



A. Barein, Dr. F. Werner, Dr. J. Meßer,  
Dr. R. Fohrmann

# Prognose der Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser mit Hilfe eines Grundwasser- strömungsmodells am Beispiel der RWW-Wassergewinnung Üfter Mark

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Klimawandel in Regionen





# PROGNOSE DER AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DAS GRUNDWASSER MIT HILFE EINES GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELLS AM BEISPIEL DER RWW-WASSERGEWINNUNG ÜFTER MARK

Annika Barein, Dr. Florian Werner, Dr. Johannes Meßer

Emscher und Lippe Gesellschaften für Wassertechnik GmbH, Essen

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

Dr. Reinhard Fohrmann

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH, Mülheim/Ruhr

[www.iww-online.de](http://www.iww-online.de)

---

*dynaklim*-Publikation Nr. 42 / Oktober 2013



---

## Abstract:

Im Forschungs- und Netzwerkprojekt *dynaklim* untersucht das IWW u. a. die wasserwirtschaftlichen Auswirkungen von klimabedingten Veränderungen des Grundwasserhaushalts auf die Wassergewinnung. Mit dem Grundwasserströmungsmodell Üfter Mark wurden stationäre Simulationen für die nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft durchgeführt und mit dem Istzustand (1961-1990) verglichen. Als Grundlage für die Simulationen wurde die Grundwasserneubildung für die genannten Varianten in Abhängigkeit von den sich ändernden Niederschlägen und potenziellen Verdunstungen berechnet. Ebenso wurde der sich verändernde Beregnungsbedarf mit Hilfe von klimatischen Bodenwasserbilanzen ermittelt und in der Grundwassermodellierung berücksichtigt. Eine Veränderung der Entnahmemengen für die Trinkwasserversorgung wurde dagegen nicht vorgenommen.

**Beachte: Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse stellen Prognosen der möglichen zukünftigen Entwicklung, basierend auf den betrachteten Klimaprojektionen, dar.**

In der nahen Zukunft ist die Grundwasserneubildung höher als im Istzustand. Auch der Beregnungsbedarf ist etwas höher als heute, gleicht aber die erhöhte Grundwasserneubildung nicht aus, so dass das Grundwasserangebot in der Bilanz geringfügig höher ist als heute. Dadurch verkleinern sich die Einzugsgebiete der Brunnen. In der fernen Zukunft entspricht die Grundwasserneubildung in etwa der heutigen. Da der Beregnungsbedarf auf den Ackerflächen gegenüber dem Istzustand deutlich steigt (trockene Sommer), kommt es zu einem Defizit beim Grundwasserangebot von ca. 20 %. In der Folge würden die Grundwasserstände signifikant absinken. Dies würde zur Vergrößerung der

Einzugsgebiete der Brunnen und zu einem geringeren grundwasserbürtigen Abfluss in den Fließgewässern führen.

Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass durch die konkurrierenden Nutzungen von Grund- und Oberflächengewässern, insbesondere im Zeichen des Klimawandels erhebliche Probleme entstehen bzw. bereits bestehende weiter verschärft werden können. Ansteigende Berechnungsmengen können so auch heute schon nicht mehr konfliktfrei durch eine Vergrößerung des Einzugsgebietes ausgeglichen werden, sondern gehen zu Lasten der Fließgewässer (Folge: ökologische Beeinträchtigungen) oder verursachen örtlich und temporär stark sinkende Grundwasserstände (Folge: Landwirtschaftliche Ertragsverluste in nicht berechneten Regionen).

**Schlagworte (im *dynaklim*-Wiki):**

Klimawandel, Grundwasser, Neubildung, Modellierung, Trinkwassergewinnung

## Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	6
1.1 Veranlassung	6
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	6
2 Wahl des Modelltyps und Modellgebiets	6
3 Modellaufbau	7
3.1 Geologischer Aufbau	7
3.2 Verwendete Datengrundlagen	10
3.2.1 Grundwassermessstellen	10
3.2.2 Grundwasserneubildung	10
3.2.3 Durchlässigkeitsbeiwerte	12
3.3 Modelldiskretisierung und Parametrisierung	12
3.3.1 Struktureller Modellaufbau (Diskretisierung)	12
3.3.2 Vorfluter für das Grundwasser	12
3.3.3 Kanalisation	13
3.3.4 Dränagen	13
3.3.5 Fördermengen	14
3.3.6 Beregnung	14
4 Modellkalibrierung	17
5 Simulation Istzustand	18
5.1 Ermittlung der Einzugsgebiete und Fließzeitzone	18
5.2 Berechnung der Fließzeiten an Grundwassermessstellen	20
6 Simulationen nahe und ferne Zukunft	22
6.1 Berechnung der Fließzeiten für die nahe Zukunft	22
6.2 Berechnung der Fließzeiten für die ferne Zukunft	25
6.3 Vergleich zwischen naher und ferner Zukunft	29
7 Zusammenfassung und Fazit	32
8 Literaturverzeichnis	33

## Abbildungen

- Abb. 1: Lage des Modellgebietes und Verschnittfläche mit dem bestehenden Grundwassermodell „Dorsten-West“
- Abb. 2: Grundwassergleichen und Lage der GWM bzw. Brunnen
- Abb. 3: Verbreitung Bottroper Mergel und Lage des Profilschnittes (Büro Losen) im Modellgebiet
- Abb. 4: Umsetzung N-S-Profilschnitt (Büro Losen, oben / Modell, unten)
- Abb. 5: Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der Grundwasserneubildung
- Abb. 6: Grundwasserneubildung 1961-1990
- Abb. 7: Fließgewässer und ihre hydraulische Wirksamkeit
- Abb. 8: Landwirtschaftliche Dränagen
- Abb. 9: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte nach der Kalibrierung
- Abb. 10: Fließzeitzone für den Istzustand
- Abb. 11: Fließzeitberechnungen für ausgewählte Messstellen
- Abb. 12: Fließzeitberechnung für die Multi-Level-Messstelle
- Abb. 13: Grundwasserneubildungsdifferenzen zwischen dem Istzustand (1961-90) und der nahen Zukunft (2021-2050)
- Abb. 14: Fließzeitzone für die nahe Zukunft
- Abb. 15: Flurabstandsänderungen und Verschiebungen der Einzugsgebiete zwischen dem Istzustand und der nahen Zukunft
- Abb. 16: Grundwasserneubildungsdifferenzen zwischen dem Istzustand (1961-90) und der fernen Zukunft (2051-2100)
- Abb. 17: Fließzeitzone für die ferne Zukunft
- Abb. 18: Flurabstandsänderungen und Verschiebungen der Einzugsgebiete zwischen dem Istzustand und der fernen Zukunft
- Abb. 19: Veränderungen des Wasserhaushaltes durch die Beregnung
- Abb. 20: Differenzen in der Grundwasserneubildung zwischen naher und ferner Zukunft (beregnete Flächen sind schraffiert)
- Abb. 21: Änderung der Flächennutzung Brunnengalerie West
- Abb. 22: Änderung der Flächennutzung Brunnengalerie Ost

### **Tabellen**

- Tab. 1: Startwerte und Wertespannen der Durchlässigkeitsbeiwerte für die Modellschichten
- Tab. 2: Land- und Forstwirtschaftliche Flächennutzung im Modellgebiet (nach IT NRW 2010[9])
- Tab. 3: Übersicht der Fließzeiten und Definition der Fließzeitzonen
- Tab. 4: Flächennutzung innerhalb der Einzugsgebiete Istzustand
- Tab. 5: Bilanzierung der Einzugsgebiete Istzustand (Angaben in Mio. m<sup>3</sup>/a)
- Tab. 6: Fließzeiten und Flächennutzung jeder Messstelle
- Tab. 7: Flächennutzung innerhalb der Einzugsgebiete in der nahen Zukunft (Angaben in Mio. m<sup>3</sup>/a)
- Tab. 8: Bilanzierung der Einzugsgebiete in der nahen Zukunft (Angaben in Mio. m<sup>3</sup>/a)
- Tab. 9: Flächennutzung innerhalb der Einzugsgebiete für die ferne Zukunft (Angaben in Mio. m<sup>3</sup>/a)
- Tab. 10: Grundwasserneubildung / Modellergebnisse (mm/a)

### **Anlagen**

- Anlage 1: Abweichungen an den Messstellen
- Anlage 2: Kalibrierung: Grundwassergleichen gemessen und berechnet
- Anlage 3: Ausgangszustand: Flurabstände und Einzugsgebiete
- Anlage 4: Nahe Zukunft: Flurabstände und Einzugsgebiete
- Anlage 5: Ferne Zukunft: Flurabstände und Einzugsgebiete

## 1 Einleitung

### 1.1 Veranlassung

Das IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH bearbeitet mit Partnern das BMBF-geförderte Projekt *dynaklim*. Als Praxispartner für die Trinkwasserversorgung ist die RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH eingebunden. Mit Schreiben vom 24.11.2011 wurde die Lippe Gesellschaft für Wassertechnik mbH durch das IWW beauftragt, im Rahmen dieses Projektes ein stationäres Grundwasserströmungsmodell für das Wassergewinnungsgebiet Üfter Mark der RWW zu erstellen und die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserstände und Grundwasserströmungsverhältnisse zu prognostizieren.

### 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In Abstimmung mit dem AG war ein stationäres Grundwasserströmungsmodell zu entwickeln, mit dem die mittleren Strömungs- und Grundwasserneubildungsverhältnisse im Einzugsgebiet und Nahbereich der Trinkwassergewinnungsanlage Üfter Mark abgebildet werden. Auf Basis des Grundwasserströmungsmodells sollte eine Berechnung mittlerer Fließzeiten für den Ausgangszustand (1961-1990) sowie die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100) erfolgen. Die Bereiche gleicher Fließzeiten waren zu Fließzeitzone zusammen zu fassen. Für jede Fließzeitzone war zudem die flächendifferenzierte (mittlere) Grundwasserneubildung zu bestimmen, um die mittleren Mischungsverhältnisse der neu gebildeten Grundwässer jeder Fließzeitzone bestimmen zu können. In diesem Zusammenhang wurden auch die Infiltrations- bzw. Exfiltrationsmengen von Oberflächengewässern berücksichtigt. Die Ergebnisse sollten für den Ausgangszustand sowie die nahe und ferne Zukunft in Form von Gebiets-Wasserbilanzen übergeben werden. Für ausgewählte Grundwassermessstellen war zudem der Bereich der Grundwasserneubildung differenziert auszuweisen.

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung stand das bereits für den Lippeverband entwickelte Grundwasserströmungsmodell „Dorsten-West“ zur Verfügung. Durch Erweiterung dieses Modells in Richtung Norden und Aktualisierung der Geologie wurde ein Grundwasserströmungsmodell aufgebaut, das das Einzugsgebiet der Trinkwassergewinnungsanlage Üfter Mark vollständig erfasst.

## 2 Wahl des Modelltyps und Modellgebiets

Das Modellgebiet liegt im westlichen Münsterland zwischen den Städten Raesfeld, Reken und Dorsten. Die Lage des Modellgebietes ist in Abb. 1 dargestellt. Die von der Rheinisch-Westfälischen Wasserwerksgesellschaft mbH betriebene Trinkwassergewinnungsanlage Üfter Mark liegt südlich der Stadtteile Dorsten-Rhade und Raesfeld-Erle. Das Modell ist ein 3D-Modell, das aus dem bereits vorhandenen Grundwassermodell Dorsten-West durch Erweiterung nach Norden und Begrenzung auf das Untersuchungsgebiet im Süden entwickelt wurde. Das Modell wird für die Fragestellung stationär betrieben. Der Grundwasserleiter wird im Modellgebiet vorrangig durch die Schichten der Halterner Sande und das darüber lagernde, gering mächtige Quartär gebildet (Kap. 3.1). Unterhalb der Halterner Sande folgt der Recklinghäuser Sandmergel, der als geringer durchlässiger Grundwasserleiter berücksichtigt wurde (Abb. 4). Die Basis des Modells bildet der Emschermergel. Im mittleren Teil des Modellgebietes schalten sich die undurchlässigen Bottroper Mergel zwischen die Halterner Sande und das Quartär (Rhader Mergelscholle, Abb. 3). In diesem Bereich wird das Grundwasser in zwei Stockwerke geteilt, weshalb der 3D-Ansatz gewählt wurde.

Die Grundwasserströmungsverhältnisse sind in Abb. 2 bzw. Anlage 2 dargestellt. Die Hauptströmung des Grundwassers ist Nord- Süd gerichtet. Als Hauptgewässersysteme sind der Rhader Mühlenbach, der Hambach und der Schafsbach mit Nebengewässern im Modellgebiet abgebildet. Der Grundwassergleichenplan bildet einen mittleren Zustand des Jahres 2010 ab (Abb. 2). Auf die Umset-

zung der Gewässer im Modell wird in Kapitel 3.3.2 eingegangen. Die Brunnengalerien Ost und West der Trinkwassergewinnungsanlage Üfter Mark sind im Modell mit 18 Brunnen abgebildet (Abb. 1).

Die Ostgrenze bildet das unterirdische Einzugsgebiet des Rhader Mühlenbachs. Im Süden wurde das Modell entlang der Isohypse 37,5 m NN abgeschnitten (Abb. 1). Die Westgrenze des Modells entspricht der Verbreitungsgrenze des Ratinger Tons. Die Gesamtgröße des Modellraums beträgt 94,5 km<sup>2</sup>. Die Modellränder sind mit einer Randbedingung 1. Art (Festpotential) belegt. Als innere Randbedingungen wurden die Kanalisation und Dränagen mit einer Randbedingung 3. Art (Leakage-Randbedingung) aus dem Modell Dorsten-West übernommen. Die Fließgewässer sind ebenfalls als Randbedingung 3. Art abgebildet. Die einzelnen Elemente werden in Kapitel 3 aufgeführt.

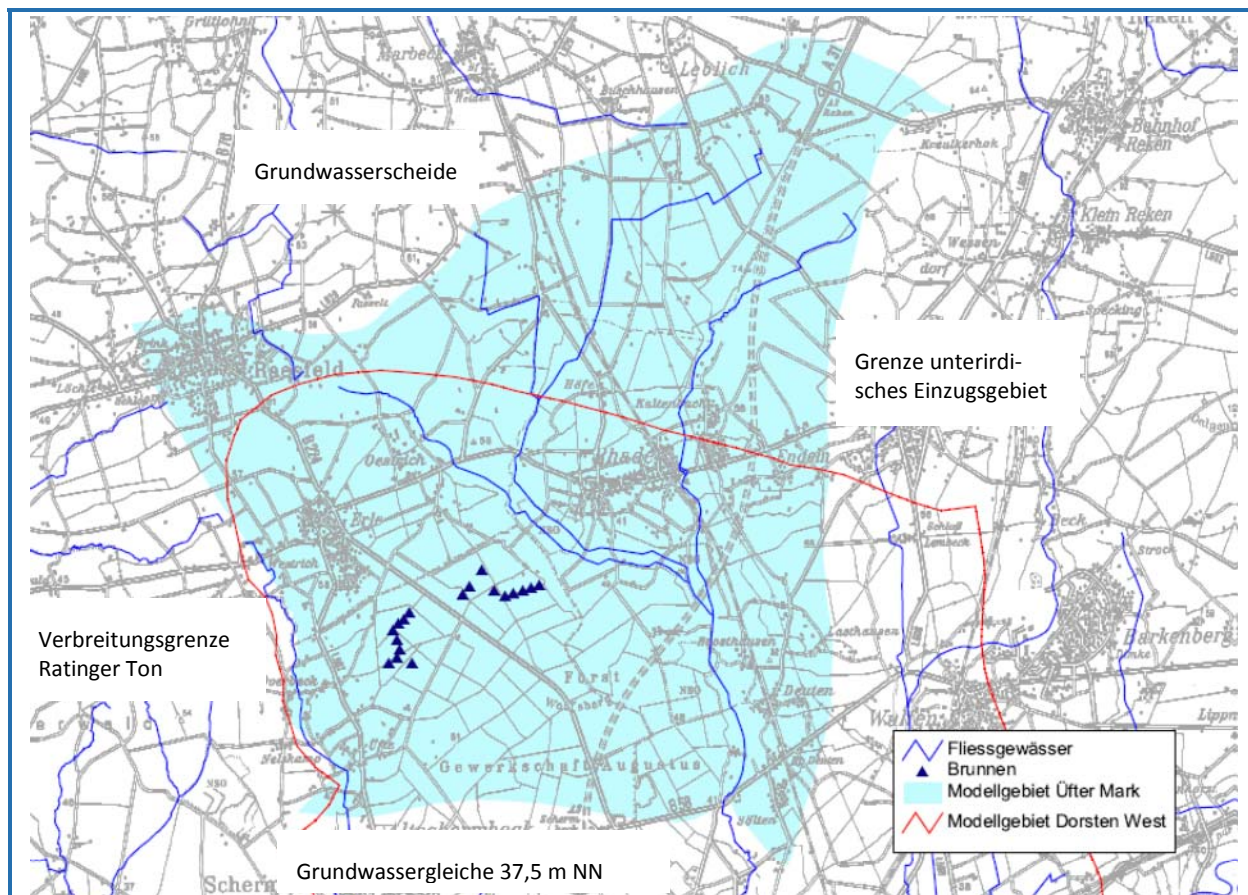


Abb. 1: Lage des Modellgebietes und Verschnittfläche mit dem bestehenden Grundwassermodell „Dorsten-West“ des Lippeverbandes

### 3 Modellaufbau

#### 3.1 Geologischer Aufbau

Der geologische Aufbau im Gebiet Üfter Mark wurde im Zuge vorangegangener Arbeiten im Jahre 1992 recherchiert und fortlaufend aktualisiert. Im Rahmen der Modellentwicklung „Dorsten-West“ erfolgte 2011 nach der Digitalisierung analoger Daten eine Einteilung des Untergrundes in Modellhorizonte. Bergsenkungen bis 2008 wurden dabei berücksichtigt. Ausführliche Beschreibungen der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse sind Losen & Konrads 1989 [1] zu entnehmen. Durch das Hydrogeologische Büro Prof. Losen, Köln wurden Bohrprofile für die Brunnen und Grundwassermessstellen übergeben. Die Lage der Sondierungen innerhalb des Modellgebietes zeigt Abb. 2. Die Erkenntnisse aus den vorliegenden Bohrprofilen wurden mit den bestehenden Daten zur Geologie im Modellgebiet abgeglichen bzw. aktualisiert.

An der Oberfläche steht im Modellgebiet flächendeckend das Quartär an, die Mächtigkeit kann bis zu 7 m betragen. Lokal sind die Schichten als gering durchlässiger Geschiebelehm ausgebildet. Im Modell wurde keine Teilung des Quartärs in separate Schichten vorgenommen. Die Differenzierung erfolgte durch die Belegung der Durchlässigkeitsbeiwerte in einem nachfolgenden Schritt.

Unterhalb des Quartärs folgen die kreidezeitlichen Sedimente der Halterner Sande mit Mächtigkeiten bis zu 130 m. Die locker gelagerten Schichten bestehen aus fein- bis mittelkörnige Sanden, die lokal Grobsande und Schluffbeimengungen enthalten können. Unregelmäßige, mit der Tiefe zunehmende Einschaltungen von Kalksandstein- und Quarzitbänken markieren den Übergang zu den stratigraphisch älteren Recklinghäuser Sandmergeln. Bedingt durch tektonische Aktivität in der Kreide bilden die Recklinghäuser Schichten zusammen mit den Halterner Sanden regional nordwest-südost-streichende Faltenstrukturen aus. Im Bereich höchster Achsenkulmination erreichen die Halterner Sande und die Recklinghäuser Sandmergel maximale Mächtigkeiten. In den schüsselartigen Mulden wurden während der Unterkreide unter flachmarinen Sedimentationsbedingungen Tone und Sande abgelagert [1]. Heute bilden diese Sedimentgesteine als „Rhader Mergelscholle“ die undurchlässigen Schichten des Bottroper Mergels mit einer Mächtigkeit bis zu 90 m. Unterhalb der grundwasserführenden Gesteine lagert der Emschermergel, der als Geringleiter einzustufen ist. In Abb. 3 ist eine Profilschnittlinie dargestellt, die in der Abb. 4 einen Vergleich von Profilen mit der Umsetzung im Modell zeigen.

Auf Basis der Profilschnitte und der Auswertung der Bohrprofile wurden die Modellhorizonte überarbeitet. Entsprechend den geologischen Untergrundverhältnissen wurde das Modell als 4-Schichten-Modell aufgebaut. Dabei wurden die quartären Ablagerungen zu einer Modellschicht zusammengefasst. Die Gesteine des Hauptgrundwasserleiters wurden nach ihrer Lithologie in zwei separate Modellhorizonte geteilt. Die Basis der Recklinghäuser Sandmergel stellt gleichzeitig die Modellbasis dar. Der unterlagernde Emschermergel wurde im Modell nicht abgebildet.

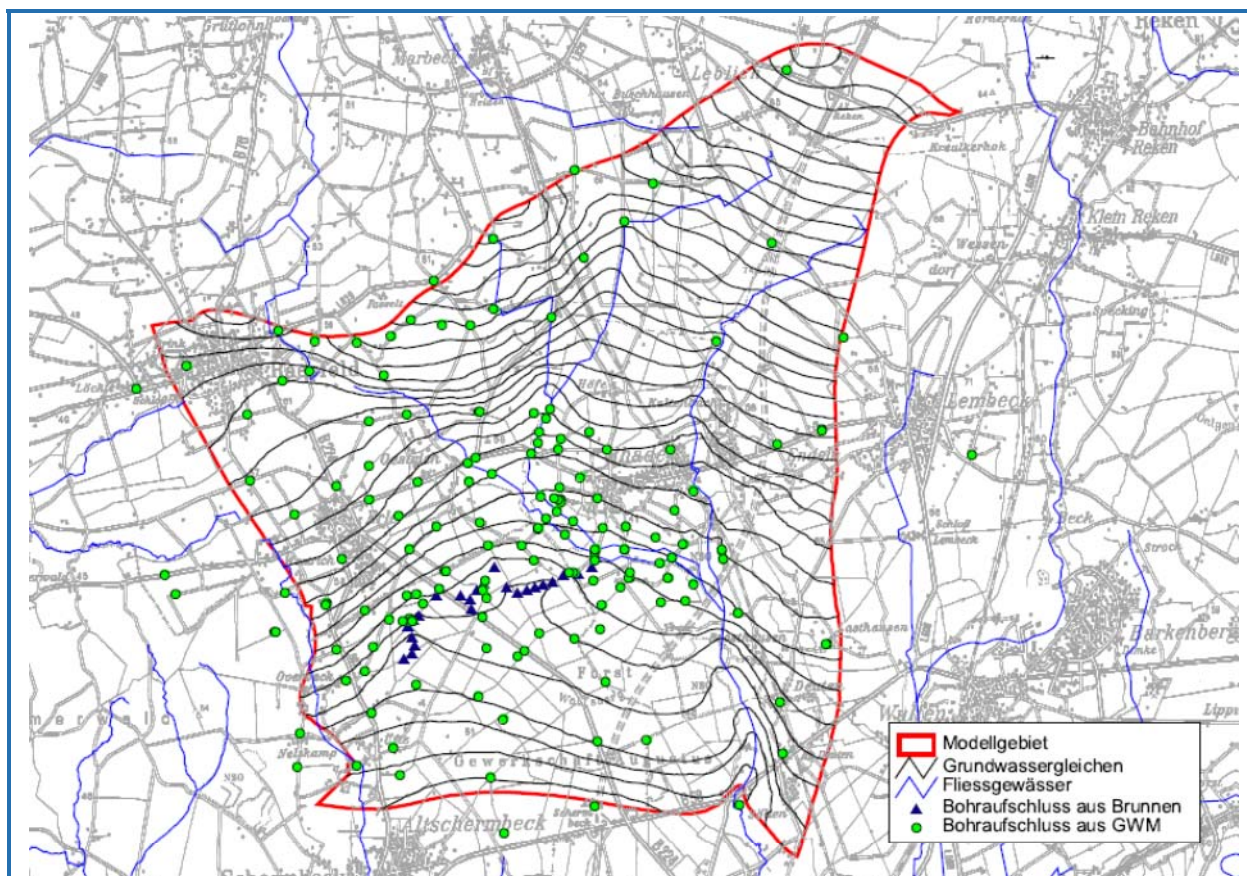


Abb. 2: Grundwassergleichen und Lage der GWM bzw. Brunnen

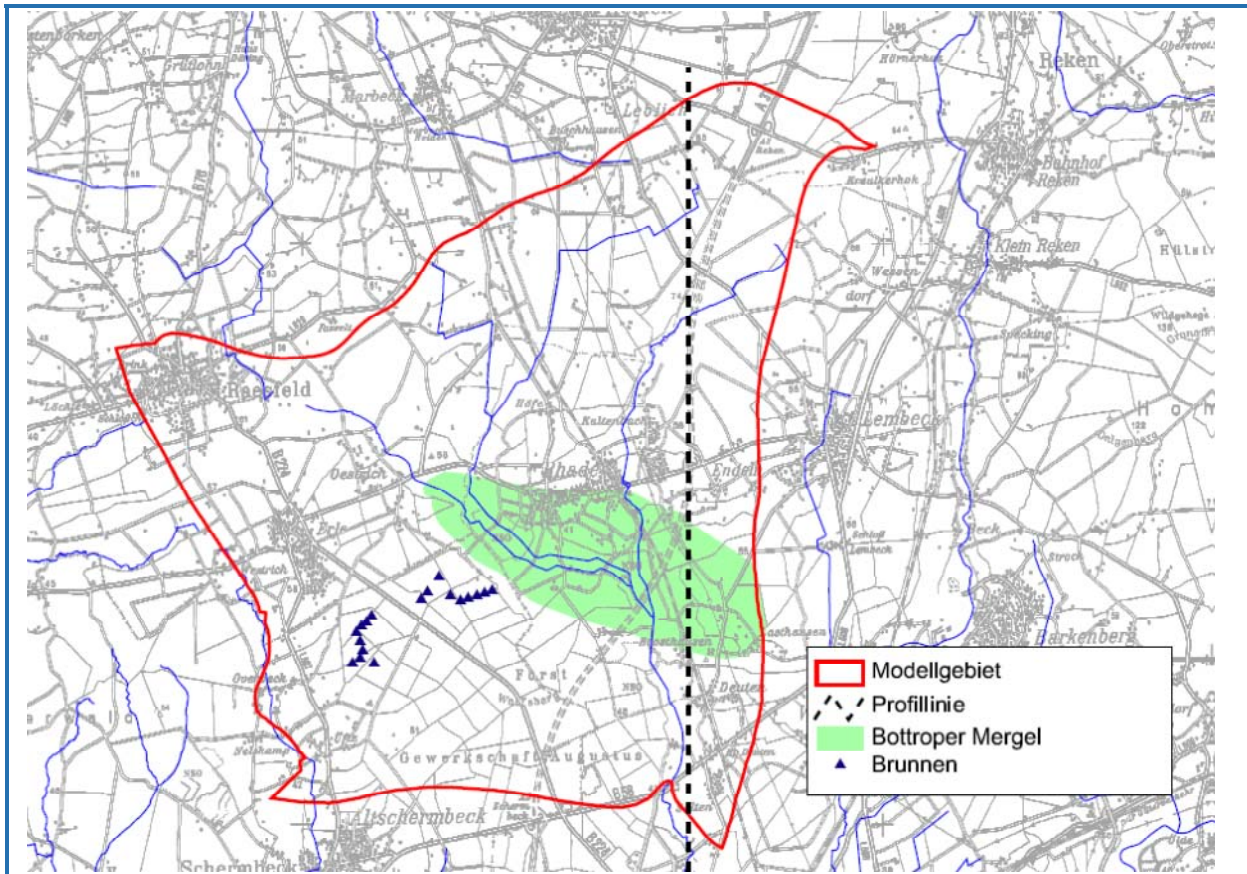


Abb. 3: Verbreitung Bottroper Mergel und Lage des Profilschnitts (Hydrogeologisches Büro Prof. Losen, Köln) im Modellgebiet

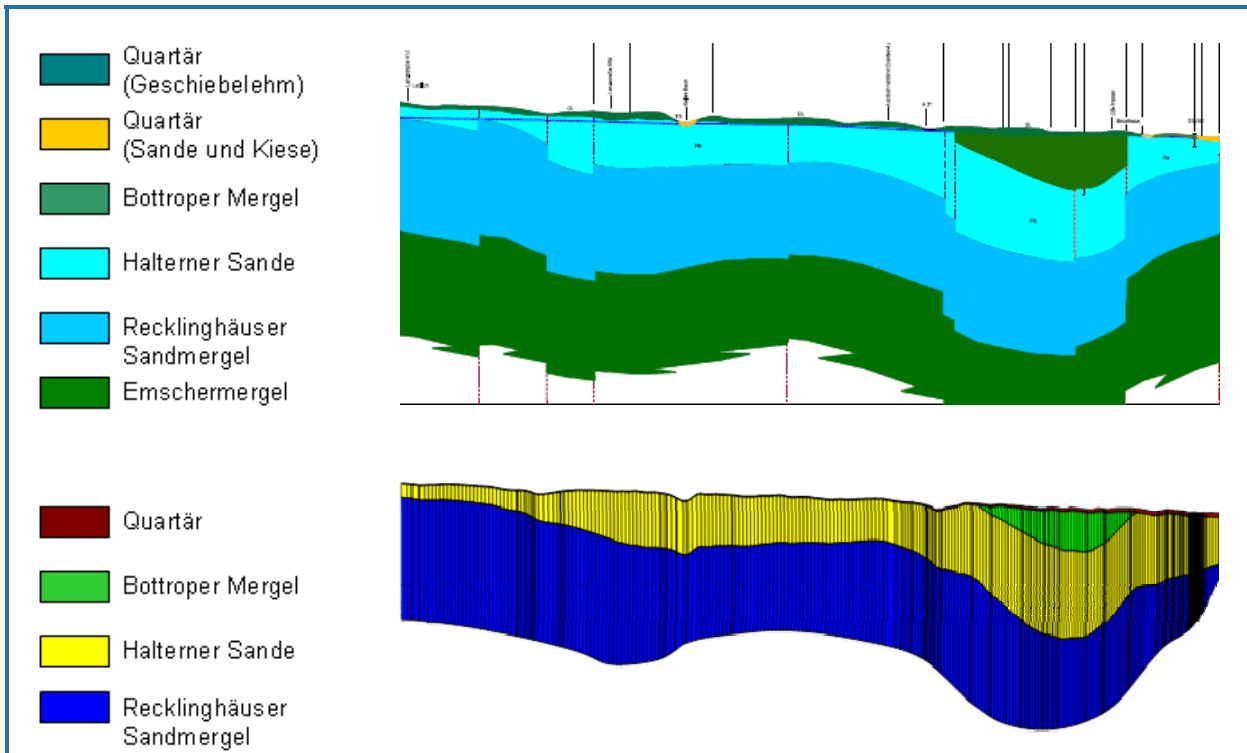


Abb. 4: Umsetzung N-S-Profilschnitt ((Hydrogeologisches Büro Prof. Losen, Köln, oben / Modell, unten)

### 3.2 Verwendete Datengrundlagen

#### 3.2.1 Grundwassermessstellen

Die Grundwassermessstellen, die zur Konstruktion des Grundwassergleichenplans verwendet wurden, wurden von RWW zur Verfügung gestellt und sind in Abb. 2 dargestellt. In Anlage 1 sind die verwendeten Messstellen mit den zugehörigen mittleren Grundwasserständen aufgeführt.

#### 3.2.2 Grundwasserneubildung

Die flächendifferenzierte langjährige mittlere Grundwasserneubildung ist Grundlage für die Modellkalibrierung und die klimabedingte Veränderung für die Simulation. In Abb. 5 sind die benötigten Eingangsdaten bzw. die verwendeten Grundlagen (eckige Rahmen) und die berechneten Größen (gerundete Rahmen) sowie die Beziehungen zueinander gemäß dem Verfahren von Meßer (2008, [2]) angegeben. Weitere Einzelheiten des Berechnungsverfahrens sind der *Dynaklim*-Publikation No. 14 (Meßer, Ohlenbusch & Getta 2011, [3]) zu entnehmen.

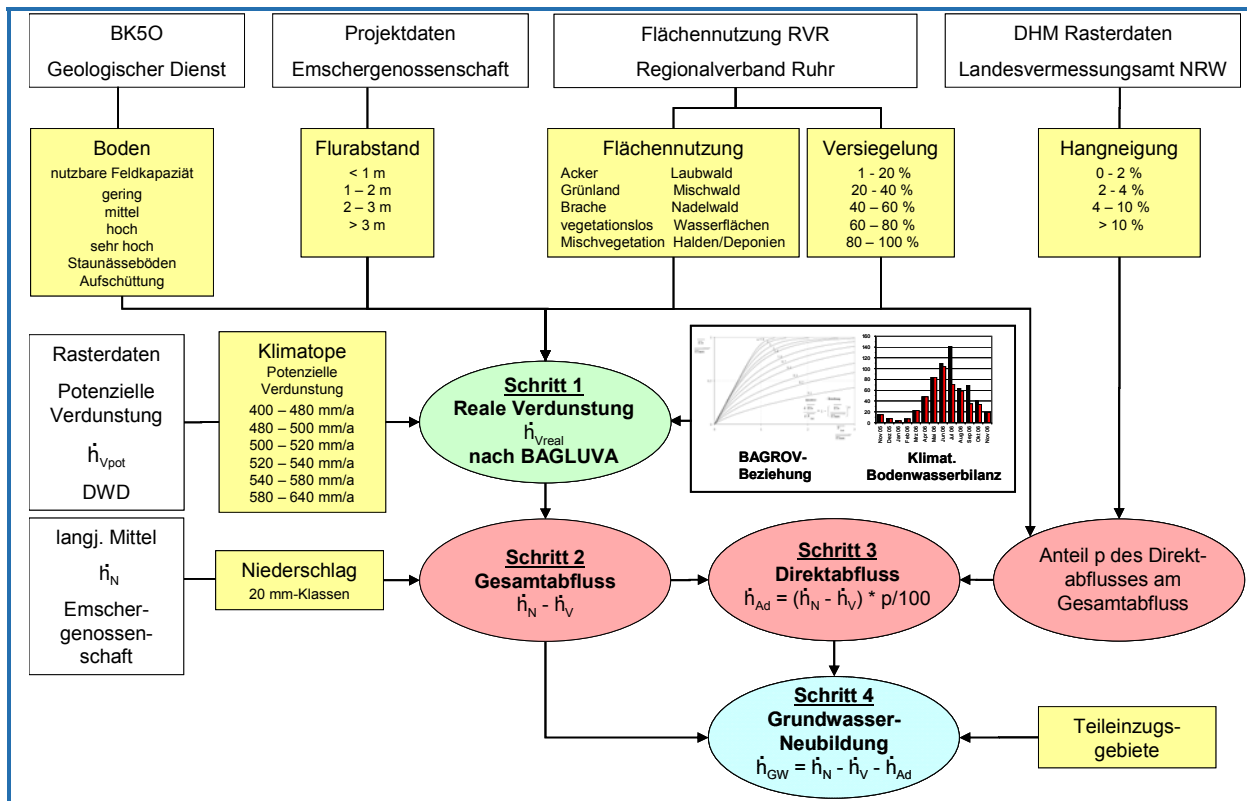


Abb. 5: Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der Grundwasser-Neubildung

Für die Berechnung von Verdunstung und Direktabfluss wurde eine Flächenverschneidung der jeweils notwendigen Grundlagenparameter mit dem Programmsystem ArcInfo durchgeführt. Für jede in sich homogene Kleinfläche wurden die beiden Größen in mm/a berechnet. Basis der Verdunstungsrechnung ist das Verfahren BAGLUVA (Glugla et al. 2003). Die Berechnung des Direktabflusses erfolgte dabei über die Bestimmung des Anteils  $p$  am Überschuswasser (Differenz von Niederschlag und Verdunstung):

$$Q_D = (N - ET) \cdot p / 100$$

Der Direktabflussanteil nimmt mit steigendem Flurabstand ab und ist bei bindigen Böden deutlich größer als bei nicht bindigen Böden. Es wird ferner davon ausgegangen, dass der Direktabflussanteil  $p$  am Überschusswasser von Acker- bzw. Grünland über Mischvegetation bis zum Wald abnimmt. Durch eine weitere Verschneidung der flächendifferenzierten Ergebnisse von Niederschlag, Verdunstung und Direktabfluss erhält man nach der Berechnung mit der Wasserhaushaltsgleichung die Grundwasserneubildung für jede in sich homogene Kleinfläche. Durch eine weitere Verschneidung mit den Teileinzugsgebieten kann die berechnete Grundwasserneubildung weiterverarbeitet werden. Die bei der Flächenverschneidung zwangsläufig entstehenden Kleinstflächen unter 20 m<sup>2</sup> wurden eliminiert.

Die Ergebnisse der Grundwasserneubildungsberechnung für den Istzustand sind der Abb. 6 zu entnehmen. Im Mittel des Modellgebietes beträgt die Grundwasserneubildung 220 mm/a. Hohe Werte ergeben sich im Bereich landwirtschaftlicher Flächen auf Sandböden, relativ geringe in Bereichen mit Wald, geringen Flurabständen und Bebauung.

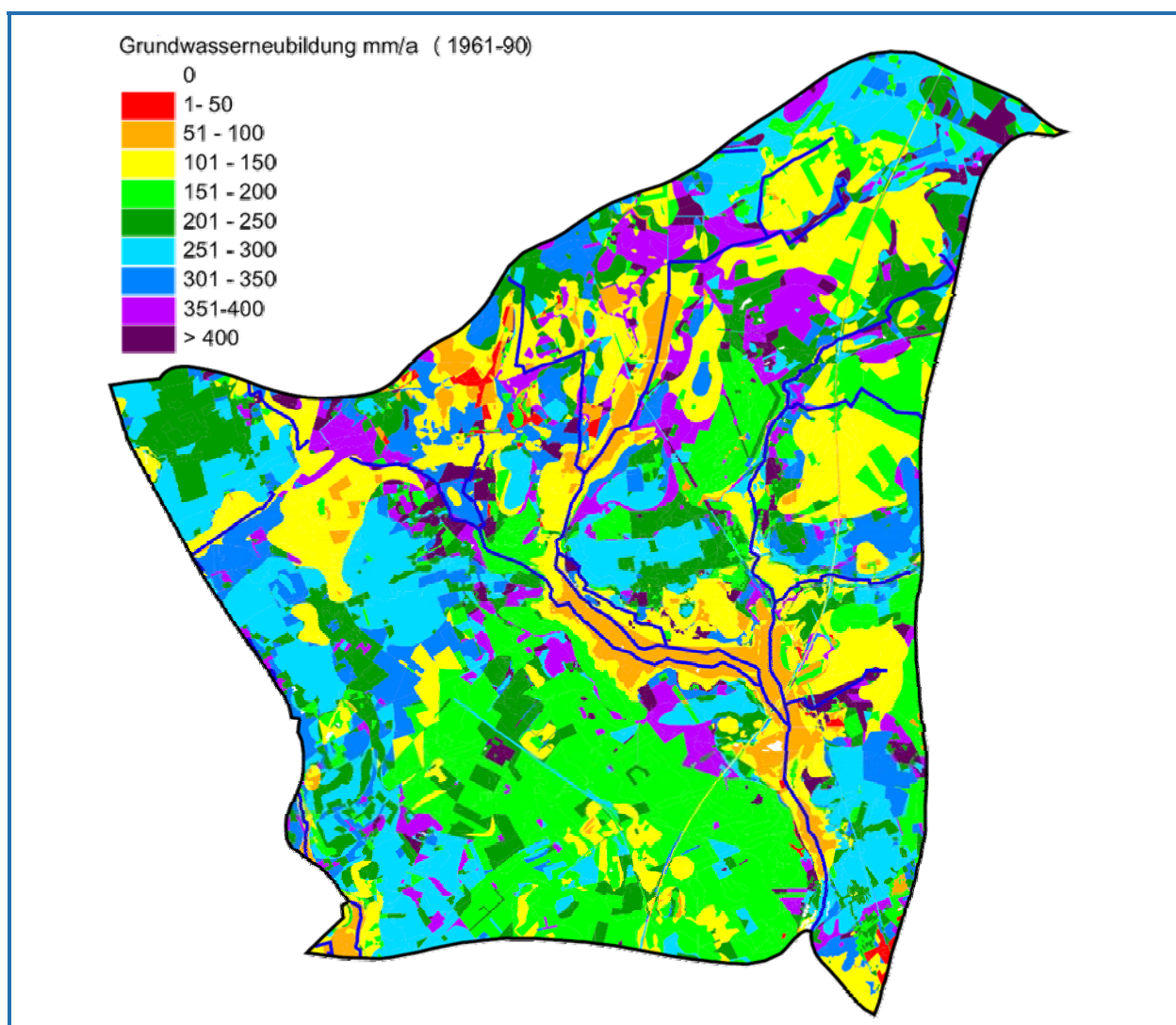


Abb. 6: Grundwasserneubildung 1961-1990

### 3.2.3 Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Durchlässigkeitsbeiwerte, die in das Modell als minimale bzw. maximale Grenzen eingegangen sind, stammen aus der Auswertung von vorliegenden Bohrprofilen und Pumpversuchen. Die Grenzwerte und der Startwert der Modellkalibrierung sind in Tab. 1 aufgeführt. Durch die Nutzung der automatischen Kalibrierung des Programms SPRING wurden die hydraulischen Durchlässigkeiten im Rahmen der angegebenen Spanne so lange variiert, bis eine bestmögliche Angleichung der berechneten Potentiale an die gemessenen Potentiale erzielt wurde.

Tab. 1: Startwerte und Wertespanssen der Durchlässigkeitsbeiwerte für die Modellschichten

Geologische Einheit	Startwert [m/s]	Untere Grenze [m/s]	Obere Grenze [m/s]
Quartär	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Geschiebelehm	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Bottroper Mergel	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Halterner Sande	$8 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Recklinghäuser Sandmergel	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$

## 3.3 Modelldiskretisierung und Parametrisierung

### 3.3.1 Struktureller Modellaufbau (Diskretisierung)

Das gemäß Kap. 3.2 aktualisierte Grundwassermodell „Üfter Mark“ besteht aus 90.439 Knoten und 99.611 Elementen. Die Knotenabstände variieren entsprechend der Netzverfeinerung und betragen im Mittel 50 m. Im Bereich der Brunnengalerien Üfter Mark wurde eine Netzverfeinerung vorgenommen, so dass dort ein Knotenabstand zwischen 2 m und 20 m vorliegt.

### 3.3.2 Vorfluter für das Grundwasser

Das Modellgebiet wird von Norden nach Süden vom Hammbach durchflossen. Die abgebildeten Oberflächengewässer umfassen zudem den von Norden zum Hammbach fließenden Rhader Mühlentbach und den aus Nordwest zum Hammbach fließenden Schafsbach. Alle Wasserspiegellagen wurden mit Daten vom Hydrogeologischen Büro Prof. Losen aktualisiert. Die Wasserspiegellagen wurden als Vorflutpotentiale (Randbedingung 3. Art) in das Modell übernommen und, wenn notwendig, mit den Algorithmen des Programms SPRING auf die Knoten interpoliert. Zusätzlich wurden die Gewässer entsprechend ihrer hydraulischen Wirksamkeit mit Leakagekoeffizienten belegt. Die Abb. 7 zeigt die Gewässer im Modellgebiet und ihre Wirksamkeit auf das Grundwasser.

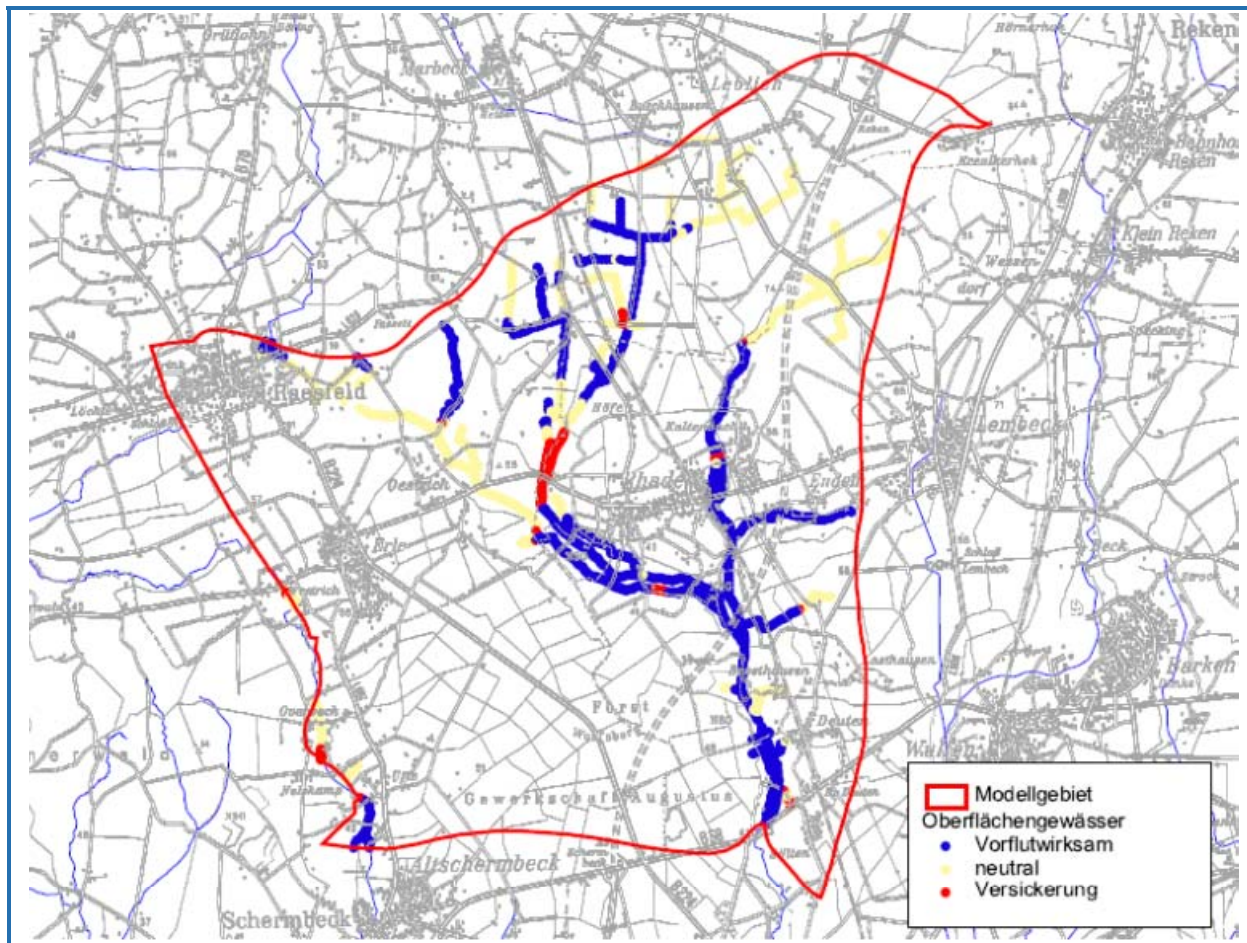


Abb. 7: Fließgewässer und ihre hydraulische Wirksamkeit

### 3.3.3 Kanalisation

Für das Erweiterungsgebiet sind keine Daten zu Kanalschächten vorhanden. Die Kanalisation wurde mit ihrer Lage und den Randbedingungen aus dem Modell Dorsten-West übernommen.

### 3.3.4 Dränagen

Im Modellgebiet werden zur Entwässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen Dränagen betrieben (Abb. 8). In das Modell wurden die Dränagen als Drainageflächen mit einem maximalen Wasserstand von 0,8 m unter Geländeoberkante eingebaut. Die Entwässerung dieser Flächen wurde im Modell über eine Randbedingung 3. Art und einen Leakagefaktor umgesetzt.

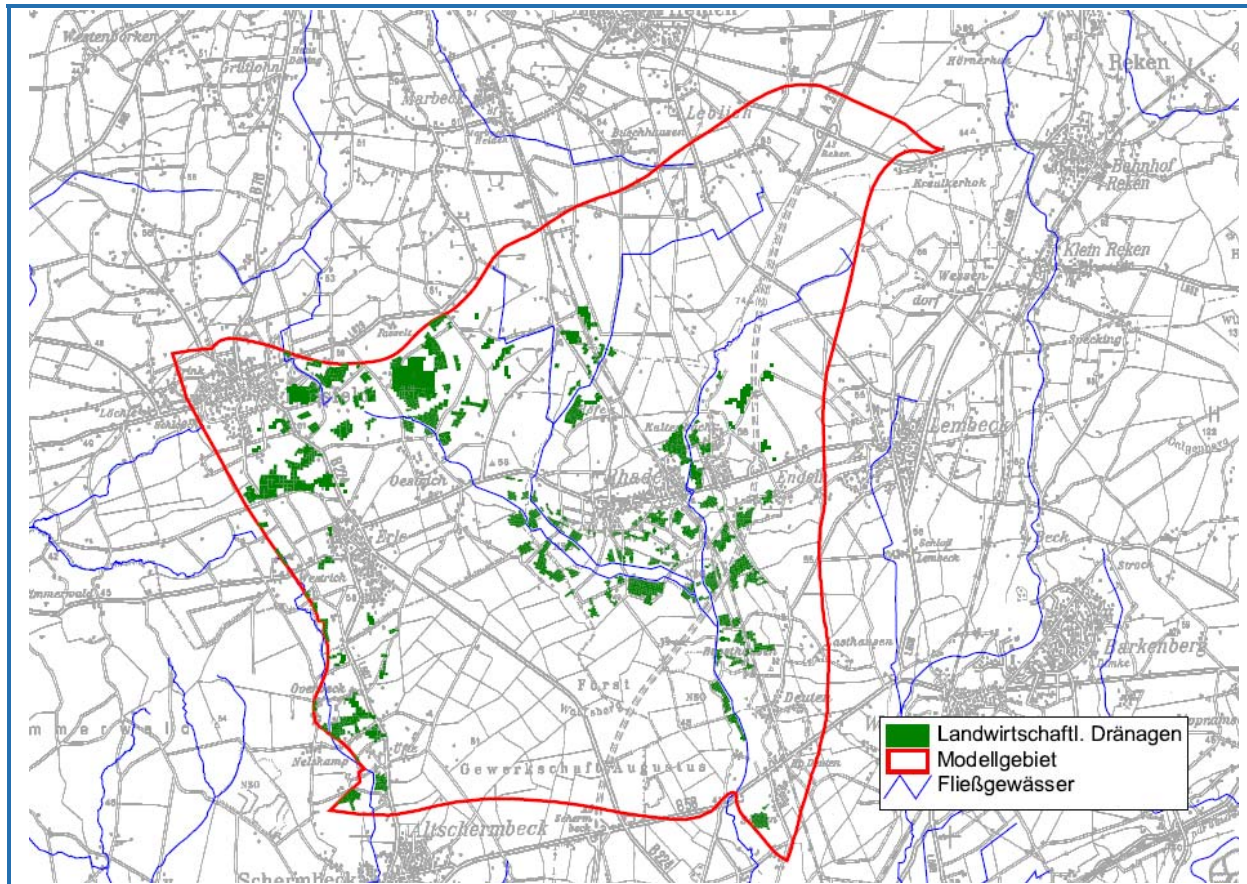


Abb. 8: Landwirtschaftliche Dränagen

### 3.3.5 Fördermengen der RWW zur Trinkwasserversorgung

Die Basis bilden die monatlichen Gesamtfördermengen der von RWW betriebenen Brunnengalerie Üfter Mark. Für das Modell wurden mit 2,4 Mio. m<sup>3</sup>/a (West) und 5,2 Mio. m<sup>3</sup>/a (Ost) typische mittlere Fördermengen aus 2010 verwendet und in den Simulationen nicht verändert. Das Wasserrecht liegt jedoch bei 11 Mio. m<sup>3</sup>/a und wird bei höherem Bedarf entsprechend stärker ausgenutzt.

### 3.3.6 Beregnung

Die Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen erfordert in Trockenmonaten eine Bewässerung. In Zukunft wird von einem größeren Beregnungsbedarf und somit von höheren Entnahmeraten ausgegangen. Da die Beregnung flächenhaft stattfindet und die Entnahme nicht punktuell einem Brunnen zugeordnet werden kann, wurde der Beregnungsbedarf mit der Grundwasserneubildung verrechnet. D.h., dass die Grundwasserneubildungsrate unter den landwirtschaftlichen Flächen um den Beregnungsbetrag reduziert wurde.

Empirische Daten zur gesamten derzeit im Untersuchungsgebiet praktizierten Beregnungsintensität standen nicht zur Verfügung. Nach Angaben der Landwirtschaftskammer NRW werden bereits derzeit regelmäßig einzelne landwirtschaftliche Kulturen im Untersuchungsgebiet bewässert. Insbesondere gilt dies für Kartoffeln (ca. 75 mm/a) und angebaute Sonderkulturen wie Erdbeeren, Spargel oder Spinat (ca. 30 - 200 mm/a) (LWK NRW 2012[6]). Diese Kulturen nehmen zwar zurzeit noch einen vergleichsweise kleinen Anteil der aktuellen landwirtschaftlichen Flächennutzung im Modellgebiet ein (siehe Tab. 2). Beobachtungen vor Ort zeigen jedoch, dass mindestens in Betrieben, die bereits über die notwendige Bewässerungstechnik verfügen, in Trockenjahren zunehmend auch weitere Kulturen - insbesondere Mais und Getreide - bei der Beregnung berücksichtigt werden und des Weiteren von einer weiteren Zunahme von Sonderkulturen auszugehen ist. Zur weiteren Kalkulation der aktuellen und zukünftigen Beregnungsbedürftigkeit wurden daher umfangreiche Berechnungen zum

Bodenwasserhaushalt durchgeführt und daraus der Beregnungsbedarf für landwirtschaftliche Nutzflächen abgeleitet.

Die Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt wurden durchgeführt mit dem frei im Internet verfügbaren Modell „Simpel - Speichermodelle zum Bodenwasserhaushalt“ (Version vom 26.6.2005; Hörmann, 2005[7]; <http://www.hydrology.uni-kiel.de/forschung/projekte/simpel/>). Simpel ist in seiner Grundversion ein einfaches, eindimensionales Bodenwassermodell mit Speicheransatz, welches als Excel-Worksheet implementiert wurde. Die Verdunstungsberechnungen erfolgen auf der Grundlage der DVWK-Methoden (DVWK 1996[8]). Verwendet wurde die in verschiedene Dateien getrennte Simpel-Version (getrennte Dateien zu Eingabedaten, Verdunstungsberechnungen und dem Bodenwassermodell). Die Berechnungen zur potenziellen Evaporation (ETp) wurden durchgeführt nach dem Verfahren von Turc-Wendling mit Setzung des Faktors  $f_k = 1,0$  (DVWK 1996[8], Gleichung 6.18).

Der Bodenwasserhaushalt wurde für die wesentlichen derzeit im Modellgebiet angebauten landwirtschaftlichen Ackerbaukulturen (Getreide, Mais, Zuckerrüben Kartoffeln) berechnet, die auf ca. 85 % der vorhandenen Ackerflächen angebaut werden (siehe Tab. 2), für 5 unterschiedliche Standortbereiche mit nutzbaren Feldkapazitäten (nFK) von 11 - 22 Vol.-% und für den Zeitraum von 1961 - 2100 mit Witterungsdaten der CLM 2-Modellläufe. Die aktuelle Flächennutzungsverteilung wurde sowohl für die zurückliegenden als auch zukünftigen Zeiträume unverändert übernommen und ging flächengewichtet in die Mittelwertbildung der jährlich benötigten Beregnungsmenge ein.

Tab. 2: Land- und Forstwirtschaftliche Flächennutzung im Modellgebiet (nach IT NRW 2010[9])

Flächennutzung	gesamt (%)	LN (%)
Acker	41.8	78.9
...Getreide	13.6	25.6
...Mais	20.7	39
...GPS / Feldgras	2.9	5.4
...Kartoffeln	1.7	3.3
...Zuckerrüben	0.2	0.4
...Gemüse / Erdbeeren	2	3.8
...Sonstiges	0.7	1.4
Grünland	11.2	21.1
Summe LN	53	100
Wald	4.3	

LN = landwirtschaftliche Nutzflächen

Da das Modell Simpel in seiner zur Verfügung gestellten Fassung keine Ergebnisse zum Bewässerungsbedarf liefert, wurde das entsprechende Excel-Sheet dahingehend modifiziert, dass bei einer Unterschreitung der jeweiligen nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ( $nFK_{We}$ ) von 40 % jeweils Bewässerungsgaben von 20 mm dem Niederschlag zugerechnet wurden, jedoch max. bis zu einer Erreichung der  $nFK_{We}$  von 80 % (Josopait et al 2009[10]). Modellbedingt floss ein Teil dieser Beregnungsmengen der Grundwasserneubildung zu. Die gemittelte jährlich Beregnungsmenge für die drei zu vergleichenden Zeiträume (Referenzzeitraum 1961 - 1990; nahe Zukunft 2021 - 2050 und ferne Zukunft 2071 - 2100) wurde um diesen bewässerungsbedingten Neubildungszuwachs bereinigt.

Mit den vorhergehend beschriebenen Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt ließ sich somit zwar der grundsätzliche Beregnungsbedarf der einzelnen Kulturen ermitteln. Die tatsächliche Durchführung von Beregnungsmaßnahmen ist jedoch stark von der betriebswirtschaftlich geprägten Beregnungswürdigkeit abhängig, die nur gegeben ist, wenn der Erlös des Mehrertrages beregneter Pflanzen größer ist als die Beregnungskosten. Hierzu wurden die Annahmen getroffen, dass für den aktu-

ellen Zeitraum 20 %, für die nahe Zukunft (2021 - 2050) 60 % und für die ferne Zukunft (2071 - 2100) 100 % der Ackerbaufläche beregnet wird. Die über alle betrachteten Kulturen und Standortbereiche ermittelte mittlere Beregnungsbedürftigkeit (in mm/a) im Modellgebiet wurde anschließend mit diesem Faktor zum angenommenen Anteil tatsächlich beregneter Flächen multipliziert.

Für den aktuellen Zeitraum ergibt sich demnach eine durchschnittliche Beregnungsintensität über alle Ackerbauflächen von 12 mm/a.

Die unterschiedlichen Szenarien werden bei den Simulationen in Kapitel 5 und 6 beschrieben.

## 4 Modellkalibrierung

Bei der Kalibrierung des stationären Grundwassermodells erfolgte eine Anpassung der berechneten Potentiale an die gemessenen Potentiale. Der zur Kalibrierung genutzte Grundwassergleichenplan wurde auf Basis der mittleren Grundwasserstände erstellt. Die Güte der Kalibrierung ergibt sich aus den ermittelten Abweichungen zwischen dem gemessenen Wert an einer Grundwassermessstelle und dem berechneten Potenzial an dieser Stelle. Das Ergebnis der Kalibrierung zeigt eine maximale Abweichung von 0,46 m, eine mittlere Abweichung von 0,12 m (Anlage 1). Die höchsten Differenzen zeigen sich in Bereichen, in denen das Messstellennetz eine vergleichsweise geringe Dichte aufweist. In Anlage 1 sind die Abweichungen an den einzelnen Messstellen aufgeführt. Anlage 2 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung. Abb. 9 zeigt die Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte der einzelnen Schichten nach der Kalibrierung.

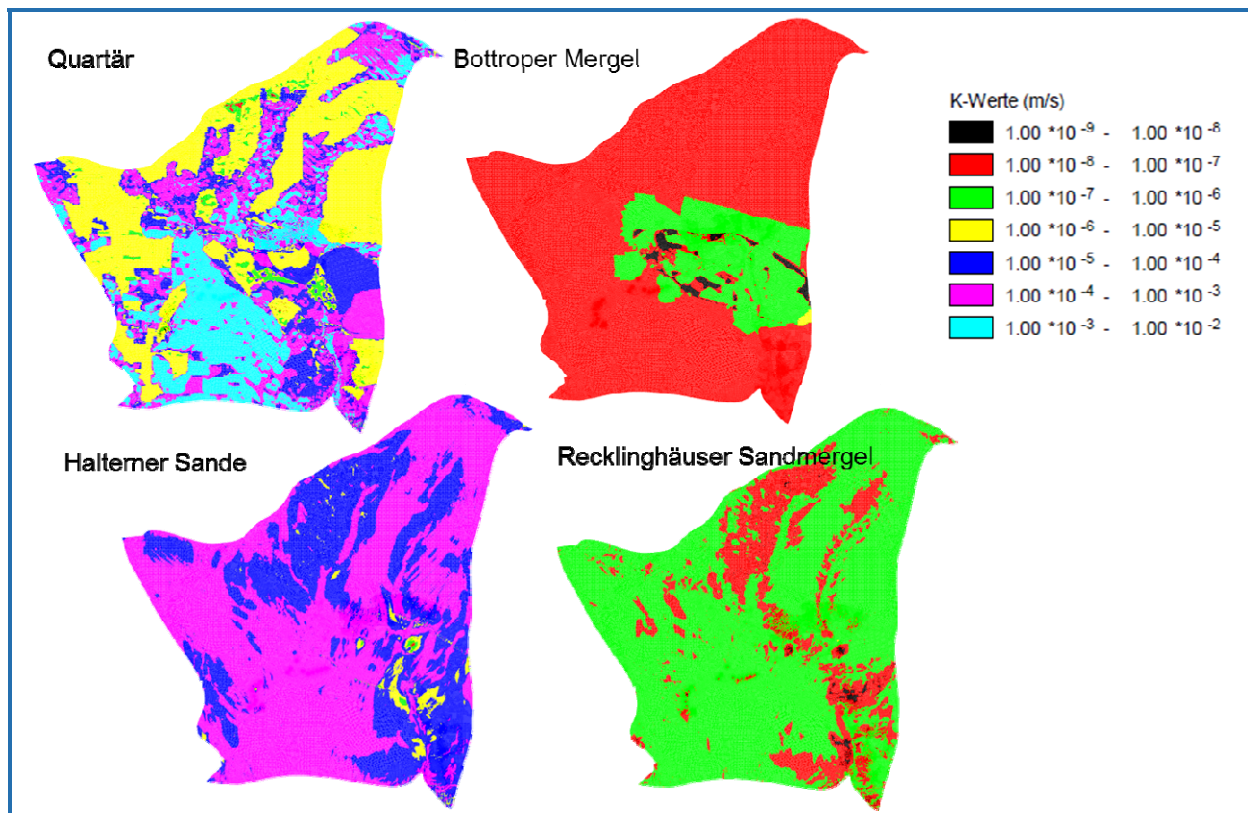


Abb. 9: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte nach der Kalibrierung (der Bottroper Mergel ist im roten Bereich, Karte oben rechts, nicht verbreitet)

## 5 Simulation Istzustand

### 5.1 Ermittlung der Einzugsgebiete und Fließzeitzone

Die Ermittlung der Einzugsgebiete für die Brunnengalerien erfolgte nach der Strömungsberechnung (mit dem Modul GEONEU). Dazu wurden um jeden Brunnen Startpunkte für Bahnlinien gesetzt, die die Fließwege des Grundwassers entgegen der Strömungsrichtung verfolgen. Aus den resultierenden Fließpfaden wurden die Einzugsgebiete der Brunnengalerien manuell bestimmt.

Analog zur Ermittlung der Einzugsgebiete wurde bei der Bestimmung der Fließzeitzone vorgegangen. Bei der Berechnung der Bahnlinien wurden Intervalle vorgegeben, in denen Markierungen gesetzt werden sollen. Anhand dieser Zeitmarker wurden Isochronen konstruiert, aus denen Zonen gleicher Fließzeiten bestimmt wurden. Tab. 3 zeigt die Zuweisung der Fließzeiten zu den Fließzeitzone 1 bis 8. Nach der Bestimmung der Fließzeitzone wurde für jede Fließzeitzone die anteilige Flächennutzung, sowie die flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsrate ausgewiesen.

Tab. 3: Übersicht der Fließzeiten und Definition der Fließzeitzone

Fließzeit [a]	Fließzeitzone (FZZ)
0-2	1
2-5	2
5-10	3
10-15	4
15-20	5
20-30	6
30-50	7
>50	8

Die Brunnen 15, 16, 17, 18a, 19, 20, 21 und 22 der RWW bilden das Einzugsgebiet West, die Brunnen 13, 11, 10, 9, 8, 7, 6 und 5 der RWW das Einzugsgebiet Ost. Es zeigte sich, dass der Zustrom auf den Brunnen 12 ein separates Einzugsgebiet ist, es wird aber bei der weiteren Flächendifferenzierung und Bilanzierung dem Einzugsgebiet Ost zugerechnet. Die Einzugsgebiete für die jeweils separate Fließzeitzone ausgewiesen wurden zeigt Abb. 10. Das Verbreitungsgebiet des Bottroper Mergels wurde für die Auswertung nicht berücksichtigt, da dort keine Grundwasserneubildung stattfindet, die dem Hauptgrundwasserleiter direkt zu Gute kommt.

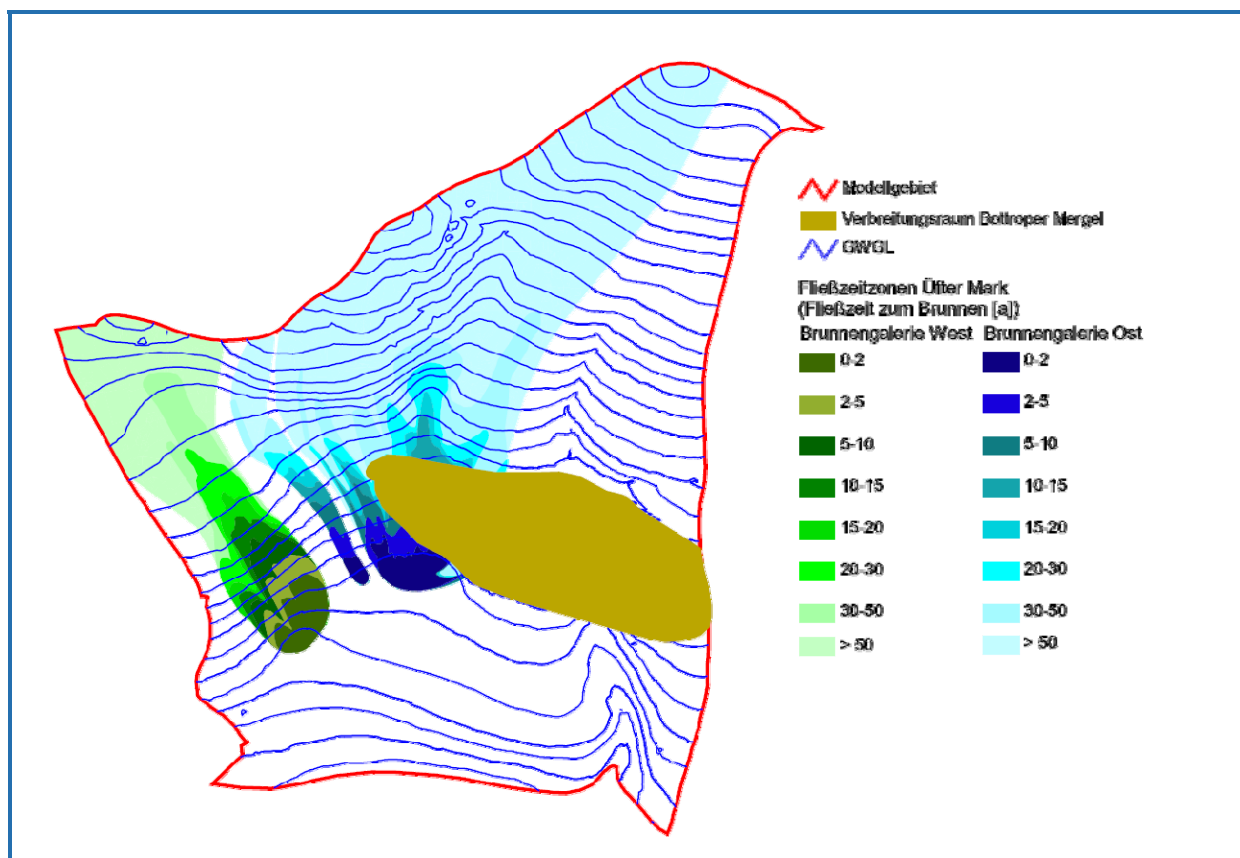


Abb. 10: Fließzeitzone für den Istzustand

Die durchschnittliche Grundwasserneubildung für das gesamte Modellgebiet liegt bei 220 mm/a und reduziert sich auf 215 mm/a, bei Berücksichtigung des Beregnungsbedarfs. Die Durchschnittswerte innerhalb der Einzugsgebiete liegen bei 230 mm/a (West) und bei 226 mm/a (Ost). Die Größe des Einzugsgebietes West ist ca. 10,78 km<sup>2</sup>, die von Ost ca. 28,64 km<sup>2</sup>. In beiden Gebieten ist die hauptsächlichliche Flächennutzung Ackerland. Tab. 4 zeigt die anteilige Flächennutzung und Grundwasserneubildung in den Einzugsgebieten. Für die Wasserbilanz in den Einzugsgebieten wurden neben der Grundwasserneubildung und den Entnahmemengen der Brunnen, die Fließgewässer und die landwirtschaftlichen Dränagen betrachtet. Tab. 5 zeigt die Ergebnisse.

Tab. 4: Flächennutzung innerhalb der Einzugsgebiete Istzustand

Nutzung	Istzustand					
	West			Ost		
	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Flächenanteil [%]	GWNeu [m <sup>3</sup> /a]	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Flächenanteil [%]	GWNeu [m <sup>3</sup> /a]
Ackerland	5,66	52,5	1.437.672	17,83	62,3	4.273.458
Grünland	1,17	10,9	302.672	4,16	14,5	1.105.066
Wald	1,06	9,8	174.273	5,41	18,9	900.763
Siedlung	2,89	26,8	572.952	1,24	4,3	216.600
Summe	10,78	100,0	2.487.569	28,64	100,0	6.495.887

Tab. 5: Bilanzierung der Einzugsgebiete Istzustand (Angaben in Mio. m<sup>3</sup>/a)

Istzustand	West	Ost
GWneu (+)	2,48	6,49
FGW (-)	0,04	0,74
Flächendrängen (-)	0,02	0,50
Brunnen (-)	2,42	5,25
Fläche [km <sup>2</sup> ]	10,78	28,46

## 5.2 Berechnung der Fließzeiten an Grundwassermessstellen

Für 20 Beobachtungspunkte (14 Grundwassermessstellen sowie eine Multilevel-Grundwassermessstelle mit 6 Horizonten) wurden die Fließzeiten von dem Ort der Grundwasserneubildung bis zur jeweiligen Messstelle berechnet. Die Darstellung erfolgte über Bahnlinien mit Zeitmarkern, analog zur Berechnung der Fließzeiten der Brunnen (Abb. 11). In Tab. 6 sind die Fließzeiten und Flächennutzungsarten jeder Messstelle ausgewiesen.

Tab. 6: Fließzeiten und Flächennutzung jeder Messstelle

GWM	Flächennutzung	Fließzeit [a]	GWM	Flächennutzung	Fließzeit [a]
N00517	Ackerland	80	N00802	Ackerland	40
N00734	Siedlung	30	N00624	Ackerland	40
N00518	Ackerland	20	N00841	Siedlung	20
N00627	Ackerland	50	N00840	Ackerland	30
N00626	Ackerland	40	N01027	Ackerland	80
N00625	Ackerland	40	N00917	Ackerland	60
N00747	Ackerland	40	N00918	Ackerland	30

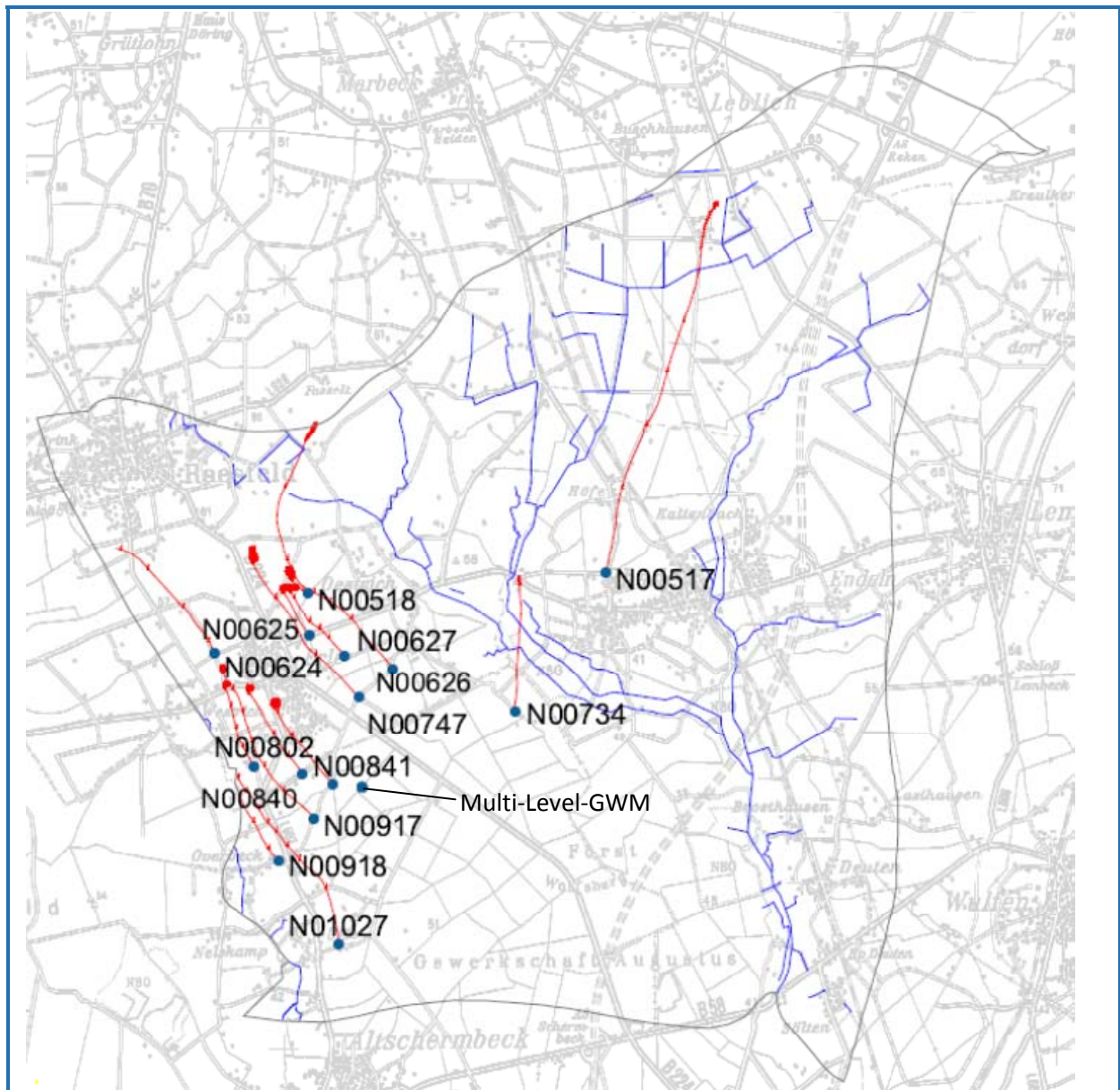


Abb. 11: Fließzeitberechnungen für ausgewählte Messstellen

Die Multi-Level-Messstelle besteht aus sechs Rohren mit den Bezeichnungen N00861 bis N00866. Die Filter sind in neun verschiedenen Tiefen angeordnet. Durch die Verfilterung in verschiedenen Tiefen des gleichen Horizontes führt eine Bahnlinienberechnung nicht zu unterschiedlichen Fließzeiten oder –strecken. Zur Differenzierung der Fließzeiten über die Tiefe wurde eine graphische Auswertung vorgenommen. Die Überlagerung der Filtertiefen der Messstelle mit den Fließzeitzonen der Brunnen ergibt eine übersichtliche Darstellung in welchen Zonen das Grundwasser in den verschiedenen Filterlagen seinen Ursprung hat. Das Grundwasser der sechs Filter oberhalb -64 m NN wird in der Fließzeitzone 1 gebildet, das des siebten Filters (-83 m NN) innerhalb der Fließzeitzone 6 und das der unteren beiden Filter in Fließzeitzone 8 (Abb. 12).

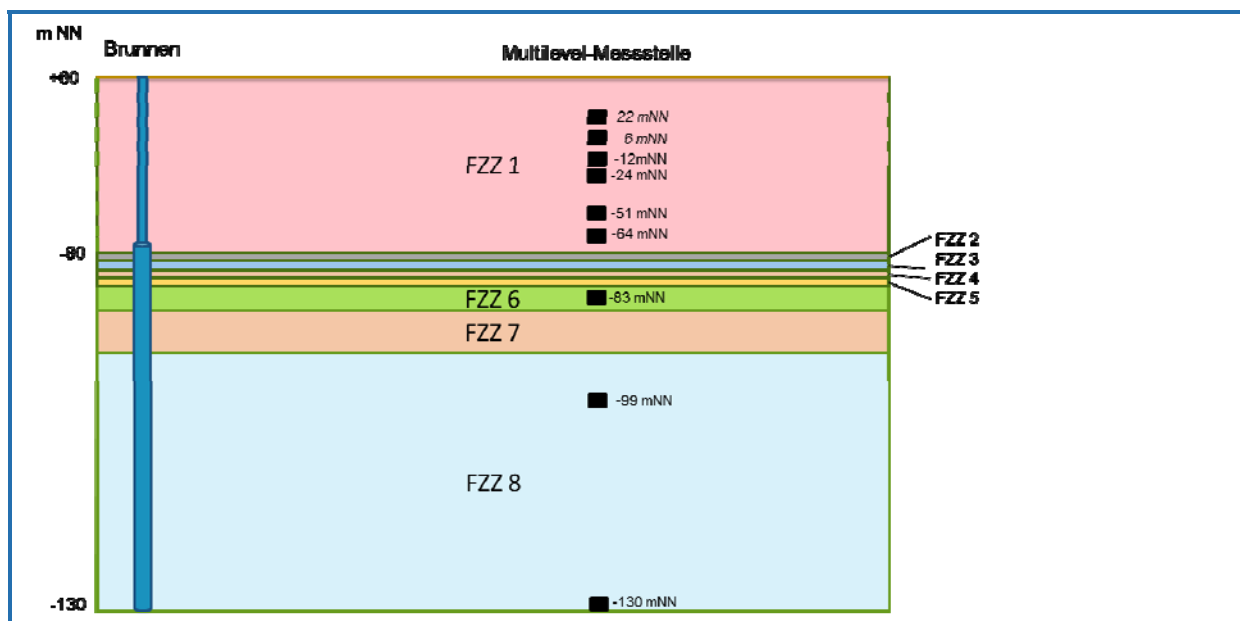


Abb. 12: Fließzeitzone für die Multi-Level-Messstelle

## 6 Simulationen nahe und ferne Zukunft

Die Änderungen in den Modelleingangsdaten für die Simulationen betrifft nur die Grundwasserneubildung. Zur Prognose der Veränderungen des Wasserhaushaltes durch den Klimawandel wurden die Eingangsdaten für den Zeitraum 1960 bis 2100 für die beiden Realisationen (COSMO-CLM 1 und -CLM 2) ausgewertet. Dies sind Monatssummen bzw. -mittel des Niederschlags, der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Sonnenscheindauer. Die Ergebnisse der Realisierungen unterscheiden sich nicht deutlich (lediglich bis 2050). Die Realisation CLM 2 zeigt eine bessere Anpassung an die Messwerte im Ausgangszustand 1961-1990 als CLM 1 und wurde daher für die weiteren Berechnungen verwendet. Die Ergebnisse entsprechen in etwa denen im Emschergebiet (Meßer et al. 2011[3], 2013 [4], Quirnbach et al. [5]). Die nahe Zukunft wird durch die langjährig mittleren berechneten Werte des Zeitraums 2021 bis 2050 beschrieben, die ferne Zukunft bildet das Mittel der Jahre 2071 bis 2100.

### 6.1 Berechnung der Fließzeiten für die nahe Zukunft

Bis 2050 nehmen der Niederschlag um 5,4 % und die potentielle Verdunstung (Grasreferenzverdunstung) um 1,8 % zu. Die Erhöhung der potentiellen Verdunstung wird auch bei Gewässern und geringen Flurabständen angesetzt. Die reale Verdunstung nimmt auf Ackerland um 4,5 % zu, während die Erhöhung auf Grünland und Wald nur 1 bis 2 % beträgt. Im Ergebnis nimmt die Grundwasserneubildung bis 2050 im Gesamtgebiet um 10 % zu. Die Veränderung ist bis 2050 durch die Niederschlagserhöhung relativ gleichmäßig. Maßgebliche Änderungen werden durch die Erhöhung des Beregnungsbedarfes auf den Ackerflächen hervorgerufen. Für den Zeitraum der nahen Zukunft ergibt sich nach den Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt auf Grund der erhöhten Niederschläge trotz der ebenfalls leichten Erhöhung der realen Evapotranspiration (ETa) grundsätzlich ein geringerer Beregnungsbedarf. Da für diesen Zeitraum aber ein erhöhter Anteil von tatsächlich beregneten Flächen angenommen wird (60 % im Vergleich zu 20 % im aktuellen Zeitraum) errechnet sich hieraus in der Summe ein Anstieg der durchschnittlichen Beregnungsmenge im Untersuchungsgebiet (von derzeit 12 auf über 30 mm/a). Diese deutliche Erhöhung zum angenommenen Anteil tatsächlich beregneter Flächen ist zunächst - unter Berücksichtigung der verwendeten Klimaprojektionen - als Worst-Case-Betrachtung zu verstehen. Er trägt der aktuell bereits festzustellenden Beobachtung zunehmender Beregnung von derzeit nicht oder nur mäßig beregnungswürdigen Kulturen Rechnung (Mais, Getreide) und unterstellt, dass sich dieser Trend fortsetzt. Für das Modell wird der Beregnungsbedarf in die

Grundwasserneubildung eingerechnet, so dass sich effektiv eine höhere Grundwasserneubildung für die nahe Zukunft im Vergleich mit dem heutigen Zustand ergibt.

Die mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet liegt bei 242 mm/a (Istzustand 220 mm/a), nach Reduzierung durch die Beregnung bei 230 mm/a (Istzustand 215 mm/a). Abb. 13 zeigt die räumliche Verteilung der Änderungen. Die Modellergebnisse werden analog zum Istzustand als Fließzeit-zonen dargestellt (Abb. 14) und in Bilanzen (Tab. 7 und Tab. 8) ausgewiesen. Die Grundwasserneubildung in den Einzugsgebieten der Trinkwassergewinnungsbrunnen steigt nicht so stark an wie über das Modellgebiet gemittelt und liegt in den Einzugsgebieten West mit 240 mm/a und Ost mit 239 mm/a leicht über den Werten des Istzustands. Diese geringe Veränderung hat im Verbreitungsgebiet des Bottroper Mergels Flurabstandsverringerungen zur Folge (Anlage 3 und 4). Die Einzugsgebiete der beiden Brunnengalerien und die sich daraus ergebenden Fließzeit-zonen zeigen nur geringe Veränderungen (Abb. 15).

Tab. 7: Flächennutzung innerhalb der Einzugsgebiete in der nahen Zukunft (Angaben in Mio. m<sup>3</sup>/a)

	nahe Zukunft					
	West			Ost		
	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Flächenanteil [%]	GWNeu [m <sup>3</sup> /a]	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Flächenanteil [%]	GWNeu [m <sup>3</sup> /a]
Ackerland	5,42	52,1	1.375.138	18,01	61,7	4.382.281
Grünland	1,09	10,5	306.020	4,23	14,5	1.241.035
Wald	1,02	9,8	195.915	5,69	19,5	1.113.335
Siedlung	2,87	27,6	616.242	1,24	4,3	231.123
Summe	10,40	100,0	2.493.315	29,17	100,0	6.967.774

Tab. 8: Bilanzierung der Einzugsgebiete in der nahen Zukunft (Angaben in Mio. m<sup>3</sup>/a)

nahe Zukunft	West	Ost
GWNeu (+)	2,48	6,96
FGW (-)	0,04	1,11
Flächendränagen (-)	0,02	0,60
Brunnen (-)	2,42	5,25
Fläche [km <sup>2</sup> ]	10,40	29,17

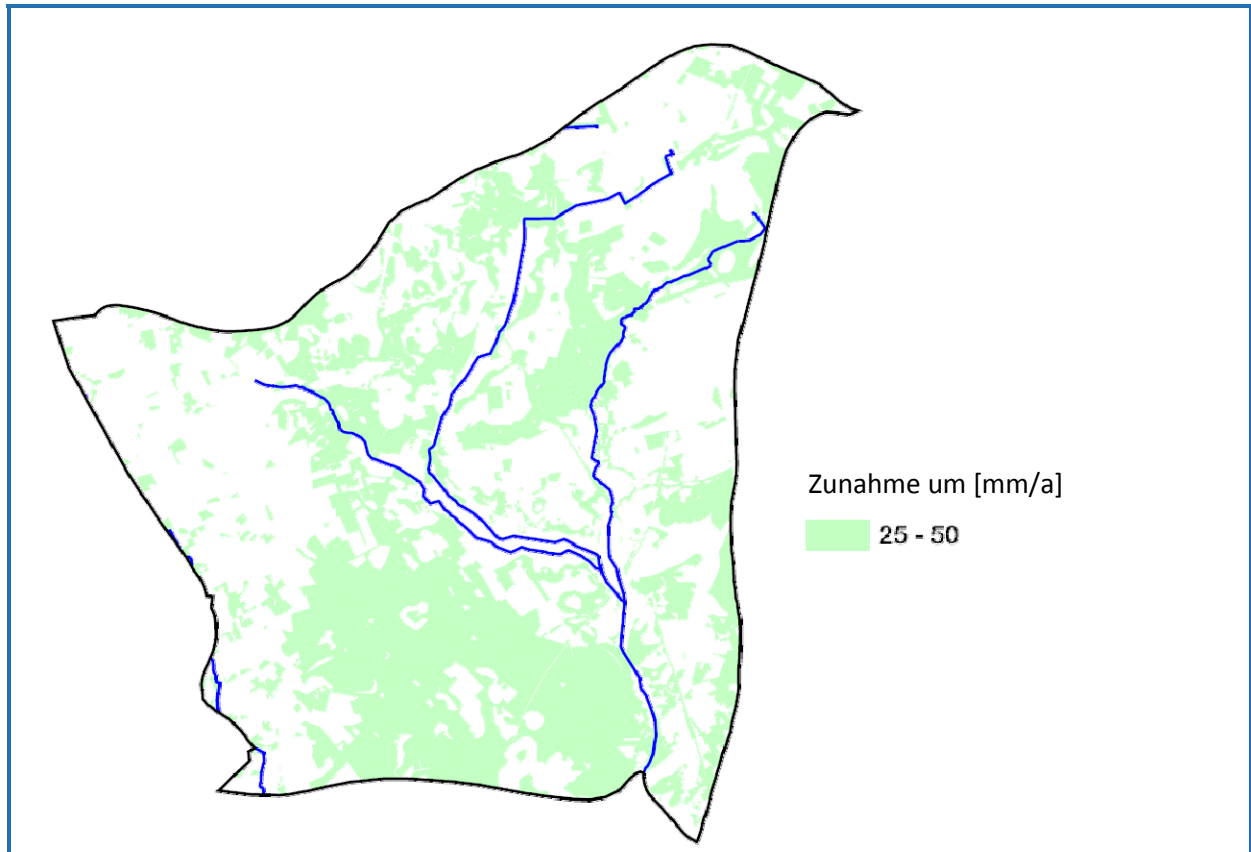


Abb. 13: Grundwasserneubildungsdifferenzen zwischen dem Istzustand (1961-90) und der nahen Zukunft (2021-2050)

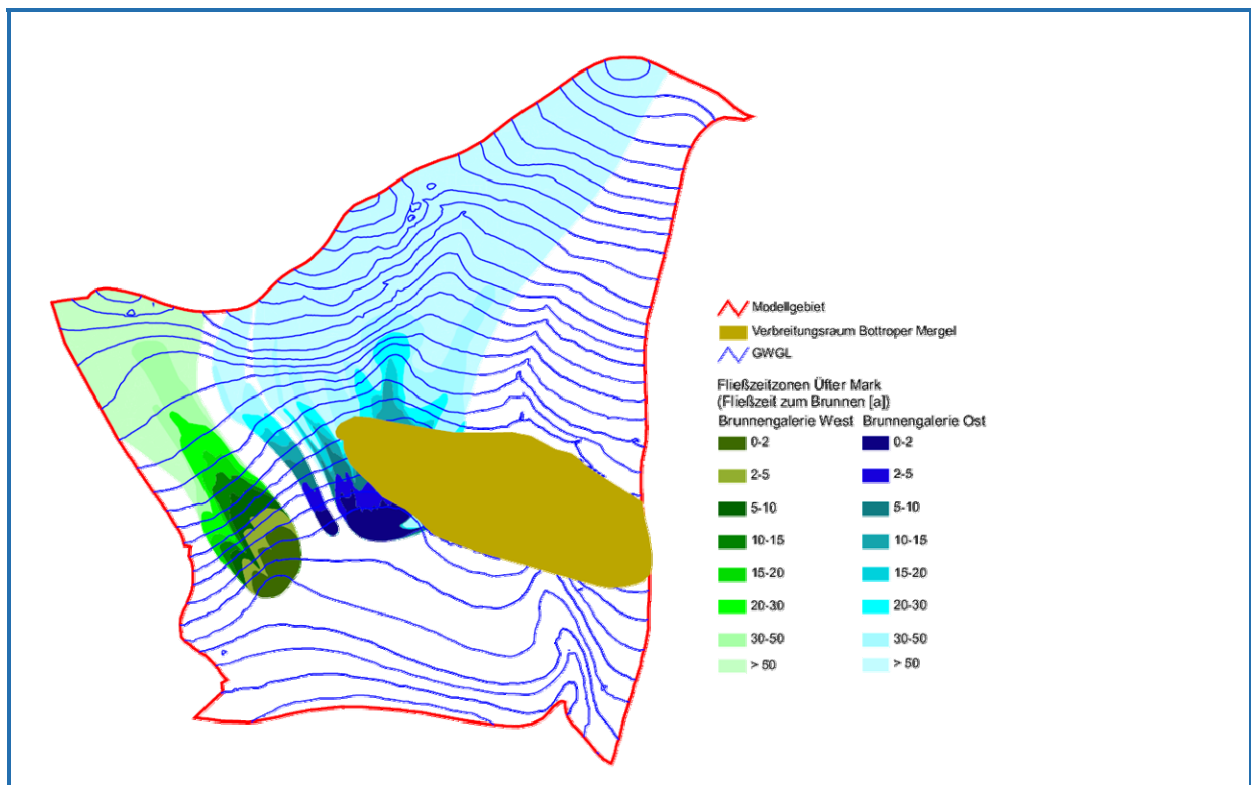


Abb. 14: Fließzeitzone für die nahe Zukunft

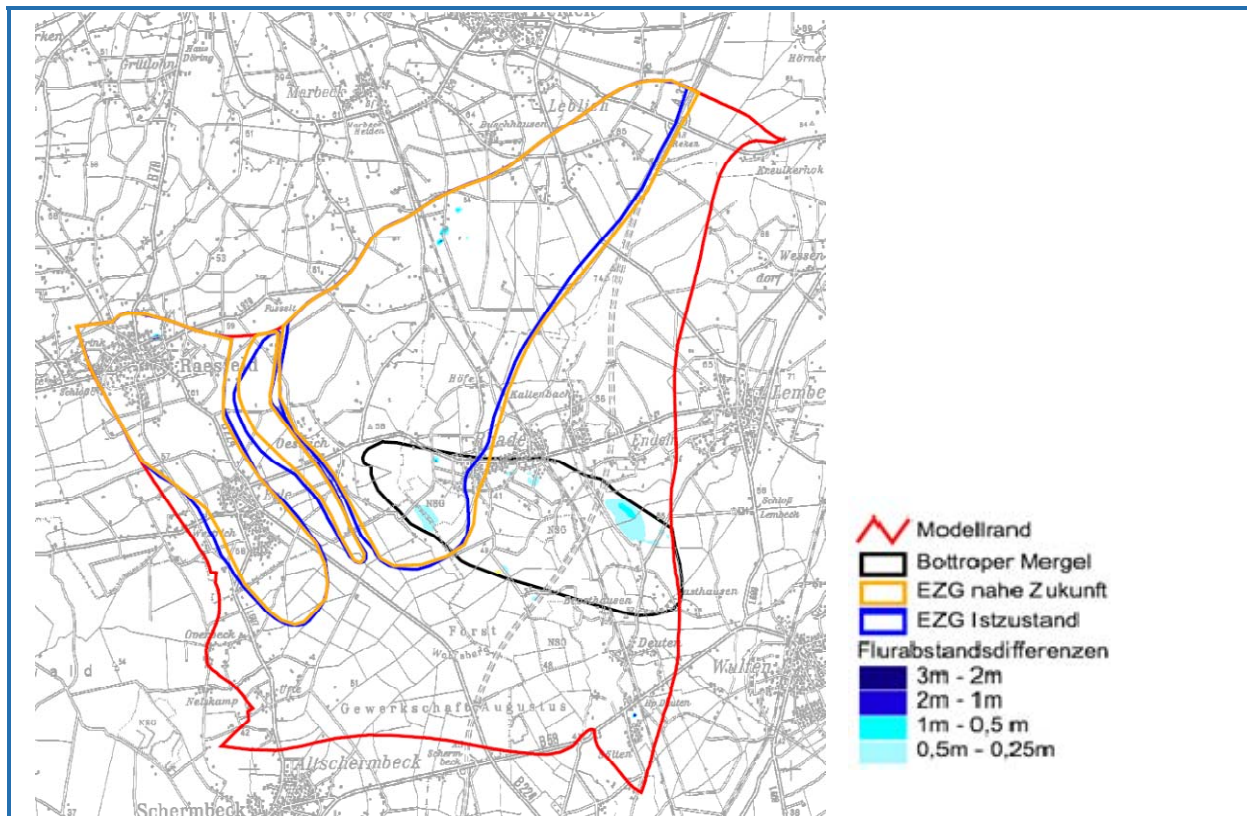


Abb. 15: Flurabstandsänderungen und Verschiebungen der Einzugsgebiete zwischen dem Istzustand und der nahen Zukunft

Das Einzugsgebiet der Brunnengalerie West verkleinert sich um  $0,38 \text{ km}^2$ , das der Brunnengalerie Ost vergrößert sich um  $0,03 \text{ km}^2$ . Den größten Anteil der Flächennutzung stellen weiterhin die Ackerflächen. Die Wasserbilanzen ändern sich für die Brunnengalerie West nicht. Im Einzugsgebiet der Brunnengalerie Ost steigt zwar die Grundwasserneubildung leicht an, aber die Fließgewässer nehmen wesentlich mehr Grundwasser auf und die Entnahme der Flächendränagen erhöht sich marginal. Diese gestiegenen Exfiltrationen aus dem Grundwasser können nicht durch die Grundwasserneubildung kompensiert werden, so dass sich das Einzugsgebiet etwas vergrößert.

## 6.2 Berechnung der Fließzeiten für die ferne Zukunft

Bis 2100 nehmen der Niederschlag um  $1,5 \%$  und die potentielle Verdunstung (Grasreferenzverdunstung) gegenüber dem Istzustand um  $9,1 \%$  zu. Die Erhöhung der potentiellen Verdunstung wird auch bei lokalen Wechselwirkungen mit Gewässern und in Bereichen mit geringen Flurabständen angesetzt. Die reale Verdunstung nimmt auf Ackerland um  $15,2 \%$  zu, während sie auf Grünland und Wald um  $9 \%$  abnimmt. Im Ergebnis nimmt die Grundwasserneubildung im Gesamtgebiet um  $0,9 \%$  zu. Die Veränderung bis 2100 ist durch die differenzierte Veränderung der realen Verdunstung sehr ungleichmäßig. Auf Waldflächen nimmt die Grundwasserneubildung zu und auf Ackerflächen deutlich ab. Maßgebliche Änderungen werden durch die Erhöhung des Beregnungsbedarfes auf den Ackerflächen hervorgerufen. Aufgrund der deutlich ansteigenden Temperaturen nimmt der Beregnungsbedarf in diesem Zeitraum erheblich und zwar auf  $117 \text{ mm/a}$  zu. Diese deutlichen Verschiebungen im Temperaturverlauf und die daraus resultierenden erhöhten Beregnungsansprüchen rechtfertigen auch die Annahme, dass in diesem Zeitraum alle ackerbaulich angebauten Kulturen beregnet werden. Deutlich herausgestellt werden soll an dieser Stelle jedoch noch einmal, dass die Berechnungen durchgeführt wurden mit einer ackerbaulichen Flächennutzung, wie sie sich derzeit im Modellgebiet darstellt. Aspekte wie Veränderungen in der Fruchtfolge, Fortschritte in der Sortenzüchtung, Anpas-

sungen in der Produktionstechnik, die über derartige Zeiträume mit Sicherheit in erheblichem Umfang zu erwarten sind, ließen sich naturgemäß nicht berücksichtigen. Zu beachten ist auch, dass mit den deutlich ansteigenden Temperaturen ein Anstieg des Trinkwasserbedarfs einhergeht, dessen Deckung durch die steigenden Entnahmemengen zur Beregnung erschwert wird.

Für das Modell wird der Beregnungsbedarf in die Grundwasserneubildung eingerechnet, so dass sich effektiv eine um 20 % niedrigere Grundwasserneubildung für die ferne Zukunft im Vergleich mit dem heutigen Zustand ergibt.

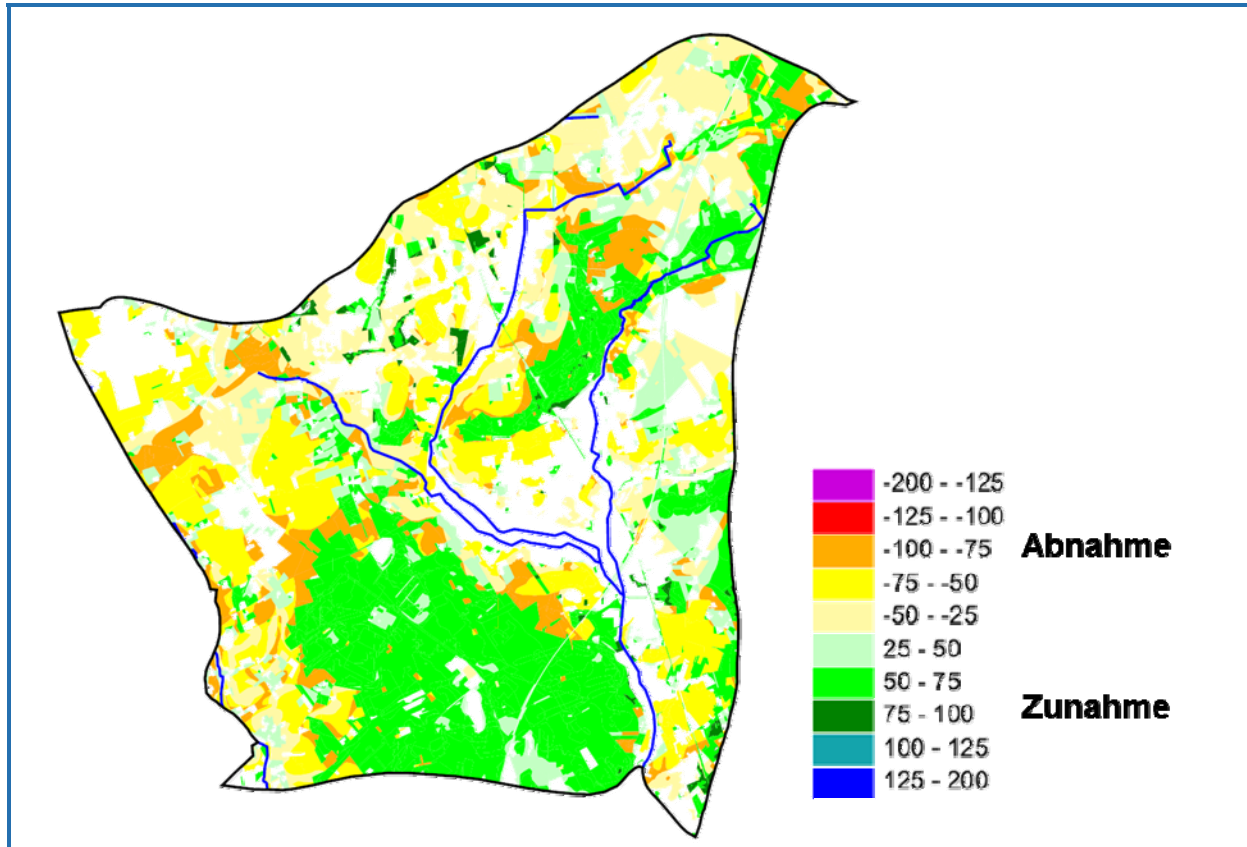


Abb. 16: Grundwasserneubildungsdifferenzen zwischen dem Istzustand (1961-90) und der fernen Zukunft (2051-2100)

Die mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet liegt bei 222 mm/a (Istzustand 220 mm/a), nach Reduzierung durch die Beregnung bei 172 mm/a (Istzustand 215 mm/a). Abb. 16 zeigt die räumliche Verteilung der Änderungen.

Die Modellergebnisse werden analog zum Istzustand und der nahen Zukunft als Fließzeitzone dargestellt (Abb. 17) und in Bilanzen (Tab. 9) ausgewiesen. Die Grundwasserneubildung liegt in den Einzugsgebieten West mit 157 mm/a und Ost mit 152 mm/a deutlich unter den Werten des Istzustands und der nahen Zukunft. Diese Veränderung hat im gesamten Modellgebiet Flurabstandsvergrößerungen und eine geringere Vorflutwirkung der Fließgewässer zur Folge. (Abb. 18).

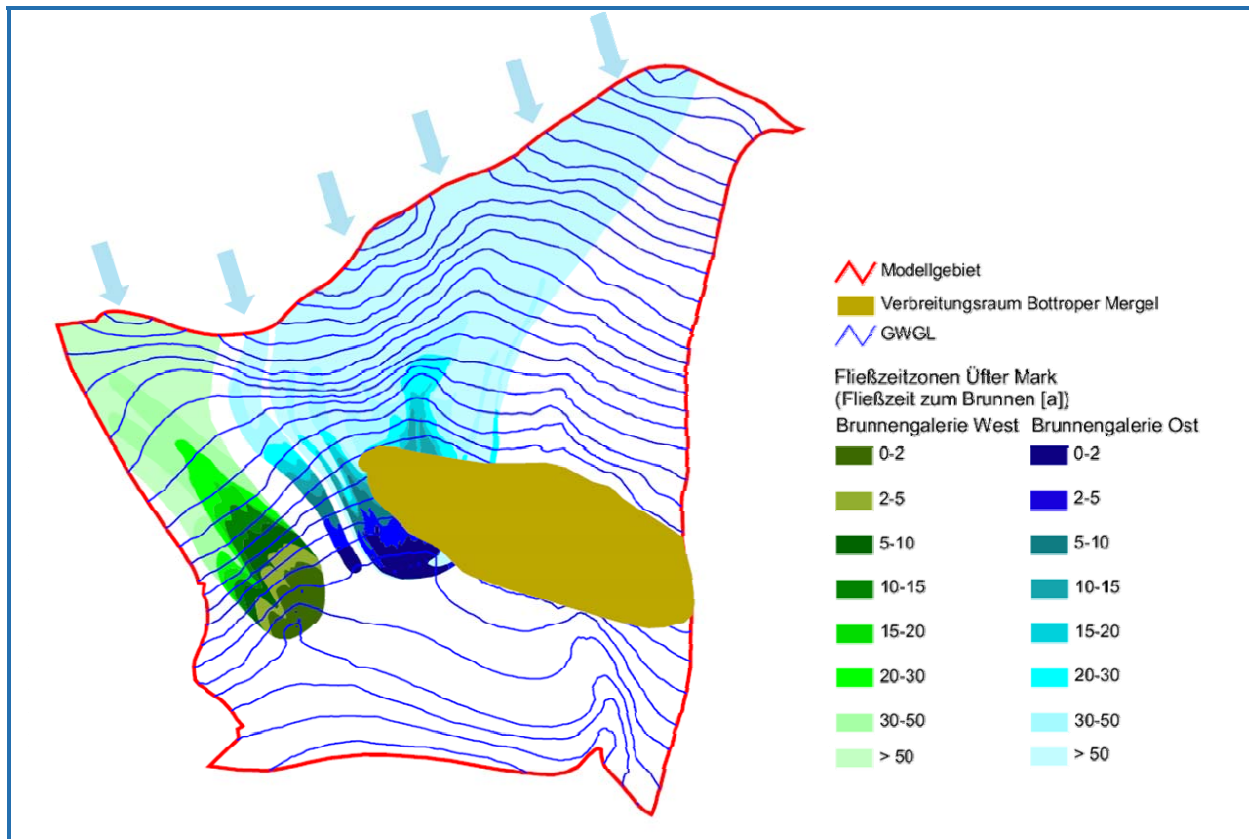


Abb. 17: Fließzeitzone für die ferne Zukunft

Tab. 9: Flächennutzung innerhalb der Einzugsgebiete für die ferne Zukunft (Angaben in Mio. m<sup>3</sup>/a)

	ferne Zukunft					
	West			Ost		
	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Flächenanteil [%]	GWNeu [m <sup>3</sup> /a]	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Flächenanteil [%]	GWNeu [m <sup>3</sup> /a]
Ackerland	5,84	53,0	549.649	17,40	62,1	1.668.517
Grünland	1,11	10,1	313.511	4,14	14,8	1.174.286
Wald	1,18	10,7	274.839	5,24	18,7	1.211.348
Siedlung	2,89	26,2	594.901	1,22	4,4	221.659
Summe	11,02	100,0	1.732.900	28,00	100,0	4.275.810
Zuwachs	4,71		740.000	9,56		1.460.000
Summe	15,73		2.472.900	37,56		5.735.810

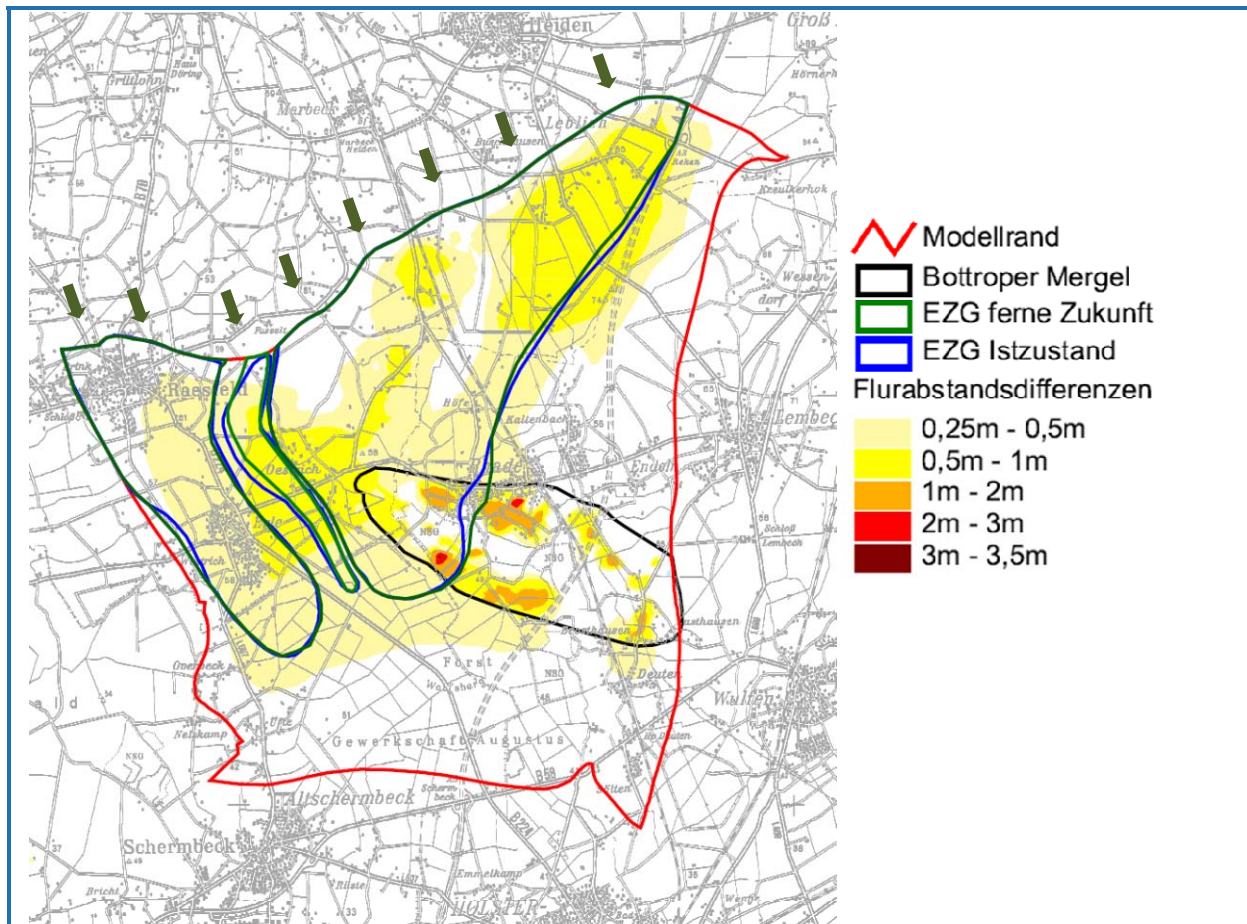


Abb. 18: Flurabstandsänderungen und Verschiebungen der Einzugsgebiete zwischen dem Istzustand und der fernen Zukunft

Den größten Anteil der Flächennutzung stellen weiterhin die Ackerflächen. Die Grundwasserneubildung nimmt in beiden Einzugsgebieten deutlich ab. Die Entnahme der Fließgewässer ändert sich im Einzugsgebiet West nicht, im Einzugsgebiet Ost nimmt die Entnahme deutlich ab. Die Entnahme über die Flächendränagen verringert sich in beiden Gebieten. Durch die erhöhten Exfiltrationen aus dem Grundwasser und die deutlich geringere Neubildung werden die Grundwasserstände weiter sinken und die Fließgewässer weiter negativ beeinflusst und ökologisch beeinträchtigt.

Die erhöhte Beregnung in der fernen Zukunft könnte nur durch Ergänzungsflächen und damit durch erhebliche Vergrößerungen der Einzugsgebiete ausgeglichen werden. Um diesen Konflikt zu lösen, wurde für das dann benötigte Einzugsgebiet das berechnete Wasserdefizit zu einer maximal möglichen Beregnungsmenge umgerechnet. Der Wasserbedarf aus den Bilanzen der fernen Zukunft beläuft sich auf insgesamt ca. 8,3 Mio. m<sup>3</sup>/a bei einer Fläche des Einzugsgebietes von ca. 39 km<sup>2</sup>. Diese Annahmen führen zu einer benötigten durchschnittlichen Grundwasserneubildung von 210 mm/a im Modellgebiet. Die errechnete Grundwasserneubildung für die ferne Zukunft ohne Reduzierung um die prognostizierte Beregnungsmenge beläuft sich auf 222 mm/a, so dass nur eine theoretische Beregnungsmenge von maximal 12 mm/a zur Verfügung steht. Die aktuelle Beregnung für das gesamte Modellgebiet liegt bei 5 mm/a, während als Beregnungsbedarf in der fernen Zukunft 50 mm/a, bei einem Beregnungsansatz von 117 mm/a auf den Ackerflächen, ermittelt wurden.

### 6.3 Vergleich zwischen naher und ferner Zukunft

Die Grundwasserneubildung nimmt zwischen naher und ferner Zukunft ab, der Beregnungsbedarf nimmt zu (Abb. 19). Daraus ergibt sich im Mittel ein deutlich verringertes Grundwasserdargebot. Flächendifferenziert ergeben sich Abnahmen auf Ackerflächen um 100 bis 180 mm/a, Zunahmen im Wald um 50 bis 75 mm/a und keine Veränderungen in bebauten Flächen, auf Grünland und bei geringen Flurabständen. Abb. 20 zeigt die Differenzen.

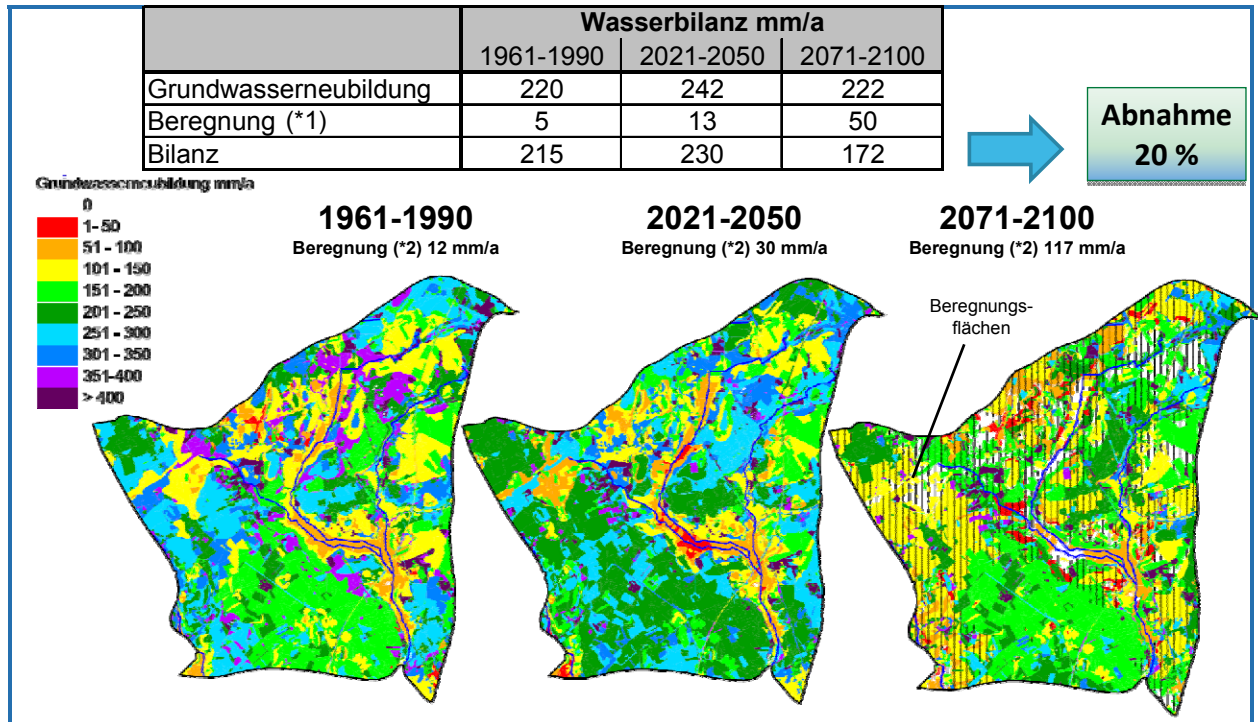


Abb. 19: Veränderungen des Wasserhaushaltes durch die Beregnung (\*1: bezogen auf das Modellgebiet, \*2: bezogen auf die Ackerflächen)

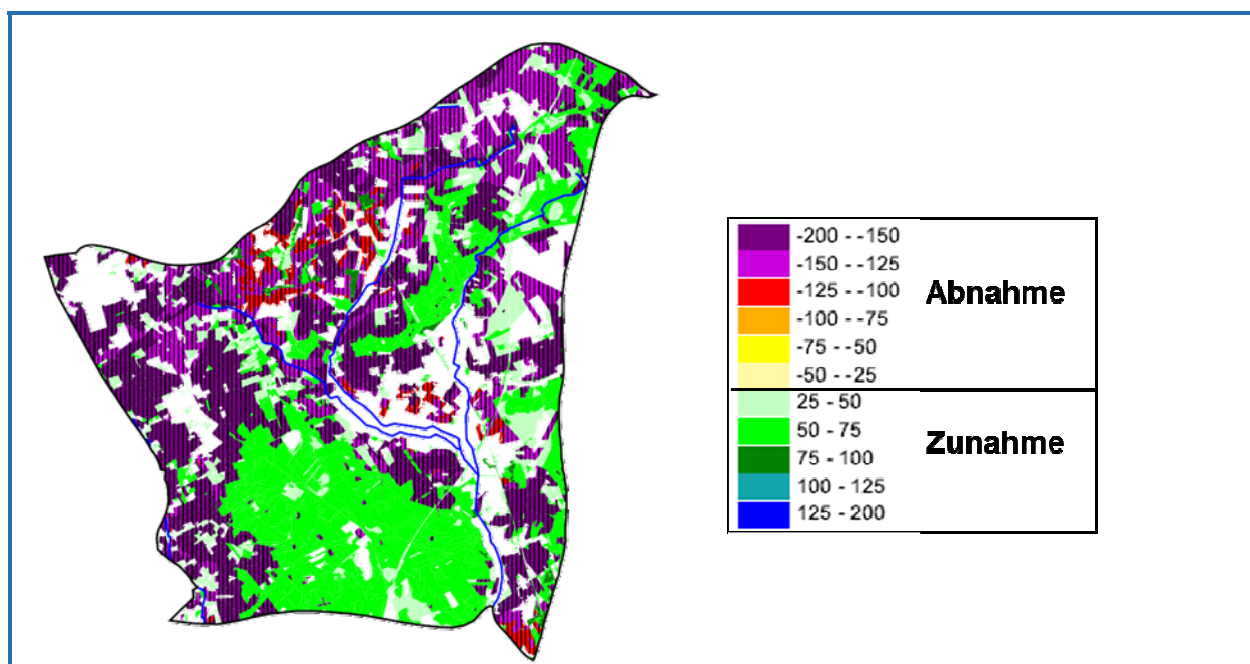


Abb. 20: Differenzen in der Grundwasserneubildung zwischen naher und ferner Zukunft (beregnete Flächen sind schraffiert)

In Tab. 10 sind die mittleren Grundwasserneubildungsraten für das Gesamtgebiet und die Einzugsgebiete der Brunnen (EZG Ost und EZG West) für die verschiedenen Zeitpunkte aufgeführt. Die Prognosen der Grundwasserneubildungsberechnung für die nahe und ferne Zukunft ergeben nur relativ geringe Änderungen. Durch die deutliche Erhöhung des prognostizierten Beregnungsbedarfs verringert sich das Grundwasserdargebot, was wiederum einen entscheidenden Einfluss auf das Grundwasser hat. Für die nahe Zukunft ergeben sich nur geringe Änderungen, die als geänderte Flächenanteile bezüglich der Nutzung in den Einzugsgebieten ausgewiesen werden können. Der grundwasserbürtige Abfluss der Fließgewässer erhöht sich in der nahen Zukunft.

Für die ferne Zukunft ergeben sich Änderungen in der Grundwasseroberfläche und auch geringere grundwasserbürtige Abflüsse in den Fließgewässern und vermehrtes (abschnittsweises) Trockenfallen. Die Flächenanteile der Nutzung verändern sich (Abb. 21 und Abb. 22).

Tab. 10: Grundwasserneubildung / Modellergebnisse (mm/a)

	Istzustand	nahe Zukunft	ferne Zukunft
Gesamt ohne Beregnung	220	242	222
Gesamt mit Beregnung	215	230	172
EZG OST	226	239	152
EZG West	230	240	157

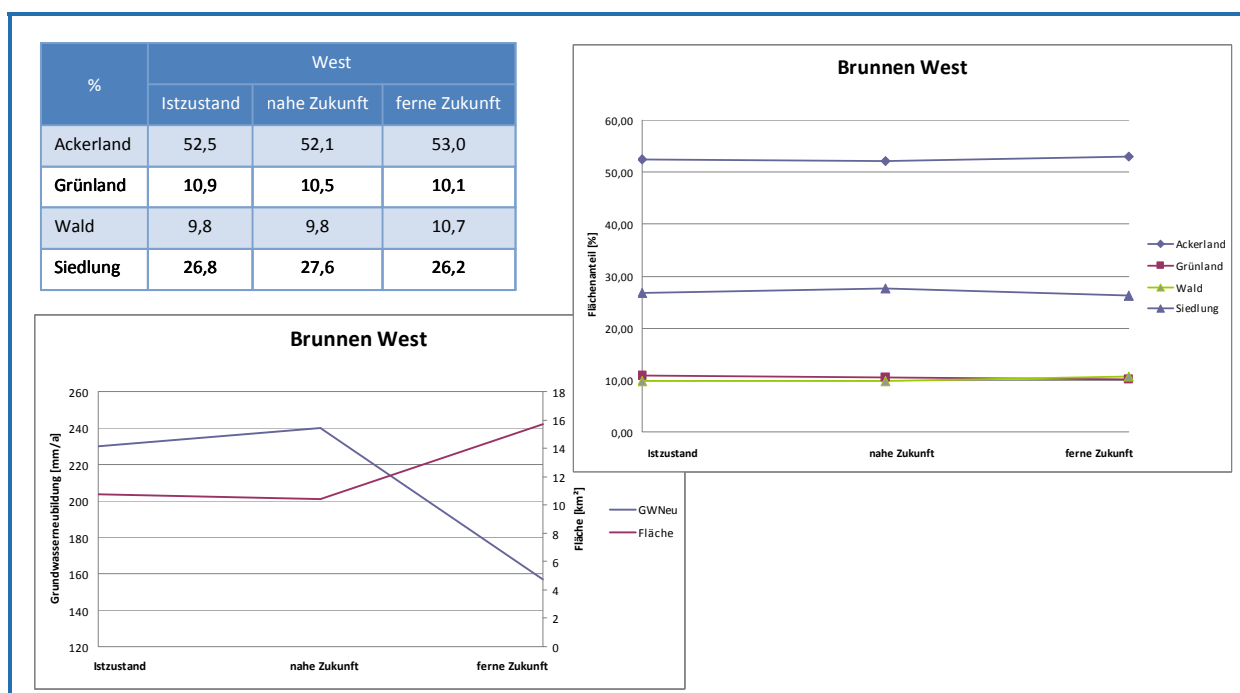


Abb. 21: Änderung der Flächennutzung Brunnengalerie West

# PROGNOSE DER AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DAS GRUNDWASSER AM BEISPIEL DER RWW-WASSERGEWINNUNG ÜFTER MARK

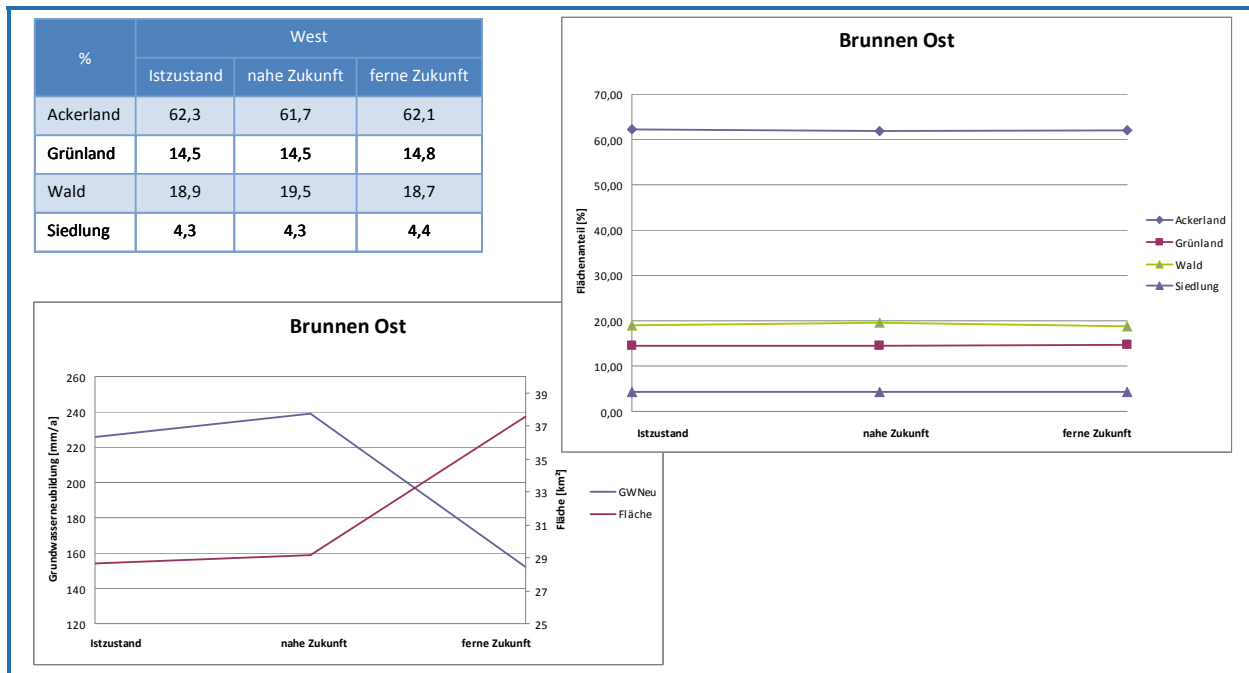


Abb. 22: Änderung der Flächennutzung Brunnengalerie Ost

## 7 Zusammenfassung und Fazit

Das Grundwasserströmungsmodell Üfter Mark wurde aus dem Modell Dorsten-West durch Erweiterung des Modellgebietes nach Norden entwickelt. Es wurde als stationäres 3D-Modell aufgebaut und deckt eine Fläche von rd. 95 km<sup>2</sup> ab. Rund 42 % dieser Fläche sind Teil des Einzugsgebietes der Wassergewinnungsanlage Üfter Mark der RWW Rheinisch-Westfälischen Wasserwerksgesellschaft mbH. Das Modell ist auf die mittlere Grundwassersituation mit mittleren Entnahmemengen zur Trinkwasserversorgung kalibriert. Die mittlere Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen an den Messstellen beträgt 0,12 m und die maximale Abweichung 0,46 m.

Auf Basis dieses mittleren Zustandes wurde eine Zonierung der Brunneneinzugsgebiete vorgenommen. Die Einzugsgebiete wurden zu Zonen gleicher Fließzeiten zusammengefasst.

Mit dem Modell wurden stationäre Simulationen zu den Varianten nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft durchgeführt und mit dem Istzustand (1961-1990) verglichen. Als Grundlage für die Simulationen wurde die Grundwasserneubildung für die genannten Varianten in Abhängigkeit von den sich ändernden Niederschlägen und potenziellen Verdunstungen berechnet. Ebenso wurde der sich daraus ergebende veränderte Beregnungsbedarf mit Hilfe von klimatischen Bodenwasserbilanzen ermittelt.

In der nahen Zukunft ist die Grundwasserneubildung höher als im Istzustand. Auch der Beregnungsbedarf ist etwas höher als heute, gleicht aber die erhöhte Grundwasserneubildung nicht aus, so dass das Grundwasserdargebot in der Bilanz geringfügig höher ist als heute. Die Einzugsgebiete der Brunnen verändern sich nur geringfügig. In der fernen Zukunft entspricht die Grundwasserneubildung in etwa der heutigen. Da der Beregnungsbedarf auf den Ackerflächen gegenüber dem Istzustand deutlich steigt (trockene Sommer), kommt es zu einem Defizit beim Grundwasserdargebot von ca. 20 %. In der Folge sinken die Grundwasserstände signifikant ab und es kommt zu einem geringeren grundwasserbürtigem Abfluss in den Fließgewässern. Durch laterale Verlagerungen der Einzugsgebiete in beiden Varianten ändern sich die Flächenanteile der Nutzungsarten. In allen betrachteten Varianten besitzt Ackerland den größten Anteil.

Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass durch die konkurrierenden Nutzungen von Grund- und Oberflächengewässern, insbesondere im Zeichen des Klimawandels erhebliche Probleme entstehen bzw. bereits bestehende weiter verschärft werden können. Die Erhöhung der Beregnung der Ackerflächen von aktuell 12 auf über 30 mm/a in der nahen Zukunft (bezogen auf die Fläche bei gleichmäßiger Verteilung) hat zwar noch keine signifikanten Auswirkungen auf das Grundwasserdargebot im Jahresdurchschnitt, für die ferne Zukunft sind mit 50 mm/a im Gesamtgebiet, bei kalkulierten Beregnungsmengen von ca. 117 mm/a auf Ackerflächen, aber deutliche Effekte und damit Nutzungskonflikte zu erwarten. Ansteigende Beregnungsmengen können bereits auch heute schon nicht mehr ökologisch konfliktfrei durch eine Vergrößerung der Einzugsgebiete für die Trinkwasser- und Brauchwassergewinnungen ausgeglichen werden.

Eine weitere Bewilligung von Grundwasserentnahmen zur (landwirtschaftlichen) Beregnung sollte daher nur nach kritischer Analyse der hydraulischen Potenziale und sorgfältiger Abwägung der bestehenden Interessen erfolgen, um bereits bestehende Nutzungskonflikte nicht weiter zu verschärfen.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] LOSEN, H. & KONRADS, B. (1998): Wasserwirtschaftliche und ökologische Aspekte bei der Nutzung flurnaher Grundwasservorkommen für die Trinkwassergewinnung in den Halterner Sanden, dargestellt am Beispiel der Brunnengalerie Üfter Mark der RWW. – RWW – Mülheim.
- [2] MEßER, J (2008): Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa. – Lippe Gesellschaft für Wassertechnik mbH, 61 S., [www.gwneu.de](http://www.gwneu.de); Essen.
- [3] MEßER, J., OHLENBUSCH, R. & GETTA, M. (2011): Entwicklung eines instationären Prognosewerkzeuges zur Berechnung der klimawandel-bedingten Veränderungen der Grundwasserneubildung – *Dynaklim*-Publikation No. **14**: 27 S., 19 Abb., 2 Tab.; Essen.
- [4] MEßER, J., OHLENBUSCH, R. & GETTA, M. (2013): Klimawandel-bedingte Veränderungen der Grundwasserneubildung im urbanen Raum am Beispiel des Emschergebietes; *Dynaklim*-Publikation No. **33**: 24 S., 17 Abb.; Essen.
- [5] QUIRMBACH, M., FREISTÜHLER, E. & PAPADAKIS, I. (2012): Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region - Analysen zu den Parametern Lufttemperatur und Niederschlag; *Dynaklim*-Publikation No. **30**: 52 S., 35 Abb., 13 Tab.; Hattingen.
- [6] LWK NRW 2012: persönliche Mitteilung vom 21.5.2012, Frau Dr. Vormann, Kreisstelle Borken)
- [7] HÖRMANN, G. 2005: Simpel - Speichermodelle zum Bodenwasserhaushalt. [www.hydrology.uni-kiel.de/simpel](http://www.hydrology.uni-kiel.de/simpel) (Download: 20.6.2012).
- [8] DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Heft 238. Wirtschafts- und Verl.-Ges., Bonn.
- [9] IT.NRW Landesbetrieb Information und Technik NRW (2010): Ergebnisse der Agrarstrukturerhebung bzw. Landwirtschaftszählung des Jahres 2010.
- [10] JOSOPAIT, V., RAISSI, F. & MÜLLER, U. (2009): Geofakten 3 - Hydrogeologische und bodenkundliche Anforderungen an Anträge zur Grundwasserentnahme für die Feldberegnung. - 3. Aufl., 5 S., 1 Tab.; Hannover.

PROGNOSE DER AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DAS GRUNDWASSER  
AM BEISPIEL DER RWW-WASSERGEWINNUNG ÜFTER MARK

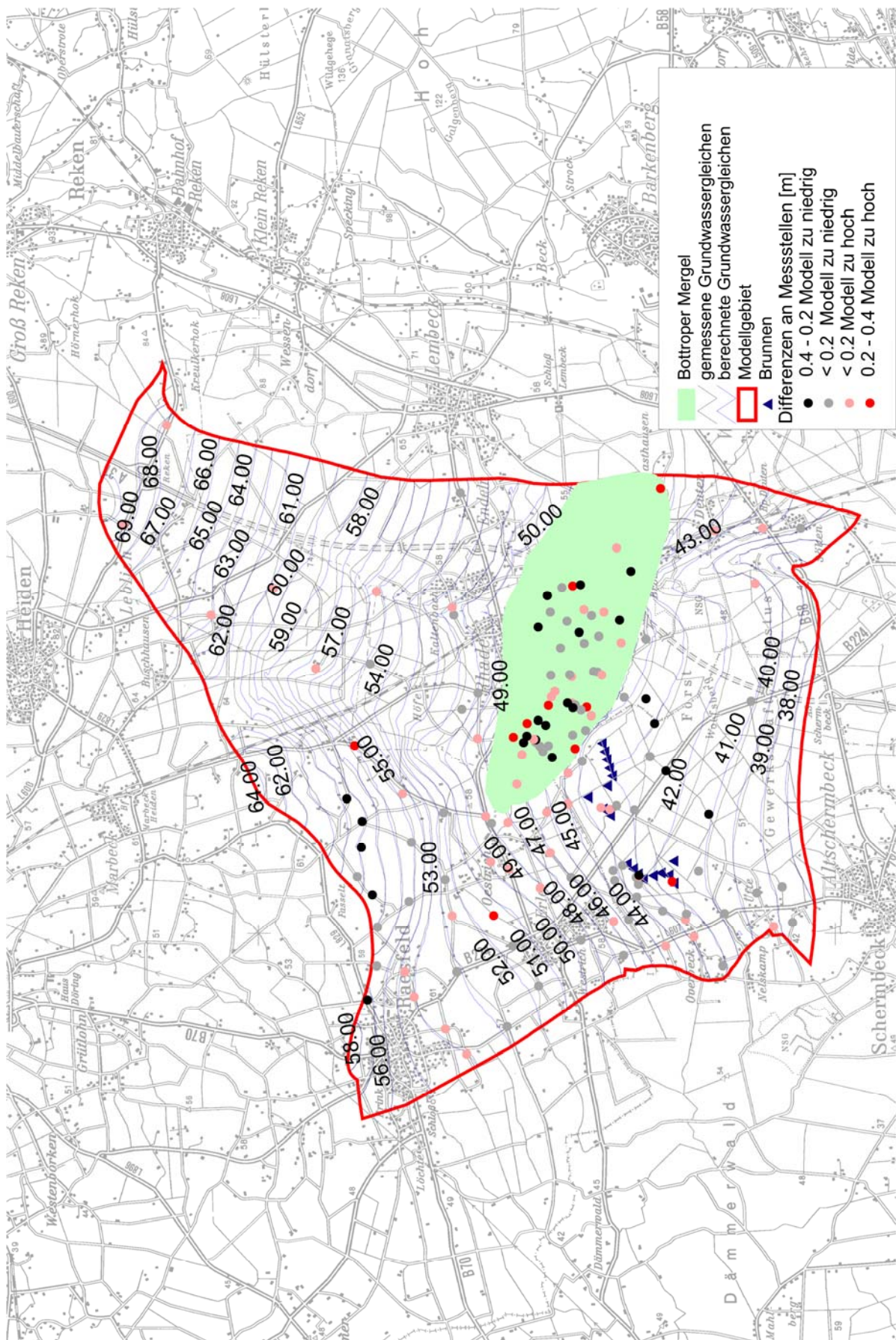
Anlage 1: Abweichungen an den Messstellen

Rechtswert	Hochwert	Differenz	Wert, gemessen	Wert, berechnet	Rechtswert	Hochwert	Differenz	Wert, gemessen	Wert, berechnet
2563370	5736190	0,15	48,07	48,22	2559870	5734400	-0,03	49,57	49,54
2564150	5736180	-0,15	50,10	49,94	2562580	5735510	0,11	47,35	47,46
2563090	5735420	0,04	47,79	47,82	2565560	5734930	-0,14	47,37	47,23
2563600	5735010	-0,28	46,87	46,59	2561550	5734200	0,00	44,50	44,50
2562090	5736780	-0,09	52,31	52,22	2562980	5734380	-0,11	43,97	43,86
2562100	5734990	0,14	46,11	46,25	2562770	5734620	0,04	44,66	44,70
2565139	5734090	-0,09	45,57	45,48	2565020	5734340	-0,10	44,48	44,38
2559610	5733660	-0,02	47,63	47,61	2565501	5734213	-0,15	43,92	43,77
2560920	5736750	-0,06	52,69	52,63	2565030	5733700	0,19	46,21	46,40
2561920	5735660	0,08	48,13	48,20	2563760	5734220	0,13	45,53	45,65
2563430	5734540	-0,10	46,31	46,21	2563910	5734300	0,23	45,43	45,66
2560300	5735910	0,21	51,40	51,61	2562180	5734050	0,03	43,57	43,60
2560780	5735100	0,03	49,12	49,15	2563860	5734400	-0,10	45,74	45,64
2560313	5735364	0,01	50,80	50,80	2560297	5736632	0,19	52,52	52,71
2560380	5732980	-0,12	43,25	43,13	2563190	5734500	0,26	45,10	45,36
2566270	5733530	-0,23	43,22	42,99	2559090	5735130	-0,10	51,75	51,65
2564050	5733270	-0,23	43,77	43,54	2560330	5732570	-0,04	42,36	42,32
2564010	5731450	-0,11	41,23	41,12	2560910	5733810	-0,03	44,40	44,37
2565300	5735140	-0,42	49,55	49,13	2560180	5730730	-0,05	38,66	38,61
2564941	5734754	-0,04	45,90	45,87	2561230	5735960	0,18	49,77	49,95
2558380	5735674	-0,08	52,92	52,84	2559775	5735580	-0,02	51,67	51,65
2563393	5735570	0,24	49,06	49,30	2560800	5730910	-0,01	38,78	38,77
2564520	5734110	-0,18	46,81	46,64	2560230	5733570	-0,03	45,24	45,21
2561578	5737337	-0,11	56,32	56,21	2560200	5733830	0,12	46,38	46,50
2562140	5733470	-0,09	43,02	42,93	2559770	5732930	0,03	44,63	44,66
2565090	5733270	-0,15	44,40	44,25	2560977	5733392	0,03	42,86	42,89
2565420	5733730	-0,29	46,46	46,17	2560998	5733395	-0,22	43,28	43,06
2559332	5736546	-0,03	53,08	53,05	2564080	5733650	-0,20	44,27	44,07
2559332	5736550	-0,04	53,11	53,07	2561170	5733680	-0,13	43,83	43,70
2560230	5732590	0,01	42,55	42,56	2560890	5732820	0,27	41,13	41,41
2561390	5734930	0,04	47,06	47,10	2563630	5733120	-0,24	43,25	43,01
2561099	5735646	0,12	49,42	49,53	2559930	5732440	0,04	42,71	42,74
2560700	5731350	-0,06	39,56	39,50	2561070	5732360	-0,12	41,25	41,14
2566020	5734540	0,25	45,94	46,19	2560340	5731910	-0,02	40,81	40,80
2567010	5731250	0,08	42,21	42,29	2563060	5733200	-0,19	42,81	42,62
2563177	5735053	-0,12	46,93	46,81	2562811	5732926	-0,26	42,59	42,34
2563180	5735070	0,07	46,94	47,02	2567707	5733021	0,31	46,35	46,67
2564440	5734560	0,19	45,25	45,45	2566060	5731380	0,01	41,23	41,24
2564471	5734594	-0,01	44,82	44,81	2565848	5734982	-0,39	45,76	45,37

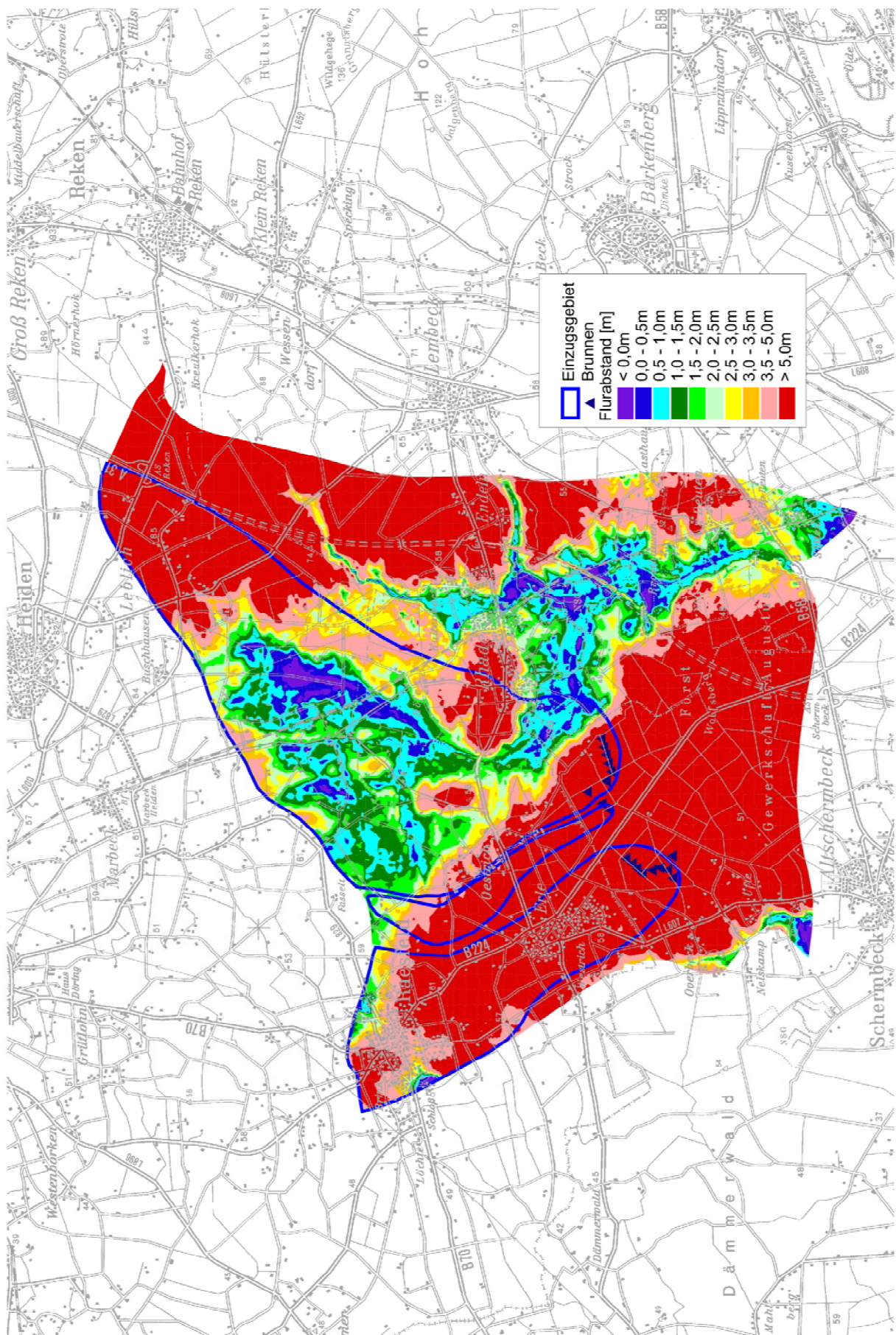
PROGNOSE DER AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DAS GRUNDWASSER  
AM BEISPIEL DER RWW-WASSERGEWINNUNG ÜFTER MARK

Rechtswert	Hochwert	Differenz	Wert, gemessen	Wert, berechnet	Rechtswert	Hochwert	Differenz	Wert, gemessen	Wert, berechnet
2564470	5734040	0,08	46,83	46,91	2566960	5732080	0,10	43,40	43,50
2563147	5735054	-0,19	47,08	46,89	2565990	5736430	0,00	51,50	51,50
2563970	5734570	0,17	45,46	45,62	2565510	5736600	-0,13	50,84	50,71
2563980	5734560	0,12	45,48	45,60	2565640	5736630	0,08	50,84	50,92
2564180	5734850	0,08	46,29	46,37	2567630	5736490	-0,04	53,48	53,44
2563042	5734897	-0,20	47,32	47,12	2558843	5738097	-0,33	57,50	57,17
2563510	5734320	-0,04	45,68	45,64	2568794	5741577	0,13	67,68	67,81
2561910	5735950	-0,04	48,98	48,95	2559427	5737938	-0,07	56,82	56,75
2559430	5731940	-0,16	42,71	42,56	2559330	5737450	0,16	54,39	54,55
2560110	5731060	0,03	39,12	39,15	2565920	5737940	0,13	55,43	55,57
2561080	5733840	-0,07	44,22	44,15	2567073	5742322	0,12	69,37	69,48
2560630	5733430	-0,04	43,92	43,88	2564660	5738050	-0,10	54,80	54,70
2560850	5733400	-0,08	43,17	43,09	2564580	5738990	0,14	57,57	57,71
2562067	5732182	-0,25	41,43	41,18	2566039	5734403	-0,23	45,35	45,12
2562150	5733900	0,04	43,35	43,39	2563310	5735180	-0,17	47,39	47,21
2560960	5733440	-0,03	43,14	43,12	2560663	5738011	-0,21	58,87	58,66
2564460	5734920	-0,05	47,40	47,35	2560100	5737920	-0,17	58,09	57,92
2565400	5734640	-0,02	45,50	45,48	2562410	5737490	0,02	55,68	55,70
2567010	5730590	-0,03	41,30	41,27	2565510	5740810	0,15	64,07	64,22
2565990	5734730	-0,13	47,02	46,89	2565976	5739726	0,06	60,64	60,70
2564660	5730430	0,00	37,80	37,80	2563250	5738320	0,32	56,50	56,82
2561440	5733920	0,00	44,17	44,16	2562328	5738458	-0,36	60,16	59,80
2560549	5737377	-0,01	56,60	56,59	2560976	5738276	-0,05	59,24	59,19
2563240	5735110	-0,18	47,46	47,28	2561490	5738204	-0,27	58,89	58,63
2563630	5735330	0,38	49,11	49,49	2558895	5737291	0,05	53,97	54,02
2562210	5733780	-0,04	43,25	43,21	2558339	5736748	0,07	53,62	53,70
2562240	5734620	0,08	45,15	45,23	2557906	5736378	0,02	54,02	54,04
2563950	5734500	-0,05	45,48	45,43	2561940	5738190	-0,23	59,42	59,19
2563870	5736460	-0,09	50,70	50,61	2563352	5735181	-0,32	47,30	46,97
2560957	5734570	-0,07	47,06	47,00	2563360	5735220	0,12	47,44	47,55
2563940	5734960	0,32	46,59	46,91	2563411	5735334	-0,30	48,15	47,85
2562030	5736050	0,02	48,97	48,99	2563302	5735391	-0,25	48,33	48,08
2564530	5734180	-0,20	46,50	46,30	2563244	5734965	-0,03	46,73	46,69
2563680	5735140	-0,46	47,62	47,15	2563980	5734630	-0,22	45,73	45,52
2564090	5734910	0,17	46,43	46,60	2563899	5734538	-0,31	45,69	45,38
2565603	5734345	0,12	43,94	44,06	2565210	5734430	-0,33	44,38	44,05
2566670	5733780	0,02	47,26	47,28	2565560	5734000	0,16	44,96	45,12

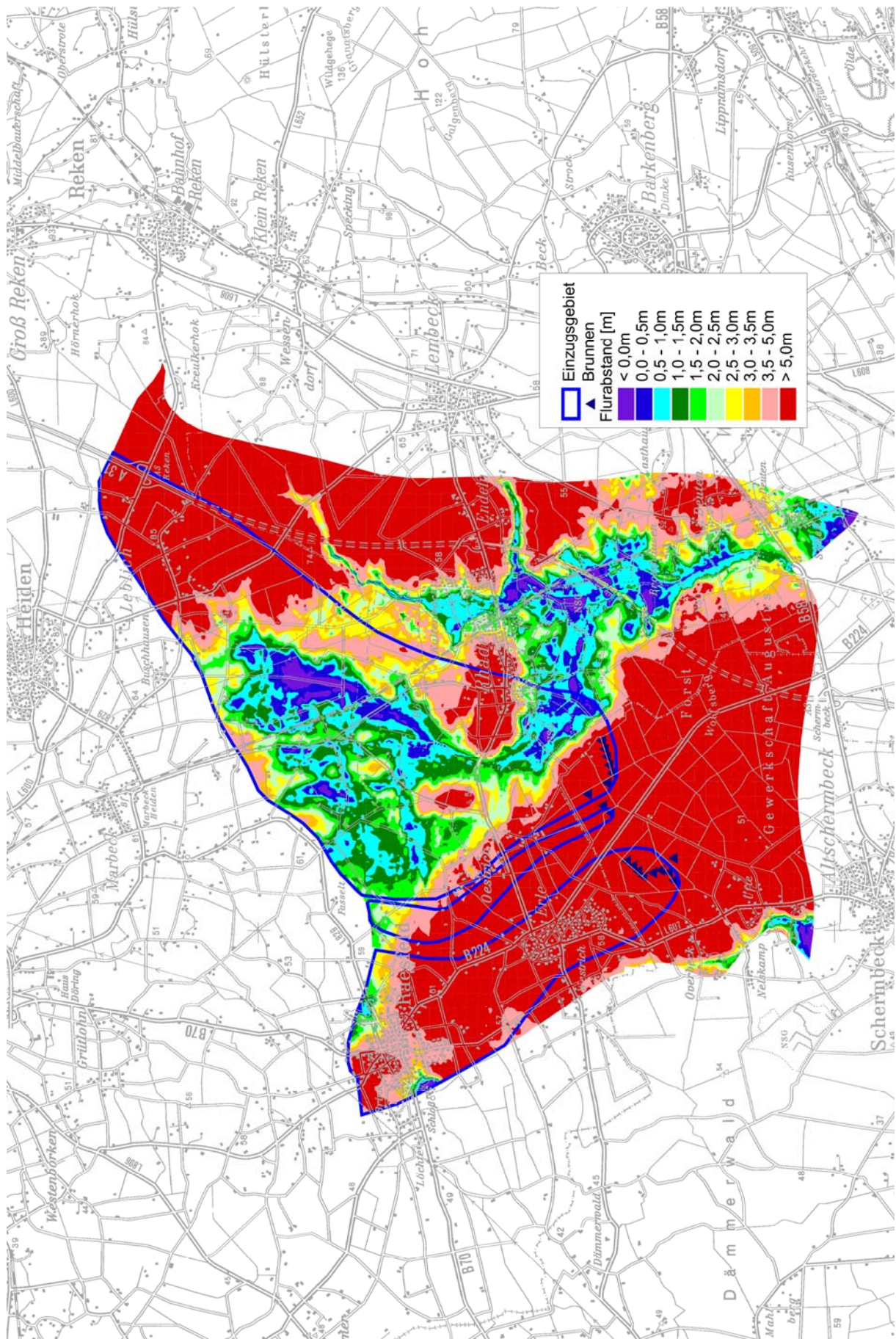
Anlage 2: Kalibrierung: Grundwassergleichen gemessen und berechnet



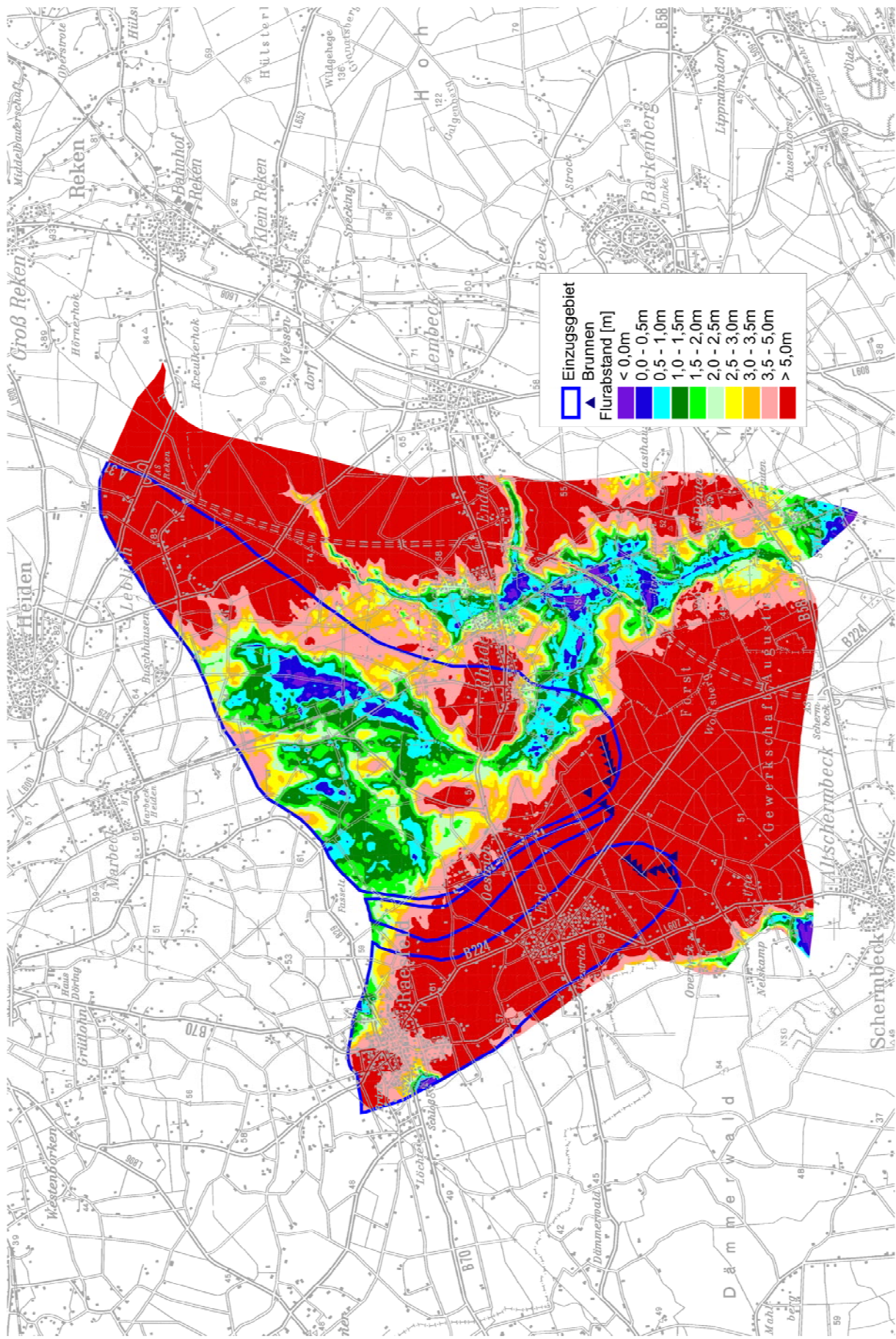
Anlage 3: Ausgangszustand: Flurabstände und Einzugsgebiete



Anlage 4: Nahe Zukunft: Flurabstände und Einzugsgebiete



Anlage 5: Ferne Zukunft: Flurabstände und Einzugsgebiete



**Ansprechpartner**

Jens Hasse  
hasse@fiw.rwth-aachen.de

Michaela Stecking  
stecking@fiw.rwth-aachen.de

**Projektbüro *dynaklim***

Mozartstraße 4  
45128 Essen

Tel.: +49 (0)201 104-33 39

***www.dynaklim.de***