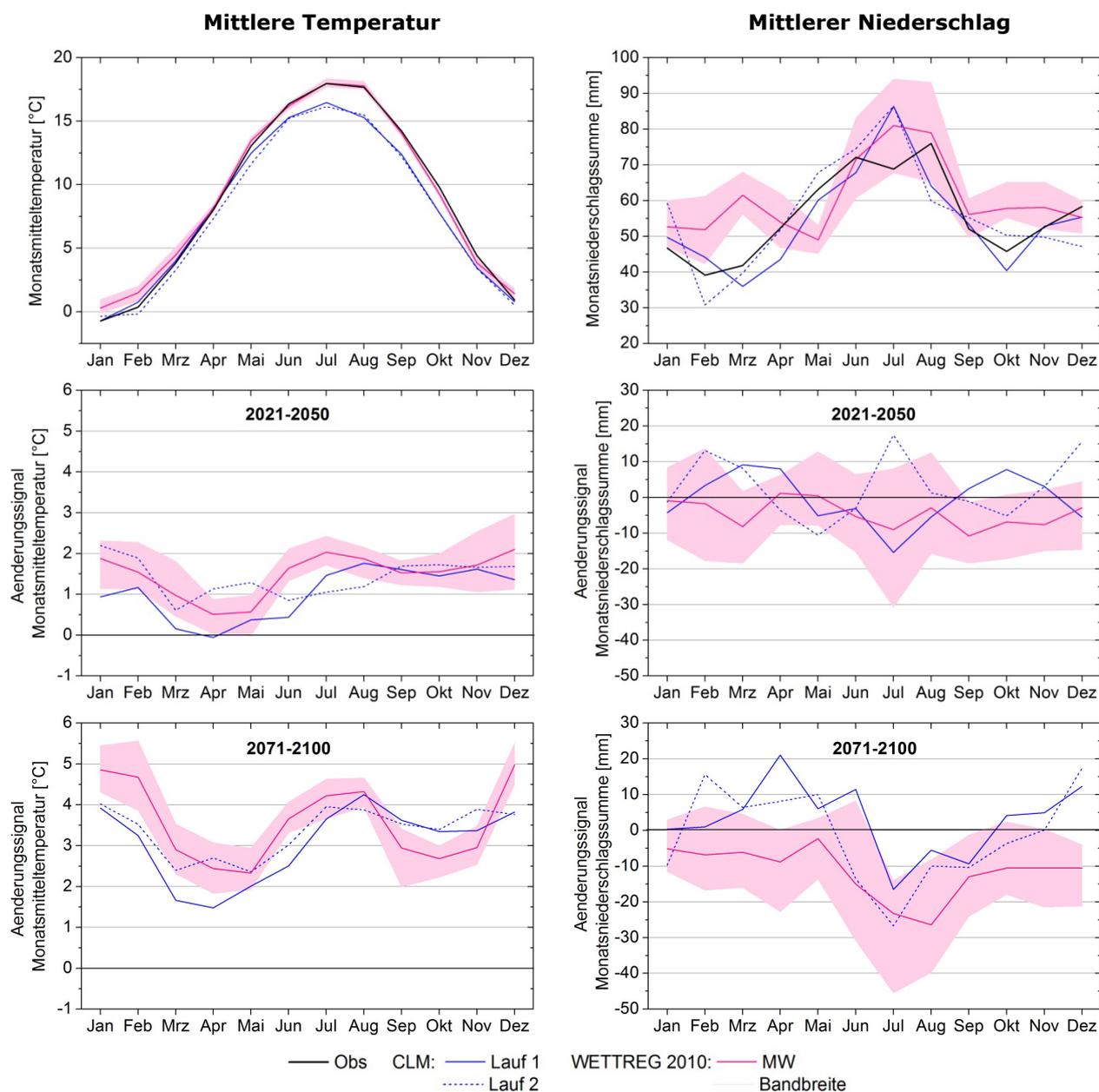


Abb. 2.5-1: Jahresgang der mittleren Monatstemperatur (links) sowie Monatsniederschlagssumme (rechts) an der Station Dresden Klotzsche im Referenzzeitraum 1961–1990 (oben) für die Beobachtungsdaten (schwarz), die beiden Läufe des Klimamodells CLM (blau; Gitterpunkt GP\_084\_123) und die zehn Läufe des Klimamodells WETTREG 2010 (pink; Mittelwert MW sowie die Bandbreite aller zehn Läufe) sowie Veränderung im Jahresgang in den Zeitscheiben 2021–2050 (Mitte) und 2071–2100 (unten) gegenüber 1961–1990 unter dem Szenario A1B.

Die Abbildungen Abb. 2.5-2 und Abb. 2.5-3 zeigen am Beispiel der Station Dresden Klotzsche den mittleren Jahresgang ausgewählter Kenntage in der Referenzperiode 1961–1990 sowie die projizierten Veränderungen für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100. Für das dynamische Klimamodell CLM sind dabei die Werte für die Rasterzelle GP\_084\_123 dargestellt, welche diese Station beinhaltet.

Grundsätzlich treten **heiße Tage** (Maximaltemperaturen von  $\geq 30^{\circ}\text{C}$ ) in den Sommermonaten auf, wobei sie in Dresden Klotzsche im Juli am häufigsten sind (Abb. 2.5-2, oben links). Auch in den Monaten Mai und September werden verein-

zelt maximale Tagestemperaturen von mindestens  $30^{\circ}\text{C}$  erreicht. Der zweite Lauf von CLM sowie sämtliche WETTREG 2010 Läufe unterschätzen die Zahl heißer Tage zum Teil deutlich.

Die Zahl heißer Tage nimmt in den beiden betrachteten Klimamodellen in der Zeitscheibe 2021–2050 um 2,9 bis 10,6 Tage gegenüber dem langjährigen Mittel (1961–1990) von 6,8 heißen Tagen zu (Abb. 2.5-2, Mitte links). Zum Ende des 21. Jahrhunderts hin werden mit +14,3 bis +25,4 Tagen noch größere Zunahmen in der Zahl heißer Tage projiziert (Abb. 2.5-2, unten links).

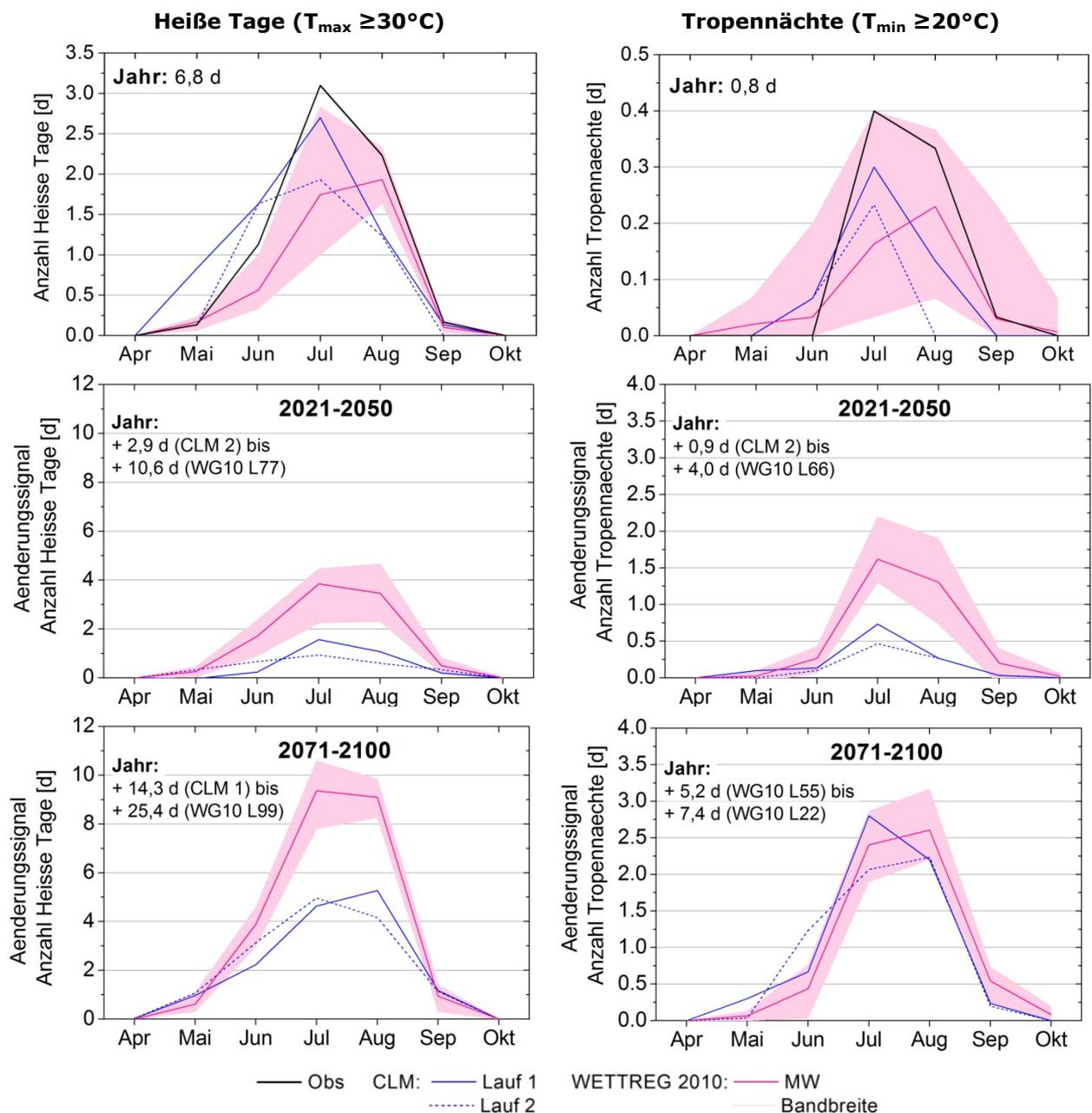


Abb. 2.5-2: Wie Abb. 2.5-1 jedoch für die Anzahl heißer Tage (links) und Tropennächte (rechts); Jahresgang für April bis Oktober. unter dem Szenario A1B.