

# Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in der Metropolregion Hamburg

25.02.2014

F. Herrmann<sup>\*</sup>, F. Wendland<sup>\*</sup>, Lena Hübsch<sup>\*\*</sup>, Udo Müller<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Forschungszentrum Jülich, IBG-3 Agrosphäre

<sup>\*\*</sup> Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover

# Gliederung

## Hintergrund

### Das Wasserhaushaltsmodell mGROWA

- Modellkonzept
- Datengrundlagen

### mGROWA-Simulation des Wasserhaushalts für die beobachtete Referenzperiode

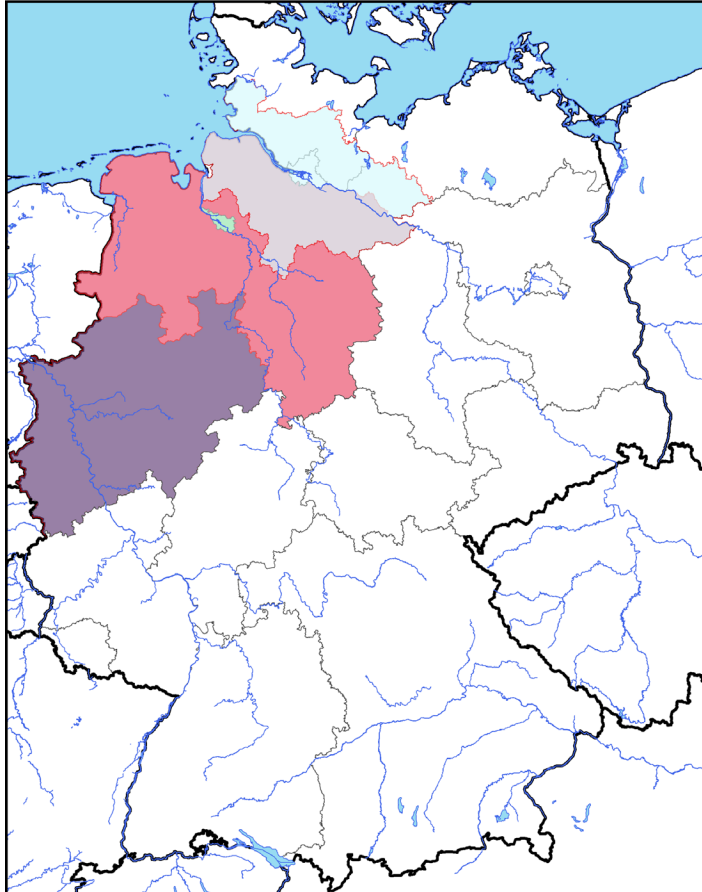
- Simulationsergebnisse und deren Evaluierung
- Zusammenfassung

### mGROWA-Simulationen des möglichen zukünftigen Wasserhaushalts (bis 2100)

- Ergebnisse für verschiedene zukünftige hydrologische Perioden
- Mögliche Entwicklung der Grundwasserneubildung

## Zusammenfassung und Ausblick

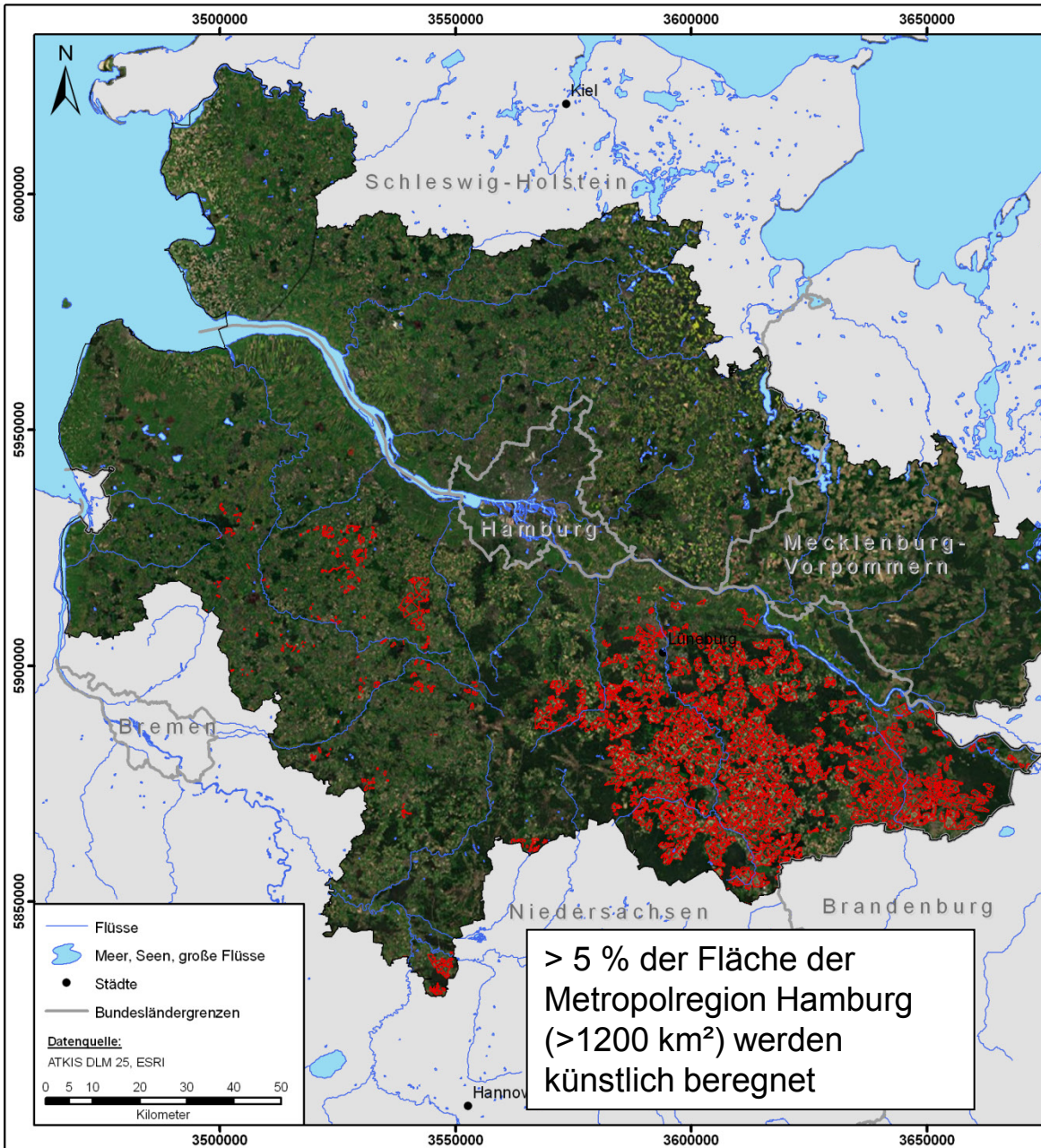
# Laufende Forschungsprojekte zum Thema: Klimawandel und (Grund-)Wasserressourcen



Zeit-raum	Auftraggeber	Forschungsthema
2010-2013	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)	Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in NRW
2009-2013	Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Geologischer Dienst Bremen	Quantifizierung und Bewertung des innerjährlichen Abflussgeschehens und der Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt in Niedersachsen und Bremen
2009-2014	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)	<b>Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg (KLIMZUG NORD)</b>
2010-2014	EU - 7th Framework Programme	Climate Induced Changes on the Hydrology of Mediterranean Basins (CLIMB)

## Ziele im Bezug auf die wasserwirtschaftliche Praxis:

Verfügbare Datenbasis für die Entscheidungsunterstützung im Zusammenhang mit Grundwasserneubildung, Grundwasserdargebot und Grundwasserentnahmen erweitern.



- Ein Großteil der für die Feldberegnung in der Metropolregion Hamburg benötigten Wassermengen müssen aus den Grundwasserleitern der Region gefördert werden.
- Im Sinne einer am Prinzip der Nachhaltigkeit orientierten Bewirtschaftungsstrategie, sollten nur die Mengen Grundwasser entnommen werden, die heute und zukünftig wieder neu gebildet werden können.
- Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des BMBF-Projektes KLIMZUG-Nord die möglichen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die **Grundwasserneubildung** und regional differenziert ermittelt.

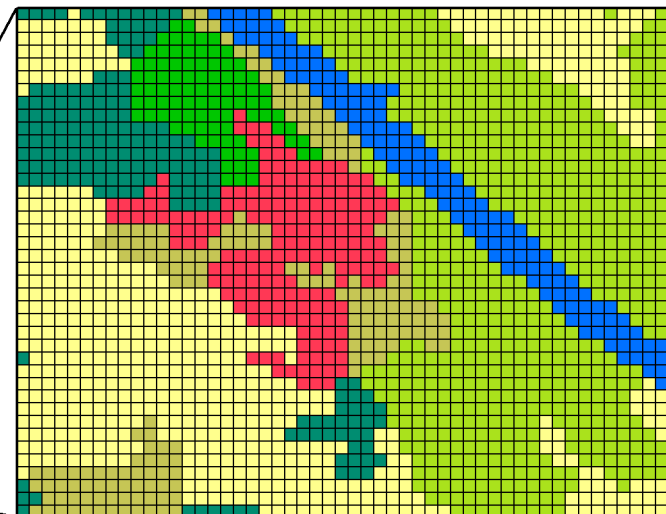
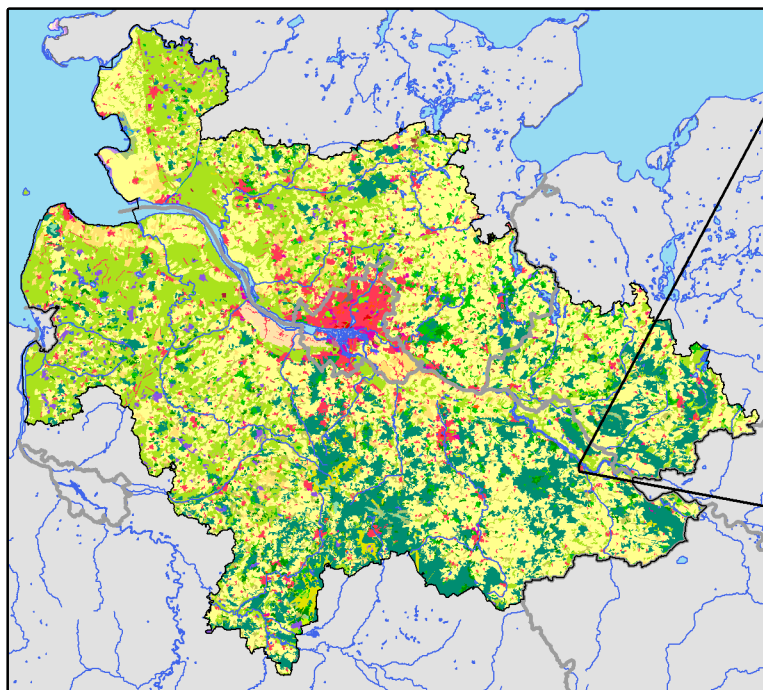
**mGROWA ist ein rasterbasiertes flächendifferenziertes Modell zur Bilanzierung:**

- *der Bodenfeuchteverteilung, der tatsächlichen Evapotranspiration und des Gesamtabflusses,*
- *des Direktabflusses (natürlicher Interflow und Drainageabfluss) sowie*
- *der Grundwasserneubildung*

über lange Zeiträume (hydrologische Perioden).

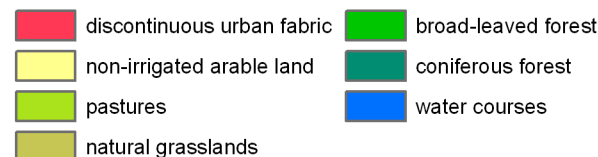
**Zeitliche Auflösung der Simulation:**

- *Bodenfeuchte und tatsächliche Evapotranspiration in Tagesschritten (BOWAB, Engel et al., 2013),*
- *Abflusskomponenten werden für einzelne Monate ausgegeben.*



**Metropolregion  
Hamburg:**

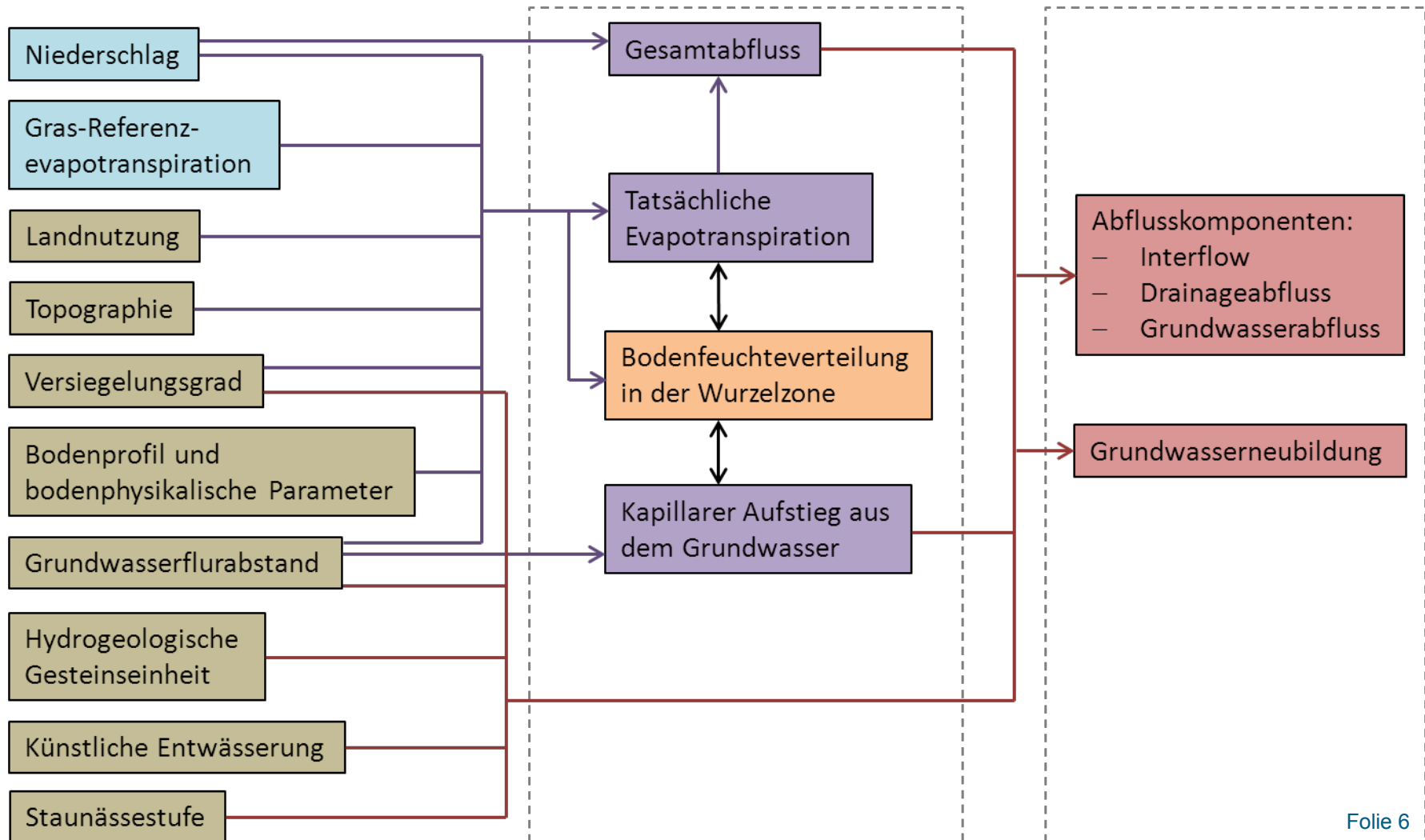
2,2 Mio. Zellen  
(1 ha groß)

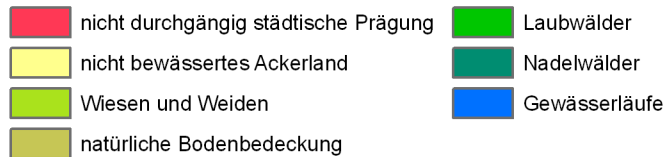
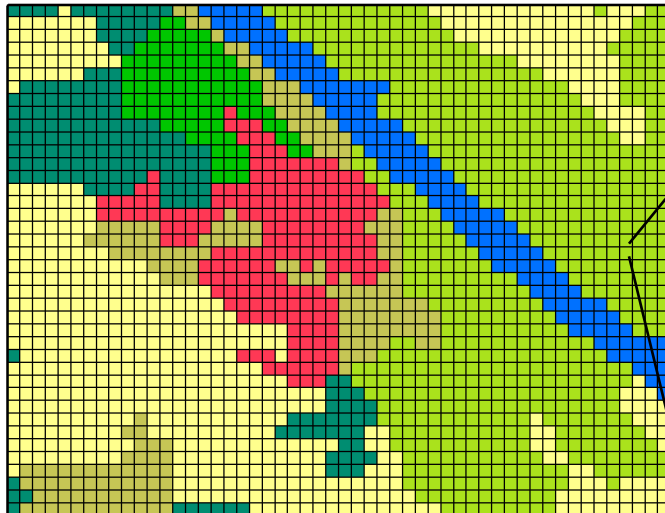


## Datenbasis & Standort-eigenschaften

## Simulation der Verdunstung und Abflussbildung

## Separation in Abfluss-komponenten und Grundwasserneubildung





Bilanzierung der Wassermengen für jede Zelle auf Basis der Wasserhaushaltsgleichung:

$$p + q_{in} = et_a + q_t + (s_2 - s_1)$$

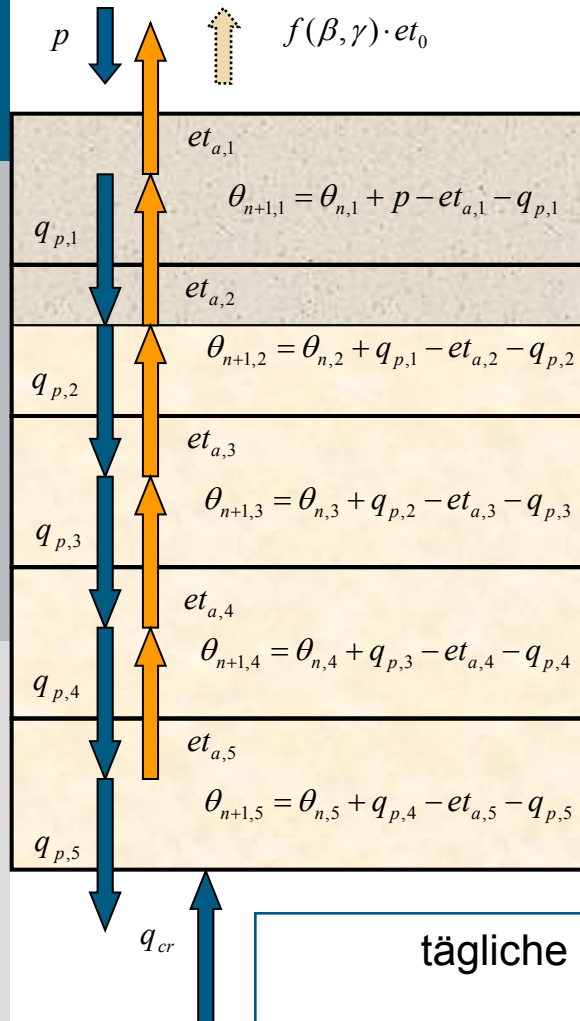
Berechnung der tatsächlichen Verdunstung auf Basis der Penman-Monteith-Gleichung, **standortspezifischer Parameter** und **standortspezifischer Funktionen**:

$$et_a = et_0 \cdot k_{LN} \cdot f(\beta, \gamma) \cdot f(s)$$



Die Funktion  $f(s)$  ist für verschiedene Standorttypen unterschiedlich definiert.

# Simulation des Bodenwasserhaushalts unter Vegetation in Tagesschritten (BOWAB, Engel et al., 2013)



$$et_{a,1} = (p - (p - et_{max}) \cdot S_1(\theta)) \cdot A_1$$

$$q_{p,1} = \begin{cases} 0 & \text{für } \theta_1 \leq FK_1 \\ \theta_1 - FK_1 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$et_{a,2} = et_{max} \cdot S_2(\theta) \cdot A_2$$

$$q_{p,2} = \begin{cases} 0 & \text{für } \theta_2 \leq FK_2 \\ \theta_2 - FK_2 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$et_{a,3} = et_{max} \cdot S_3(\theta) \cdot A_3$$

$$q_{p,3} = \begin{cases} 0 & \text{für } \theta_3 \leq FK_3 \\ \theta_3 - FK_3 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$et_{a,4} = et_{max} \cdot S_4(\theta) \cdot A_4$$

$$q_{p,4} = \begin{cases} 0 & \text{für } \theta_4 \leq FK_4 \\ \theta_4 - FK_4 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$et_{a,5} = et_{max} \cdot S_5(\theta) \cdot A_5$$

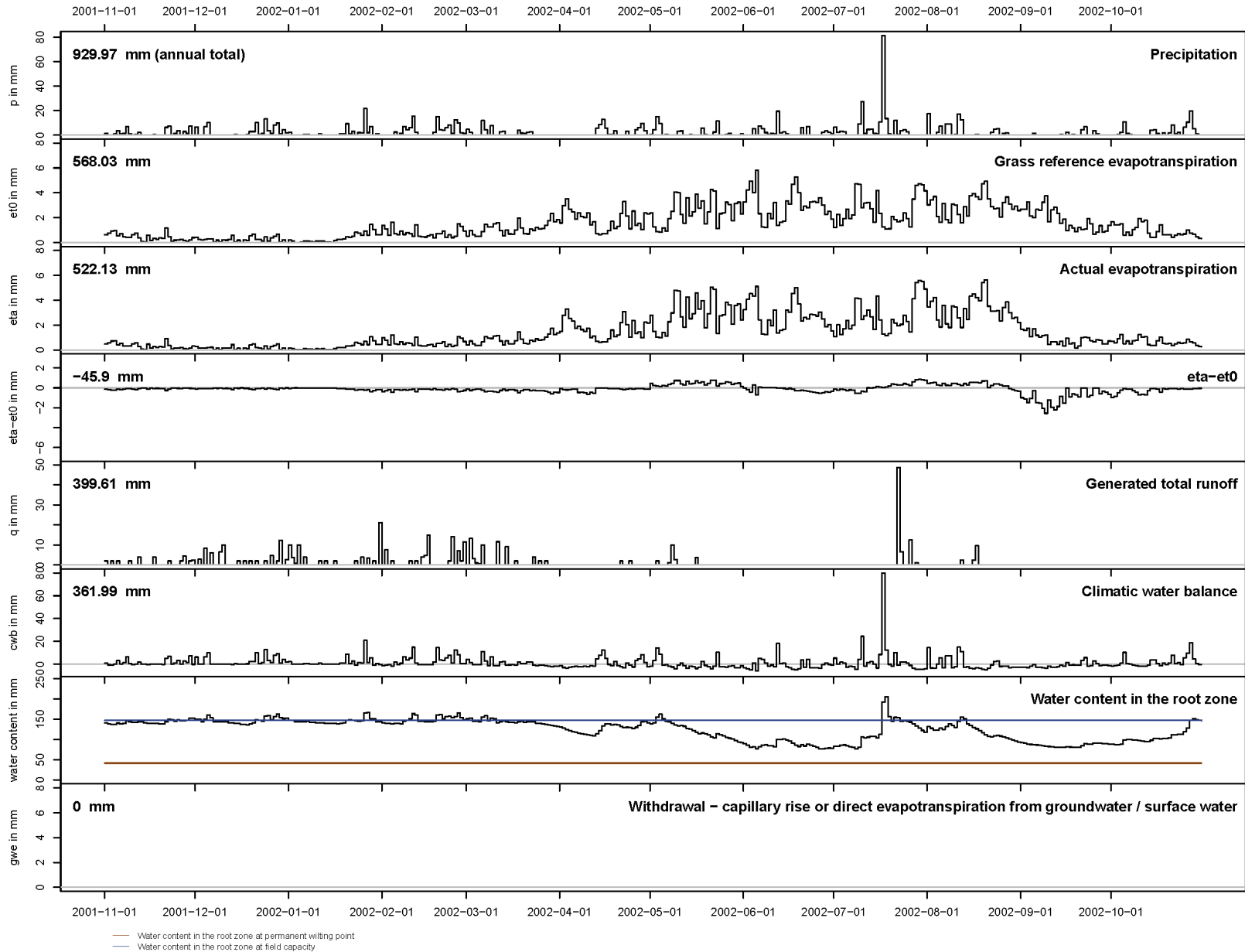
$$q_{p,5} = \begin{cases} 0 & \text{für } \theta_5 \leq FK_5 \\ \theta_5 - FK_5 & \text{sonst} \end{cases}$$

tägliche Sickerwasserrate  
=  
Gesamtabfluss von dieser Zelle

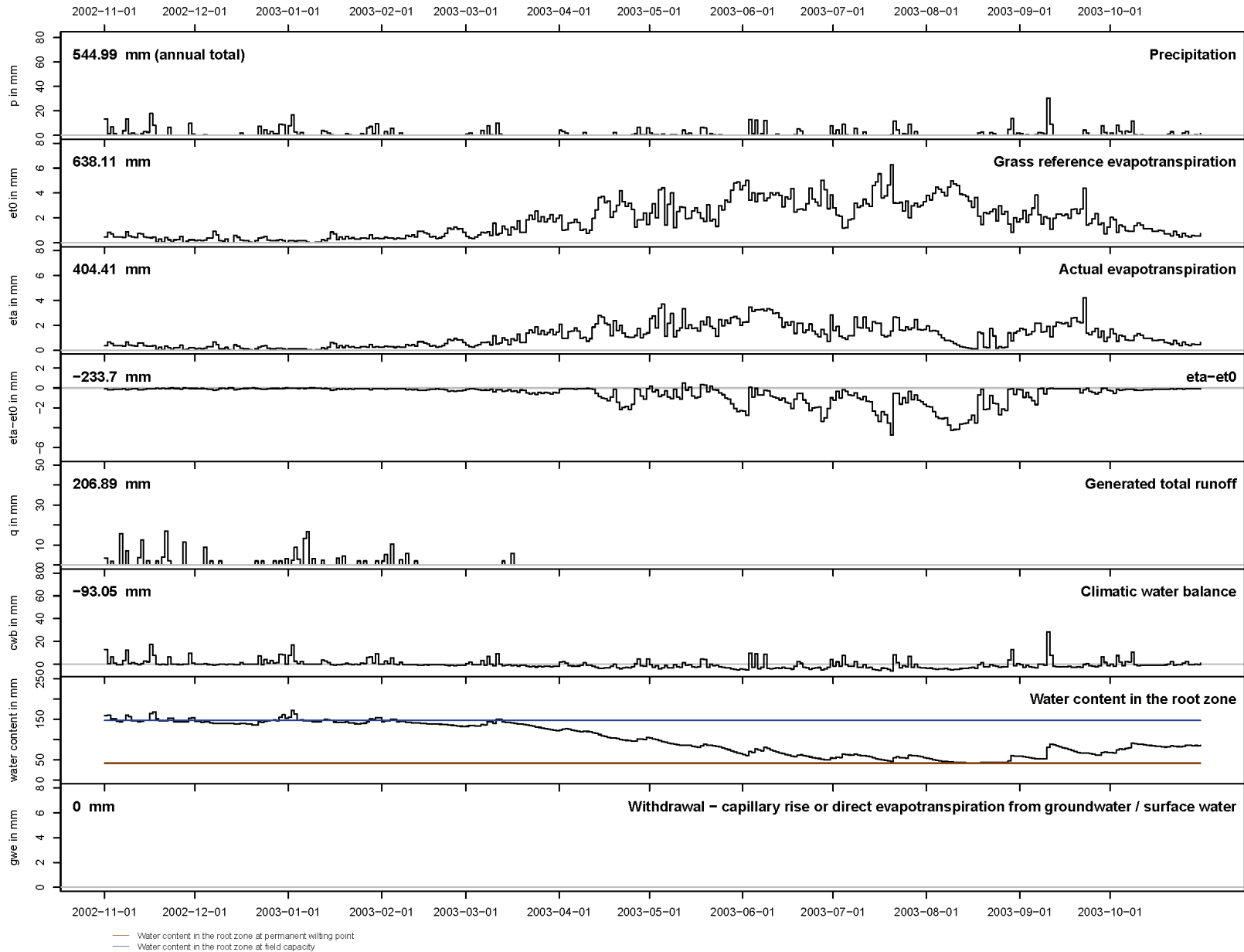
- Automatisierte Gliederung aller Rasterzellen mit Vegetation in beliebig viele Schichten (derzeit 5 Schichten je 3 dm mächtig).
  - Automatisierte Parametrisierung der Modellschichten auf Basis kartierter Bodenprofile (Berechnung nFK, FK, LD, ...)
1. Bestimmung von p und  $et_0$
  2. Bestimmung der kapillaren Aufstiegsrate in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt
  3. Berechnung der tatsächlichen Verdunstung in Abhängigkeit von Bodenfeuchte und Ausschöpfungstiefe.
  4. Berechnung der Sickerwasserraten zwischen den Schichten und aus der Wurzelzone (einfaches Überlaufmodell)
  5. Neuberechnung des Wassergehaltes pro Schicht



# Simulationsergebnisse für einen Ackerstandort in der Lüneburger Heide im Jahr 2002



# Simulationsergebnisse für einen Ackerstandort in der Lüneburger Heide im Jahr 2003



# Zeitlicher Verlauf des Bodenfeuchtedefizits in Niedersachsen vom 01.11.2002 bis 31.10.2004

Soil water deficit in the root zone

01.11.2002

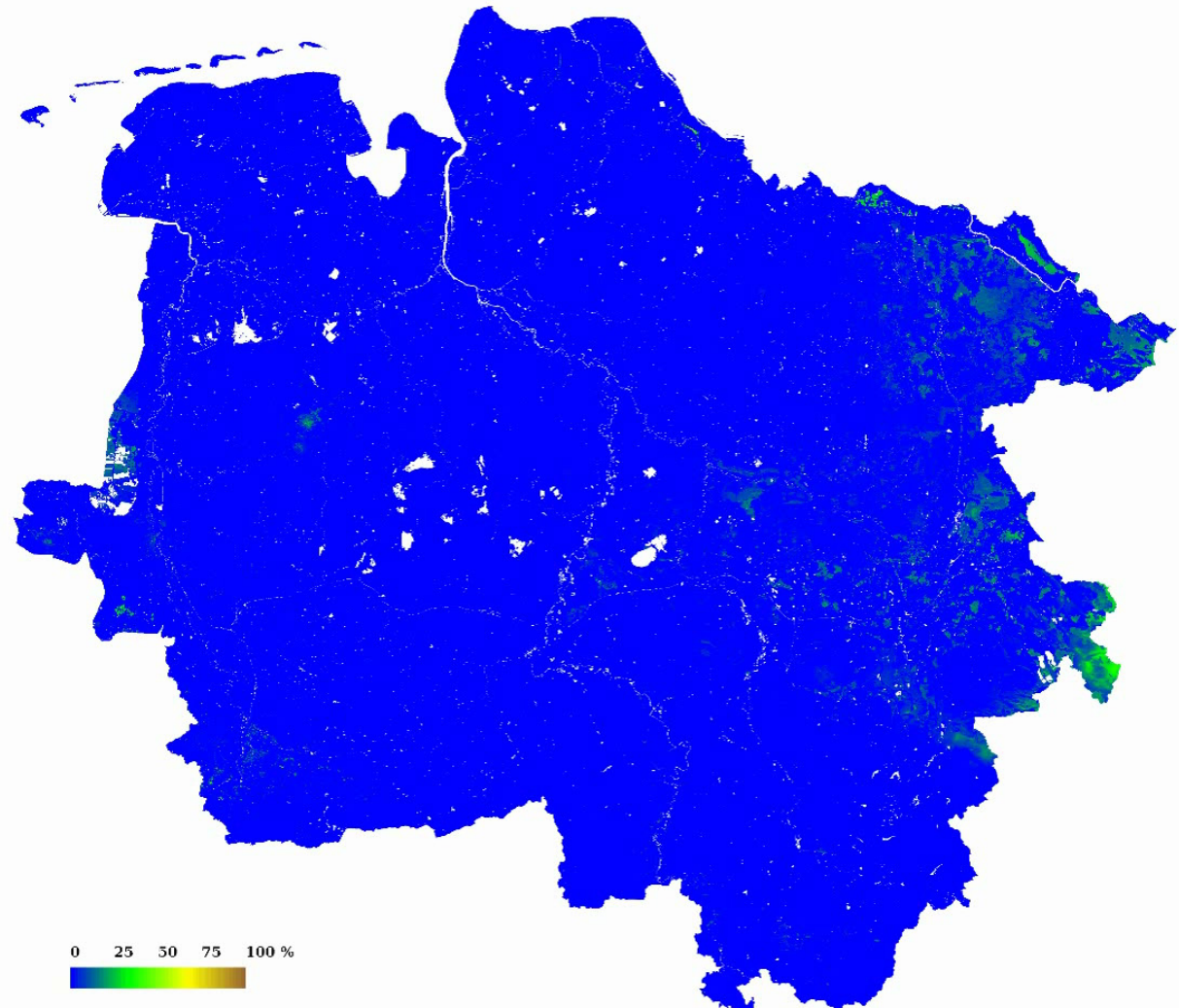
Das **Bodenfeuchtedefizit** ist die Wassermenge die benötigt wird, um den Wassergehalt in der Wurzelzone auf Feldkapazität zu bringen.

$$d_{sm} = 100 - \left( \frac{\theta - \theta_{pwp}}{\theta_{fk} - \theta_{pwp}} \cdot 100 \right)$$

## **Bedeutung:**

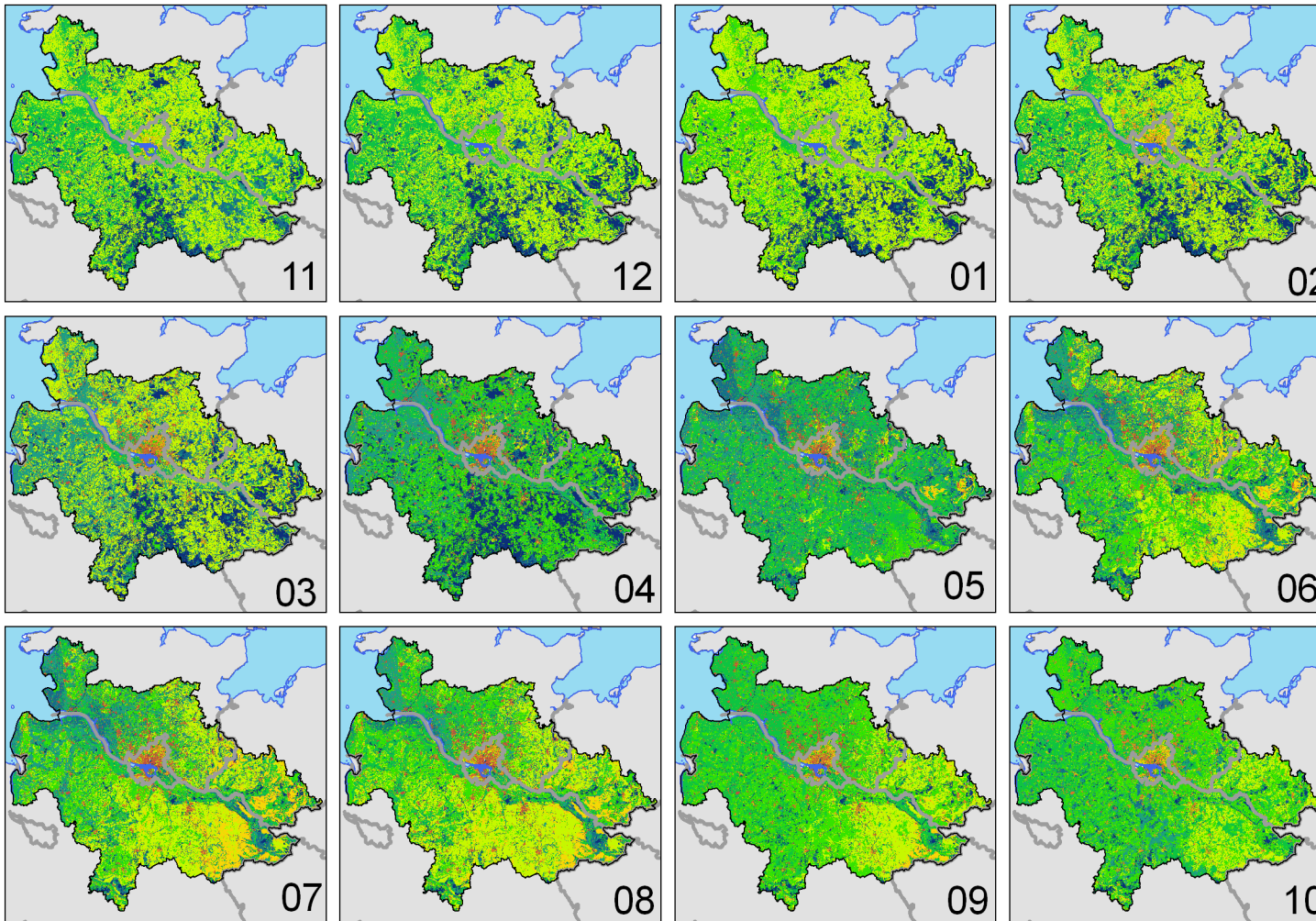
Bei hohem Defizit sinkt die Wasser und Nährstoffaufnahme der Vegetation, es besteht ab 60 % Defizit **Beregnungsbedarf!** (entspricht 40 % nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum)

Eine signifikante **Sickerwasserbewegung Richtung Grundwasser** findet nur bei geringem oder keinem Defizit statt!



# Evapotranspirationsverhältnis auf Basis des beobachteten Klimas

Klimadatenbasis: beobachtete DWD-Daten (1971 - 2000)



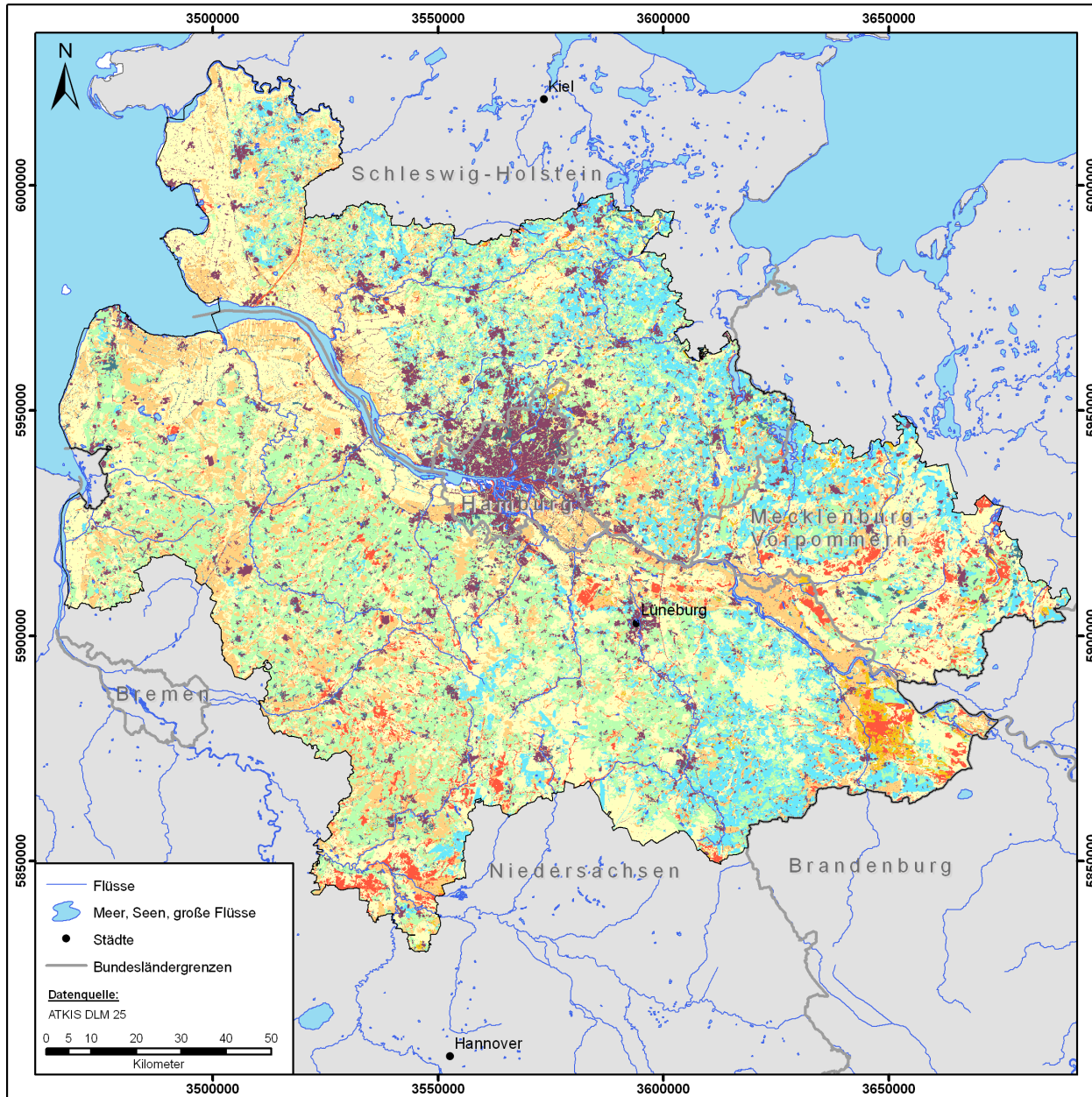
Evapotranspirationsverhältnis:

$$et_i = \frac{et_a}{et_0}$$

## Evapotranspirationsverhältnis

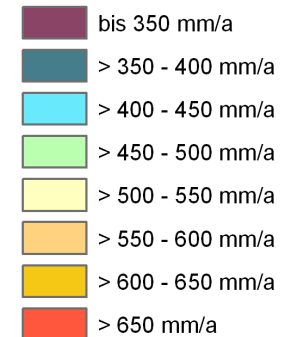


# Tatsächliche Evapotranspiration auf Basis des beobachteten Klimas



## Mittlere jährliche tatsächliche Evapotranspiration (1971 - 2000)

Klimadatenbasis:  
DWD

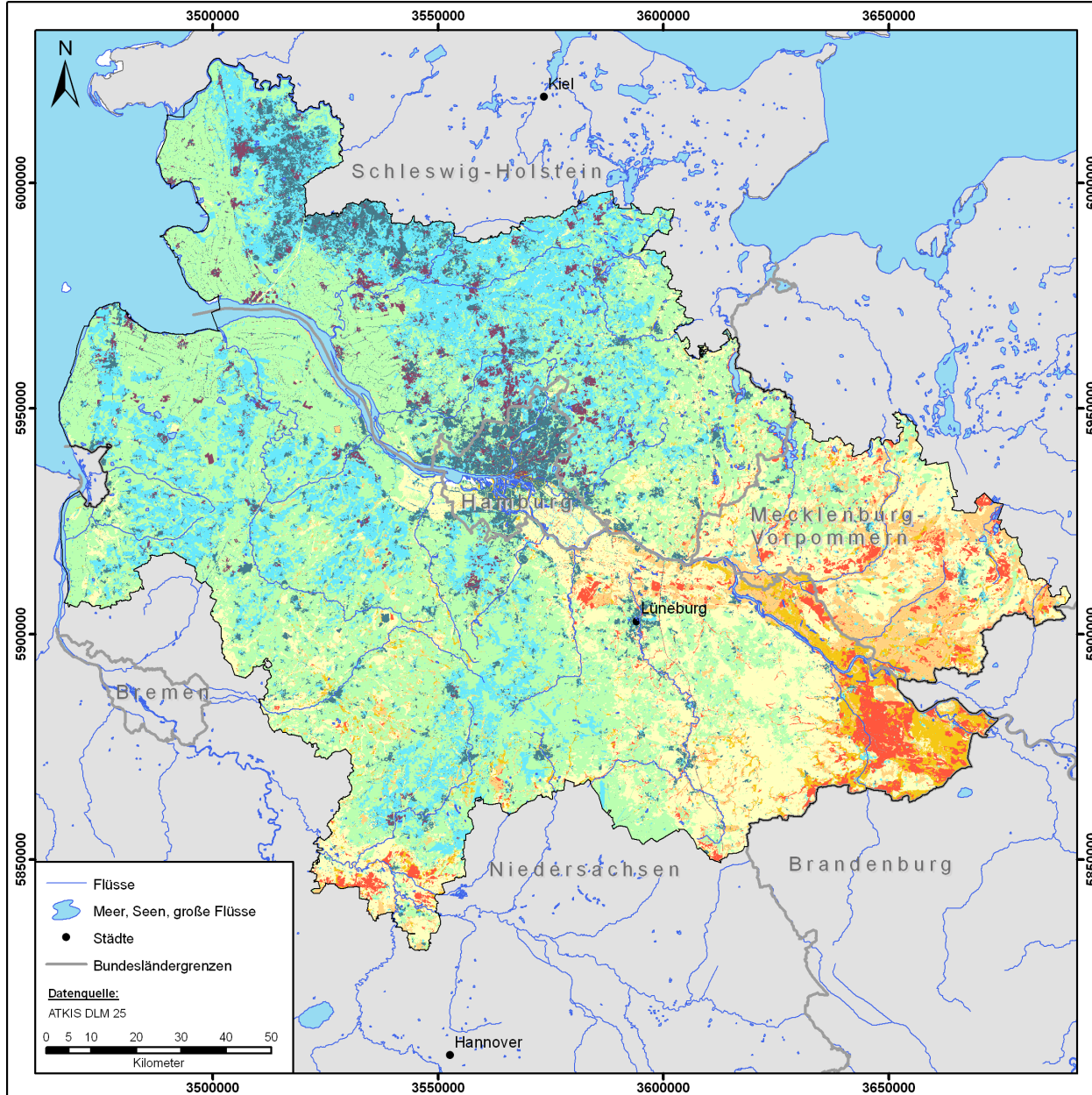


Datenquelle:

mGROWA Version 1.0 (2012)

### Forschungsprojekt KLIMZUG-NORD

Teilprojekt T 3.5: Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in der Metropolregion Hamburg



## Mittlerer jährlicher Gesamtabfluss (1971 - 2000)

Klimadatenbasis:  
DWD

- langjährige Wasserbilanz ist negativ
- bis 50 mm/a
- > 50 - 100 mm/a
- > 100 - 200 mm/a
- > 200 - 300 mm/a
- > 300 - 400 mm/a
- > 400 - 600 mm/a
- > 600 mm/a

Datenquelle:

mGROWA Version 1.0 (2012)

### Forschungsprojekt KLIMZUG-NORD

Teilprojekt T 3.5: Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserangebot und den Bodenwasserhaushalt in der Metropolregion Hamburg

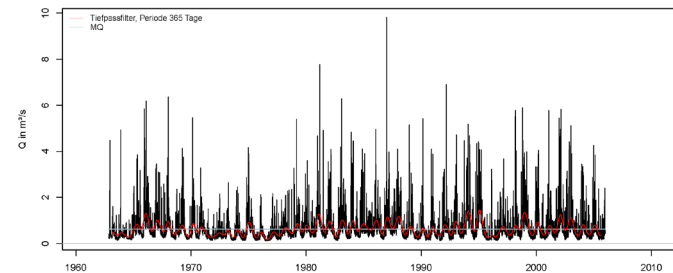


Institut für Bio- und Geowissenschaften  
IBG-3: Agrosphäre

# Evaluierung des Gesamtabflusses

Vergleich der simulierten Gesamtabflüsse mit mittleren jährlichen beobachteten Abflusspenden in geeigneten Einzugsgebieten.

Berechnung von Kennzahlen zur Bewertung der Güte der Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulation:

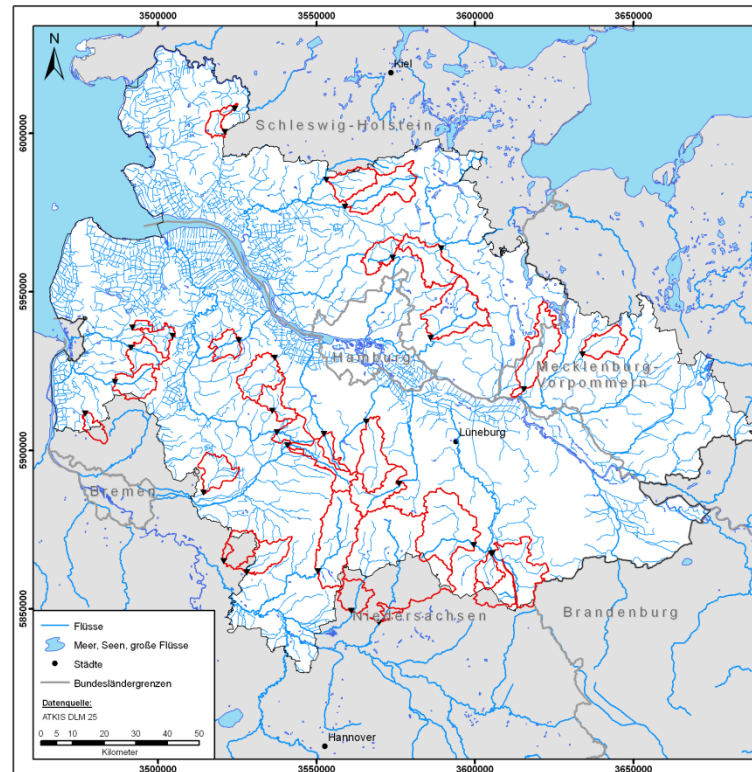
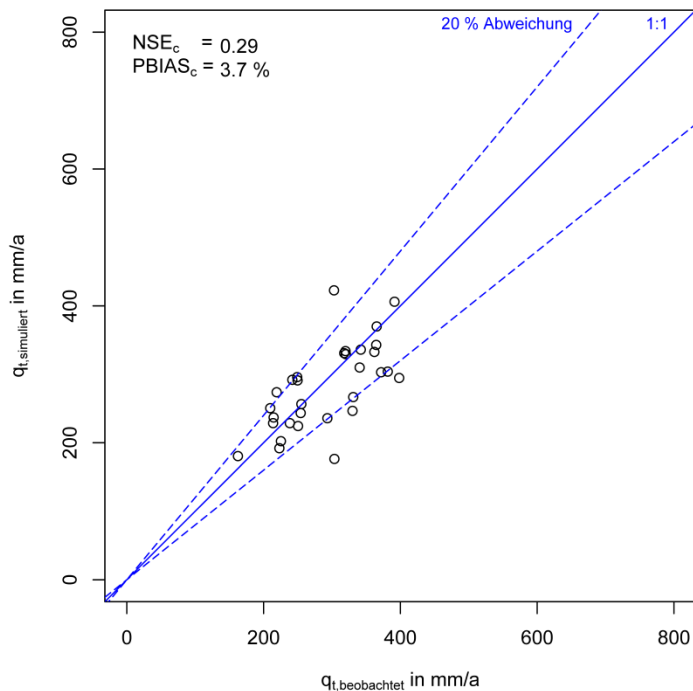


Wert größer 0  
kennzeichnet  
gute Modellperformance

→  $NSE_c = 0.29$      $PBIAS_c = 3.7$     ←

Werte nahe 0 bedeuten keine generelle  
Tendenz zum Über- oder Unterschätzen  
des Gesamtabflusses!

Mittlerer jährlicher Gesamtabfluss  
(1971 – 2000) in 31 Einzugsgebieten



Einzugsgebiete  
zur Evaluierung  
des Gesamtabflusses

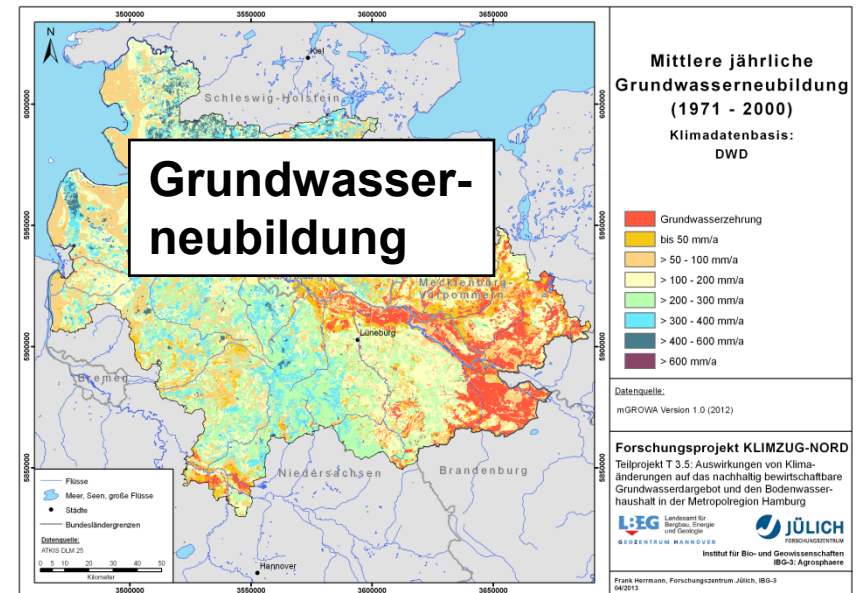
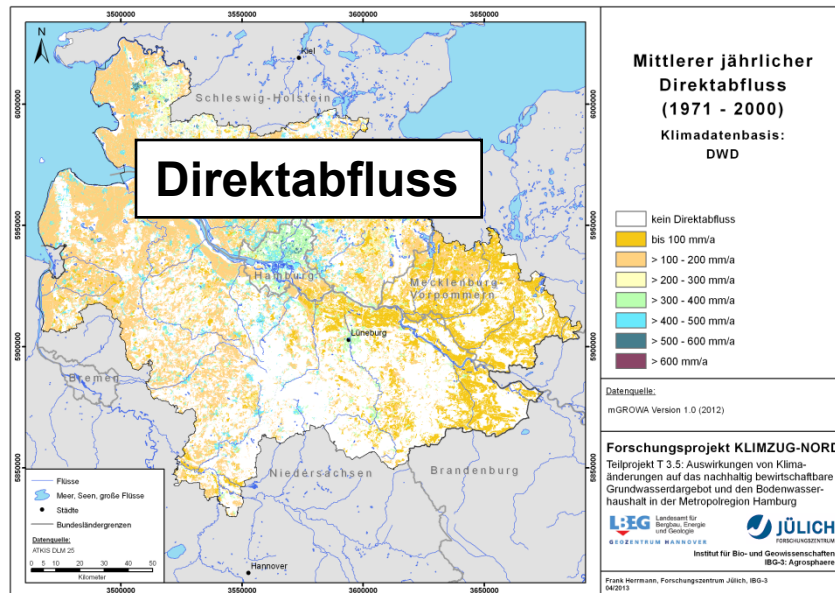
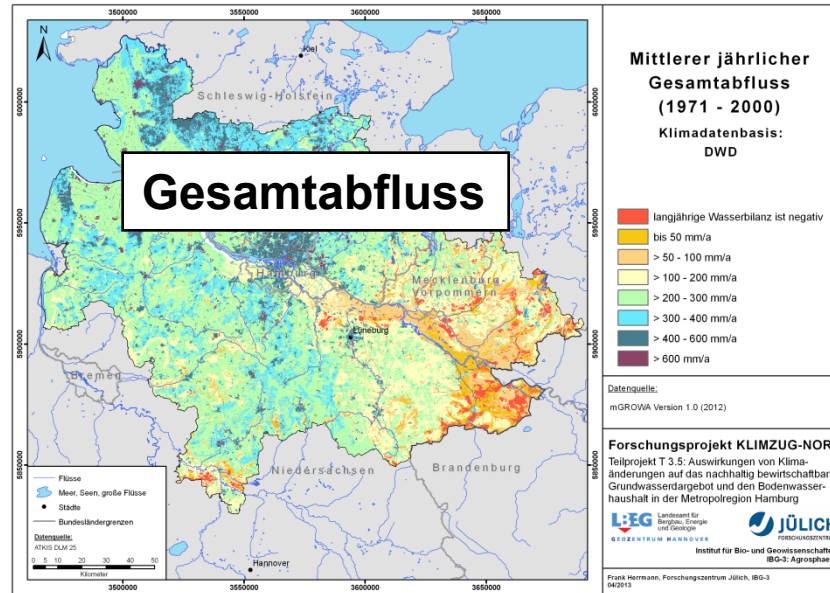
▼ Pegel  
 oberirdische Einzugsgebietsgrenzen

Datenquelle:

**Forschungsprojekt KLIMZUG-NORD**

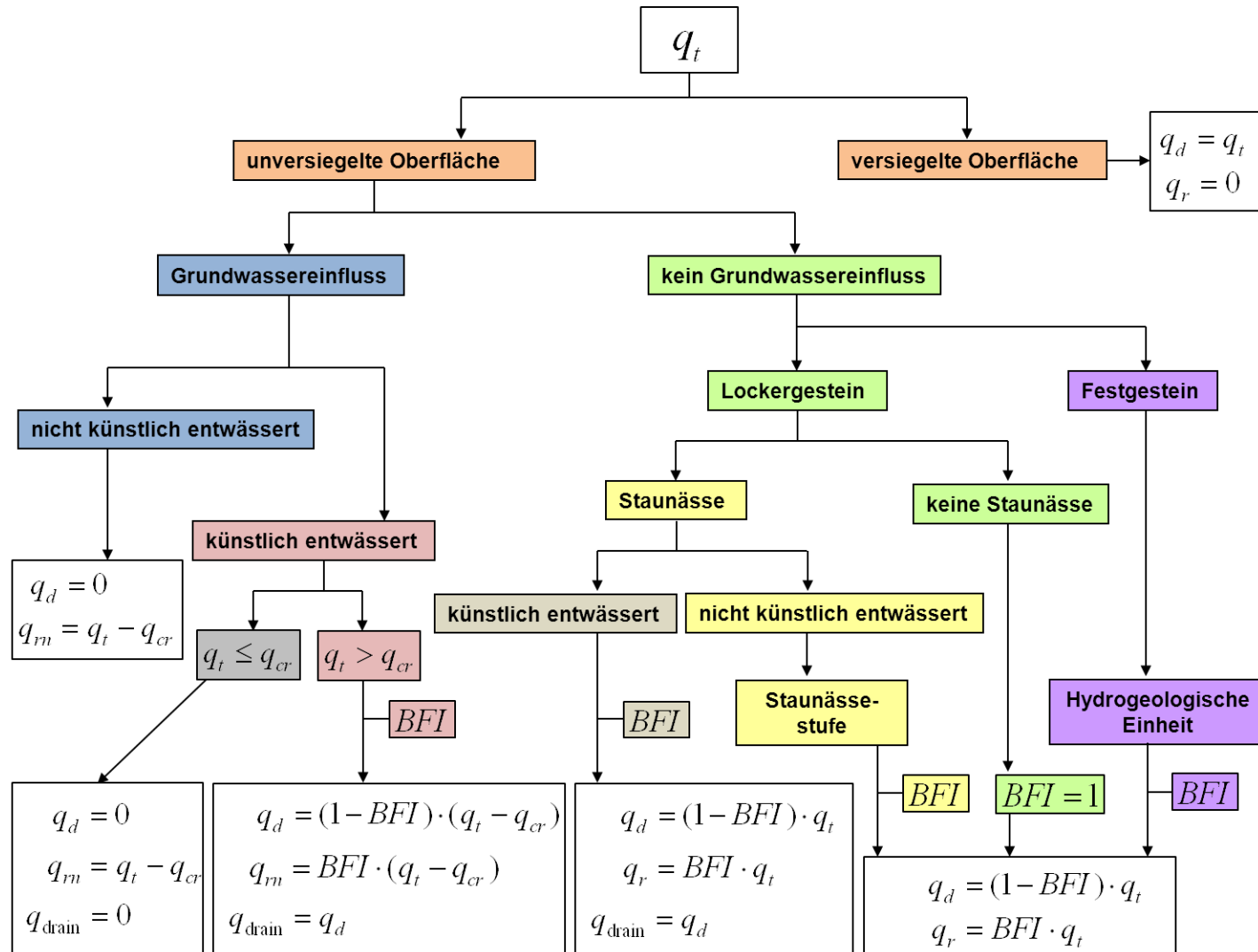
Teilprojekt T 3.5: Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in der Metropolregion Hamburg

# Simulationsergebnisse: Abflusskomponenten



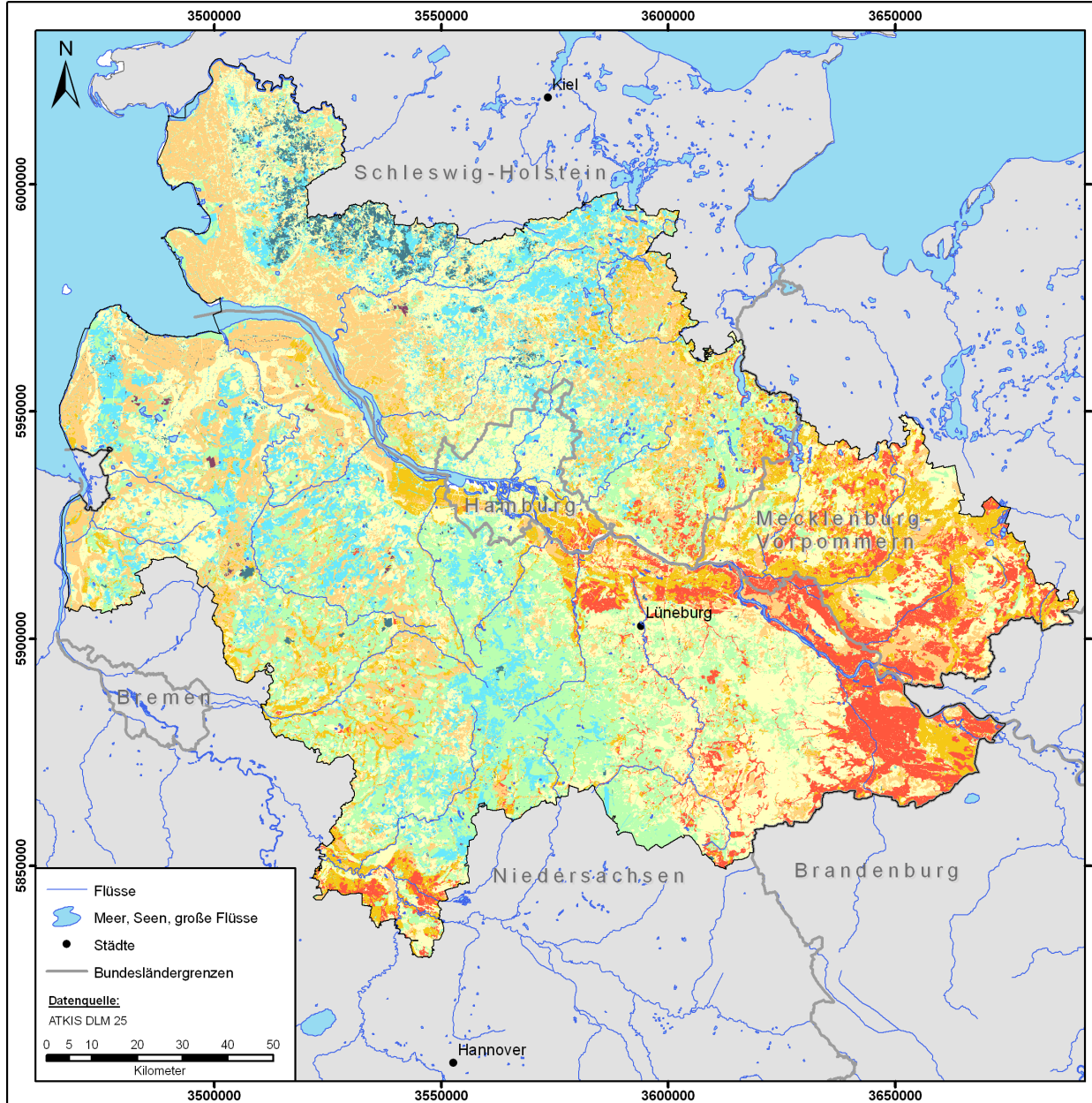


# Standortspezifische Separation des Gesamtabflusses in Grundwasserneubildung und Direktabflusskomponenten



$q_t$	Gesamtabfluss	$q_{rn}$	Netto-Grundwasserneubildung	BFI	Base-Flow-Index
$q_d$	Direktabfluss	$q_{drain}$	Drainageabfluss		
$q_r$	Grundwasserneubildung	$q_{cr}$	kapillarer Aufstieg		

# Grundwasserneubildung auf Basis des beobachteten Klimas



## Mittlere jährliche Grundwasserneubildung (1971 - 2000)

Klimadatenbasis:  
DWD



### Datenquelle:

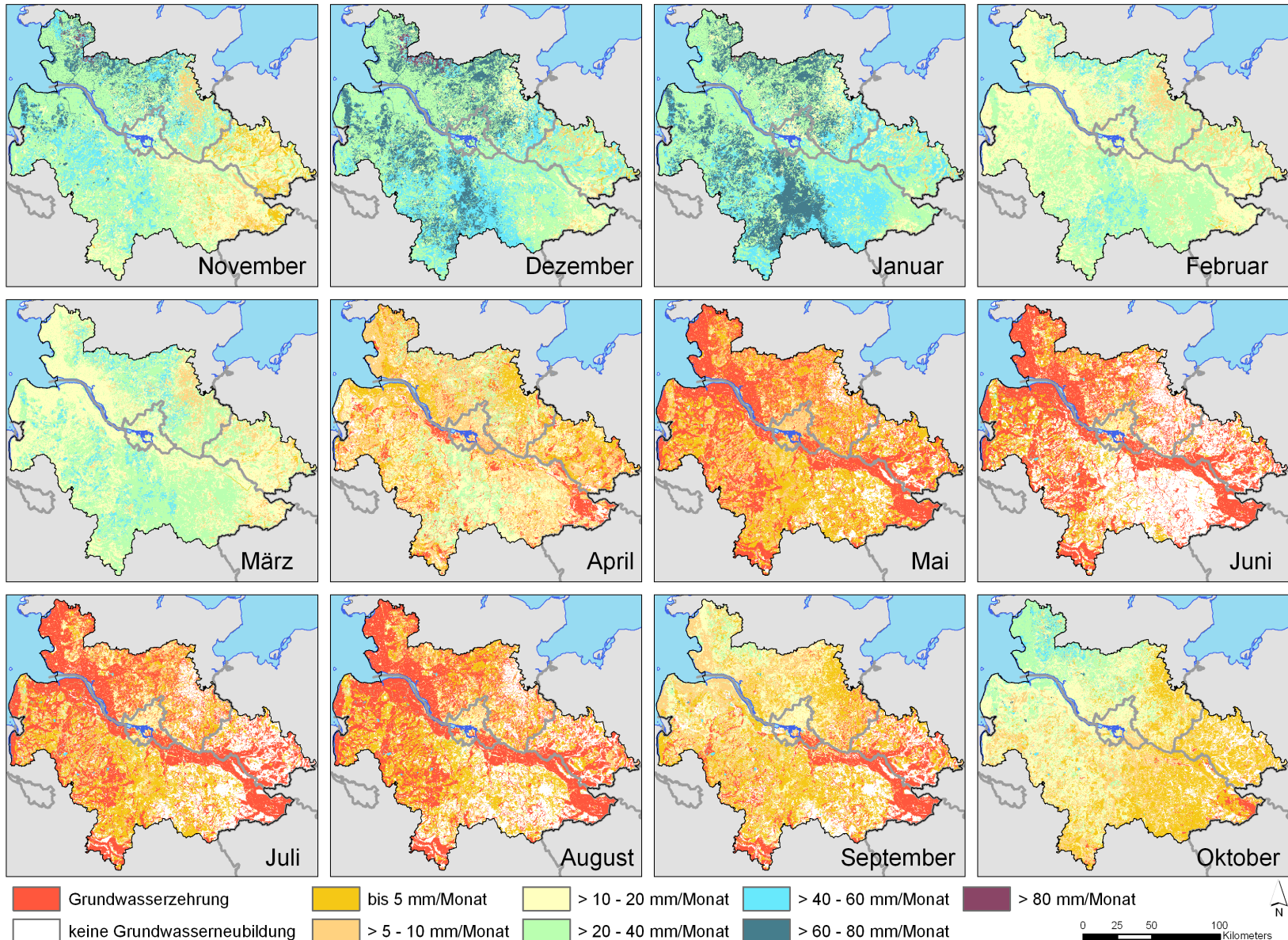
mGROWA Version 1.0 (2012)

### Forschungsprojekt KLIMZUG-NORD

Teilprojekt T 3.5: Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserangebot und den Bodenwasserhaushalt in der Metropolregion Hamburg

# Grundwasserneubildung auf Basis des beobachteten Klimas

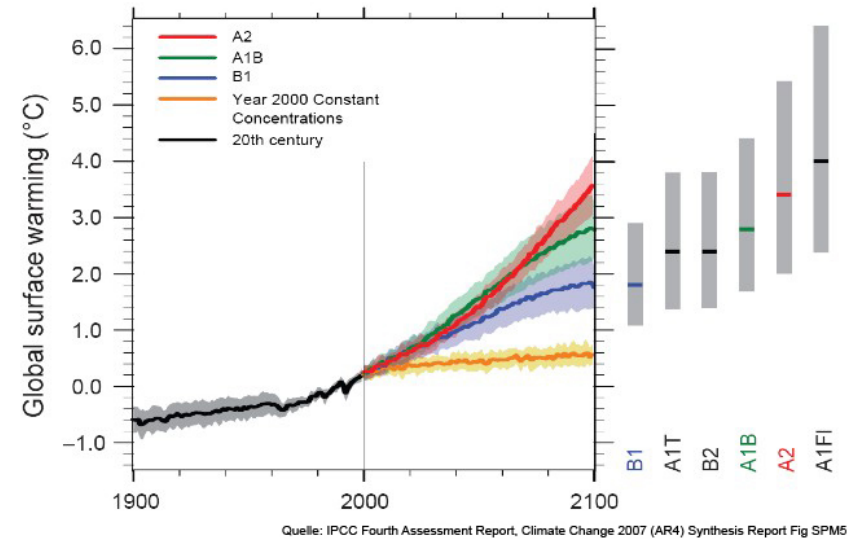
Mittlere monatl. Grundwasserneubildung (1971 - 2000) Klimadatenbasis: beobachtete DWD-Daten



# Datenbasis für die Simulation der möglichen zukünftigen Grundwasserneubildung

## Klimadaten aus zwei regionalen Klimamodellen (Emissionsszenario A1B):

- Realisierung 4 des Modells WETTREG 2010:
  - Keine BIAS-Korrektur
  - Kriging-Interpolation mit CLINT (Kunkel et al. 2012)
- REMO A1B 1 und 2:
  - Keine BIAS-Korrektur
  - Bi-lineare Interpolation



## mGROWA set-up:

- Unveränderte Landnutzung, Topographie, Bodenparameter, etc.
- Stationäre Grundwasseroberfläche → alle Drainagen bleiben in Betrieb
- Alle Verdunstungsparameter blieben unverändert

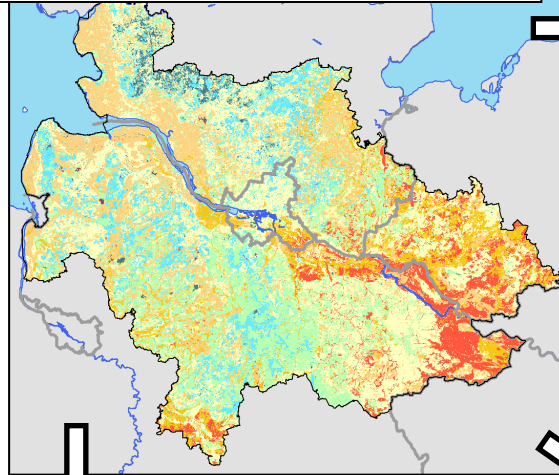
# Projizierte Veränderung der jährlichen Grundwasserneubildung

Möglich erscheinende Veränderung der jährlichen Grundwasserneubildung in der zukünftigen hydrologischen Periode 2071-2100 gegenüber Vergleichsperioden

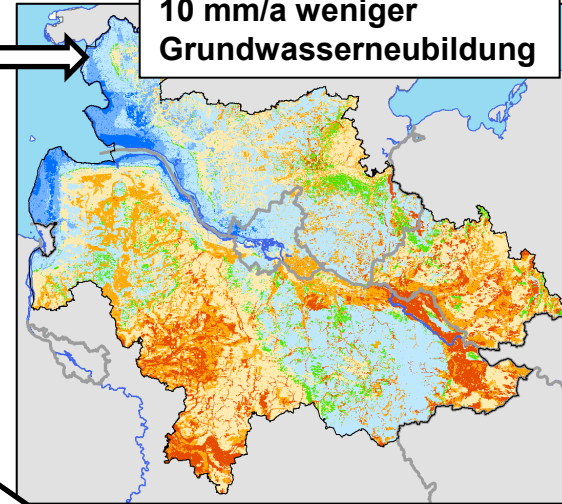
Beobachtete Referenzperiode (1971-2000)



150 mm/a Grundwasserneubildung

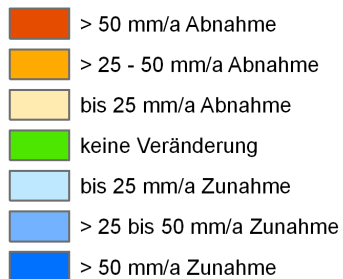


10 mm/a weniger Grundwasserneubildung

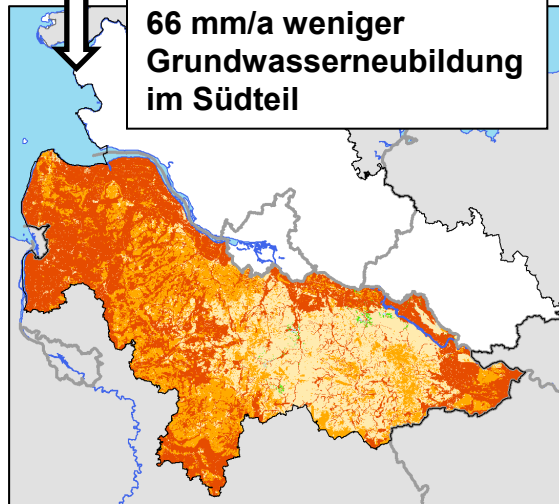


Klimadatenbasis: REMO (Emissionsszenario A1B 1)

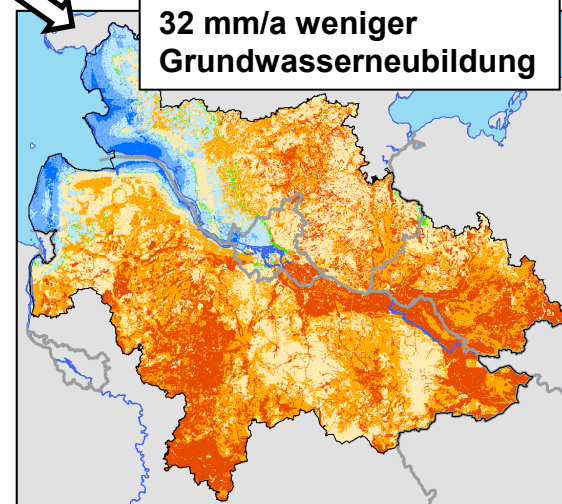
Klimadatenbasis: WETTREG (2010, R4, Emissionsszenario A1B)



66 mm/a weniger Grundwasserneubildung im Südtteil



32 mm/a weniger Grundwasserneubildung

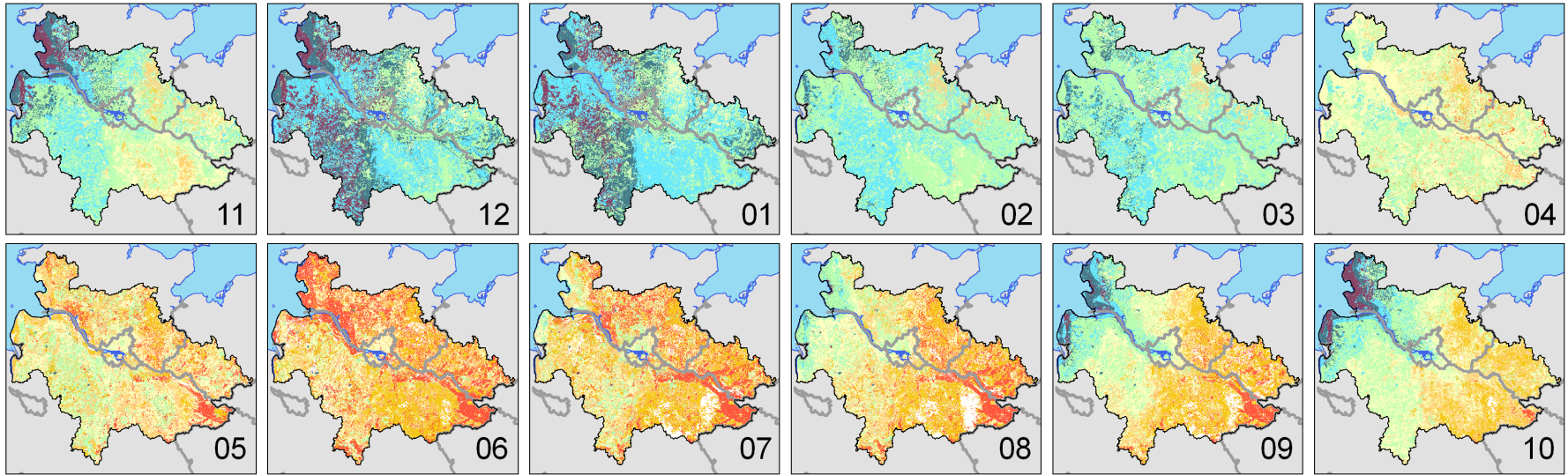


Klimadatenbasis: REMO (Emissionsszenario A1B 2)

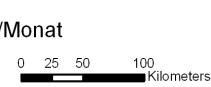
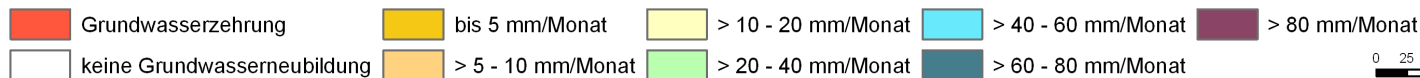
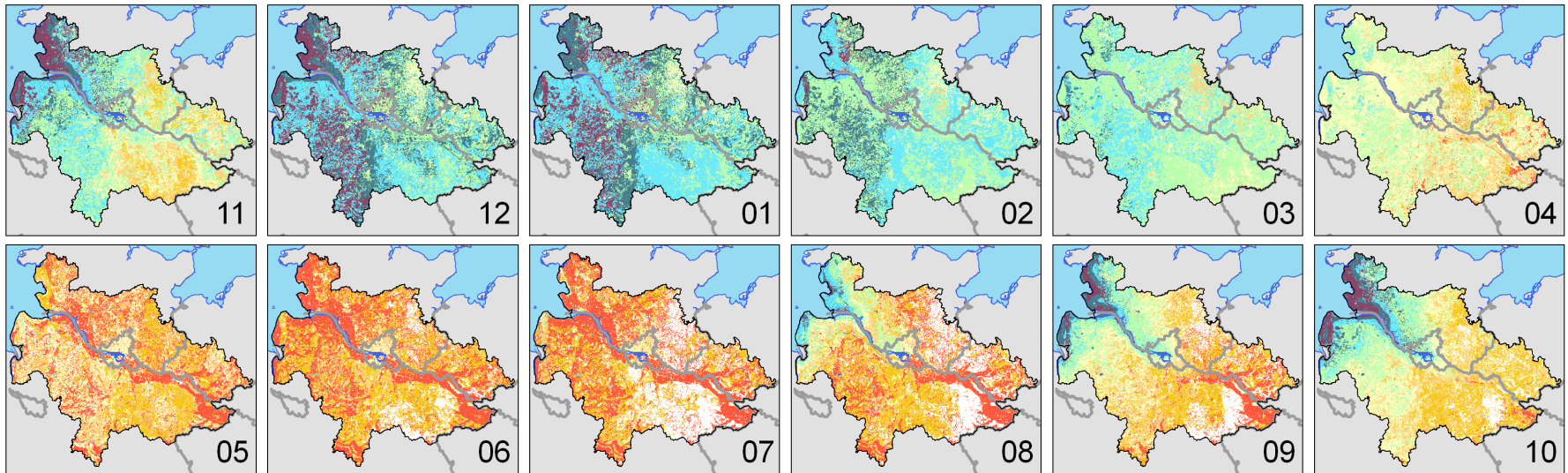


# Projizierte Veränderung der monatlichen Grundwasserneubildung

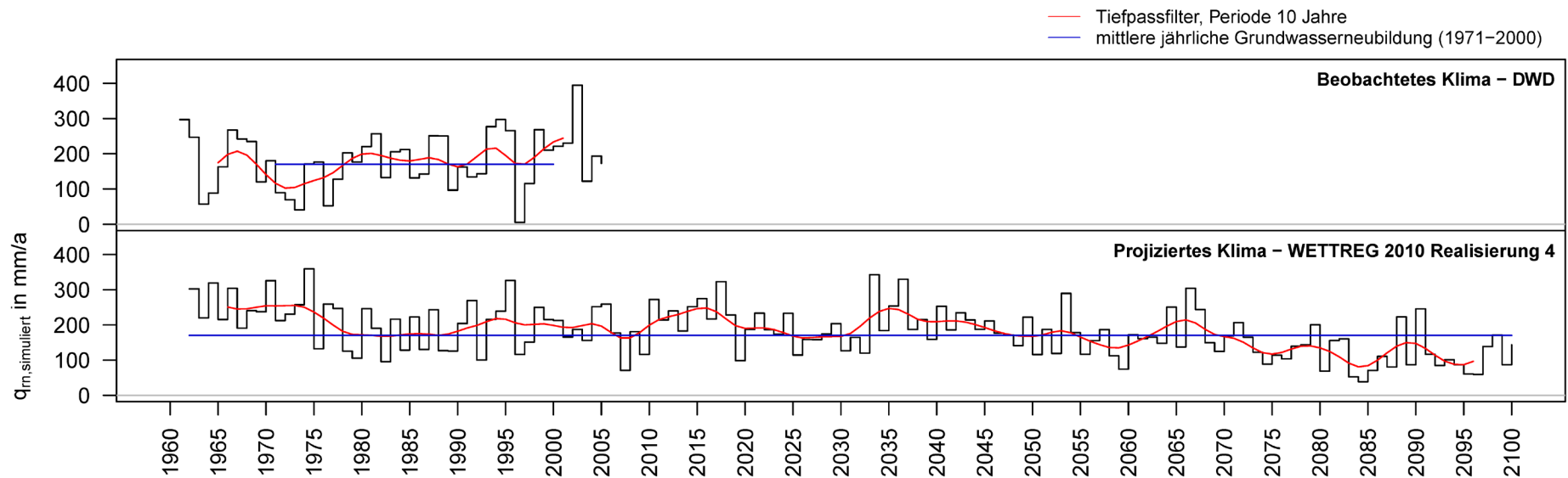
Klimadatenbasis: REMO A1B 2 (2011 - 2040)



Klimadatenbasis: REMO A1B 2 (2071 - 2100)

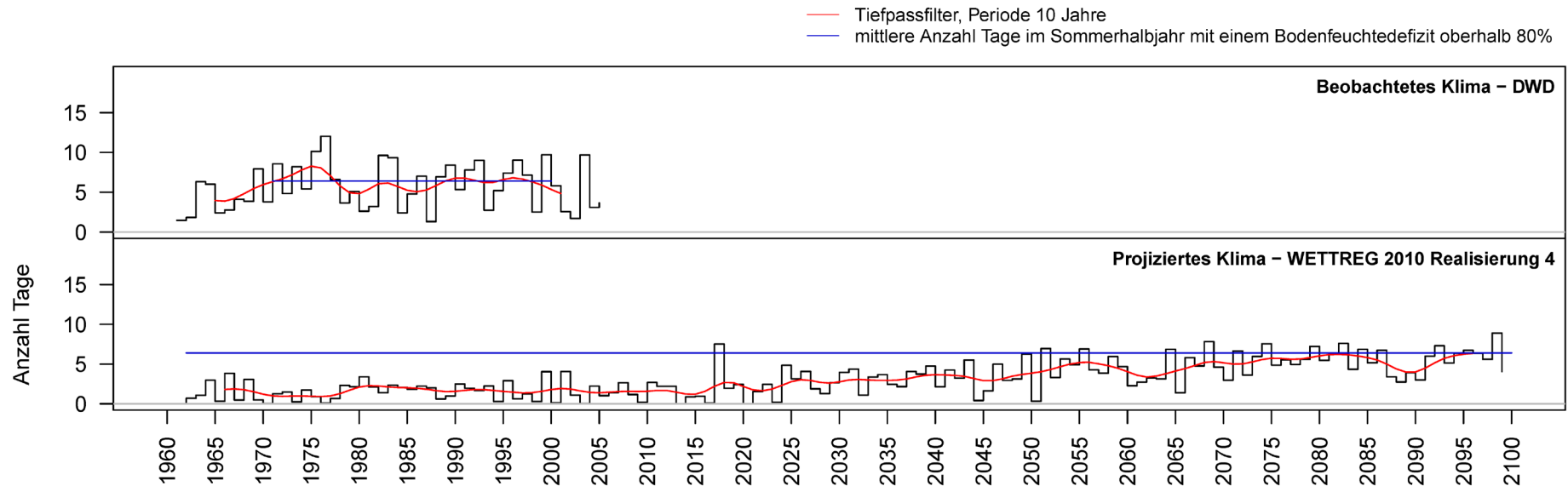


# Gebietsmittelwert der jährlichen Grundwasserneubildung im Südteil der Metropolregion basierend auf WETTREG 2010 R4



**Trend zu geringerer jährlicher Grundwasserneubildung**

# Anzahl der Tage im Sommerhalbjahr mit einem Bodenfeuchtedefizit über 80% auf Ackerflächen im Südteil der Metropolregion basierend auf WETTREG 2010 R4



**Trend zu längeren Trockenperioden im Sommerhalbjahr**



# Projizierte Veränderung des Evapotranspirationsverhältnisses

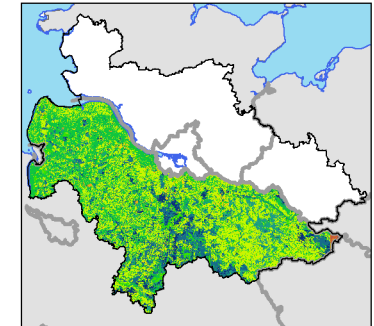
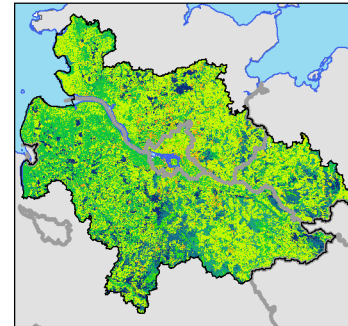
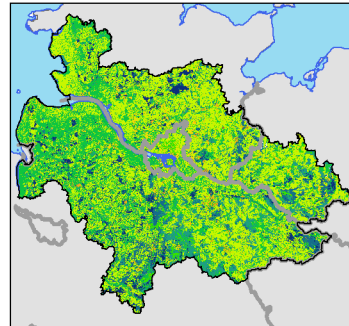
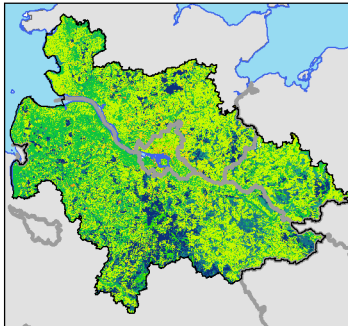
beobachtete  
DWD-Daten  
(1971 - 2000)

REMO A1B 1  
(2071 - 2100)

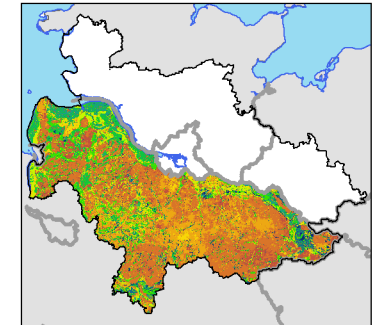
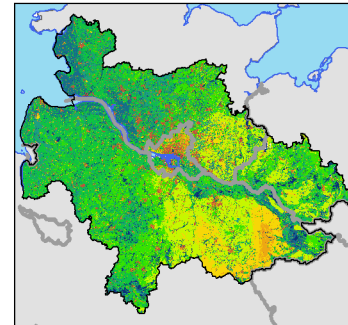
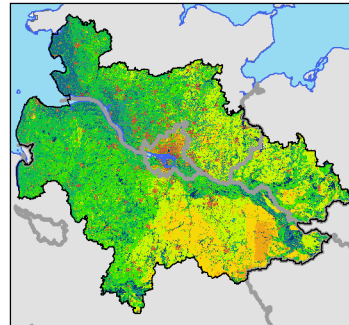
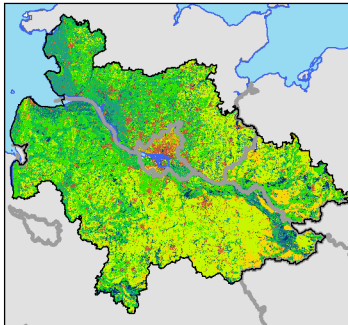
REMO A1B 2  
(2071 - 2100)

WETTREG  
2010 R4 A1B  
(2071 - 2100)

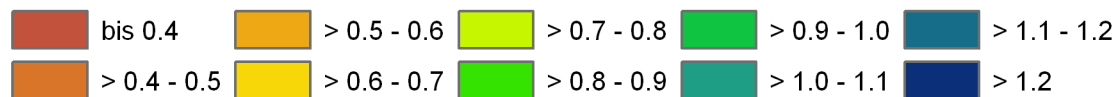
November



August



## Evapotranspirationsverhältnis



- Mit dem Modell mGROWA können die wasserwirtschaftlich relevanten Komponenten des Landschaftswasserhaushalts und insbesondere die Grundwasserneubildung räumlich hochaufgelöst (1 ha große Zellen) und zeitlich hochaufgelöst (Tage, Monate) über lange Zeiträume mit sich veränderndem Klima (mehrere hydrologische Perioden) simuliert werden.
- Die mit mGROWA für die Jahre von 1971 bis 2000 bilanzierten Wassermengen wurden durch Auswertung gemessener Abflussganglinien in einer Vielzahl von Einzugsgebieten in der Metropolregion Hamburg bestätigt. Es gibt keine nennenswerte Tendenz für Über- bzw. Unterschätzung der beobachteten Wassermengen.
- Basierend auf den mGROWA-Ergebnissen können praxisrelevante Kennzahlen für die Unterstützung von Entscheidungsprozessen beim Grundwassermanagement berechnet werden.
- Aus drei unterschiedlichen mit mGROWA simulierten Entwicklungspfaden des zukünftigen Wasserhaushalts resultiert für die Metropolregion Hamburg ein Rückgang der Gebietsgrundwasserneubildung in einer Spanne zwischen 10 und >50 mm/a. Diese Werte sind jedoch noch mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden. Eine Verkürzung der Neubildungsperiode auf November bis März (2071-2100) erscheint möglich.
- Derzeit wird ein mGROWA-Modul zur Bilanzierung der notwendigen Feldberegnung entwickelt. Damit werden zukünftig Simulationen von Grundwassernutzung und -neubildung mit einem Modell möglich.

## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

### Publikationen zum Thema:

Herrmann, F., Chen, S., Hübsch, L., Engel, N., Kunkel, R., Müller, U., Vereecken, H., Wendland, F., 2014. *Auswirkung von möglichen Klimaänderungen auf den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung in der Metropolregion Hamburg*. In: Kaden, S., Dietrich, O. Theobald, S. (Hrsg.). **Wassermanagement im Klimawandel – Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen**. (erscheint wahrscheinlich März 2014)

Herrmann, F., Chen, S., Heidt, L., Elbracht, J., Engel, N., Kunkel, R., Müller, U., Röhm, H., Vereecken, H., Wendland, F., 2013. *Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA*. **Hydrologie und Wasserbewirtschaftung**, 57(5): 206-224.

Engel, N., Müller, U., Schäfer, W., 2012. *BOWAB - Ein Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell*. **GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie**, 20: 85-98.

Kunkel, R., Röhm, H., Elbracht, J., Wendland, F., 2012. *Das CLINT Interpolationsmodell zur Regionalisierung von Klimadaten und WETTREG Klimaprojektionen für Analysen zum regionalen Boden- und Grundwasserhaushalt in Niedersachsen und Bremen*. **GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie**, 20: 6-31.