



# Grundwassermodell Flutpolder Bertoldsheim

Modellaufbau  
Kalibrierung und Modelltest

Mai 2020



GeoBüro Ulm

---

**Arbeitsgemeinschaft Simultec – GeoBüro Ulm**

c/o Simultec AG, KraftWerk1, Hardturmstr. 261, CH-8005 Zürich

Tel: +41 44 563 86 20, Fax: +41 44 563 86 29, E-Mail: [info@simultec.ch](mailto:info@simultec.ch)

Grundwassermodell Flutpolder Bertoldsheim  
Modellaufbau, Kalibrierung und Modelltest

---

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung, Ziel</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modellaufbau</b> .....	<b>3</b>
2.1	Modellcode und Unterteilung in finite Elemente .....	3
2.2	Datenübernahme in die Modellierung .....	4
2.2.1	Schichtgrenzen.....	4
2.2.2	Randbedingungen .....	4
2.2.3	Kopplung mit dem hydraulischen Modell .....	5
2.2.4	Kopplung mit der Donau.....	7
2.2.5	Modellparameter .....	9
2.2.6	Karstzufluss.....	9
2.2.7	Stichtagsmessung .....	10
<b>3</b>	<b>Kalibrierung</b> .....	<b>14</b>
3.1	Kalibrierungsmethode.....	14
3.1.1	Verfahren .....	14
3.1.2	Bewertungskriterien.....	14
3.2	Instationäre Kalibrierung mit PEST .....	15
3.2.1	Vorgehen.....	15
3.2.2	Zonierung für die Kalibrierung mit PEST.....	15
3.2.3	Resultate der automatischen Kalibrierung .....	18
3.2.4	Kovarianzanalyse .....	19
3.2.5	Sensitivität der Zielfunktion auf die Parameter.....	21
3.3	Manuelle Kalibrierung.....	22
3.3.1	Vergleich mit den Messdaten des Grundwasserspiegels .....	23
3.3.2	Vergleich der Drainagemengen am Stichtag .....	32
3.4	Resultierende Modellparameter.....	33
3.5	Resultierende Strömungsverhältnisse .....	36
3.6	Wasserbilanz.....	36
<b>4</b>	<b>Modelltest an weiteren Datensätzen</b> .....	<b>38</b>
4.1	Grundwasserspiegeldaten des Jahres 2013.....	38
<b>5</b>	<b>Sensitivitäten</b> .....	<b>44</b>
5.1	Variierte Parameter .....	44
5.2	Resultate .....	45
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>55</b>

## 1 Einleitung, Ziel

---

Anlass	Entlang der Donau sollen gesteuerte Flutpolder erstellt werden, mit denen bei großen Hochwasserereignissen die Hochwasserspitzen gekappt und die unterhalb liegenden Hochwasserschutzanlagen entlastet werden können. Der Flutpolder Bertoldsheim ist einer der möglichen Flutpolderstandorte.
Auftrag	Für die Quantifizierung des Einflusses des Polders auf die Grundwasserverhältnisse werden ein hydrogeologisches Modell und darauf aufbauend ein Grundwassermodell für den Einflussbereich des Flutpolders Bertoldsheim erstellt.
Ziele	Mit dem Grundwassermodell werden folgende Ziele verfolgt: <ul style="list-style-type: none"><li>- Berechnung der Auswirkungen des Flutpolderbetriebs auf die Grundwasserstände, resp. Flurabstände.</li><li>- Quantifizierung der Auswirkungen auf benachbarte Trinkwasserbrunnen und die Abflüsse in der Binnenentwässerung.</li><li>- Ausarbeitung von Planungsvorschlägen zur Optimierung der Polderumrisse und der baulichen Massnahmen.</li><li>- Bemessung und Wirkungsnachweis der Massnahmen.</li><li>- Unterstützung im Genehmigungsverfahren und der Öffentlichkeitsarbeit.</li></ul>
Untersuchungsgebiet	Das Untersuchungsgebiet umfasst das Donautal zwischen Genderkingen und Rennertshofen. Abbildung 1 zeigt den Rand des Grundwassermodells und die beiden Planungsbereiche südlich und nördlich der Donau.
Berichtsumfang	Die Arbeiten werden mit drei Teilberichten dokumentiert: <ul style="list-style-type: none"><li>- Hydrogeologisches Modell und Modellkonzepte</li><li>- Modellaufbau, Kalibrierung und Modelltest</li><li>- Modelleinsatz</li></ul> <p>Der vorliegende Teilbericht beschreibt den Aufbau und die Kalibrierung des Modells, sowie den Modelltest.</p>

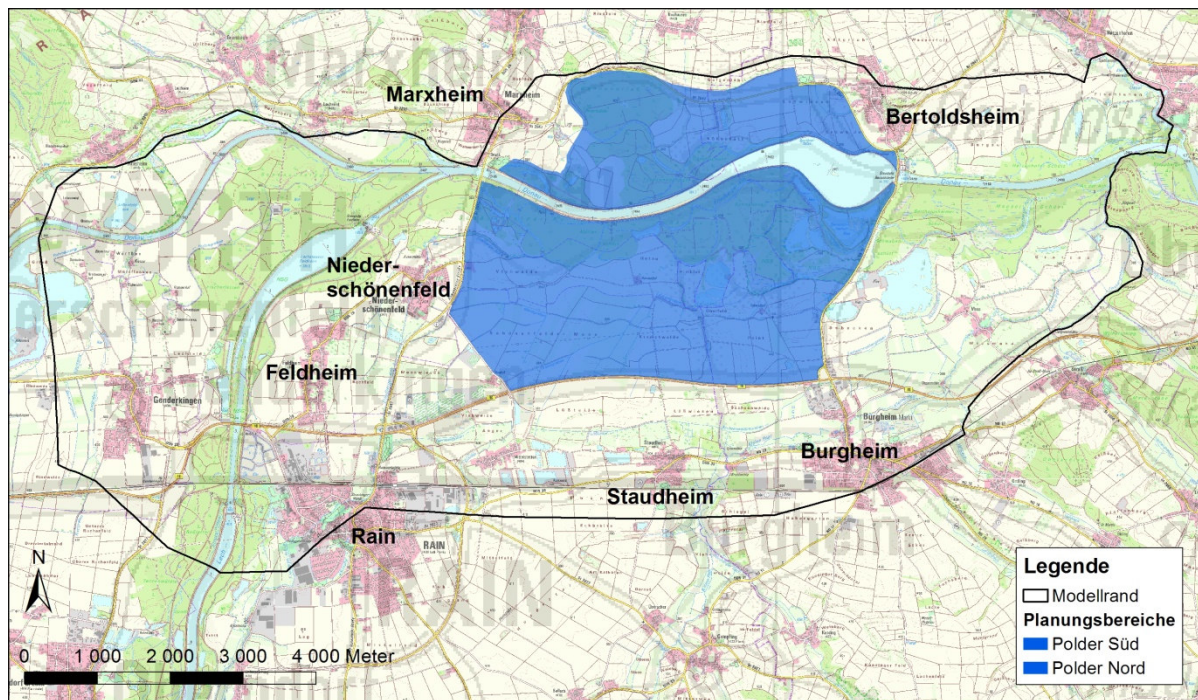


Abbildung 1: Situation mit Modellumriss und Planungsbereiche der Flutpolder.

## 2 Modellaufbau

### 2.1 Modellcode und Unterteilung in finite Elemente

#### Software

Für die numerischen Berechnungen wurde FEFLOW in der Version 6.2 eingesetzt [4]. FEFLOW ist ein Softwarepaket zur Berechnung von Wasserströmung, Massen- und Wärmetransport in porösen Medien. Die Numerik beruht auf der Methode der Finiten Elemente. Mit Finiten Elementen kann das Berechnungsnetz an natürliche Strukturen wie Flüsse, Brunnenstandorte oder unregelmässige Modellumrisse angepasst werden. In FEFLOW können sowohl die Randbedingungen wie auch die Materialparameter zeitlich variabel vorgegeben werden.

#### Diskretisierung

Das Modellgebiet wurde in 67'000 Dreieckselemente mit 34'000 Knoten unterteilt. Bei einer Modellfläche von etwa 80 km<sup>2</sup> bedeutet dies eine durchschnittliche Elementfläche von 1'200 m<sup>2</sup> oder eine charakteristische Seitenlänge von etwa 40 m. Das Modellnetz wurde entlang der Entnahmestellen und der Oberflächengewässer feiner, im übrigen Gebiet gröber unterteilt. Abbildung 2 zeigt das Finite-Elemente-Netz. Für die zeitliche Diskretisierung wurden im Rahmen der Kalibrierung Tagesschritte gewählt.

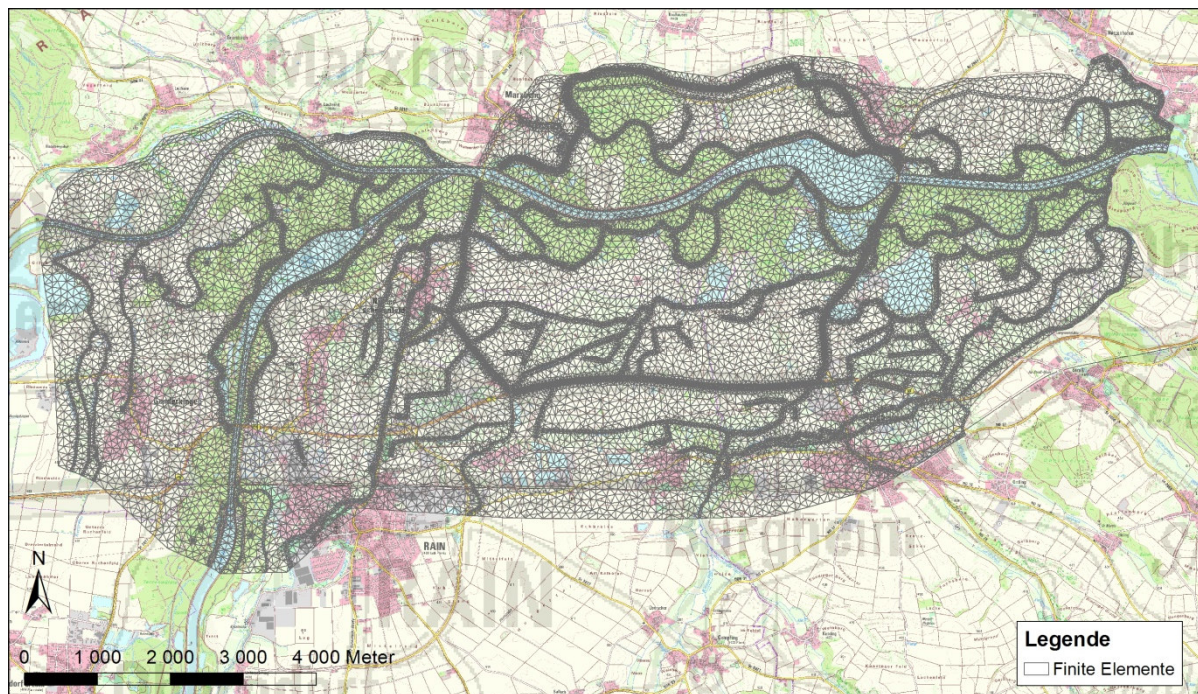


Abbildung 2: Einteilung des Modellgebiets in finite Elemente

## 2.2 Datenübernahme in die Modellierung

### 2.2.1 Schichtgrenzen

Quartärbasis	Die Schichtgrenzen des hydrogeologischen Modells wurden zum Aufbau des numerischen Modells eingesetzt. Die Unterkante des Quartärs dient als Modelluntergrenze.
Deckschichtbasis	Die Deckschichtbasis ist von Bedeutung für den Übergang von freien zu gespannten Verhältnissen bei hohen Grundwasserständen. Sie wurde deshalb auf die Elementmittelpunkte interpoliert und als Elementeigenschaft im Modell gespeichert.
Topografie	Bei Ansteigen des Grundwasserpotenzials über die Terrainoberfläche tritt Qualmwasser an die Oberfläche. Umgekehrt versickert bei Hochwasser der Donau in den überschwemmten Flächen Wasser in den Grundwasserleiter (Abbildung 3). Das digitale Terrainmodell [1] wurde deshalb auf die Modellknoten interpoliert.

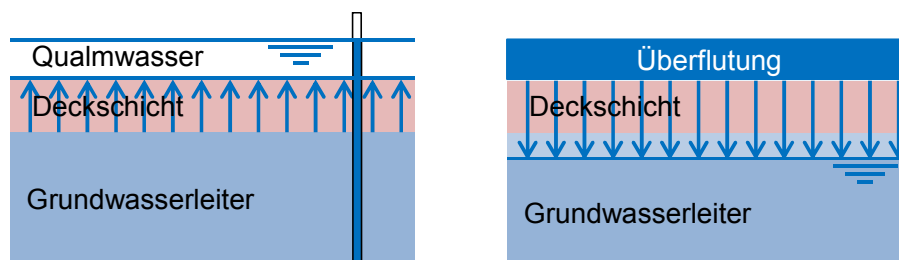


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Situation bei einem Grundwasserpotenzial über der Terrainhöhe (links) und bei Überflutung der Auebereiche (rechts).

### 2.2.2 Randbedingungen

Umsetzung Modell-konzept	Die Randbedingungen des Grundwassermodells wurden gemäss den in [6] beschriebenen Modellkonzepten für den Zeitraum von 2013 bis 2019 aus den Grundlagedaten berechnet. Daraus wurden für die einzelnen Berechnungszeiträume Dateien erzeugt, welche in FEFLOW [4] eingelesen werden können.
Überflutung und Qualmwasser	Qualmwasser und Überflutung wurden im Modell mit einer Cauchy-Randbedingung nachgebildet, da die Deckschicht einen Widerstand gegen die Durchströmung ausübt.
Qualmwasser	Bei der Cauchy-Randbedingung für Qualmwasser wird die Topografie als Potential vorgegeben. Der Leakagewert für den Eintritt ins Modell wird zu Null gesetzt, der Leakagewert für den Austritt aus dem Modell erhält einen Wert grösser Null. Damit wird erreicht, dass die Randbedingung nur aktiv wird, wenn die Potentialhöhe des Grundwassers über die Topografie ansteigt.
Gespannte Verhältnisse	Befindet sich im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels die Unterkante der Deckschicht, so kann angenommen werden, dass bei Erreichen der Deckschicht kurzzeitig gespannte Verhältnisse auftreten.

ten. Dieses Verhalten wurde mit einer Erweiterung von FEFLOW berücksichtigt. Dabei erhält der Speicherkoeffizient einen tieferen Wert, wenn der Grundwasserspiegel über die Deckschichtunterkante ansteigt.

### 2.2.3 Kopplung mit dem hydraulischen Modell

Zeitraum

Mit dem hydraulischen Modell wurden die beiden Hochwasserwellen im Jahr 2013 nachgebildet. Das Grundwassermodell wird für diesen Zeitraum entlang der Gewässer und in den Überflutungsgebieten mit dem hydraulischen Modell gekoppelt.

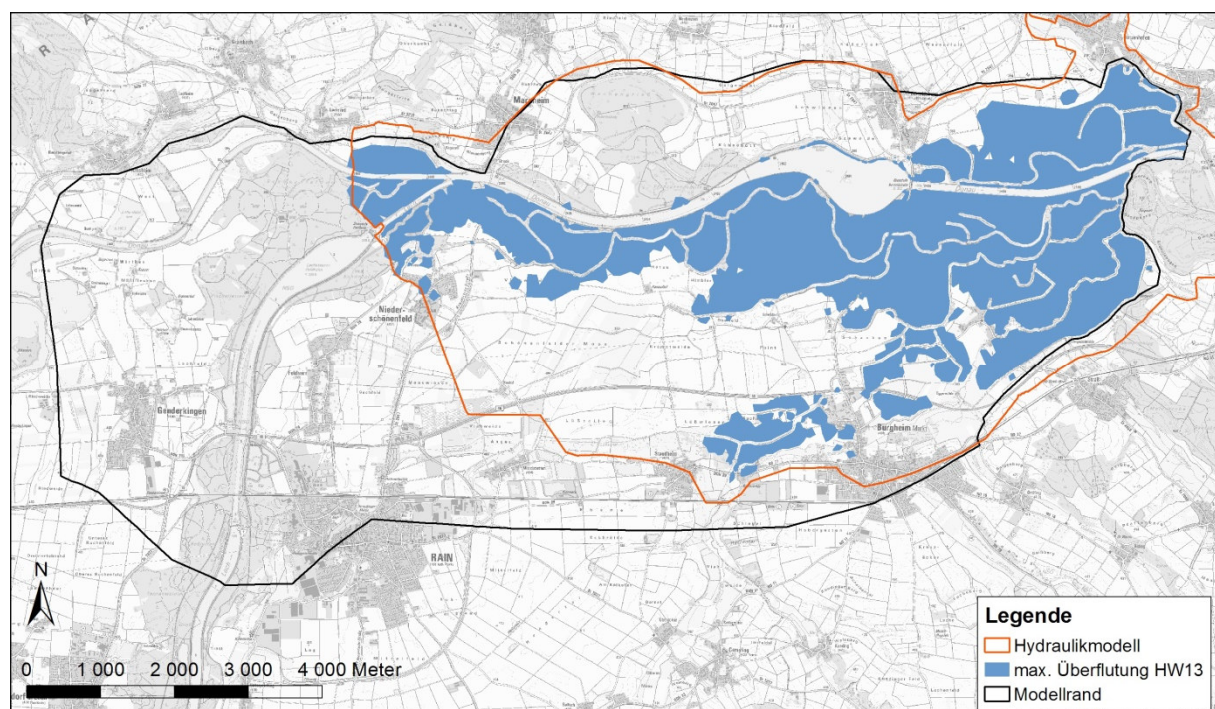


Abbildung 4:

Mit dem Hydraulikmodell berechnete maximale Überflutungsfläche beim Hochwasser 2013.

Vorgehen

Eine Überflutung mit relevanter Ausdehnung findet nur bei Hochwasserereignissen statt. Die Überflutung wird im Grundwassermodell mit einer Cauchy-Randbedingung berücksichtigt. Zu jedem Berechnungszeitpunkt und in jedem Modellknoten wird überprüft, ob der im hydraulischen Modell resultierende Wasserspiegel über der Topografie liegt. Ist dies der Fall, so wird im Grundwassermodell der berechnete Wasserspiegel als Randbedingung vorgegeben und der Leakagewert für den Eintritt ins Modell erhält einen Wert grösser Null.

Leakagewert entlang von Linien

In FEFLOW ist der Leakagewert eigentlich für die Anwendung von Gewässern in Form von Linien gedacht. Die zum Modell zu- resp. vom Modell abströmende Wassermenge errechnet sich aus der Differenz zwischen vorgegebenem Randpotential und berechneter Grund-

wasserspiegellage, dem Leakagewert und der Länge der an zwei benachbarte Leakage-Knoten angrenzenden Seiten.

$$Q = (H_P(t) - H_{GW}(t)) \times f_{LEAK}(t) \times L$$

Q: Zugegebene oder entnommene Wassermenge [m<sup>3</sup>/Tag].

H<sub>P</sub>: Wasserspiegel [mNN].

H<sub>GW</sub>: Grundwasserspiegel [mNN].

f<sub>LEAK</sub>: Leakagewert [m/Tag].

L: Länge der zugeordneten Elementseiten [m].

Leakagewert in der Fläche

Bei einer Überflutung muss das Linienkonzept auf die Fläche erweitert werden. Wird die Überflutung mit einer Cauchy-Randbedingung vorgegeben, so ist der berechnete Zufluss zum Modell abhängig von der Gesamtlänge aller im Überflutungsgebiet liegenden Seiten. Der Zufluss ist daher abhängig von der Netzfeinheit des Modells, da die Summe der Seitenlängen umso grösser ist, je kleiner die Elemente sind. Um bei unterschiedlicher Elementgröße einen räumlich konstanten Zuflusswiderstand zu erhalten müssen also allen Elementen individuelle Leakagewerte zugeordnet werden.

Berechnung

Zur Berechnung der Leakagewerte wird die Mächtigkeit der Deckschicht und deren Durchlässigkeit beigezogen. Mit nachfolgender Formel errechnet sich der Leakagewert eines finiten Elementes in Abhängigkeit seiner Fläche und der angrenzenden Seitenlängen.

$$f_{LEAK} = \frac{A \times k_{f\ DEECK} \times 86400}{(s_1 + s_2 + s_3) \times M_{DEECK}}$$

A: Dreiecksfläche [m<sup>2</sup>]

s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>, s<sub>3</sub>: Längen der Dreiecksseiten [m]

86400: Anzahl Sekunden pro Tag [s/Tag]

k<sub>f DEECK</sub>: Durchlässigkeit der Deckschicht [m/s]

M<sub>DEECK</sub>: Mächtigkeit der Deckschicht [m]

Da FEFLOW jeweils die Leakagewerte den angrenzenden Seiten, und diese wiederum den angrenzenden Knoten zuordnet, wird die Deckschichtdurchlässigkeit schlussendlich den Eckknoten zugeordnet. In jedem Knoten wird jeweils ein Drittel der Fläche der angrenzenden Elemente erfasst (Abbildung 5).



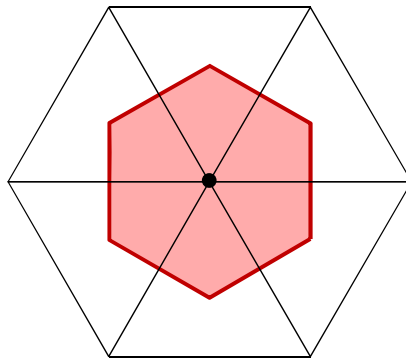


Abbildung 5: Dem Leakage-Knoten zugeordnete Elementfläche

## 2.2.4 Kopplung mit der Donau

Randbedingung	Die Donau wird im Grundwassermodell mit einer Cauchy-Randbedingung entlang deren Mittellinie vorgegeben. Die Höhe des Wasserspiegels wird über die Abflussmenge und die im hydraulischen Modell bestimmte Abfluss-Pegel-Beziehung berechnet.
Schwallbetrieb	Die Stauhaltung Bertoldsheim wird im Schwallbetrieb gesteuert, um zu Spitzenzeiten mehr Strom für die Deutsche Bahn erzeugen zu können. Dabei wird der Wasserspiegel im Stauraum zweimal pro Tag abgesenkt. Danach füllt sich der Stauraum langsam wieder bis zum Stauziel von 390.8 m NN auf (Abbildung 6). Der Schwallbetrieb wird nur bei Donau-Abflüssen zwischen 300 und 600 m <sup>3</sup> /s aufrechterhalten. Bei kleineren Abflüssen wird der Wasserspiegel beim Stauziel gehalten, bei grösseren Abflüssen erfolgt ein Überstau.

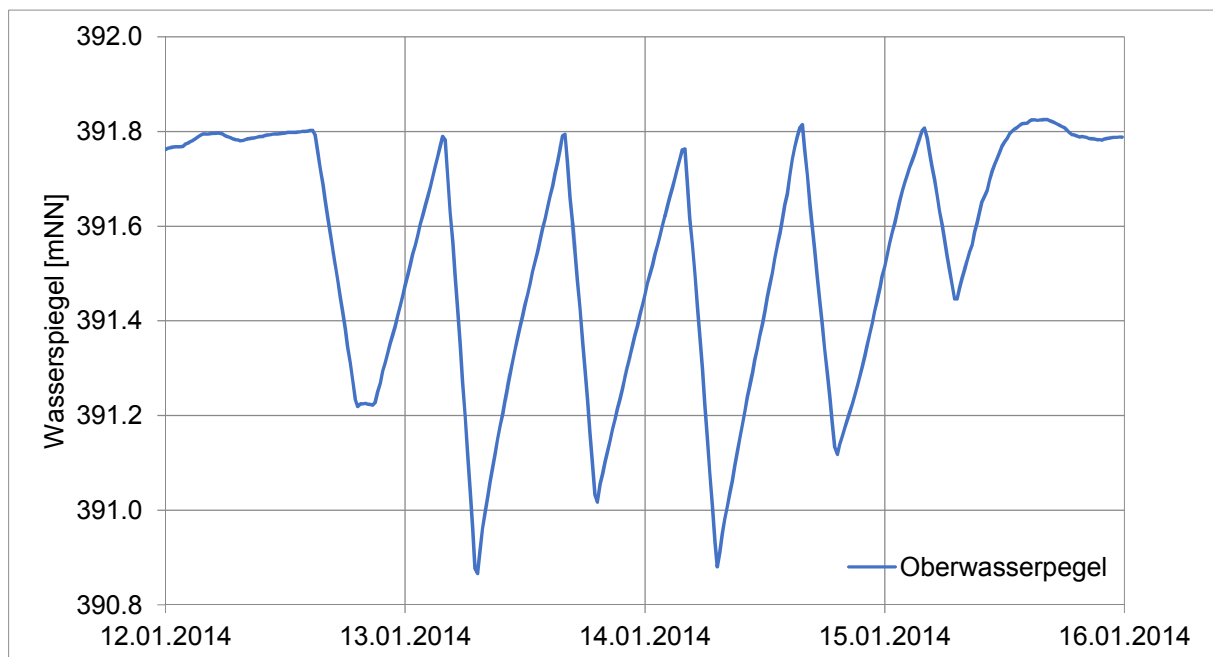


Abbildung 6: Schwankung des Oberwasserpegels bei Schwallbetrieb

**Berücksichtigung  
im Modell**

Für das Grundwassermodell wird der Wasserstand der Donau als Tagesmittel vorgegeben, da die Berechnung in Tagesschritten erfolgt. Bei Schwallbetrieb ist der über den Tag gemittelte Wasserstand tiefer als das Stauziel. Der mit dem hydraulischen Modell unter Annahme des Stauziels berechnete Wasserstand muss deshalb nach unten korrigiert werden. Dazu wurde das Tagesmittel der von der Uniper viertelstündlich aufgezeichneten Oberwasserpegel verwendet.

Für den breiten Teil der Stauhaltung (km 2490.18 – km 2493) wurde als Korrektur die Differenz zwischen Stauziel und Tagesmittel der Messung verwendet. Weiter stromaufwärts (km 2491 – 2502) wurde die Korrektur linear abnehmend vorgenommen. Oberhalb von km 2502 wurde der Wasserstand unverändert aus der Abfluss-Pegel-Beziehung ermittelt.

**Bauabsenkungen**

Zusätzlich zum Schwallbetrieb wurde der Wasserstand in der Stauhaltung Bertoldsheim noch für den Bau der Fischtreppe, sowie für Erkundungsbohrungen abgesenkt. Abbildung 7 zeigt die mittleren Tageswasserstände vom 01.01.2018 bis 15.08.2019.

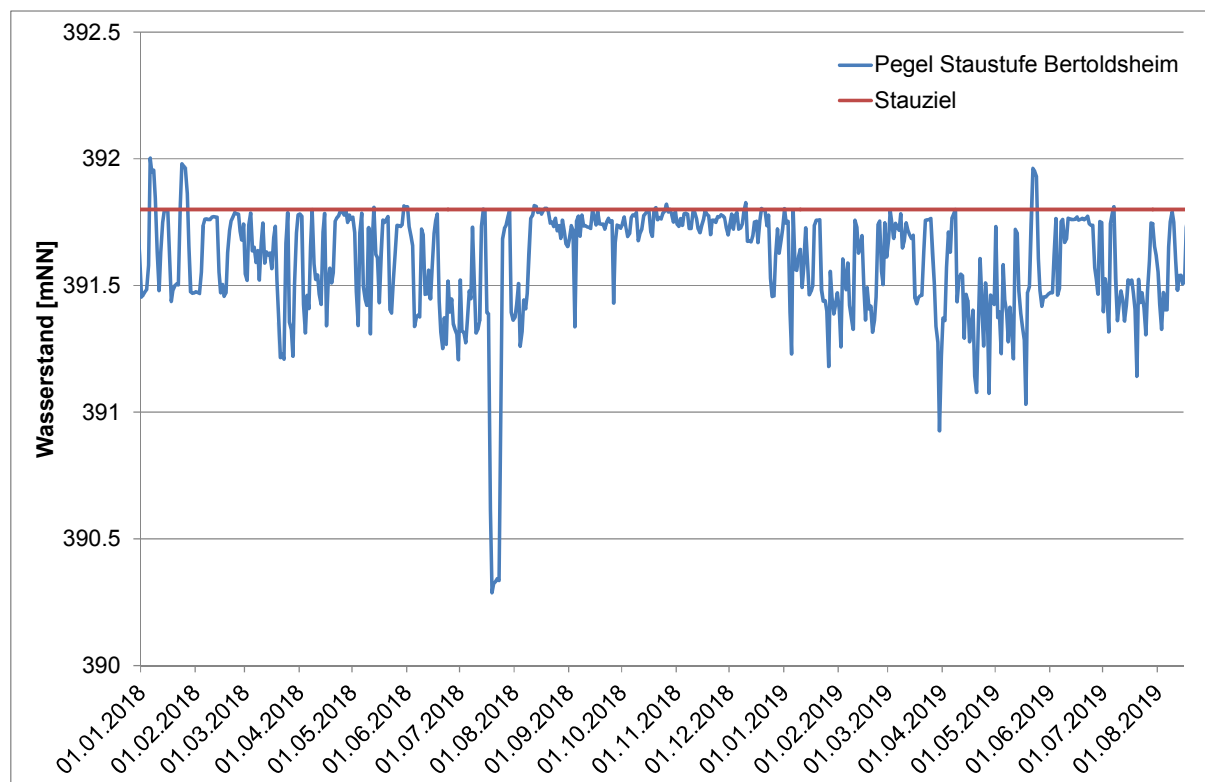


Abbildung 7:

Tagesmittel des Wasserstands in der Stauhaltung Bertoldsheim

### 2.2.5 Modellparameter

Durchlässigkeit	Der Grundwasserleiter besteht im Modellgebiet aus würmzeitlichen Niederterrassenschottern, postglazialen Terrassenschottern und der am südlichen Talrand sedimentierten Hochterrasse. [2]. Aufgrund der bekannten Durchlässigkeitsversuche kann mit einer Durchlässigkeit von etwa $1 \times 10^{-3}$ bis $2 \times 10^{-2}$ m/s gerechnet werden. Als Anfangswert der Durchlässigkeit wurde für die Niederterrasse ein Wert von $5 \times 10^{-3}$ m/s, für die Hochterrasse ein Wert von $1 \times 10^{-3}$ m/s vorgegeben. Im Gebiet westlich des Lech wurden die Durchlässigkeiten aus dem Modell der Stadt Donauwörth übernommen.
Porosität	Für die Porosität im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels (Speicherkoeffizient) wurde ein Anfangswert von 10% verwendet.

### 2.2.6 Karstzufluss

Situation	Am nördlichen Modellrand sind die verkarsteten und wasserführenden Gesteine des Oberjura nur durch eine geringmächtige Tertiärschicht von den quartären Flussschottern getrennt. Da die Druckhöhen im Karst höher liegen als im quartären Grundwasserleiter ist mit einem Zustrom von Karstwasser zu rechnen.
Randbedingung	Im Grundwassermodell wird der Zufluss mit einer Cauchy-Randbedingung entlang von Linien am Fuss der Hangkante berücksichtigt. Die dort angesetzten Karstpotentiale werden aus den Messwerten in folgenden Messstellen interpoliert: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kaisheim W3</li> <li>- Gempfung W4</li> <li>- Tiefbrunnen Rennertshofen</li> <li>- Auchsesheim D54</li> </ul>

Für die Interpolation wurde die Methode der inversen quadratischen Distanzwichtung verwendet.

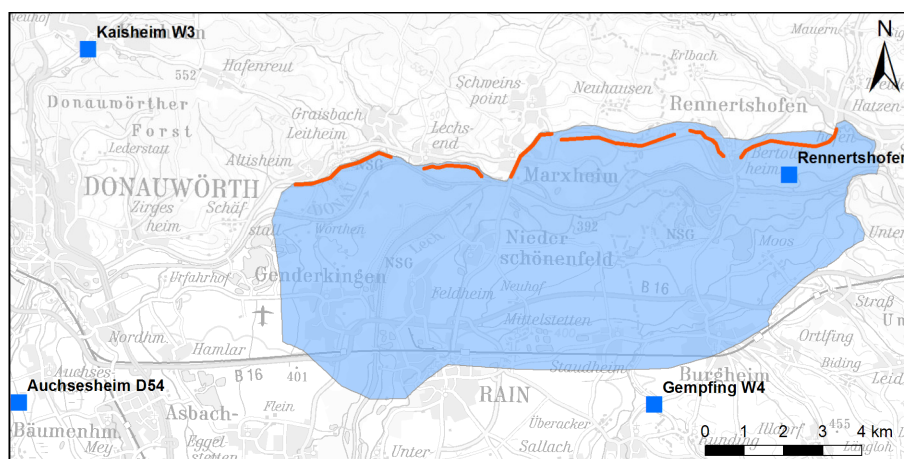


Abbildung 8: Lage der Karstrandbedingung und der verwendeten Messstellen im Oberjura

Zusammenstellung Die Lage der Karst-Randbedingung ist, zusammen mit den übrigen im Modell angesetzten Randbedingungen, in Abbildung 9 dargestellt

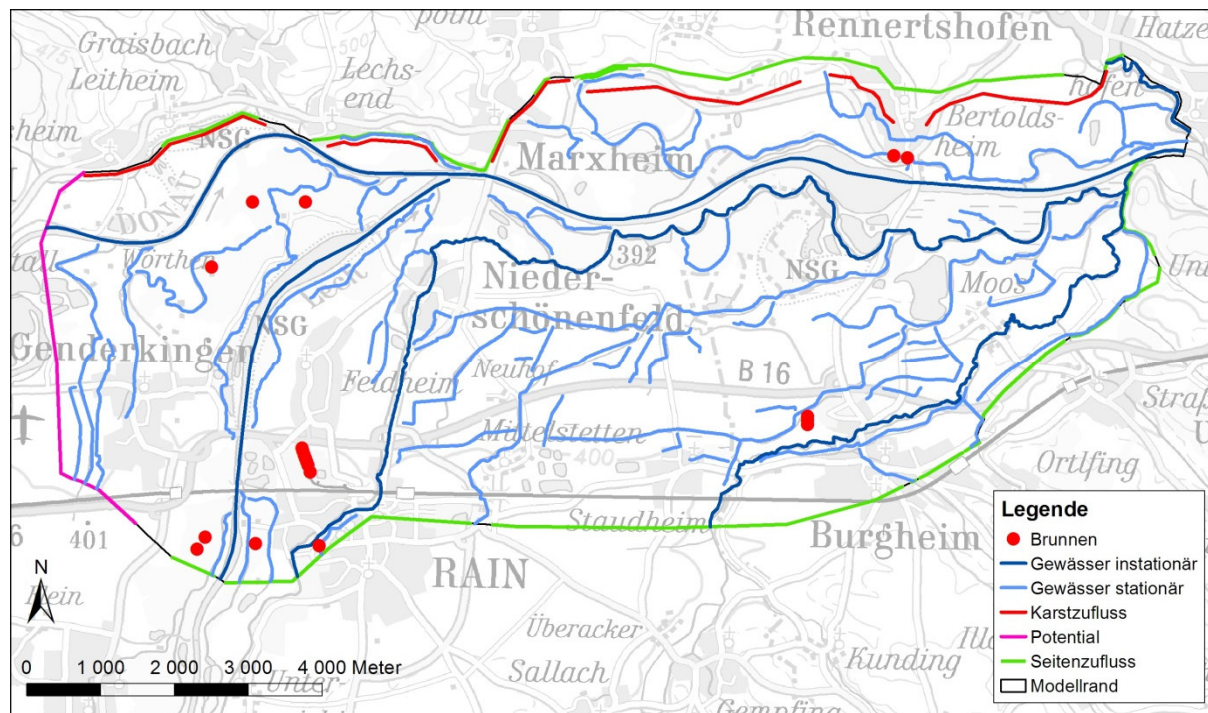


Abbildung 9: Randbedingungen des Modells

### 2.2.7 Stichtagsmessung

Durchführung

Zur Verbesserung der Datenbasis wurde am 2. April 2019 eine Stichtagsmessung durchgeführt. Dabei wurde an 105 Messstellen der Grundwasserspiegel gemessen. Der gemessene Wasserstand entspricht etwa einem Mittelwasserstand. Zusätzlich wurde an 10 Gewässern der Abfluss gemessen. Die Stichtagsmessung wurde von Mitarbeitern des Wasserwirtschaftsamtes Ingolstadt durchgeführt.

Abbildung 10 zeigt die Isohypsen des Grundwasserspiegels zum Zeitpunkt der Stichtagsmessung zusammen mit den Messpunkten.

Messpunkthöhen

Vor der Durchführung des Stichtages wurden die Messpunkthöhen neu eingemessen. Die neu eingemessenen Höhen unterschieden sich zum Teil deutlich von den bisher verwendeten (Abbildung 11). Für die Modellkalibrierung wurden anschliessend die neuen Messpunkthöhen verwendet. Da in der Datenbank die Abstichhöhen gespeichert sind, genügte eine Anpassung der Referenzhöhe.

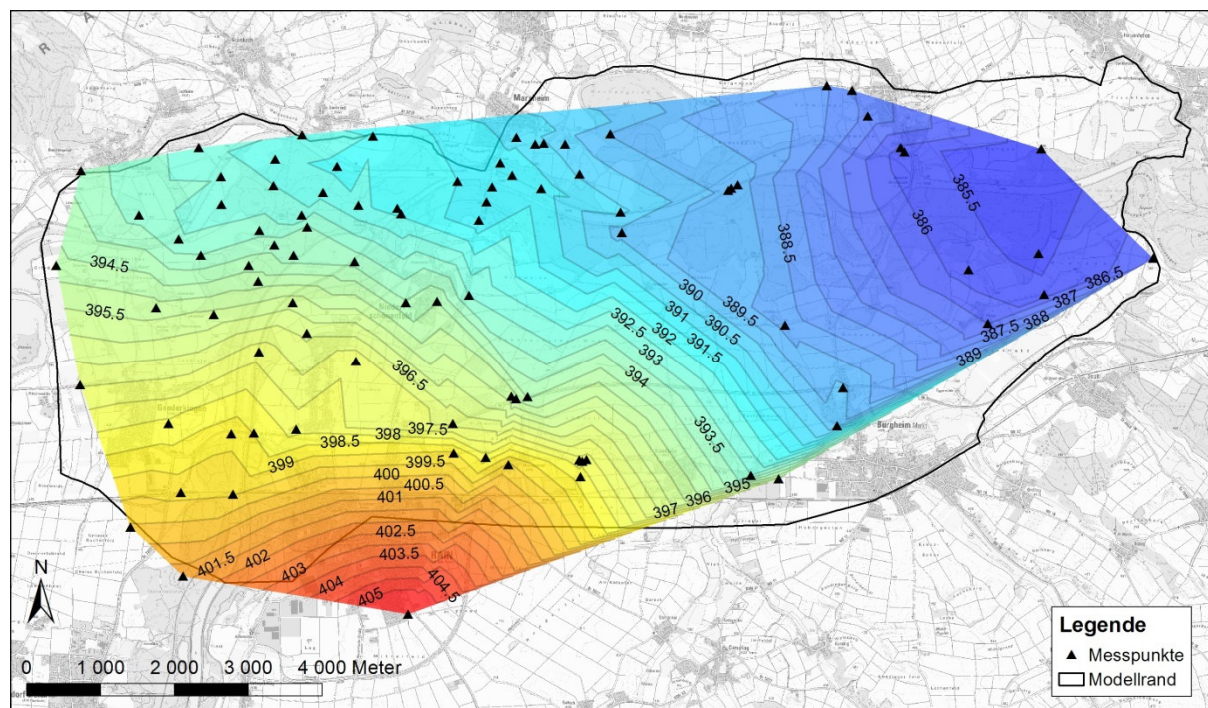


Abbildung 10: Aus den Messwerten interpolierte Isohypsen des Grundwasserspiegels.

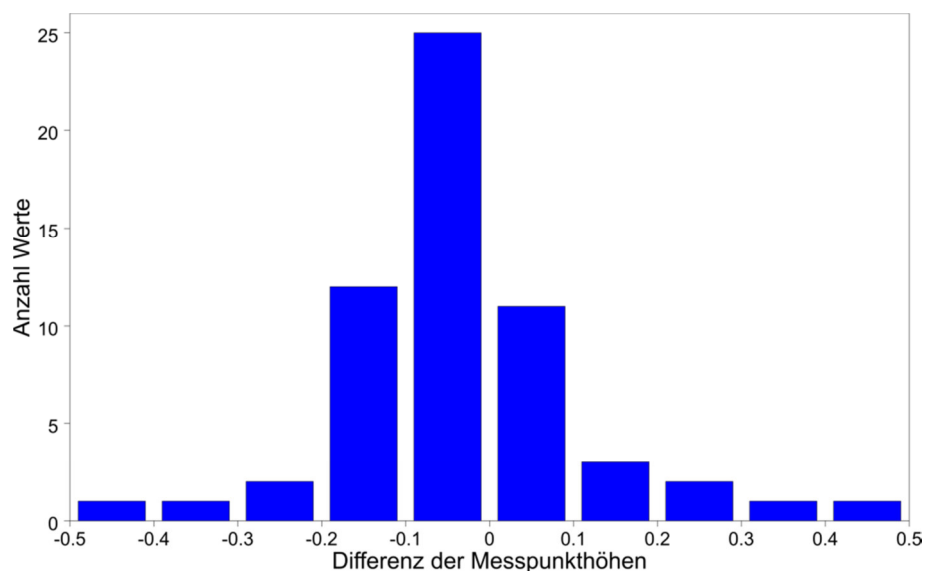


Abbildung 11: Histogramm der Differenz zwischen der neu eingemessenen Messpunkthöhe und den davor verwendeten Werten

#### Variabilität

An einigen Stellen wurden in unmittelbarer Nähe um etwa 1 m unterschiedliche Grundwasserstände gemessen (Abbildung 12). Solche Unterschiede können auf lokale Heterogenitäten des Untergrundes, unterschiedliche Schichthorizonte oder Messfehler zurückgeführt werden. Bei der Erfassung verschiedener Schichthorizonte resultie-

ren im Projektgebiet jedoch in der Regel Differenzen kleiner 20 cm (Abbildung 13). Das Grundwassermodell, welches den Grundwasserleiter mit einer, kleinräumig als homogen betrachteter Schicht abbildet, wird zwangsläufig Differenzen zu den Messwerten aufweisen. Die maximalen Abweichungen dürften in der Grössenordnung der kleinräumigen Unterschiede liegen.



Abbildung 12: Nahe beieinander liegende Messstellen mit deutlich unterschiedlichem Grundwasserstand.

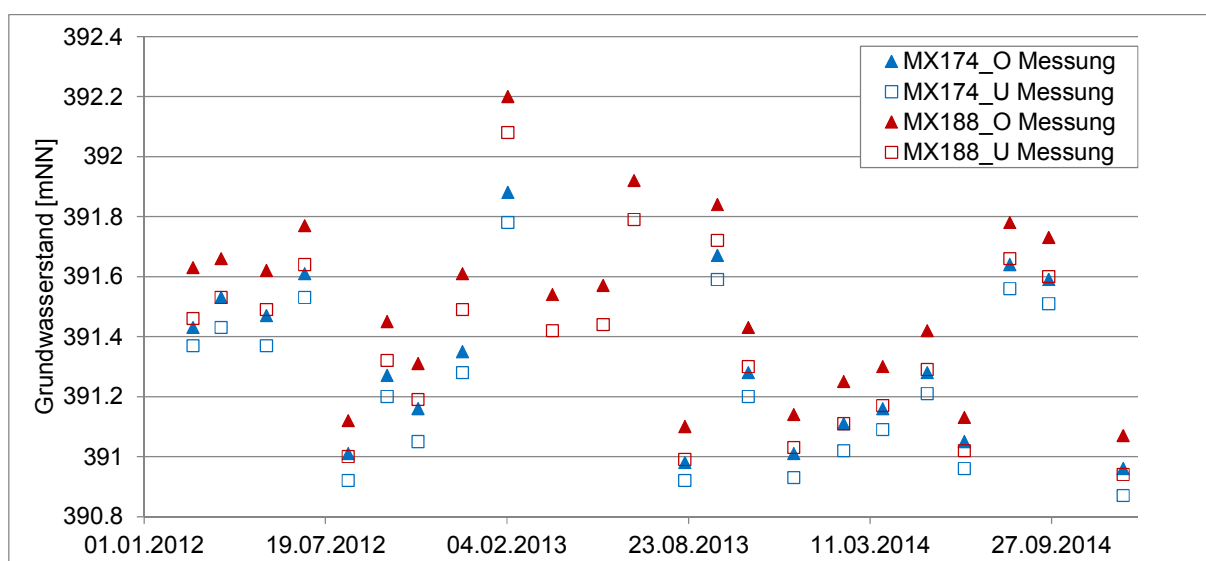


Abbildung 13: Gemessene Grundwasserstände in unterschiedlicher Tiefe des quartären Grundwasserleiters bei Marxheim.

**Abflussmessungen** Für die Abflussmessungen wurden Gewässerprofile ausgewählt, welche eine Aussage über die aus dem Grundwasser in die Gewässer drainierten Wassermengen erlauben. Da die Einzugsbereiche der Friedberger Ach und der Kleinen Paar über das Modellgebiet hinaus reichen, wurden die Abflüsse der Friedberger Ach an drei, der Kleinen Paar an zwei Messstellen gemessen. Die Drainagemengen ergeben sich aus der Zunahme der Abflüsse zwischen den Messstellen.

**Gewässer ohne Abfluss** Am Entwässerungsgraben auf der linken Seite der Staustufe Rain wurde auf eine Messung verzichtet, da der Durchfluss an der Messstelle praktisch null ist. Weitere mögliche Messstellen wurden an einer Begehung eruiert. In allen Gewässern im zentralen Modellbereich (Moosgraben) sind die Abflüsse jedoch für eine Messung zu gering.

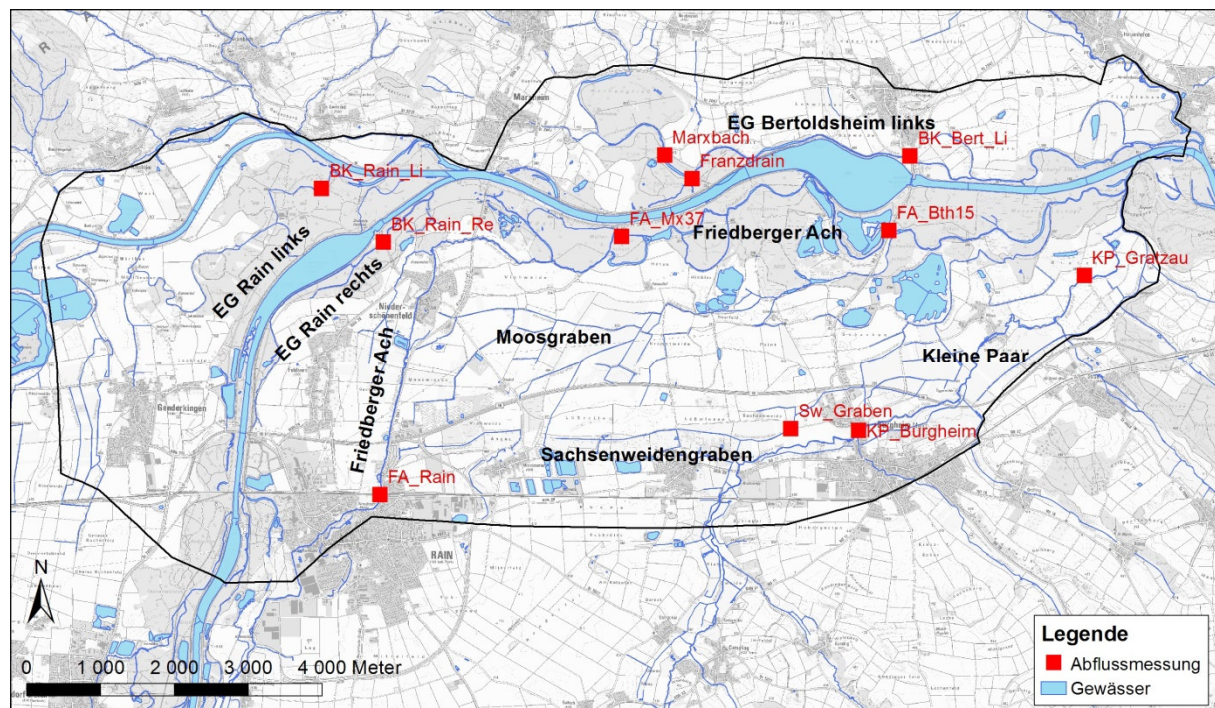


Abbildung 14: Messstellen des Abflusses am Stichtag

## 3 Kalibrierung

---

### 3.1 Kalibrierungsmethode

#### 3.1.1 Verfahren

Für die Kalibrierung des Grundwassermodells wurde ein dreistufiges Vorgehen gewählt:

Stufe 1	Ausgehend von den Anfangswerten wurden die Modellparameter variiert und deren Einflüsse auf die Modellresultate bestimmt. Damit wurden Kenntnisse über das Systemverhalten gewonnen und es wurde eine erste manuelle Kalibrierung vorgenommen. Diese hatte zum Ziel, die im späteren automatischen Verfahren auf einem festen Wert gehaltenen Randbedingungen zu bestimmen. Zudem wurde eine sinnvolle Zonierung für die automatische Kalibrierung festgelegt.
Stufe 2	Mit der automatischen Kalibrierung wurden die Modellparameter und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten bestimmt. Die Parameter wurden dabei in physikalisch plausiblen Grenzen variiert, bis die Abweichungen zwischen Modell und Messung minimal waren.
Stufe 3	Aus der automatischen Kalibrierung können, insbesondere bei gegenseitig voneinander abhängigen Parametern, Werte resultieren, welche nicht plausibel sind. Bei der abschliessenden manuellen Kalibrierung wurden deshalb die Resultate der automatischen Kalibrierung kritisch hinterfragt und, sofern notwendig, angepasst. In einzelnen Fällen wurde die Zonierung noch angepasst und verfeinert.
Iteration	Die Stufen 1 und 2 wurden in einem iterativen Prozess zweimal durchlaufen, bis ein befriedigendes Ergebnis vorlag.

#### 3.1.2 Bewertungskriterien

Verfahren	Die Güte der Kalibrierung wurde über den Vergleich der berechneten mit den gemessenen Grundwasserpotentialen bewertet. Dabei kamen die folgenden summarischen Gütewerte zur Anwendung: <ul style="list-style-type: none"><li>- RMSE: Root Mean Square Error (Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung)</li><li>- Mittel: Mittelwert der Absolutwerte der Abweichungen</li><li>- Median: Median der absoluten Abweichungen</li></ul>
Kalibrierungsziel	Als Kalibrierungsziel wurde ein RMSE von 30 cm, ein Mittelwert von 20 cm und ein Median von 15 cm angestrebt. Eine genauere Kalibrierung ist theoretisch zwar möglich, könnte aber eine den Modellzielen nicht angemessene Einführung kleinräumiger Durchlässigkeitsunterschiede erfordern.



Zusatzinformationen Bei der manuellen Kalibrierung wurden die am Stichtag gemessenen Abflüsse ebenfalls in den Vergleich zwischen Modell und Messung einbezogen. Zudem wurde ein grosses Gewicht auf einen korrekten zeitlichen Verlauf der Grundwasserspiegelhöhen gelegt.

## 3.2 Instationäre Kalibrierung mit PEST

### 3.2.1 Vorgehen

Algorithmus Für die automatische Kalibrierung wurde die Software PEST eingesetzt [3]. PEST beruht auf dem Gauss-Marquardt-Levenberg-Algorithmus. Dieser Algorithmus sucht das lokale Minimum einer Zielwertfunktion. Er eignet sich besonders für Fälle, in denen die möglichen Parameterkombinationen bereits durch bestehende Vorkenntnisse eingegrenzt wurden.

Zeitraum Für die automatische Kalibrierung wurde der Zeitraum vom 1.1.2017 bis 31.12.2017 verwendet.

Messdaten Bei der Kalibrierung wurde die Summe der quadratischen Abweichung der Modellwerte von den Messdaten minimiert. Es wurden nur Messdaten ab dem 1.2.2017 verwendet um einen Einfluss des Anfangszustandes auszuschliessen. Im Jahr 2017 stehen 9608 Messungen in 89 Messstellen zur Verfügung. Alle Messdaten erhielten das gleiche Gewicht.

### 3.2.2 Zonierung für die Kalibrierung mit PEST

Durchlässigkeit Da im Modell Dichtwände mit fest vorgegebener Geometrie enthalten sind, eignet sich die Zonierungsmethode für die automatische Kalibrierung besser als die pilot point Methode. Die Zonenunterteilung erfolgt dabei einerseits anhand hydrogeologischer Grenzen, andererseits wurde sie mit der ersten manuellen Kalibrierung bestimmt. Abbildung 15 zeigt die Durchlässigkeitszonen des Grundwasserleiters.

Konstante Werte Einige Durchlässigkeitswerte wurden während der automatischen Kalibrierung auf einem konstanten Wert gehalten. Sie sind in Abbildung 15 mit grauer Farbe dargestellt. Es handelt sich um folgende Zonen:

- Entlang des Westrandes wird das Potential aufgrund von Messungen vorgegeben. Die Kalibrierung ist deshalb nicht sensitiv auf die Durchlässigkeiten am Modellrand.
- Durchlässigkeiten am Nordrand des Modells. Die Bereiche ausserhalb des Schottergrundwasserleiters können nicht kalibriert werden, da im Hangwasser keine Messungen des Grundwasserstandes durchgeführt werden können.

- Der Grundwasserleiter im Bereich von Baggerseen wurde mit einer konstanten Durchlässigkeit von  $1 \times 10^{-2}$  m/s berücksichtigt.
- Durchlässigkeiten oberhalb der Terrassenkante im Süden des Modells. In diesen Bereichen gibt es nur wenige Grundwasserstandsmessungen.
- Durchlässigkeiten der Dichtwände bei den Staustufen des Lech. Diese Durchlässigkeiten wurden bereits bei der Kalibrierung des benachbarten Modells der Stadt Donauwörth kalibriert.

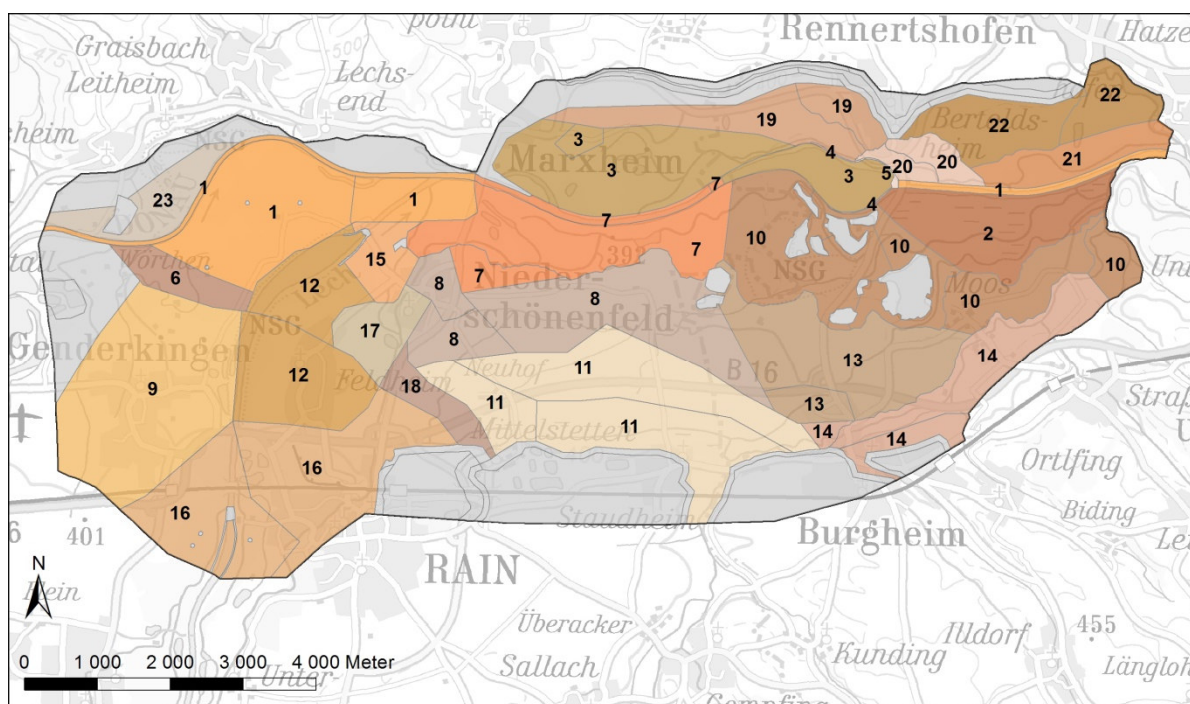


Abbildung 15: Durchlässigkeitszonen der automatischen Kalibrierung.

Leakagewerte	Da das Modellgebiet sehr viele Gewässer enthält, mussten die Leakagewerte verschiedener Gewässer in gemeinsame Zonen gruppiert werden. Abbildung 17 zeigt die gewählte Zonierung. Die Leakagewerte für Infiltration und Exfiltration wurden gleichgesetzt. Bei reinen Drainagegewässern wurde der Leakagewert für die Infiltration zu Null gesetzt.
Speicherkoeffizienten	Zur Kalibrierung der Speicherkoeffizienten wurde das Modellgebiet in drei Zonen aufgeteilt. Unter der Donau und in den südlichen und nördlichen Randzonen wurde der Speicherkoeffizient festgehalten, da dort keine Loggerdaten für eine Kalibrierung zur Verfügung stehen.
Rechenzeit	Insgesamt wurden bei der automatischen Kalibrierung 58 Parameter variiert. Bis zum Erreichen der Abbruchkriterien wurden 794 Rechenaufläufe benötigt. Die Rechenzeit betrug 4 Tage.

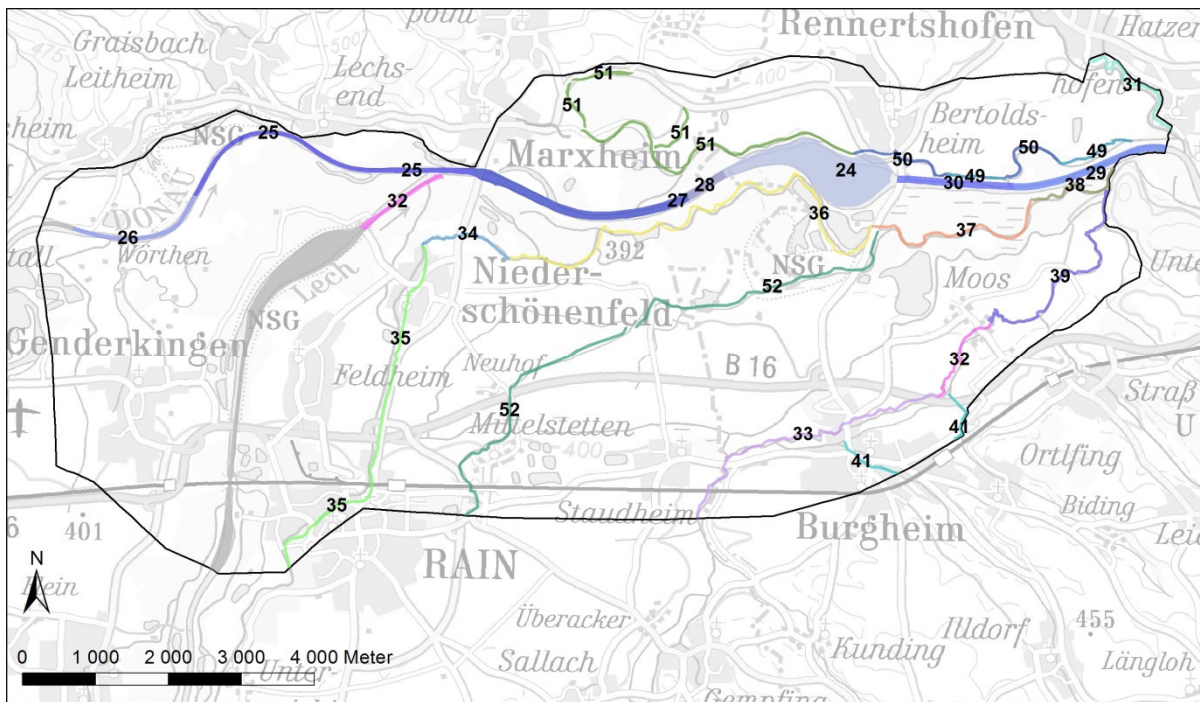


Abbildung 16: Zonierung der In-Leakage (Infiltration)

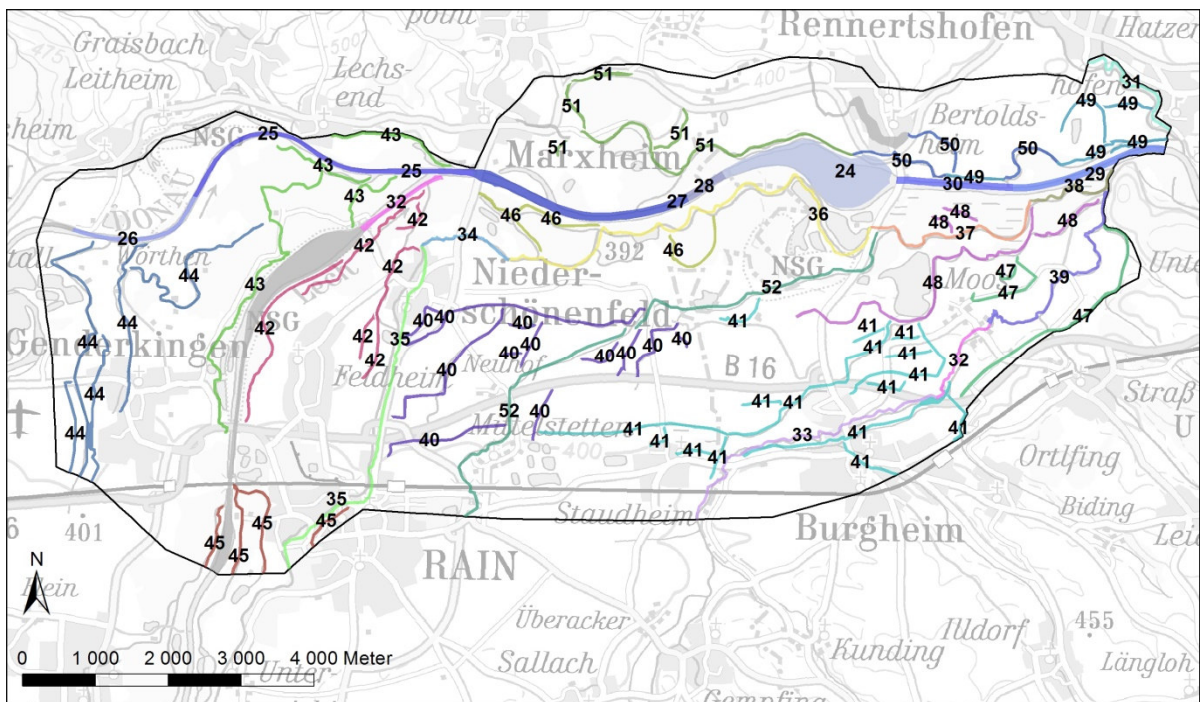


Abbildung 17: Zonierung der Out-Leakage (Exfiltration).

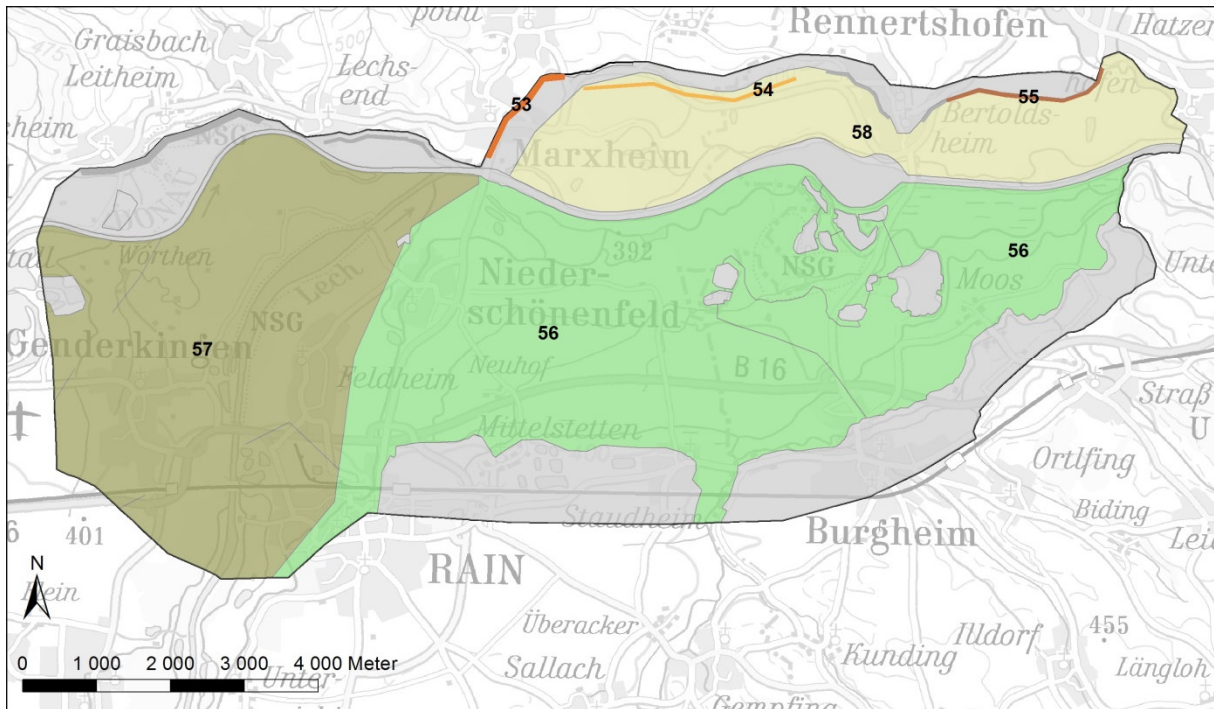


Abbildung 18: Zonierung des Speicherkoeffizienten und der Leakage des Karstzuflusses.

### 3.2.3 Resultate der automatischen Kalibrierung

**Modellparameter**

Für die Modellparameter wurden physikalisch plausible Grenzen vorgegeben. Drei Durchlässigkeitszonen im Bereich östlich Bertoldsheim erreichten das vorgegebene Maximum von  $3 \times 10^{-2}$  m/s. Bei der automatischen Kalibrierung interessieren primär die Abhängigkeiten der Parameter untereinander (Kapitel 3.2.4). Die resultierenden Modellparameter werden erst nach der abschliessenden manuellen Kalibrierung dokumentiert (Abbildung 38 bis Abbildung 41).

**Kalibrierungsgüte**

Die Kalibrierungsgüte ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Die erzielte Genauigkeit ist angesichts der relativ grossen Durchlässigkeitszonen hervorragend.

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichung (RMSE) [cm]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Median der Absoluten Abweichung [cm]
2017	15	11	9

Tabelle 1: Gütwerte der automatischen Kalibrierung

### 3.2.4 Kovarianzanalyse

#### Korrelationen

Abbildung 19 zeigt die Korrelationsmatrix der Kalibrierung. Dunkelrote und dunkelblaue Werte zeigen an, dass Parameter voneinander abhängig sind. Eine positive Korrelation bedeutet, dass bei einer Vergrößerung eines Wertes der abhängige Wert ebenfalls anwächst, eine negative Korrelation bedeutet, dass der abhängige Wert abnimmt.

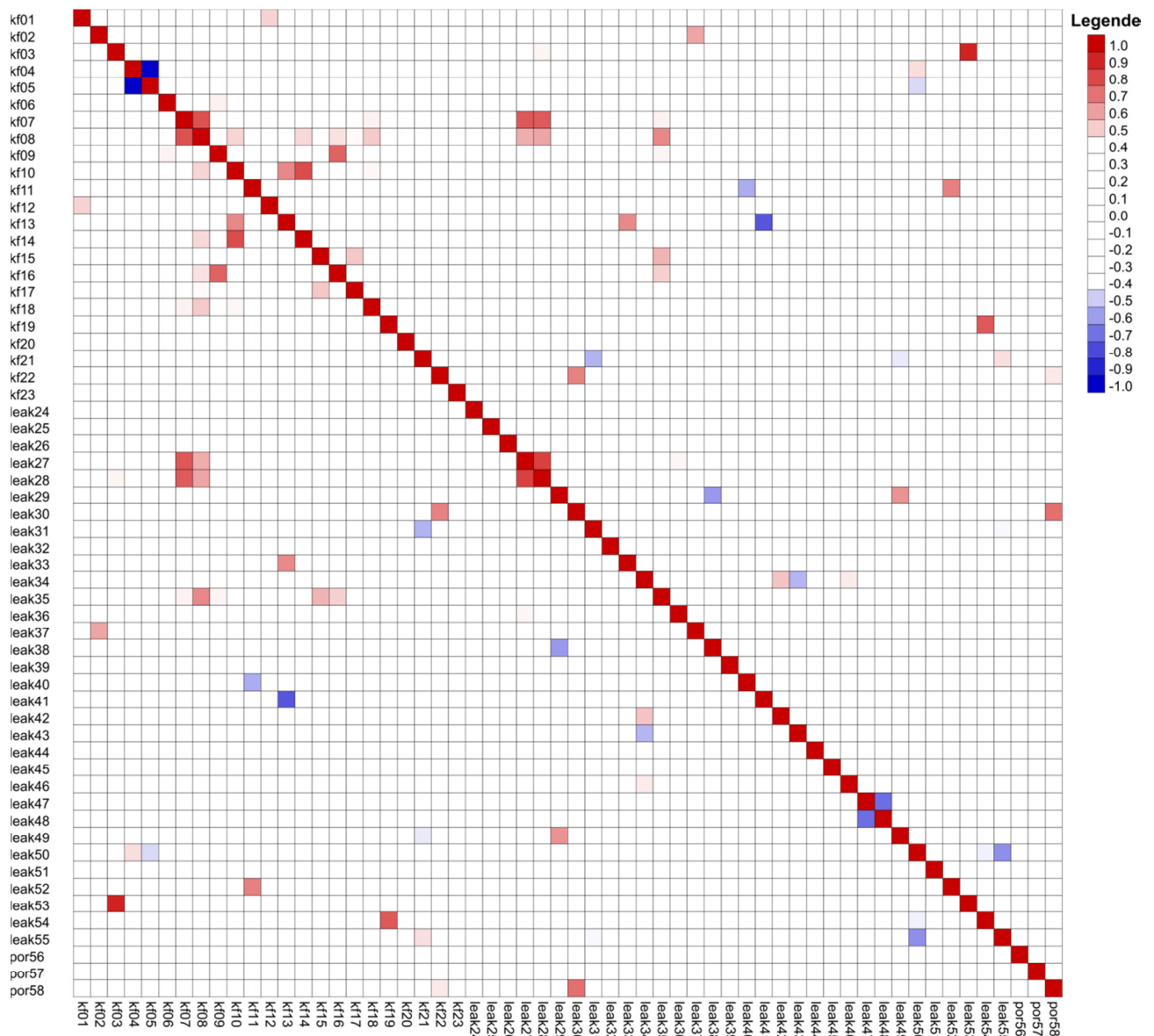


Abbildung 19: Korrelation zwischen den Zonen der Durchlässigkeit, der Leakage und der Porosität

Dichtwand	<p>Die grösste negative Korrelation tritt bei den Dichtwandelementen der Staustufe Bertoldsheim auf (Zonen kf4 und kf5). Dies ist darauf zurückzuführen, dass zwei Dichtwandzonen nebeneinander liegen. Wird eine der beiden durchlässiger gewählt, muss die andere dichter werden, damit in der Summe gleich viel Wasser hindurchströmt.</p> <p>Die Dichtwanddurchlässigkeit ist auch mit der Leakage des nördlichen Drainagegrabens (leak50) korreliert.</p>
Karstzufluss	<p>Die grösste positive Korrelation besteht zwischen dem Karstzufluss bei Marxheim (leak53) und der angrenzenden Durchlässigkeitszone (kf3). Je höher der Karstzufluss, desto grösser muss die Durchlässigkeit sein, um diesen abzuführen. Eine ähnlich grosse Abhängigkeit besteht aus dem gleichen Grund zwischen den Zonen leak54 und kf19. Aus der automatischen Kalibrierung resultieren für die beiden Durchlässigkeitszonen realistische Werte um <math>6 \times 10^{-3}</math> m/s. Für die Karst-Leakage resultieren relativ kleine Werte (zw. 0.03 und 0.3 m/d). Da der Karstzufluss nur 3% des Gesamtzuflusses ins Modell ausmacht (Abbildung 43), ist die Bedeutung der Unsicherheit gering.</p>
Donau	<p>Die Leakage der Donau im westlichen Bereich des Stauraums Bertoldsheim (leak27, leak28) korreliert positiv mit der südlich angrenzenden Durchlässigkeitszone kf7. Dies erklärt sich dadurch, dass bei hoher Donauinfiltration eine hohe Durchlässigkeit zum Abführen des Wassers benötigt wird. Die Leakagezonen leak27 und leak28 der Donau korrelieren auch untereinander und müssten deshalb zu einer Zone zusammengefasst werden.</p>
Weitere Korrelationen	<p>Hohe positive Korrelationen bestehen auch zwischen den Durchlässigkeitszonen kf7 und kf8, kf10 und kf14, sowie kf9 und kf16. Diese Zonen liegen jeweils in der Strömungsrichtung hintereinander. Negativ korrelieren die Durchlässigkeitszone kf13 und die Leakage der Drainagegewässer in der Umgebung (leak41) miteinander.</p>
Folgerungen	<p>Die Abhängigkeiten zwischen den Modellparametern wurden bei der zweiten manuellen Kalibrierung berücksichtigt. Bei Abhängigkeiten zwischen Leakagewerten und Durchlässigkeiten wurde eine Lösung mit möglichst homogener Durchlässigkeit gesucht. Zudem wurden noch die Abflussmessungen an Drainagegräben mitberücksichtigt.</p> <p>Aus der automatischen Kalibrierung resultieren im Bereich der südlichen Randbedingung bei Rain hohe Durchlässigkeiten. Dies deutet darauf hin, dass der seitliche Zufluss an dieser Stelle zu hoch gewählt wurde. Für die weitere Kalibrierung wurde der Seitenzufluss an dieser Stelle reduziert.</p> <p>Verbleibende Unsicherheiten zu einzelnen Parametern müssen im Rahmen der Modellanwendung durch Sensitivitätsuntersuchungen quantifiziert werden.</p>

### 3.2.5 Sensitivität der Zielfunktion auf die Parameter

#### Sensitivitäten

In Abbildung 20 und Abbildung 21 sind die Sensitivitäten der Zielfunktion der Optimierung auf die einzelnen Parameter dargestellt. Die in Pest ermittelten Werte sind als Relativangaben zu verstehen [3]. Es zeigt sich, dass die Zielfunktion vor allem auf die Durchlässigkeiten und Leakagewerte im Gebiet der geplanten Polder sensitiv reagiert.

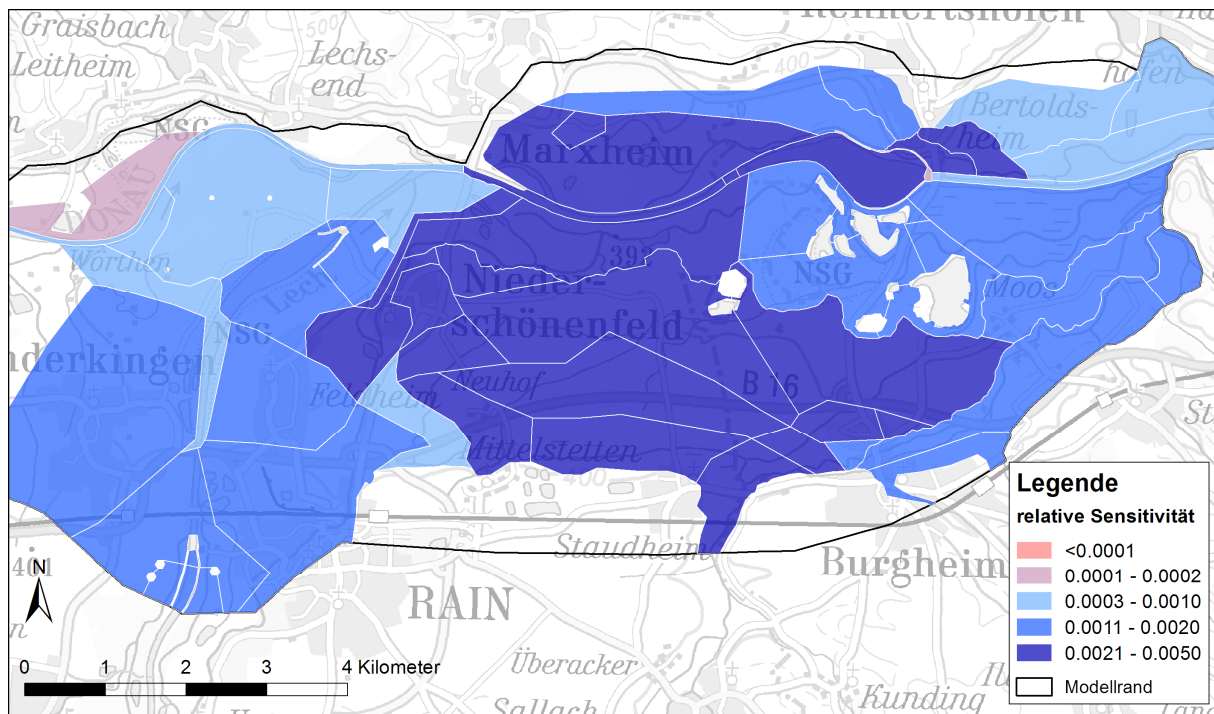


Abbildung 20: Aus Pest resultierende Sensitivität der Zielfunktion auf die Durchlässigkeiten

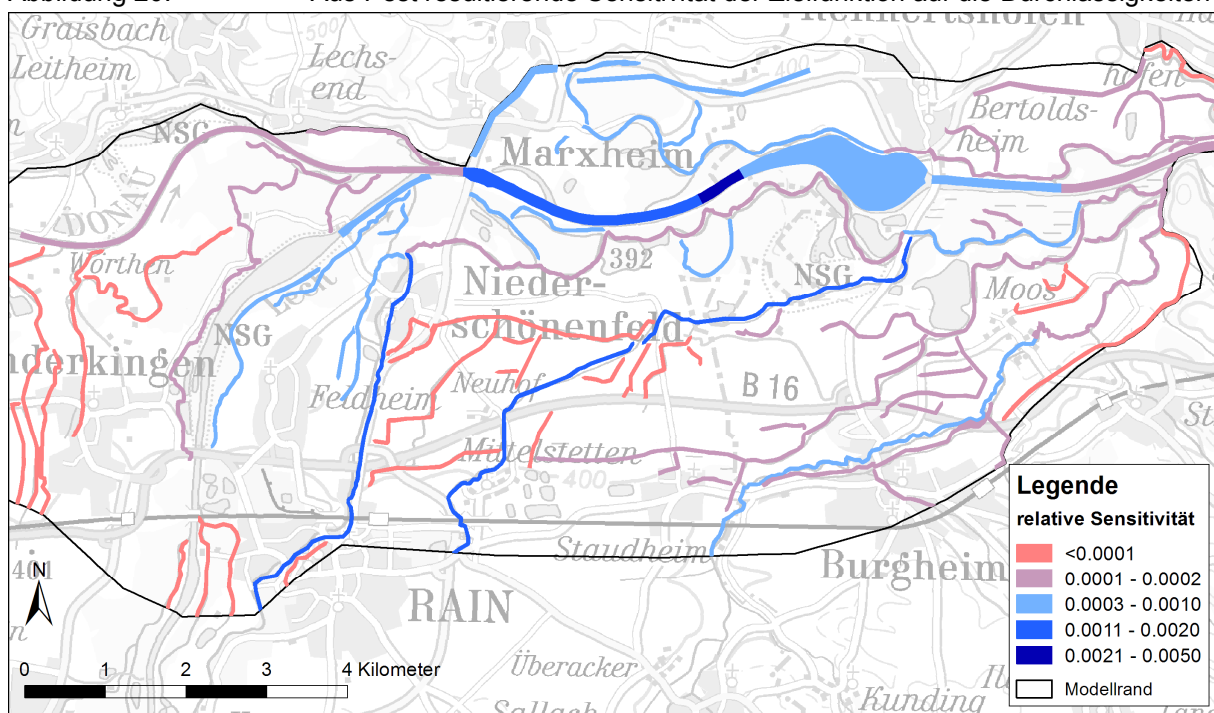


Abbildung 21: Aus Pest resultierende Sensitivität der Zielfunktion auf die Leakagewerte

### 3.3 Manuelle Kalibrierung

- Ziel** Mit der manuellen Kalibrierung wurden einige, aus der automatischen Kalibrierung resultierende, unrealistische Durchlässigkeitsunterschiede wieder eliminiert. Zudem wurde das Modell in einigen Teilgebieten noch etwas verfeinert.
- Zeiträume** Bei der manuellen Kalibrierung konnte ein längerer Rechenzeitraum verwendet werden, da keine systematische Variation aller Parameter erfolgte, sondern nur noch lokale Anpassungen vorgenommen wurden. Es wurden folgende Zeiträume verwendet:  
 01.01.2017 – 31.12.2017 (9 608 Messdaten in 91 Messstellen)  
 01.01.2018 – 15.08.2019 (13 776 Messdaten in 106 Messstellen)
- Güte der Kalibrierung** Tabelle 2 zeigt die Gütwerte nach der manuellen Kalibrierung. Für beide Zeiträume ist die Übereinstimmung mit den Messwerten des Grundwasserspiegels etwa gleich wie in der automatischen Kalibrierung. Die Kalibrierungsziele wurden deutlich übertroffen.

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichung (RMSE) [cm]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Median der Absoluten Abweichung [cm]
2017	15	12	11
2018 - 2019	18	13	11

Tabelle 2: Gütwerte der Kalibrierung über das ganze Modellgebiet

- DVGW W 107** Gemäss dem Arbeitsblatt DVGW W 107 (A) [5] kann die Güte einer stationären Kalibrierung über die mittlere absolute Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten im Verhältnis zur maximalen Differenz der Standrohrspiegelhöhen im Modellraum beurteilt werden. Für die Kalibrierungszeiträume sind die resultierenden Gütwerte in Tabelle 3 zusammengestellt. Für die vorliegende Kalibrierung liegen die Werte unter 1% (sehr gute Modellanpassung).

Zeitraum	Maximale Differenz der Standrohrspiegelhöhen [m]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Verhältnis nach DVGW W 107 (A) [%]
2017	15	12	0.8
2018 - 2019	15	13	0.9

Tabelle 3: Gütwerte der Kalibrierung nach DVGW W 107 (A) [5]



**Prognosegenauigkeit** Für die Prognose der Polderflutung werden zusätzliche Parameter wie z.B. der Leakagewert geplanter Drainagen eingeführt. Zudem kann die Deckschicht im Polderraum eine grössere Bedeutung erlangen. Die Prognosegenauigkeit entspricht deshalb nicht der Kalibrierungsgenauigkeit und muss bei der Modellanwendung mit Hilfe von Sensitivitätsbetrachtungen quantifiziert werden.

### 3.3.1 Vergleich mit den Messdaten des Grundwasserspiegels

**Übersicht** Eine Übersicht über die Abweichung des Modells kann summarisch durch einen Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Potentiale gewonnen werden. Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die Scatterplots für die Zeiträume 2017 und 2018 - 2019.

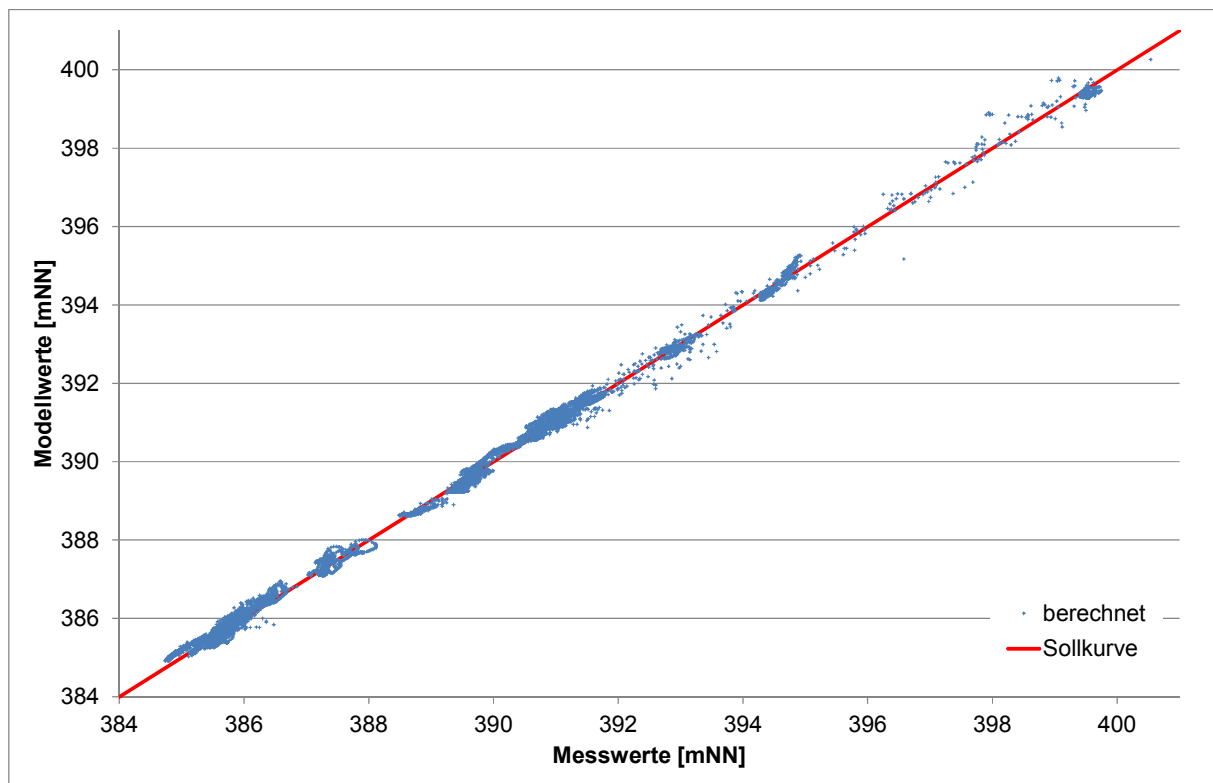


Abbildung 22: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte des Jahres 2017.

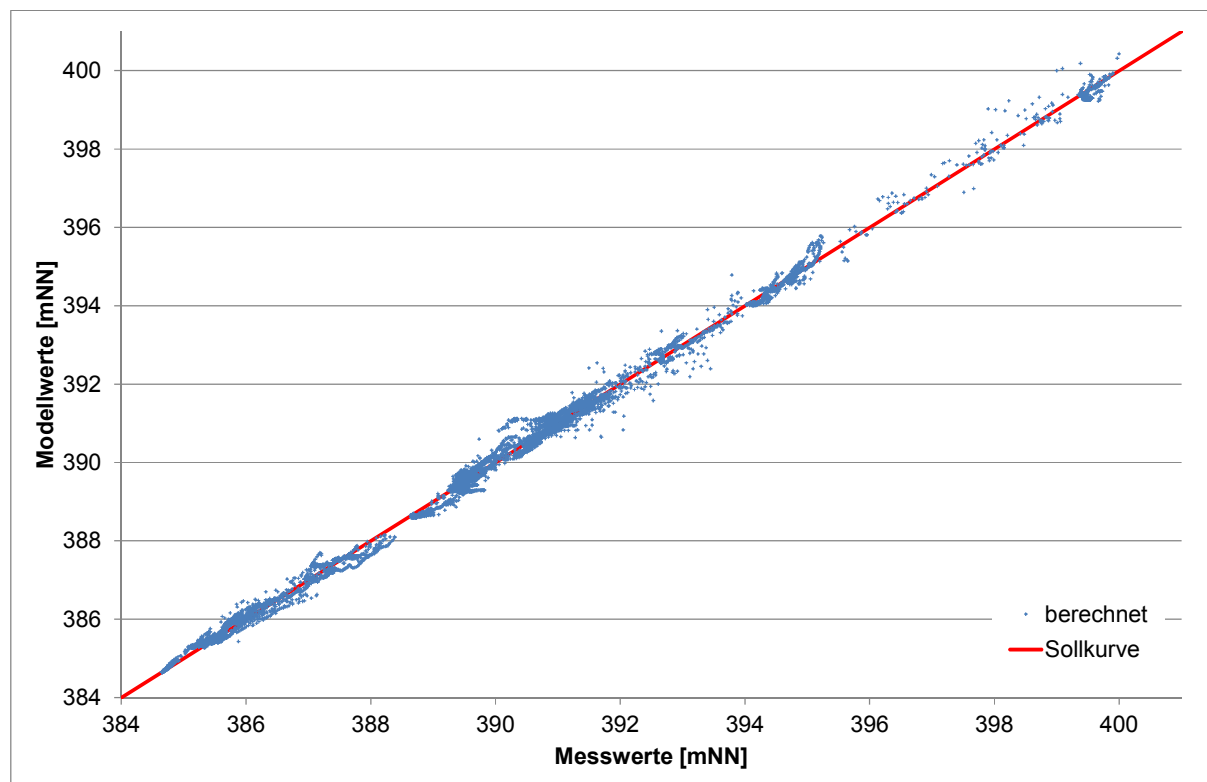


Abbildung 23: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte der Jahre 2018 - 2019

**Räumlicher Vergleich** Der räumliche Vergleich zwischen Modell und Messung wird an Hand des Stichtags dargestellt (Abbildung 24).

**Abweichungen** Die Darstellungen zeigen, dass die Übereinstimmung im Planungsbe-  
reich des Flutpolders sehr gut ist. Grössere Abweichungen gibt es  
entlang der Terrassengrenze, sowie in der Nähe der Grundwasser-  
fassungen Genderkingen. Allerdings wurden dort ab dem Juni 2018  
nur mittlere Entnahmemengen vorgegeben, da die Datenbeschaffung  
im Jahr 2018 durchgeführt wurde.

Aus den Abweichungen wird die kleinräumige Variabilität der gemes-  
senen Grundwasserstände ersichtlich. Messstellen mit grossen Ab-  
weichungen liegen direkt neben Messstellen mit exakter Überein-  
stimmung.

**Zeitliches Verhalten** Für die Dokumentation der Übereinstimmung des zeitlichen Verhal-  
tens wurden einige, über das Modellgebiet verteilte Messstellen aus-  
gewählt (Abbildung 25). Die Zeitkurven sind in Abbildung 26 bis Ab-  
bildung 37 dargestellt. Die Übereinstimmung ist mit wenigen Aus-  
nahmen sehr gut.

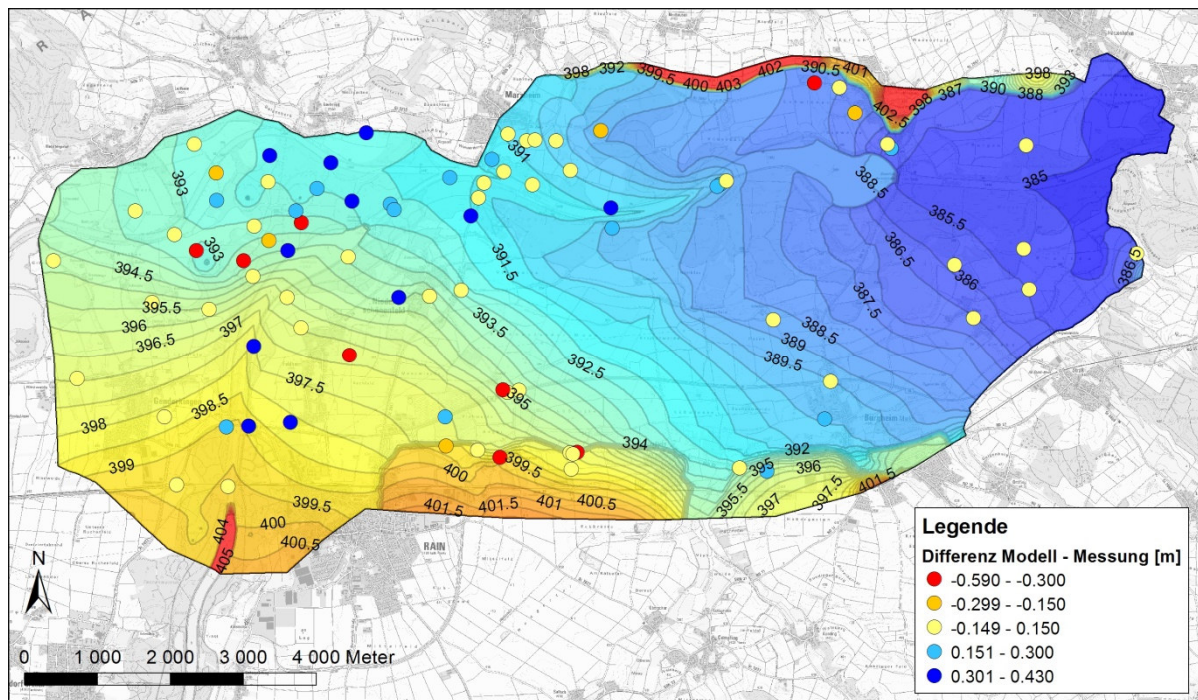


Abbildung 24: Grundwasserhöhengleichen des Modells am 02.04.2019. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten sind mit Farbpunkten dargestellt.

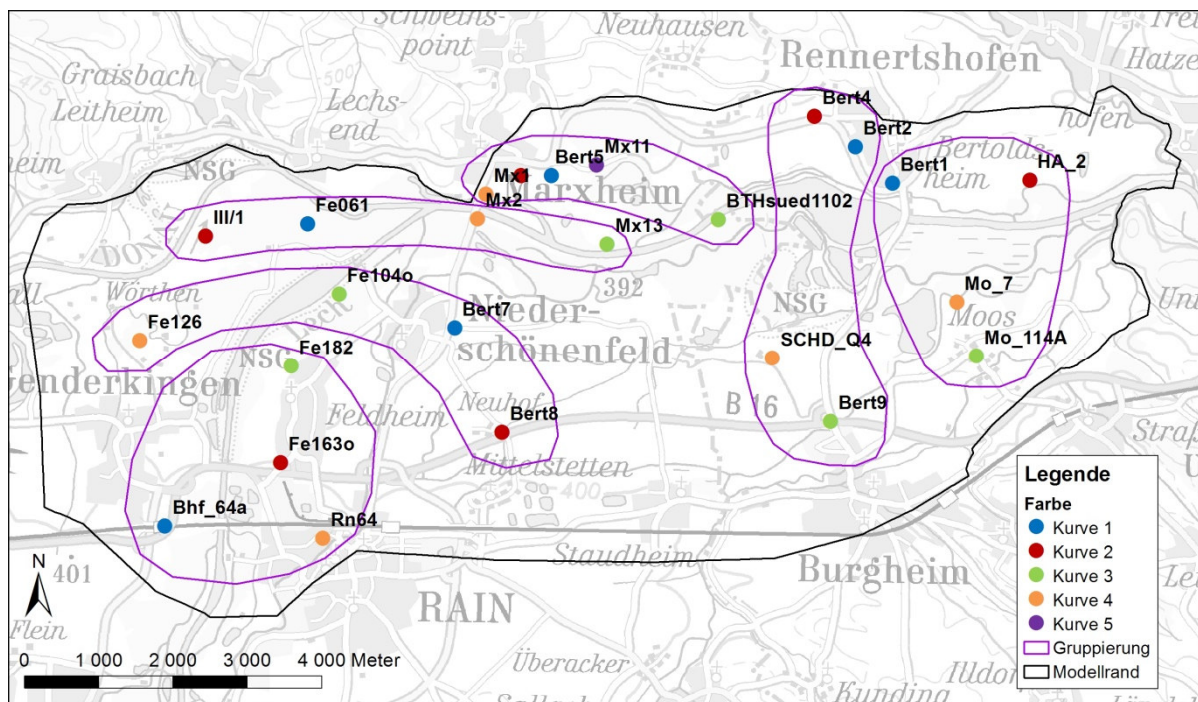


Abbildung 25: Ausgewählte Messstellen für den Vergleich des zeitlichen Verhaltens.

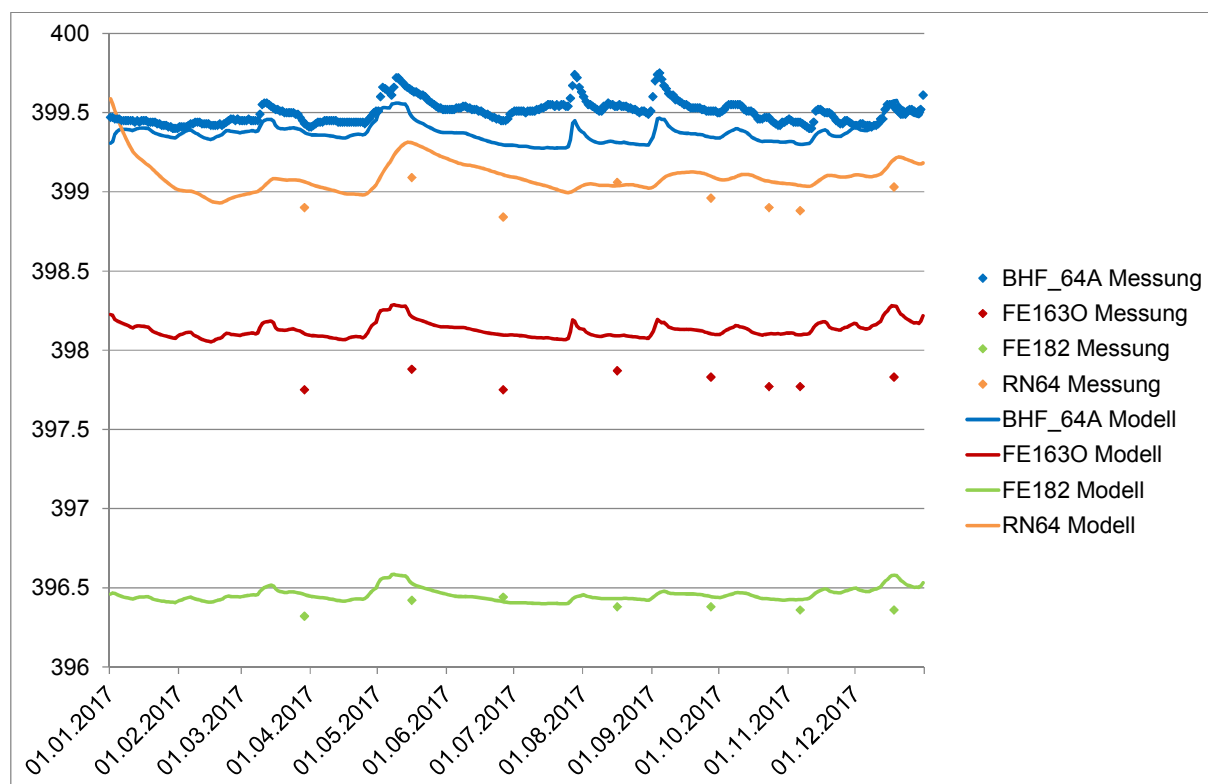


Abbildung 26: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Rain Lech im Zeitraum 2017.

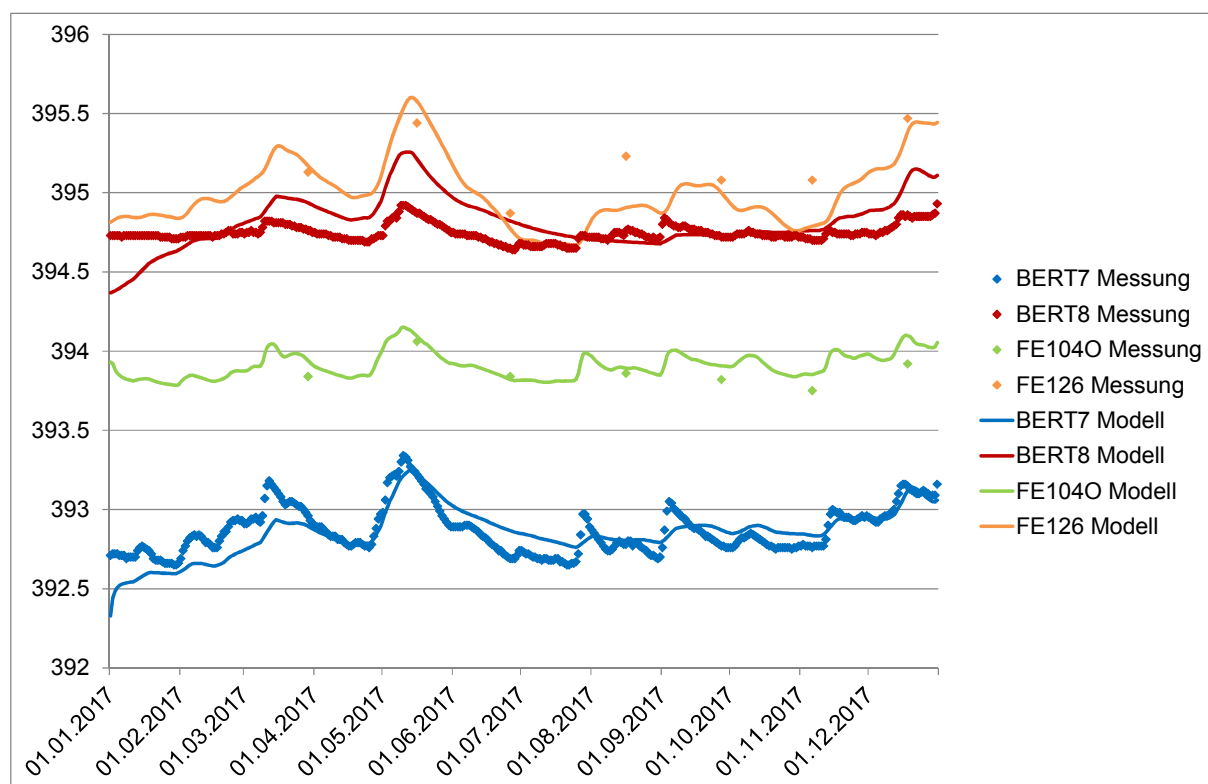


Abbildung 27: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Niederschönenfeld - Würthen im Zeitraum 2017.

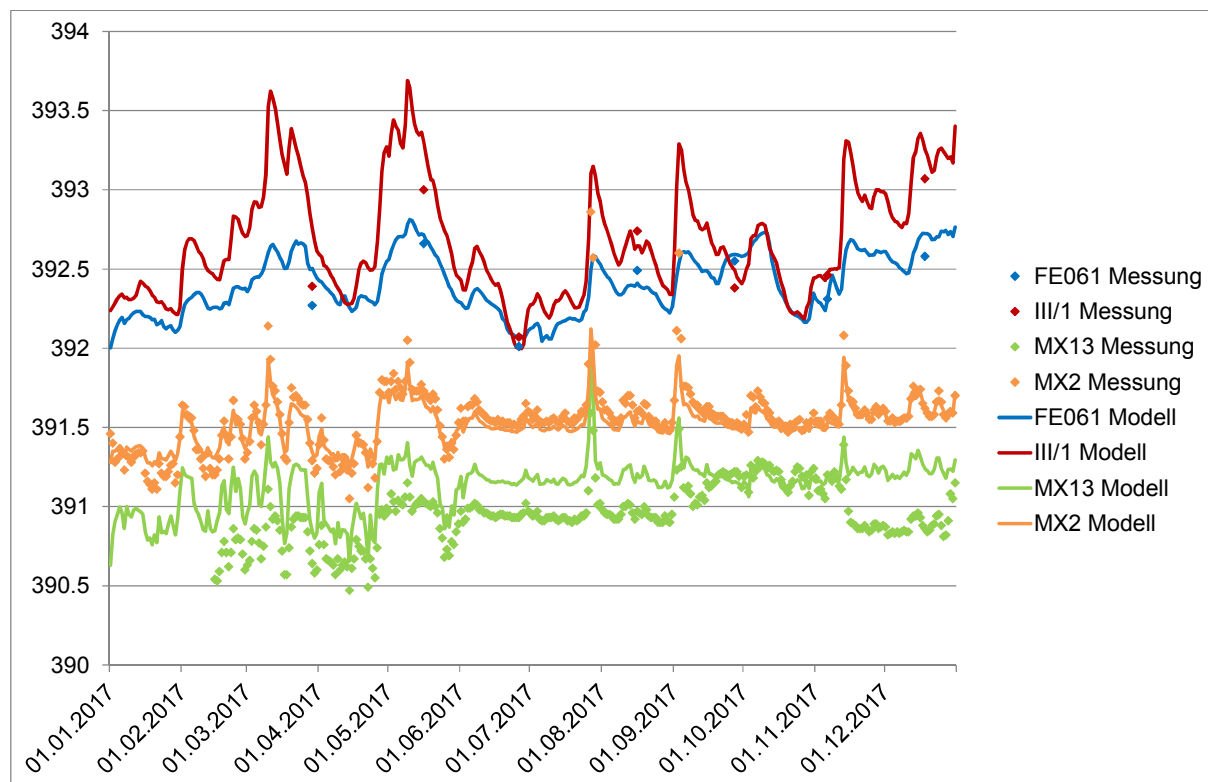


Abbildung 28: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände entlang der Donau zwischen Würthen und Marxheim im Zeitraum 2017.

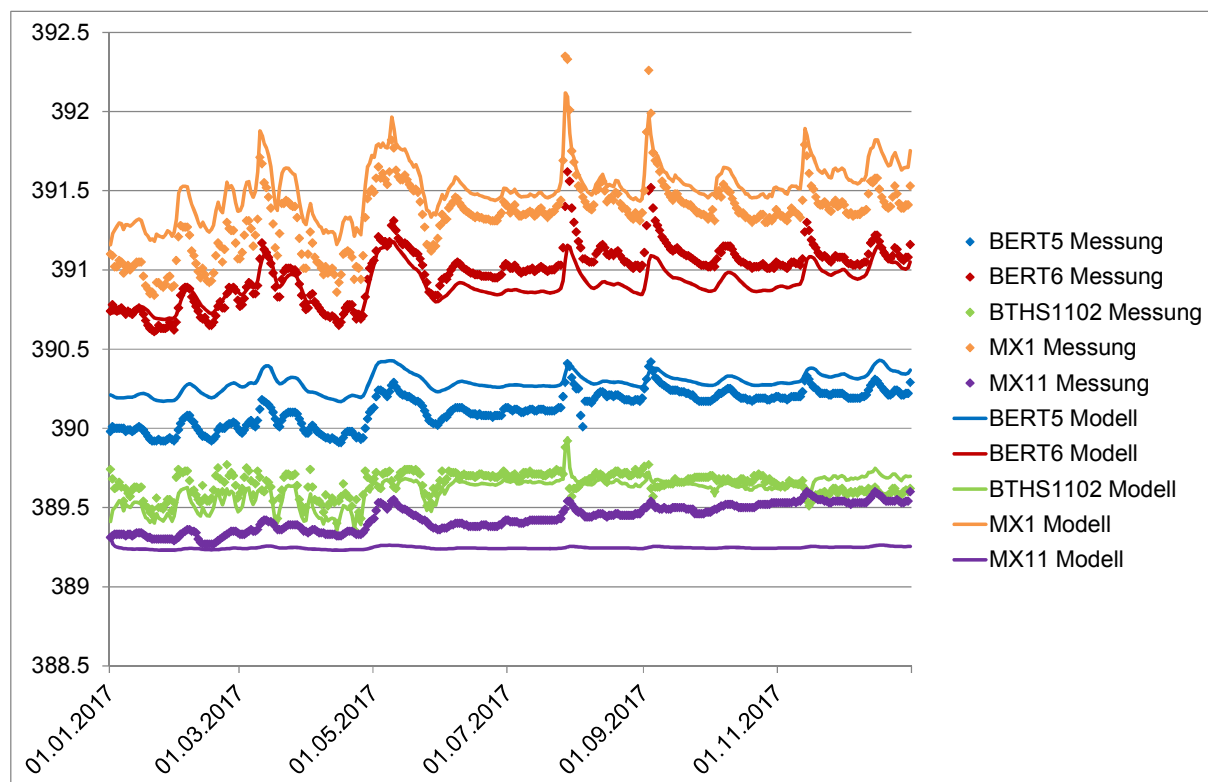


Abbildung 29: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Marxheim im Zeitraum 2017.

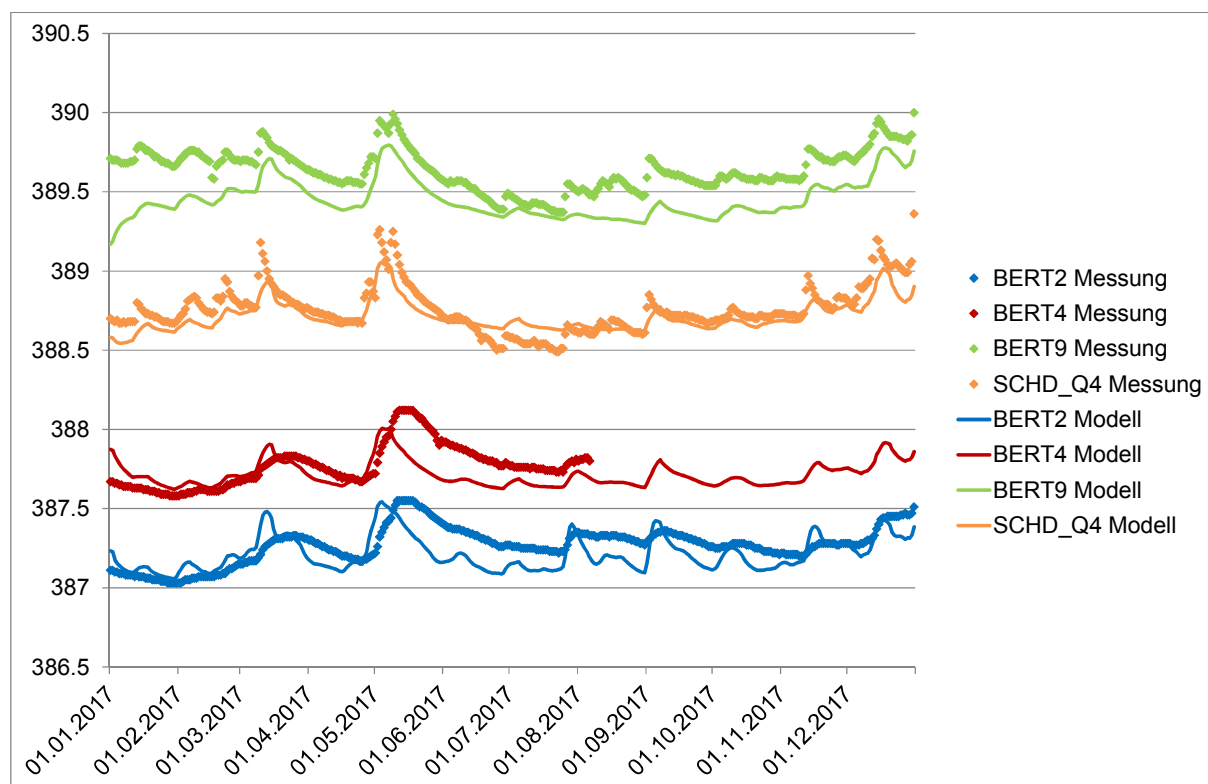


Abbildung 30: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Burgheim - Bertoldsheim im Zeitraum 2017.

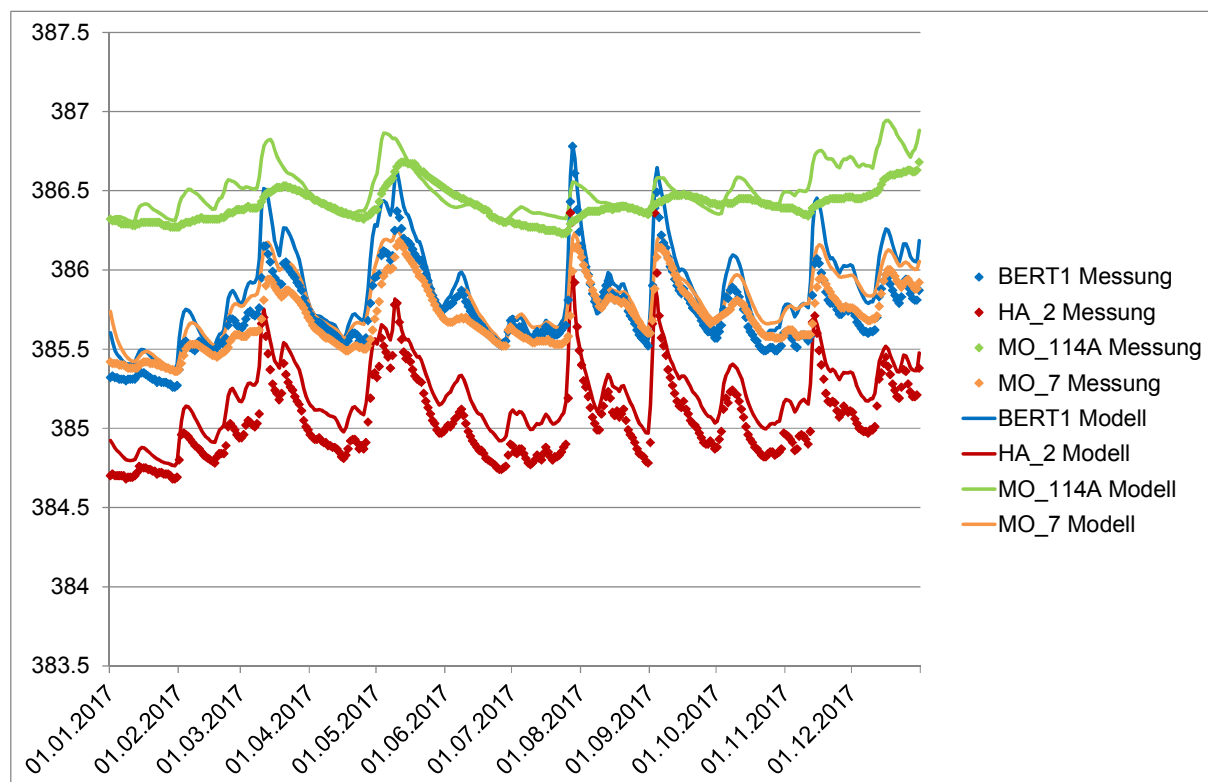


Abbildung 31: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Bertoldsheim – Moos im Zeitraum 2017.

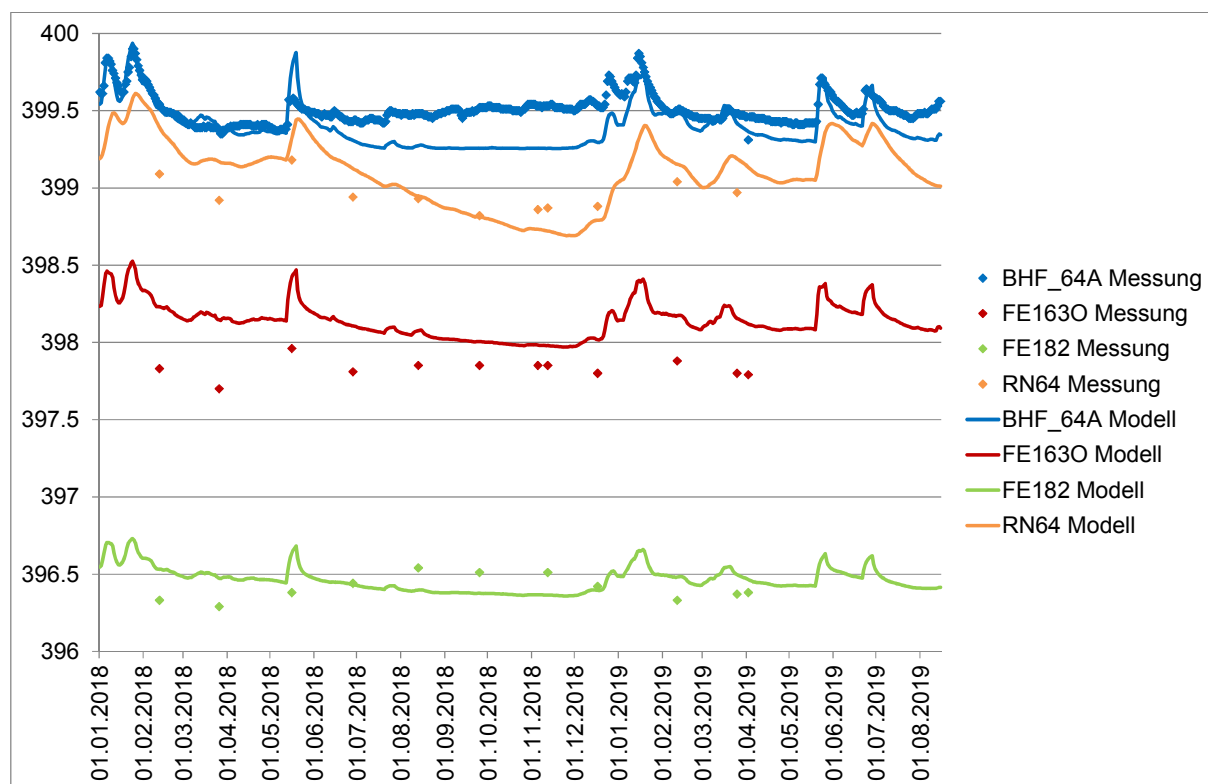


Abbildung 32: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Rain Lech im Zeitraum 2018 - 2019.

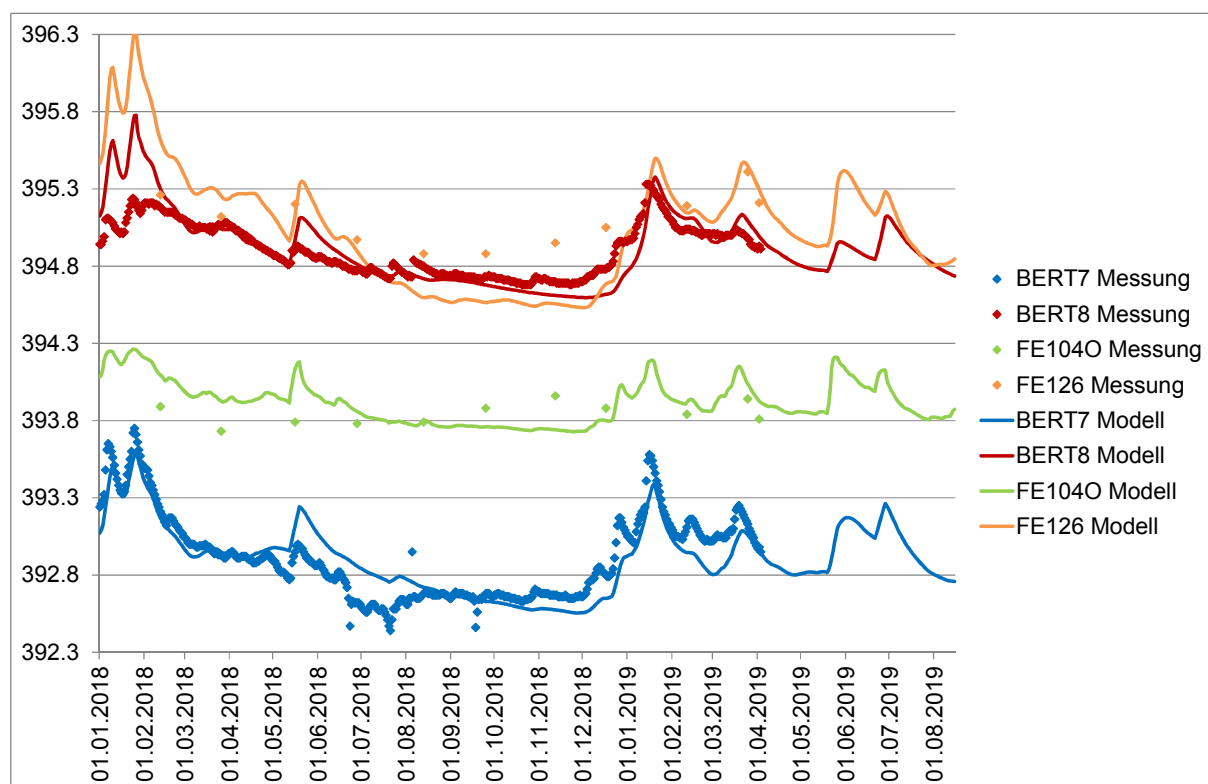


Abbildung 33: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Niederschönenfeld - Würthen im Zeitraum 2018 - 2019.

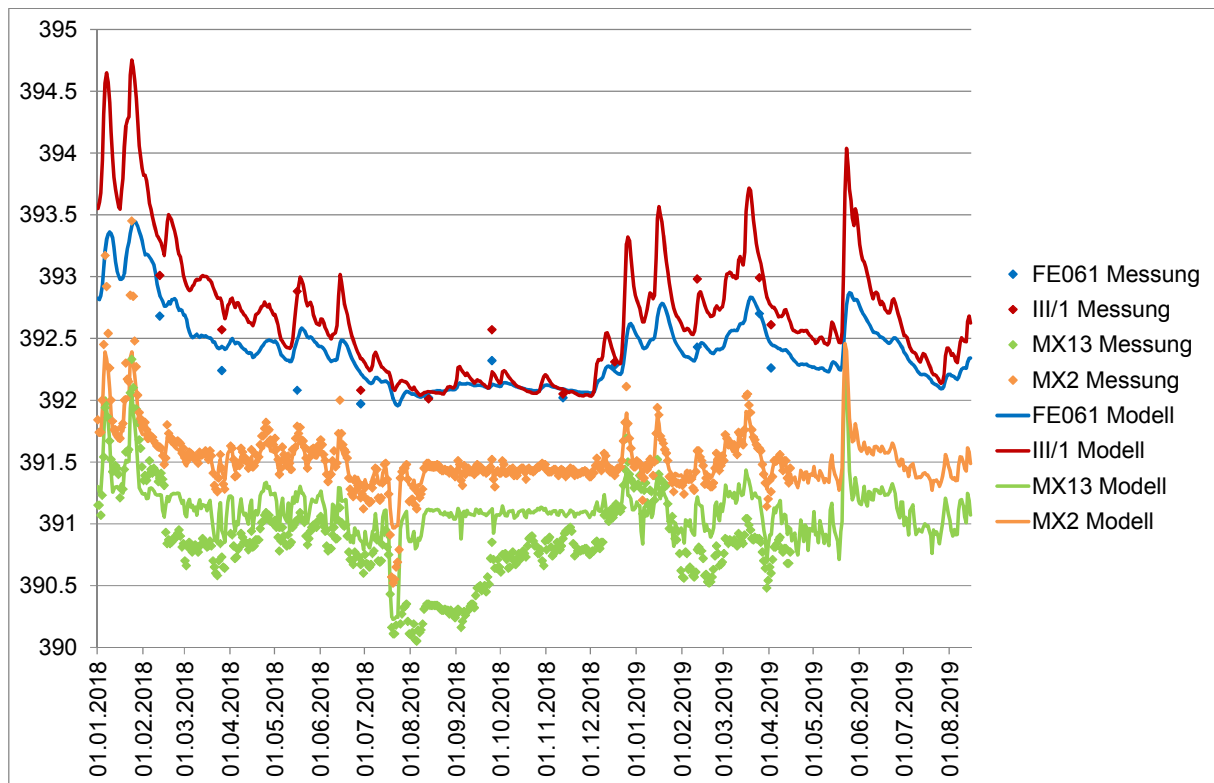


Abbildung 34: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände entlang der Donau zwischen Würthen und Marxheim im Zeitraum 2018 - 2019.

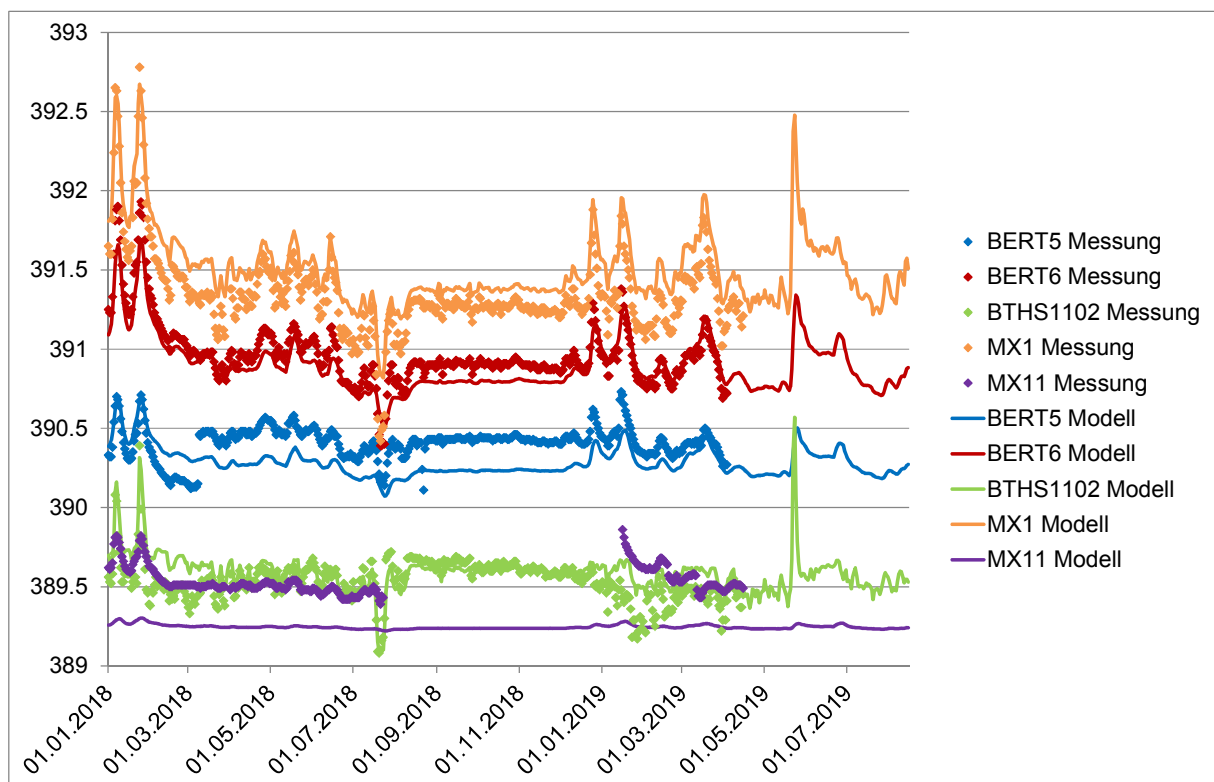


Abbildung 35: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Marxheim im Zeitraum 2018 - 2019.



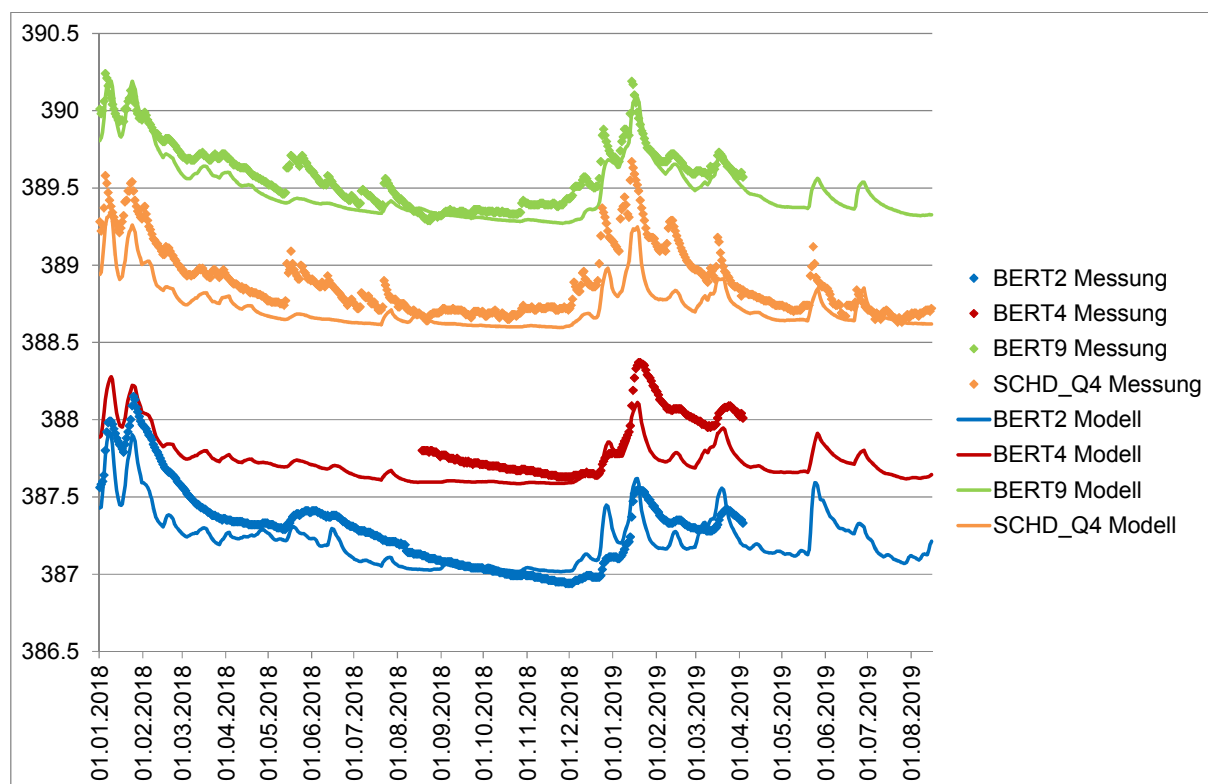


Abbildung 36: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Burgheim - Bertoldsheim im Zeitraum 2018 - 2019.

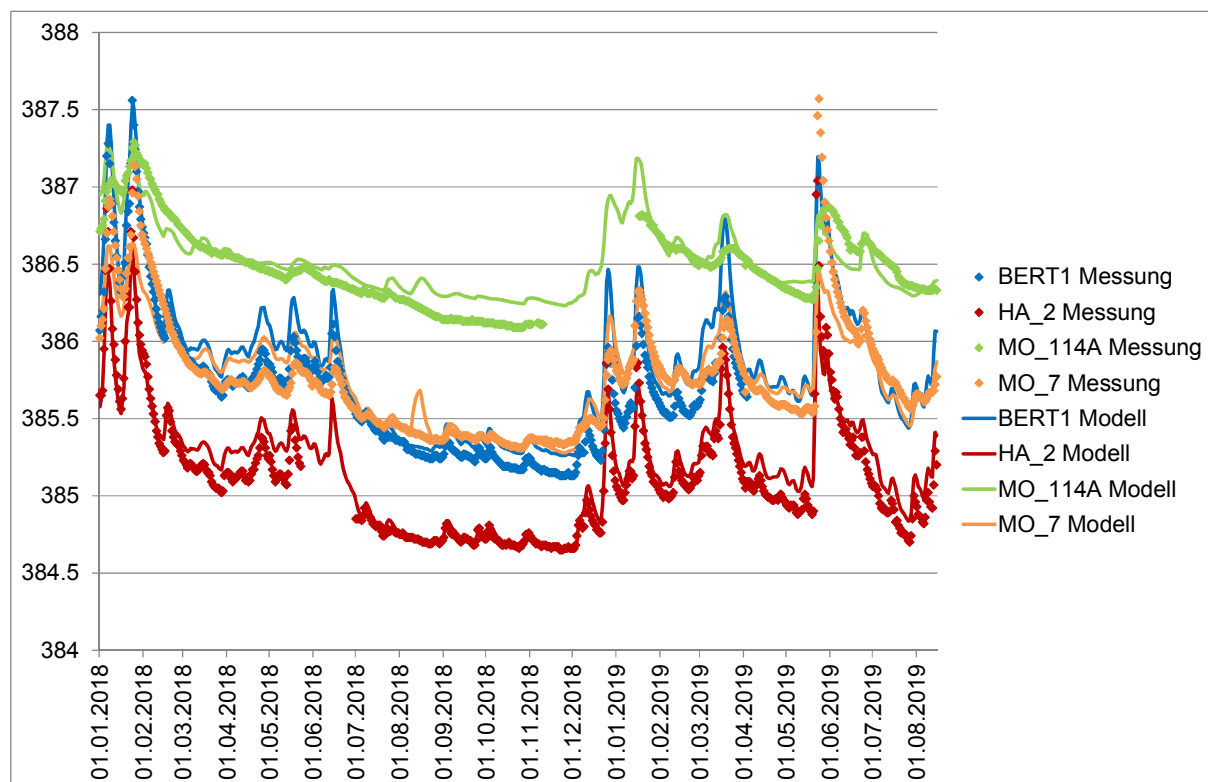


Abbildung 37: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Bertoldsheim – Moos im Zeitraum 2018 - 2019.

### 3.3.2 Vergleich der Drainagemengen am Stichtag

Stichtag	Die im Modell entlang der Drainagegewässer berechneten Abflüsse wurden mit den gemessenen Abflüssen am Stichtag verglichen. Am Stichtag fielen ca. 1 mm Niederschlag. Die Tage vor dem Stichtag waren trocken. Von Anfang bis Mitte März fielen etwa 50 mm Niederschlag. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Gewässer mit Einzugsgebiet innerhalb des Modellgebietes am Stichtag hauptsächlich drainiertes Grundwasser führten. Gewässer mit größeren Einzugsgebieten führten am Stichtag vermutlich noch Niederschlagswasser aus der Zeit vor dem 15. März.
Übereinstimmung	Die Übereinstimmung der Modellwerte mit den gemessenen Abflussmengen ist in Tabelle 4 dargestellt. Die Drainagewerte des Modells sind an den meisten Stellen etwas tiefer als die gemessenen Abflusswerte, da das Modell nur die Drainage aus Grundwasser enthält. Das Modell ergibt auch korrekterweise in den Gewässern, welche nur einen geringen Abfluss aufweisen und deren Abfluss deshalb am Stichtag nicht gemessen werden konnte, sehr geringe Drainagemengen.
Abweichungen	Etwas grössere Abweichungen weisen die Friedberger Ach auf dem Abschnitt Rain bis Mx37, sowie der rechtsseitige Entwässerungsgraben der Staustufe Rain auf. Während im Modell entlang der Friedberger Ach zu wenig Grundwasser drainiert, drainiert im Entwässerungsgraben zu viel. Die beiden Gewässer verlaufen parallel. In der Summe ist die Drainagemenge korrekt.
Entwässerungsgraben Staustufe Bertoldsheim	Die grösste Abweichung weist der linksseitige Entwässerungsgraben der Staustufe Bertoldsheim auf. Die Messstelle liegt jedoch unterhalb der Einleitung des Fischauftieges mit einer Wasserführung von ca. 0.5 m <sup>3</sup> /s. Zudem wird dem Binnenkanal auch noch das Abwasser aus der ARA Marxheim zugeführt und über verschiedene Bäche fließt Wasser von ausserhalb des Modellgebietes zu. Eine bessere Übereinstimmung wurde deshalb nicht angestrebt.

Gewässerabschnitt	Abfluss (zunahme)	Modell
Friedberger Ach, Rain bis Mx37	0.92	0.56
Friedberger Ach, Mx37 bis Bth15	1.1	0.75
Kleine Paar, Burgheim bis Gratzau	-0.02	-0.06
Entwässerungsgraben Rain rechts	0.25	0.43
Entwässerungsgraben Rain links	Nicht messbar	0
Bach von Marxheim	0.23	0.23
Entwässerungsgraben Bertoldsheim links	2.11	0.92
Sachsenweidengraben	0.06	0.1
Moosgraben, Schüttrinnengraben	Nicht messbar	0.02

Tabelle 4: Vergleich der am Stichtag gemessenen Abflüsse mit den im Modell berechneten Drainagemengen.

### 3.4 Resultierende Modellparameter

#### Durchlässigkeit

Die resultierenden Modellparameter sind in Abbildung 38 bis Abbildung 41 dargestellt. Die Durchlässigkeitswerte des Grundwasserleiters bewegen sich mit Werten zwischen  $5 \times 10^{-4}$  bis  $3 \times 10^{-2}$  m/s im Rahmen der erwarteten Spannweite. Die Durchlässigkeiten entlang der Lech und der Donau sind tendenziell etwas höher als jene der weiter entfernten Schotter.

#### Extremwerte

Sehr hohe Durchlässigkeiten ergab die Kalibrierung im Gebiet der Grundwasserbrunnen Genderkingen, sowie östlich der Staustufe Bertoldsheim. In beiden Gebieten sind hohe Durchlässigkeiten durch Pumpversuche belegt (BIS-Datenbank des LfU). Die hohen Durchlässigkeiten im Modell werden bei Genderkingen durch die korrekte Abbildung der Absenkungstrichter, östlich der Staustufe Bertoldsheim durch die korrekte Abbildung des kleinen hydraulischen Gradienten zur Donau bestätigt. Bei den Brunnen Genderkingen entsprechen die resultierenden Durchlässigkeiten jenen aus früheren Modellen [8].

Die kleinen Durchlässigkeiten am nördlichen und südlichen Modellrand können durch die Kalibrierung nicht bestimmt werden, da am Nordrand keine, am Südrand nur wenige Messungen des Grundwasserstandes vorhanden sind. In den Randbereichen wurde die Durchlässigkeit so gewählt, dass der Grundwasserstand möglichst nicht unter die Unterkante des Schotters fällt.

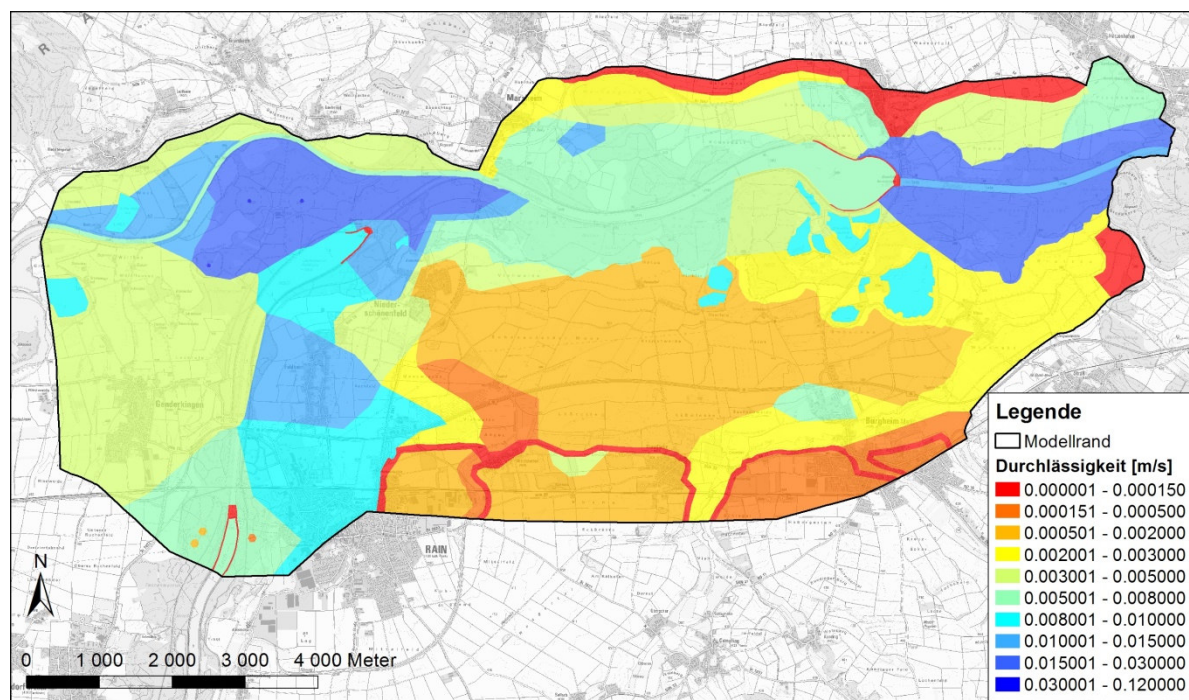


Abbildung 38:

Resultierende Durchlässigkeitswerte des Modells im Zustand nach Bau der Staustufen

**Speicherkoeffizient**

Abbildung 39 zeigt die wirksame Porosität im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels (Speicherkoeffizient). Bei der Kalibrierung zeigte sich, dass die Ganglinien des Grundwasserspiegels mit einem Speicherkoeffizienten von 12 bis 15% nachgebildet werden können. In den Baggerseen wurde ein Speicherkoeffizient von 100% vorgegeben. Der Speicherkoeffizient am Nord- und Südrand des Modells kann durch die Kalibrierung nicht bestimmt werden, da an diesen Stellen keine Loggerdaten zur Verfügung stehen. Aufgrund der tieferen Durchlässigkeit ist jedoch eher ein tieferer Speicherkoeffizient zu erwarten.

Bei einem Einstau der Deckschicht wird der Speicherkoeffizient zu 1% angesetzt.

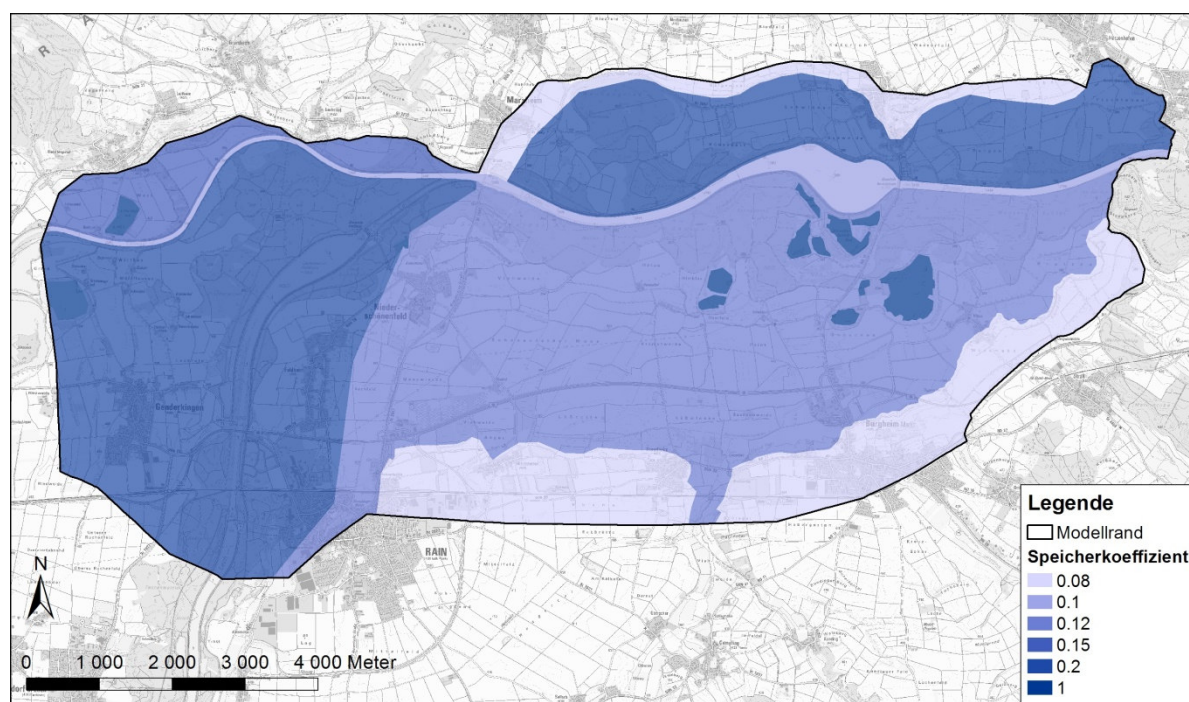


Abbildung 39:

Im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels wirksame Porosität.

**Leakagewerte**

Die aus der Kalibrierung resultierenden Leakagewerte der Gewässer sind in Abbildung 40 und Abbildung 41 dargestellt. Die höchsten Leakagewerte wurden der Donau und den Entwässerungsgräben südlich und nördlich der Staustufe Bertoldsheim zugeordnet. Die Stauhaltungen und Drainagegewässer erhielten tiefere Leakagewerte. Entlang der Kleinen Paar gibt es eine Reihe kleinerer Staustufen. Dort wurde jeweils oberhalb der Staustufe ein kleiner, unterhalb der Staustufe ein grösserer Leakagewert zugeordnet. Generell weisen Gewässer entlang von Exfiltrationsstrecken eine grössere Sohlendurchlässigkeit auf als entlang von Infiltrationsstrecken, da durch die Exfiltration eine Kolmation verhindert wird.

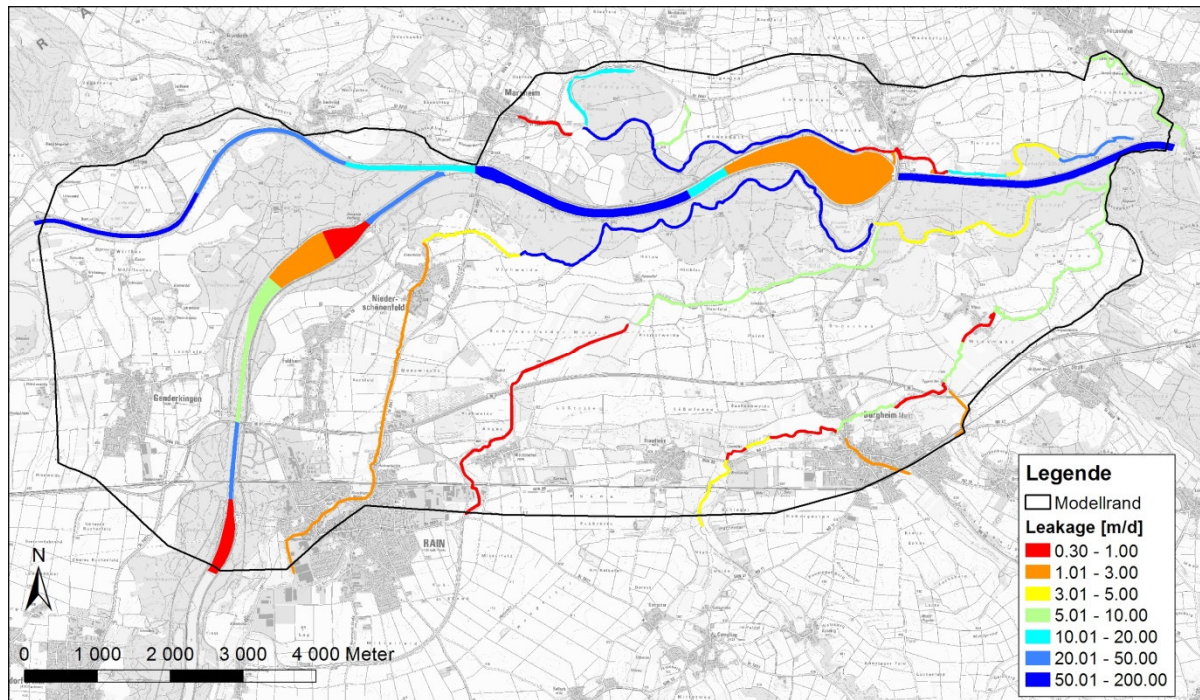


Abbildung 40: In-Leakage (Infiltration) der Gewässer

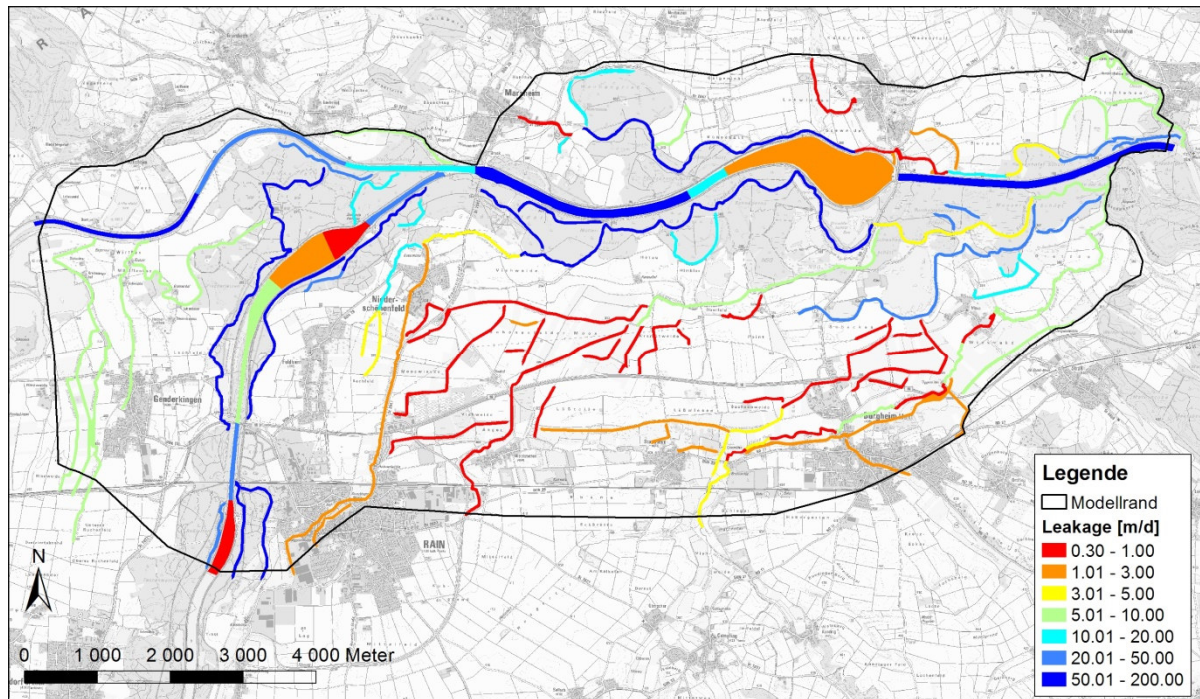


Abbildung 41: Out-Leakage (Exfiltration) der Gewässer

### 3.5 Resultierende Strömungsverhältnisse

Niederwasser

Zur Visualisierung der Strömungsverhältnisse werden die Darcy-Geschwindigkeiten als Pfeile in Strömungsrichtung dargestellt. Daraus sind sowohl die Fließrichtung, wie auch die Strömungsmenge ersichtlich (Abbildung 42).

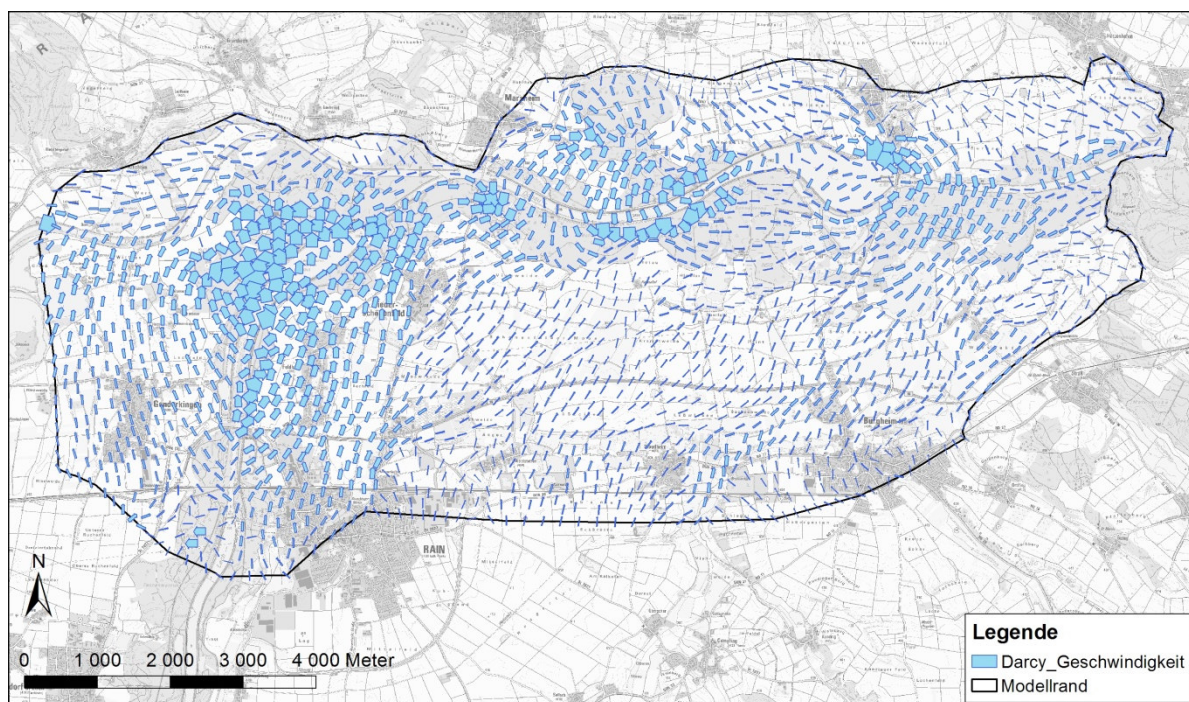


Abbildung 42: Darcy-Geschwindigkeiten am Stichtag vom 02.04.2019

### 3.6 Wasserbilanz

Gesamtbilanz

Zur Darstellung der Wasserbilanz wurde der Zeitraum vom 1.8.2018 bis zum 31.7.2019 verwendet. Zu Beginn und am Ende des Zeitraums befindet sich der Grundwasserstand etwa auf gleicher Höhe, so dass die Wasserbilanz keine grossen Speicheranteile aufweist. Die resultierende Wasserbilanz ist in Abbildung 43 dargestellt. Der grösste Zufluss zum Modell stammt aus der Donau und dem Lech. Der grösste Abfluss aus dem Modell erfolgt durch die Drainage in den übrigen Gewässern.

Zeitliche Variation

Abbildung 44 zeigt die zeitliche Variation der Infiltration aus der Donau. Die Infiltration beträgt bei Nieder- und Mittelwasser konstant etwa  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , bei Hochwasserereignissen kann sie auf das 5-fache ansteigen.

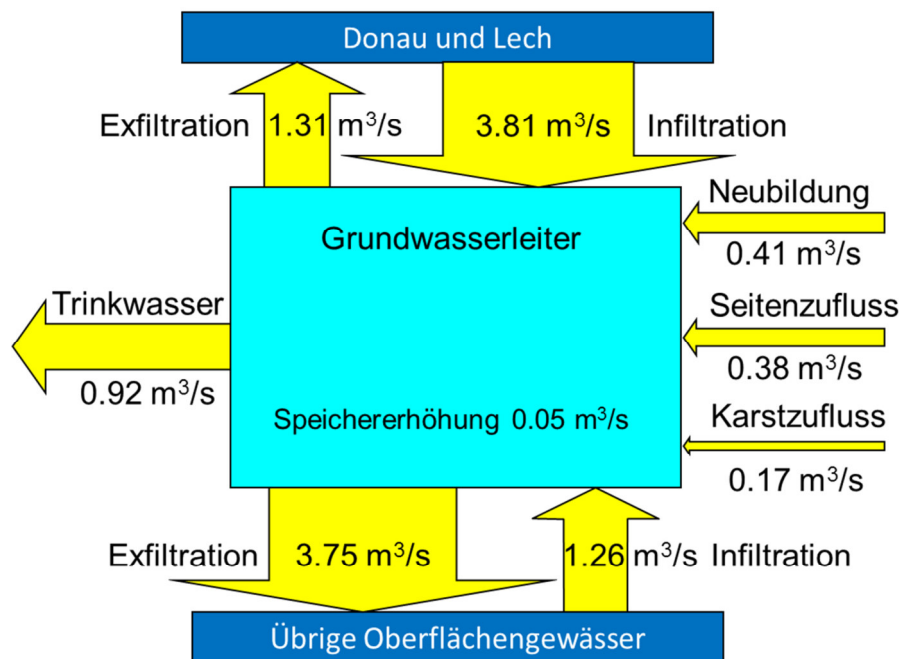


Abbildung 43: Wasserbilanz über den Zeitraum vom 1.8.2018 – 31.7.2019.

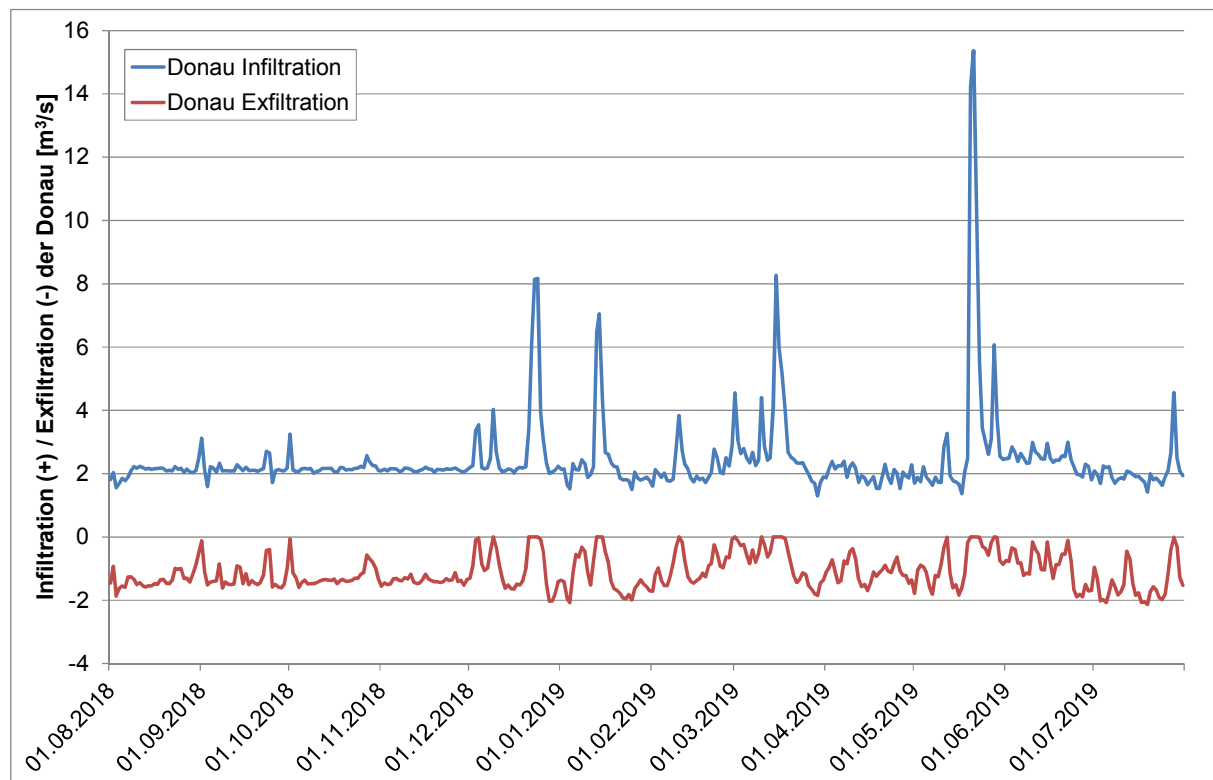


Abbildung 44: Zeitliche Variation der Infiltration / Exfiltration der Donau

## 4 Modelltest an weiteren Datensätzen

### 4.1 Grundwasserspiegeldaten des Jahres 2013

**Datenauswahl** Zur Durchführung eines Modelltests wurden die Grundwasserstände des Jahres 2013 ausgewählt. In diesem Jahr gab es ein Donauhochwasser, welches zu Ausuferungen führte. Im Zeitraum vom 01.02.2013 bis 31.12.2013 stehen 6710 Messdaten des Grundwasserspiegels in 72 Messstellen zur Verfügung. Die Januarwerte wurden weggelassen, um einen Einfluss des Anfangspotentials zu vermeiden. Die vom Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt eingerichteten Logger Bert1 bis Bert9 waren im Jahr 2013 noch nicht in Betrieb.

**Gütwerte** Tabelle 5 zeigt die Gütwerte des Modelltests. Die Übereinstimmung der Modellwerte mit den Messungen ist etwas schlechter als bei der Kalibrierung. Sie ist jedoch immer noch ausreichend gut. Der Modelltest zeigt, dass das Modell auch für andere Zeiträume und insbesondere auch für den Zustand bei einer Überflutung korrekte Grundwasserstände ergibt.

**Gütwerte** Grund für die höhere Abweichung ist insbesondere, dass die Übereinstimmung des Modells mit den Loggerdaten des WWA in den Kalibrierungszeiträumen besonders gut war. Da diese beim Modelltest fehlten, bekamen andere Messstellen ein höheres Gewicht. Insbesondere tragen die eng beieinander liegenden Messstellen BthSued 1002, 1004 und 1006 einen Drittel zur gesamten Abweichung bei. Die Abweichungen an dieser Stelle zeigen sich auch im Scatterplot bei ca. 390 m NN (Abbildung 45) und können nicht erklärt werden.

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichung (RMSE) [cm]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Median der Absoluten Abweichung [cm]
2013	22	16	14

Tabelle 5: Gütwerte des Modelltests

**Übersicht** Eine Übersicht über die Abweichung des Modells kann summarisch durch einen Scatterplot der berechneten zu den gemessenen Potentialen gewonnen werden. Abbildung 45 zeigt den Scatterplot der Modellwerte gegen die gemessenen Werte des Jahres 2013.

**Zeitliche Übereinstimmung** In Abbildung 46 bis Abbildung 51 sind die Zeitkurven des Grundwasserspiegels an ausgewählten Messstellen für den Testzeitraum 2013 dargestellt. Die Lage der Messstellen ist in Abbildung 25 dargestellt.

**Räumliche Übereinstimmung** Abbildung 52 zeigt die räumliche Übereinstimmung des berechneten Grundwasserstandes bei Hochwasser, am 05.06.2013. Es fällt auf, dass sich die Differenzen kleinräumig stark unterscheiden.



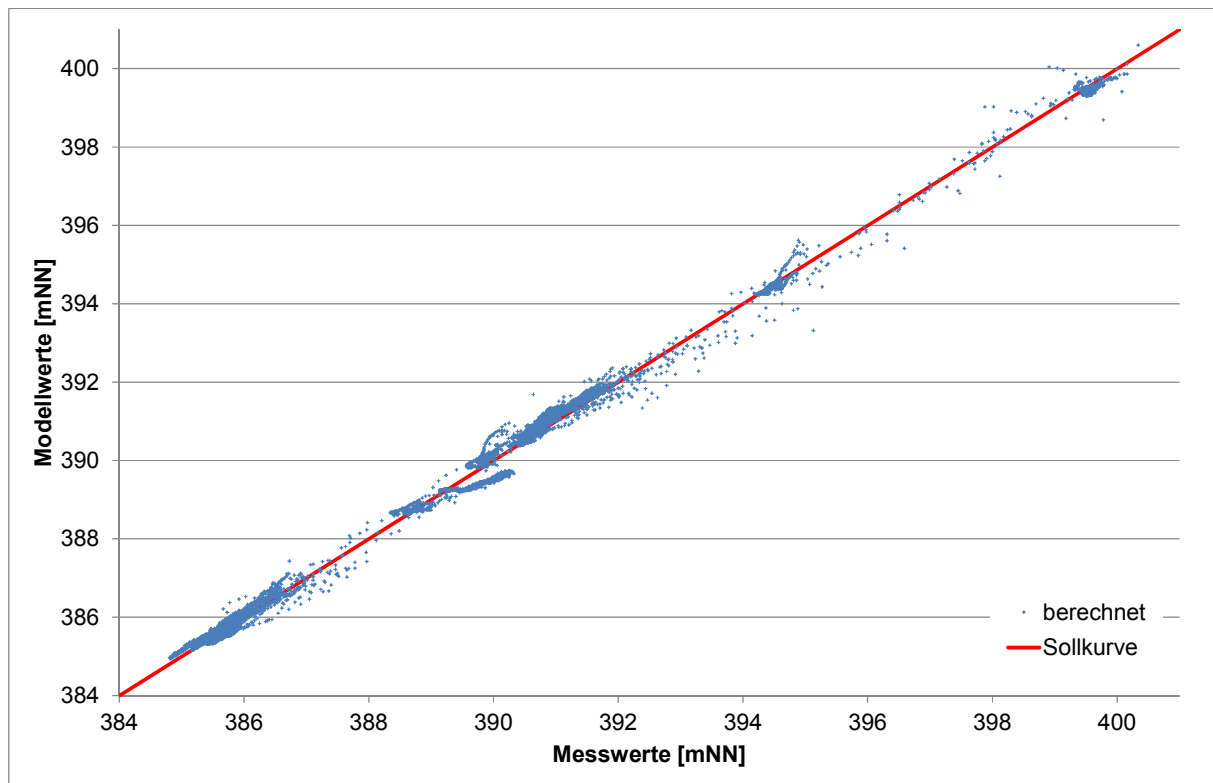


Abbildung 45: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte des Jahres 2013.

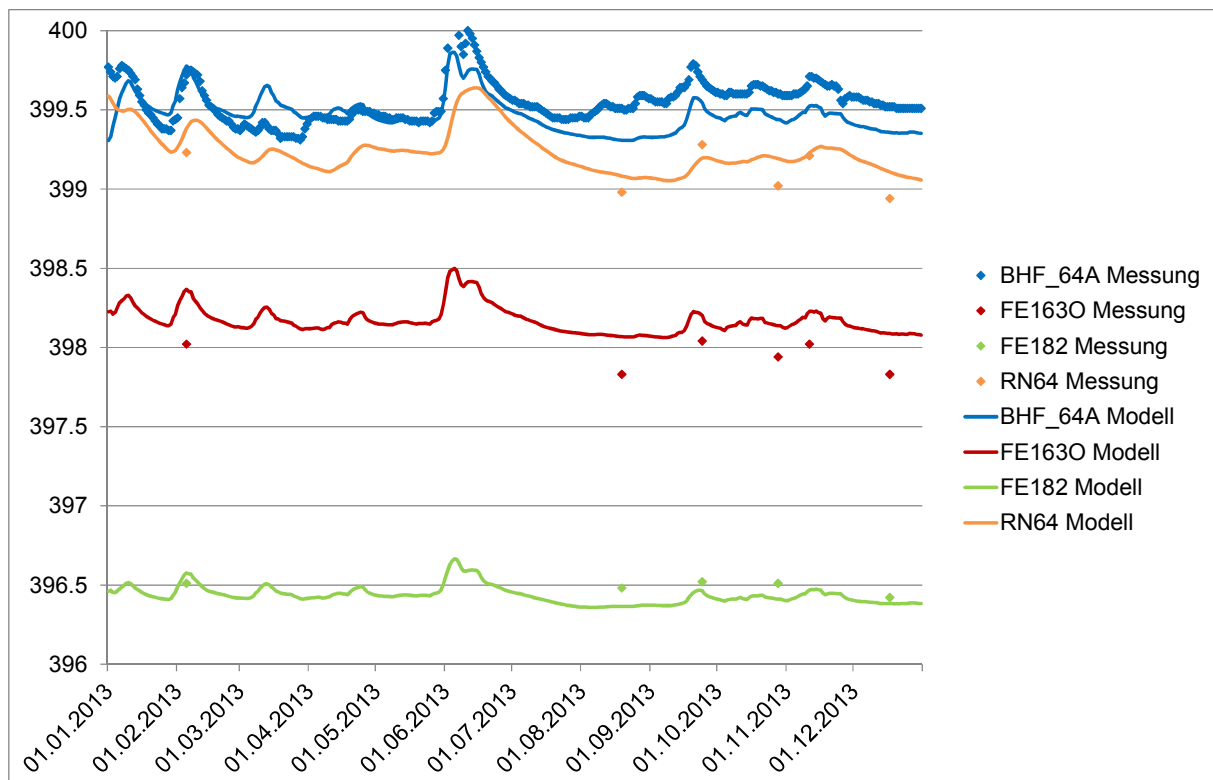


Abbildung 46: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Rain Lech im Zeitraum 2013.

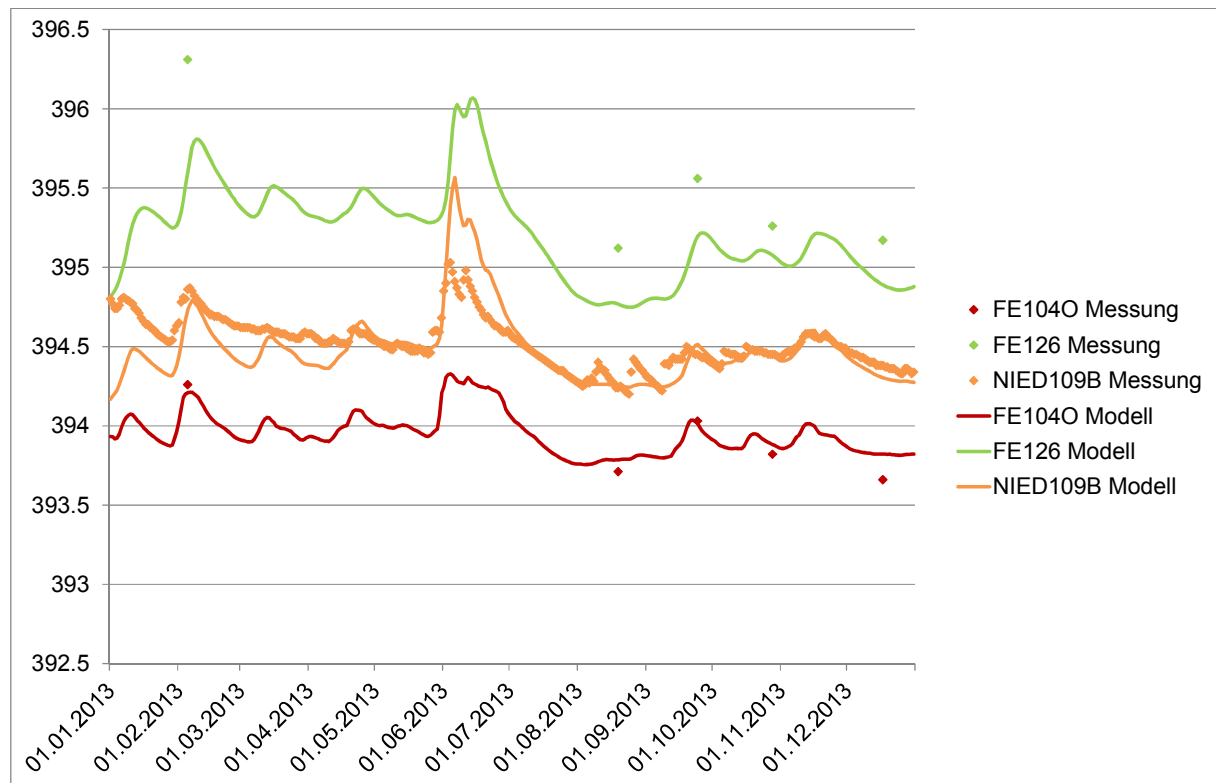


Abbildung 47: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Niederschönenfeld - Würthen im Zeitraum 2013.

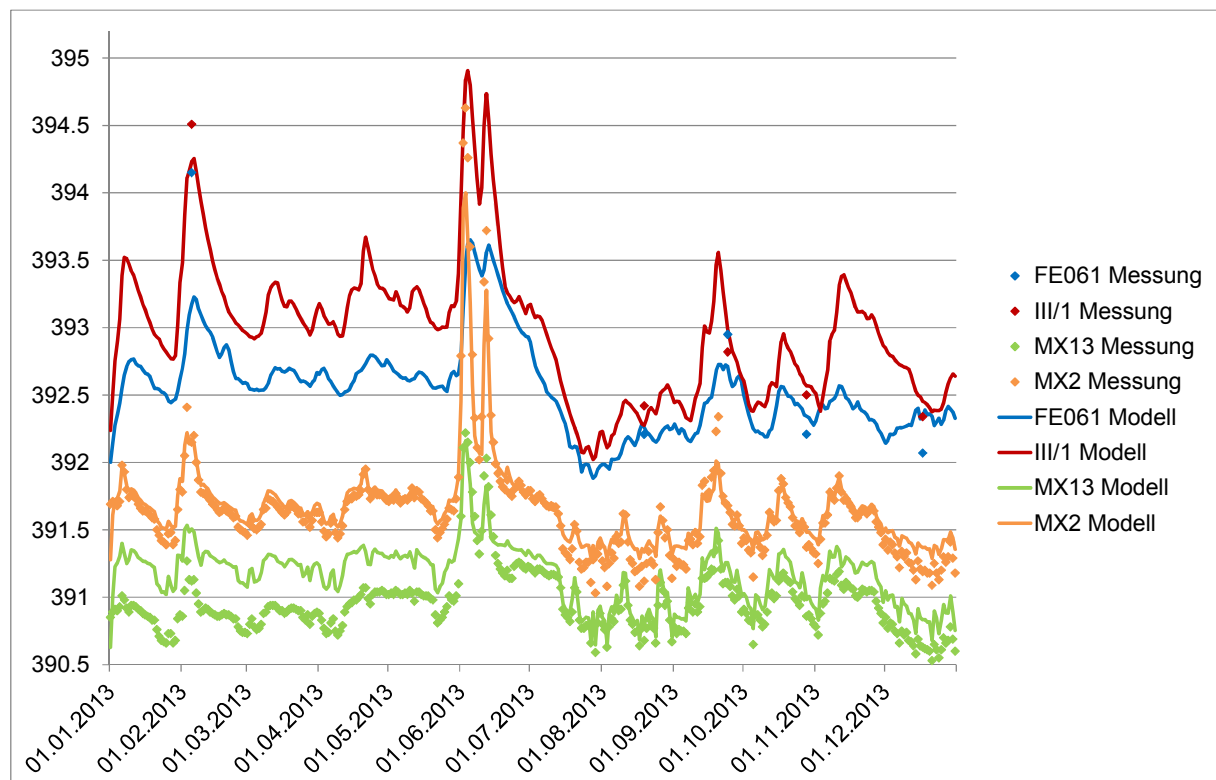


Abbildung 48: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände entlang der Donau zwischen Würthen und Marxheim im Zeitraum 2013.

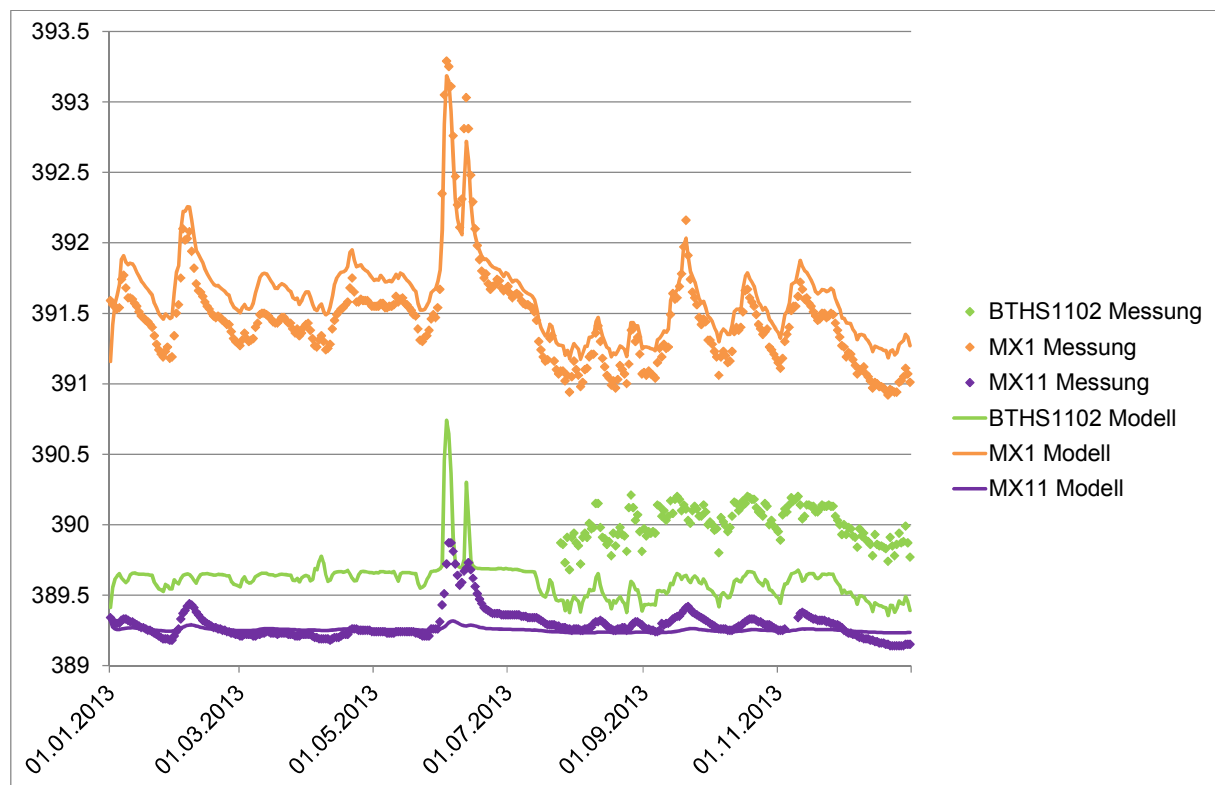


Abbildung 49: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Marxheim im Zeitraum 2013.

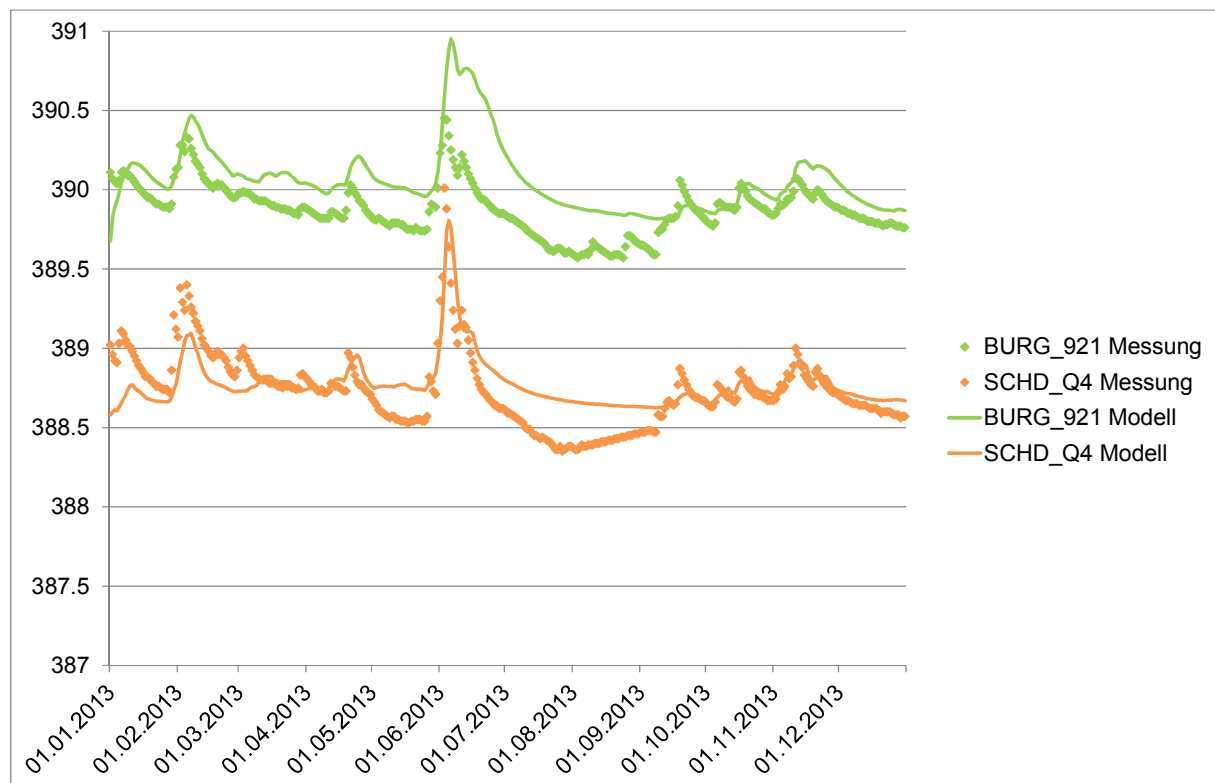


Abbildung 50: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Burgheim - Bertoldsheim im Zeitraum 2013.

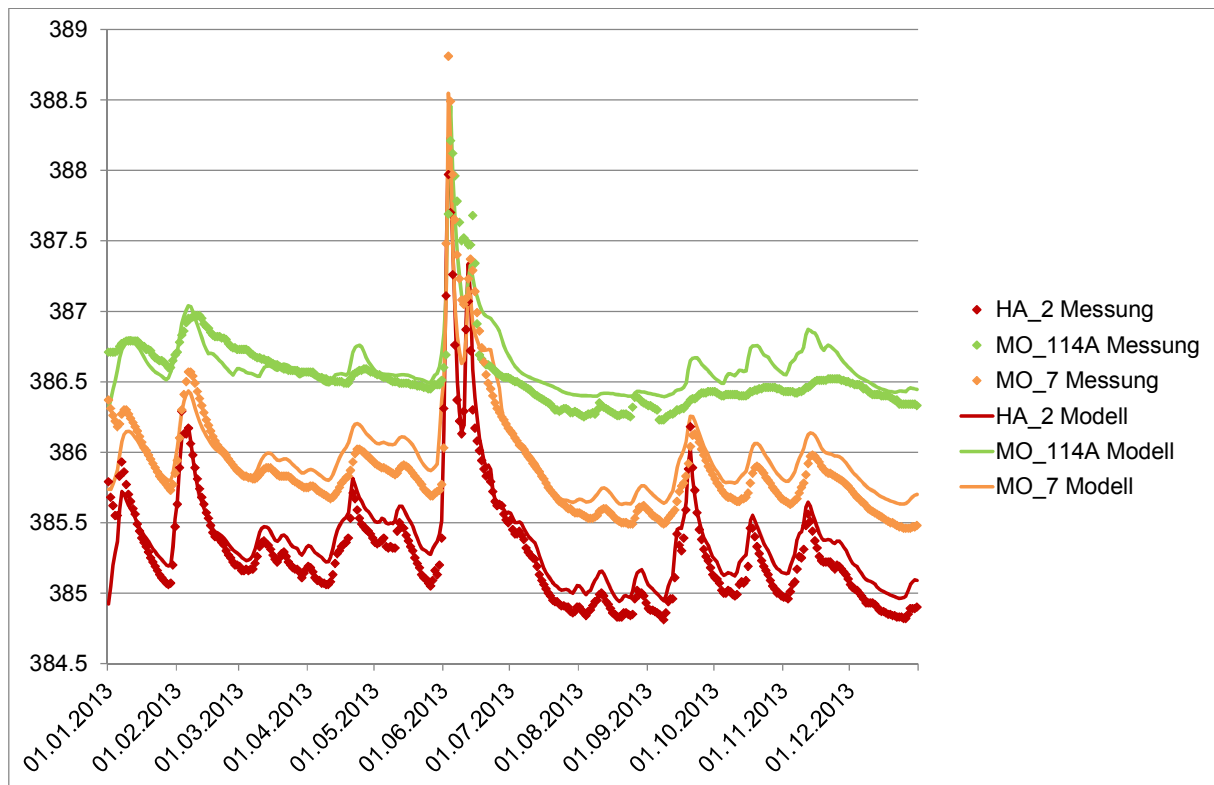


Abbildung 51: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet Bertoldsheim – Moos im Zeitraum 2013.

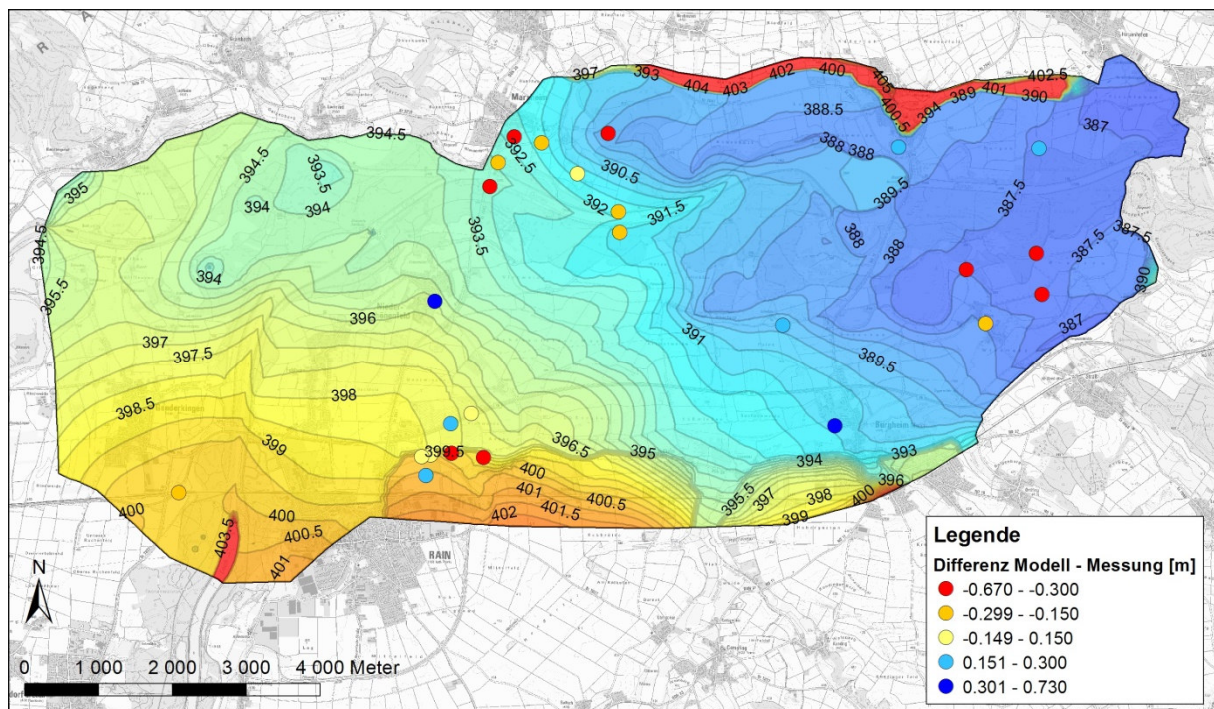


Abbildung 52: Höhenkurven des Grundwasserstandes am 05.06.2013, zusammen mit den Abweichungen zu den gemessenen Grundwasserständen.

### Wasserbilanz bei Hochwasser

Die Abbildung 53 zeigt die Wasserbilanz des Modells während des Hochwasserdurchganges im Juni 2013. Als zusätzliche Komponente wurde die Überflutungsfläche eingeführt, welche sich zuerst durch ein Eindringen von Wasser (Überflutung,  $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ ), danach mit einem Qualmwasseraustritt ( $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) manifestiert.

Aufgrund der hohen Niederschläge war im Juni 2013 die Neubildung sehr viel höher als sonst. Die hohen Wasserstände in der Donau und im Lech führten zu einer höheren Infiltration und einer geringeren Exfiltration. Ein Teil des aus dem Lech exfiltrierten Wassers verließ das Modell an dessen Westgrenze (Seitenabfluss).

Im überfluteten Gebiet infiltrierte während der Überflutung Wasser aus den Drainagegräben ins Grundwasser. Nach der Hochwasserspitze begannen diese jedoch schnell wieder als Drainage zu wirken, weshalb sowohl Infiltration wie Exfiltration der übrigen Oberflächengewässer deutlich höher sind als 2017.

In der Summe resultiert während des Hochwasserdurchganges eine Erhöhung des Grundwasserspeichers.

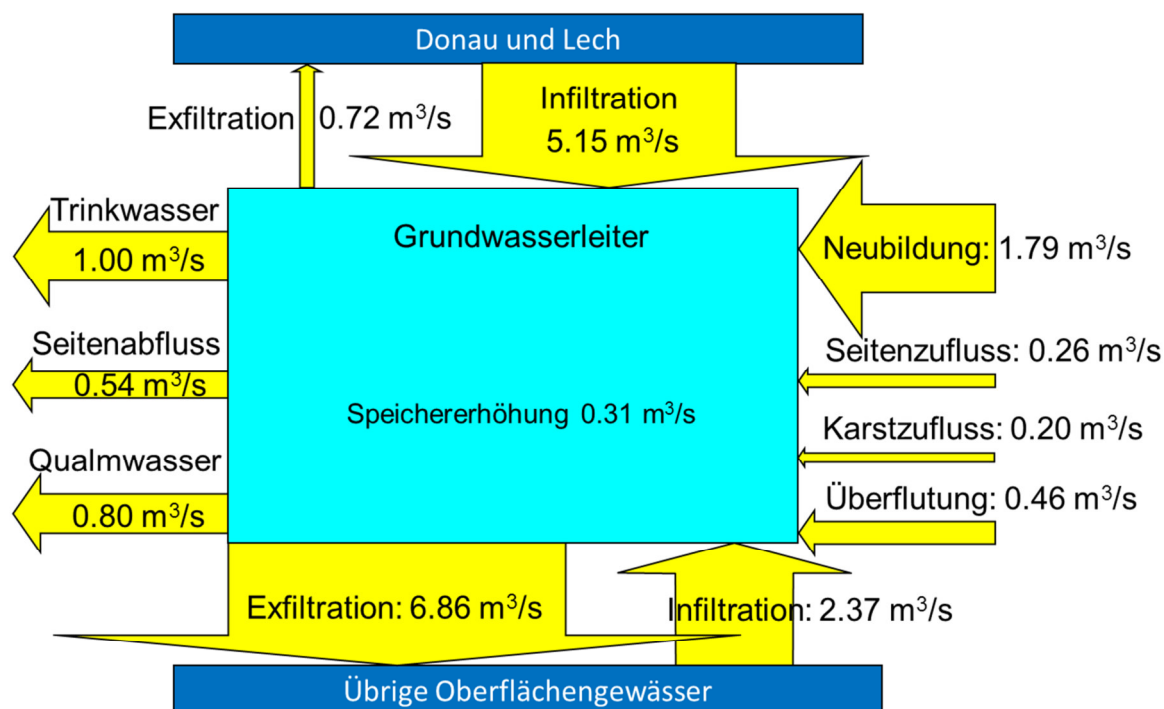


Abbildung 53:

Wasserbilanz während des Hochwasserdurchganges (Mittelwerte des Zeitraumes 29.05.2013 bis 28.06.2013)

## 5 Sensitivitäten

### 5.1 Variierte Parameter

**Ziel** Durch die Variation einzelner Modellparameter kann deren Einfluss auf die Modellresultate bestimmt werden. Bereits während der Kalibrierung wurde der Einfluss verschiedener Parameter untersucht. Im Folgenden wird der Einfluss einzelner ausgewählter Parameter dokumentiert. Dazu wurden Parameter ausgewählt, welche im Hinblick auf die spätere Simulation von Polderszenarien von Bedeutung sind.

**Untersuchte Parameter** Die untersuchten Parameter sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Parameter, welche im Ausgangsmodell einen hohen Wert aufweisen, wurden verkleinert, solche mit einem kleinen Ausgangswert vergrößert. Da die Durchlässigkeiten besser bekannt sind als die Leakagewerte wurden sie mit einem Faktor 2 variiert, während die Leakagewerte mit einem Faktor 4 variiert wurden.

Der Parameter, über den am wenigsten Informationen vorliegen, ist die Durchlässigkeit der Deckschicht. Dieser Parameter wurde deshalb um den Faktor 10 vergrößert. Eine hohe Deckschichtdurchlässigkeit wirkt sich auf die Auswirkungen einer Polderflutung ungünstig aus.

Fall	Modell	Parameter	Ort	Variation
S1	2017	K <sub>f</sub> -Wert	Südteil Poldervariante Süd	2 x höher
S2	2017	K <sub>f</sub> -Wert	Nordteil Poldervariante Süd	2 x tiefer
S3	2017	K <sub>f</sub> -Wert	Poldervariante Nord	2 x tiefer
S4	2017	K <sub>f</sub> -Wert	Östlich Bertoldsheim	2 x tiefer
S5	2017	Leakage	Entwässerungsgraben Nord	4 x tiefer
S6	2017	Leakage	Friedberger Ach Polder Süd	4 x tiefer
S7	2017	Leakage	Friedberger Ach Rain bis Polder Süd	4 x höher
S8	2017	Leakage	Donau Marxheim bis Staustufe Berth.	4 x höher
S9	2013	Kf Deckschicht	Gesamtes Modellgebiet	10 x höher

Tabelle 6: Untersuchte Fälle der Sensitivitätsuntersuchung

**Durchlässigkeitszonen** Abbildung 54 zeigt die Ausdehnung der Durchlässigkeitszonen, in denen der kf-Wert variiert wurde.

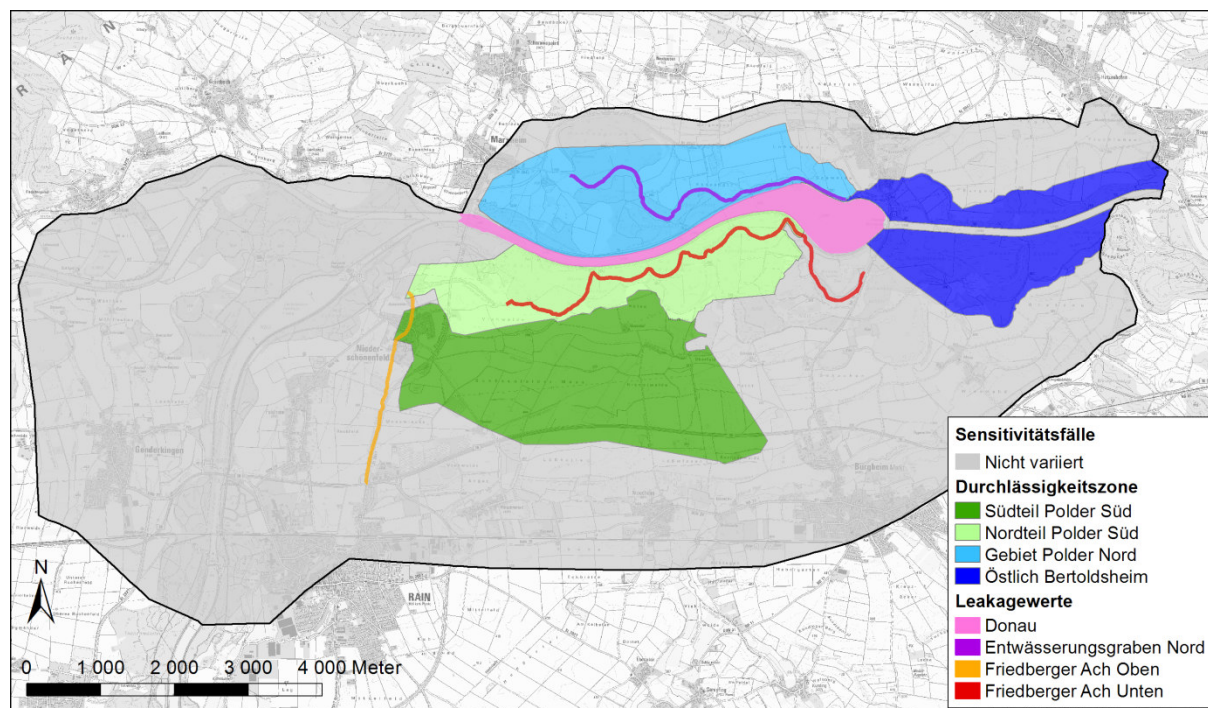


Abbildung 54: In der Sensitivitätsuntersuchung variierte Durchlässigkeits- und Leakage-zonen

## 5.2 Resultate

### Überblick

Abbildung 55 bis Abbildung 66 zeigen die resultierenden Auswirkungen des Grundwasserstandes und der Drainagemenge auf die Veränderung der Durchlässigkeit und des Leakagewerts. Die Parametervariationen wirken sich weitgehend lokal aus.

### Bewertung

Auf den ersten Blick erscheinen die Differenzen klein. Die Kalibrierungsgüte reagiert jedoch sensitiv auf Variationen der Durchlässigkeit oder des Leakagewerts, da die Abweichungen zwischen Modell und Messung klein sind.

### Durchlässigkeit Polder Süd

Abbildung 55 zeigt die Auswirkungen einer Verdoppelung der Durchlässigkeit im Südteil des Polders Süd. Im Anstrom des Polders sinkt dadurch der Grundwasserspiegel deutlich ab, während er im Norden der untersuchten Durchlässigkeitszone nur schwach ansteigt. Dies zeigt, dass der Grundwasserstand im Nordteil des Polders durch die Friedberger Ach kontrolliert ist. Dies ist auch der Grund, weshalb bei einer Erhöhung der Durchlässigkeit im Norden des Polders Süd praktisch keine Veränderung des Grundwasserstandes resultiert. Eine Ausnahme bildet dabei der Bereich westlich des Polders, wo die Friedberger Ach weniger gut an den Grundwasserleiter angebunden ist (tieferer Leakagewert, siehe Abbildung 40).

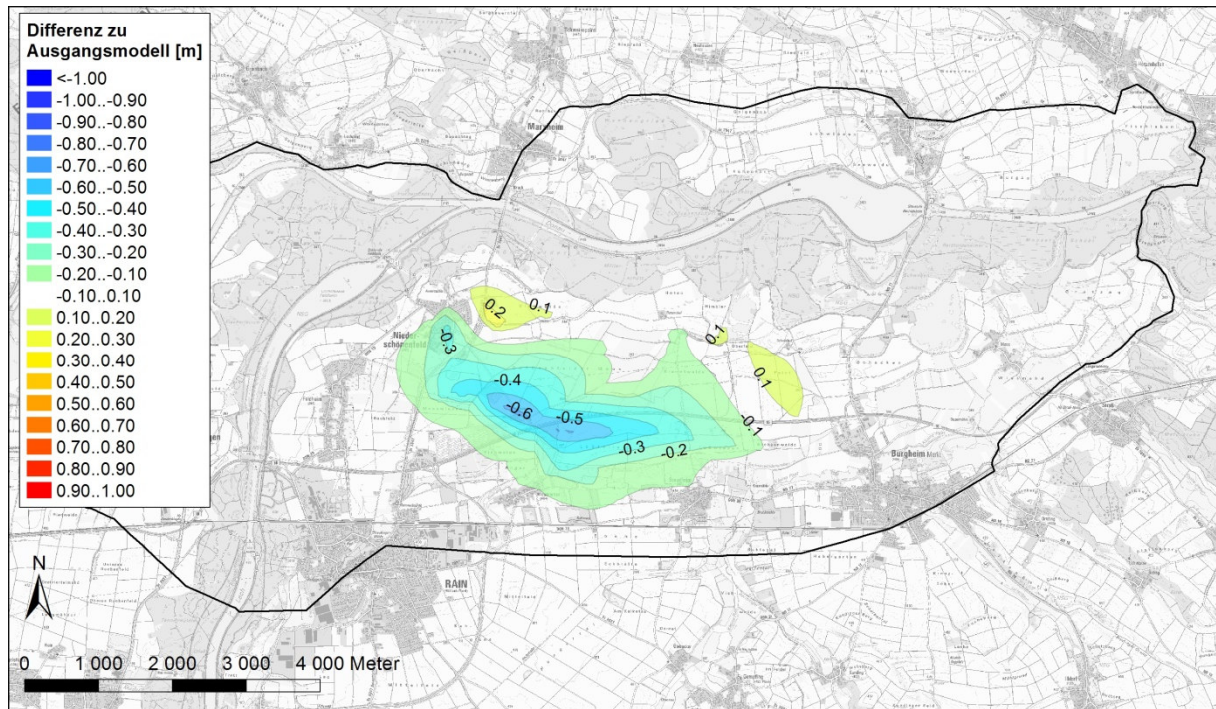


Abbildung 55: Sensitivität des Grundwasserstands bei Mittelwasser auf eine Verdopplung der Durchlässigkeit im südlichen Teil der Poldervariante Süd.



Abbildung 56: Sensitivität des Grundwasserstands bei Mittelwasser auf eine Halbierung der Durchlässigkeit im nördlichen Teil der Poldervariante Süd.



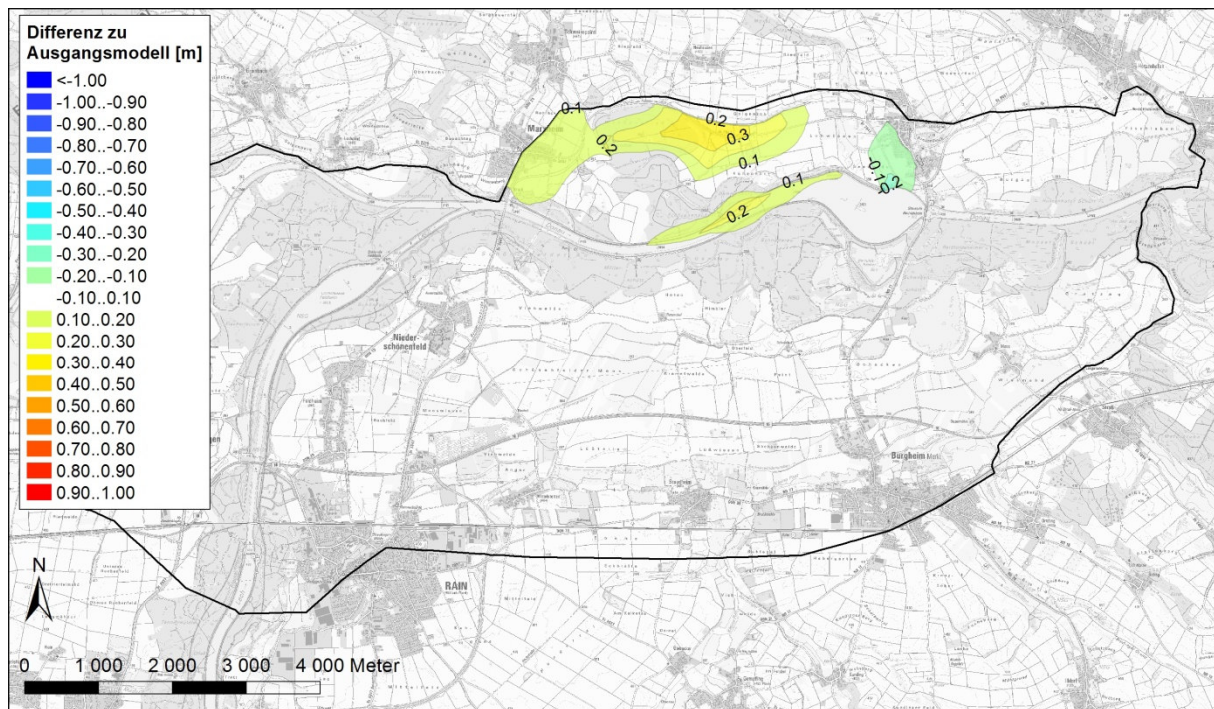


Abbildung 57: Sensitivität des Grundwasserstands bei Mittelwasser auf eine Halbierung der Durchlässigkeit im Gebiet der Poldervariante Nord.

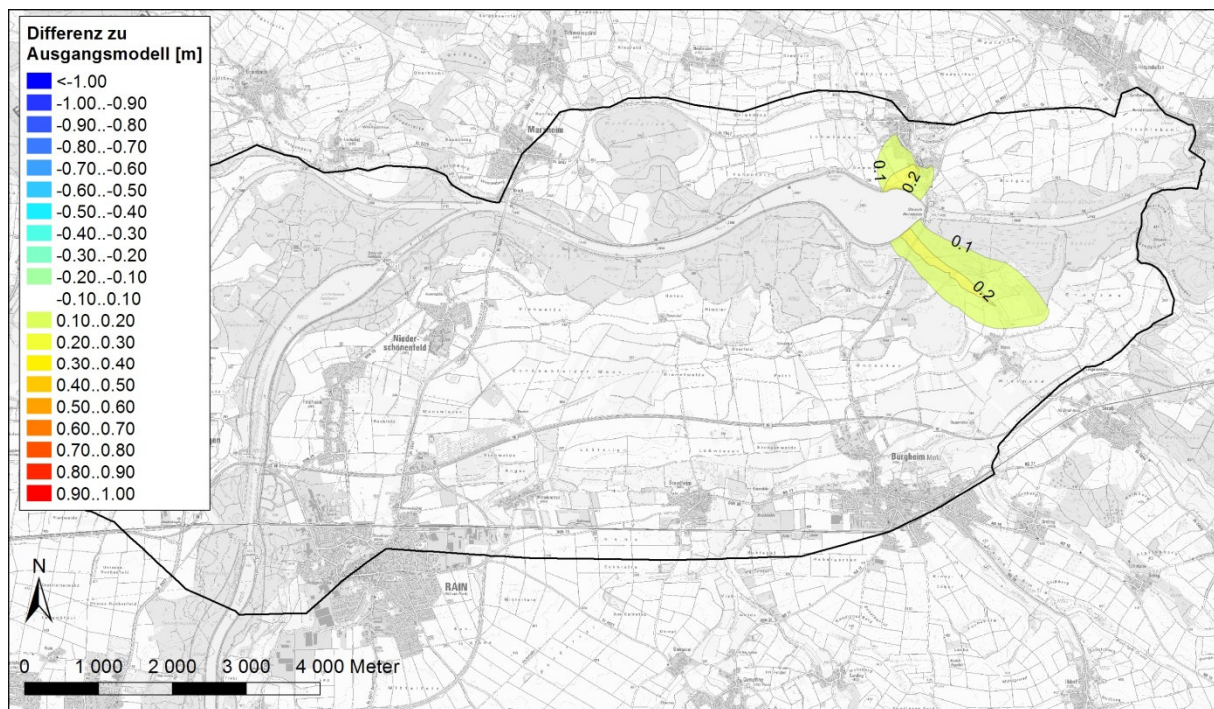


Abbildung 58: Sensitivität des Grundwasserstands bei Mittelwasser auf eine Halbierung der Durchlässigkeit im Gebiet östlich von Bertoldsheim.

Durchlässigkeit Polder Nord	<p>In Abbildung 57 sind die Auswirkungen einer Halbierung der Durchlässigkeit im Bereich des Polders Nord dargestellt. Sowohl Donauseitig, wie auch landseitig steigt der Grundwasserstand an, da das zuströmende Wasser weniger gut nach Osten abgeleitet wird.</p> <p>Wird die Durchlässigkeit östlich des Polders Nord verkleinert, bewirkt dies einen Aufstau im Anstrom aus westlicher Richtung (Abbildung 58). Entlang der Donau wird der Grundwasserstand durch die Donau kontrolliert, weshalb keine Auswirkungen festgestellt werden können.</p>
Leakagewerte Drainagegräben	<p>Auffällig sind die kleinen Auswirkungen der Drainagemenge auf eine Veränderung der Leakagewerte der Drainagegräben nördlich und südlich der Donau (Abbildung 60, Abbildung 62). Wie Abbildung 66 zeigt, wird die Drainagemenge in diesen Gewässern hauptsächlich durch den Leakagewert der Donau bestimmt. Bei hohen Leakagewerten der Gewässer kann zudem die Durchlässigkeit in der Umgebung zum limitierenden Faktor der Drainagemenge werden.</p> <p>Wird der Leakagewert des Drainagegrabens nördlich der Staustufe reduziert, so steigt der Grundwasserstand an (Abbildung 59) und die Drainagemenge im Graben (Abbildung 60) nimmt ab. Dasselbe geschieht bei einer Reduktion des Leakageswerts der Friedberger Ach südlich der Staustufe (Abbildung 61 und Abbildung 62).</p> <p>Wird der Leakagewert der Friedberger Ach im Bereich westlich des Polders Süd erhöht, so steigt dort der Grundwasserstand an, da die Friedberger Ach auf dieser Strecke infiltriert. Die Drainagemenge der Friedberger Ach, welche aus der Exfiltration abzüglich der Infiltration berechnet wird, nimmt dadurch ab.</p>
Leakagewert Donau	<p>Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen den Einfluss einer Erhöhung des Leakagewerts in der Stauhaltung der Donau. Im Osten der Stauhaltung steigt der Grundwasserstand stark an. Dieser Bereich ist durch Dichtwände vom umliegenden Grundwasser getrennt. Im Westteil der Stauhaltung steigt der Grundwasserstand weniger stark an. Der Einflussbereich des Anstiegs beschränkt sich auf das Gebiet zwischen der Donau und den Entwässerungsgräben nördlich und südlich der Staustufe. Diese kontrollieren den Grundwasserstand. Die darin anfallende Drainagemenge steigt stark an.</p>

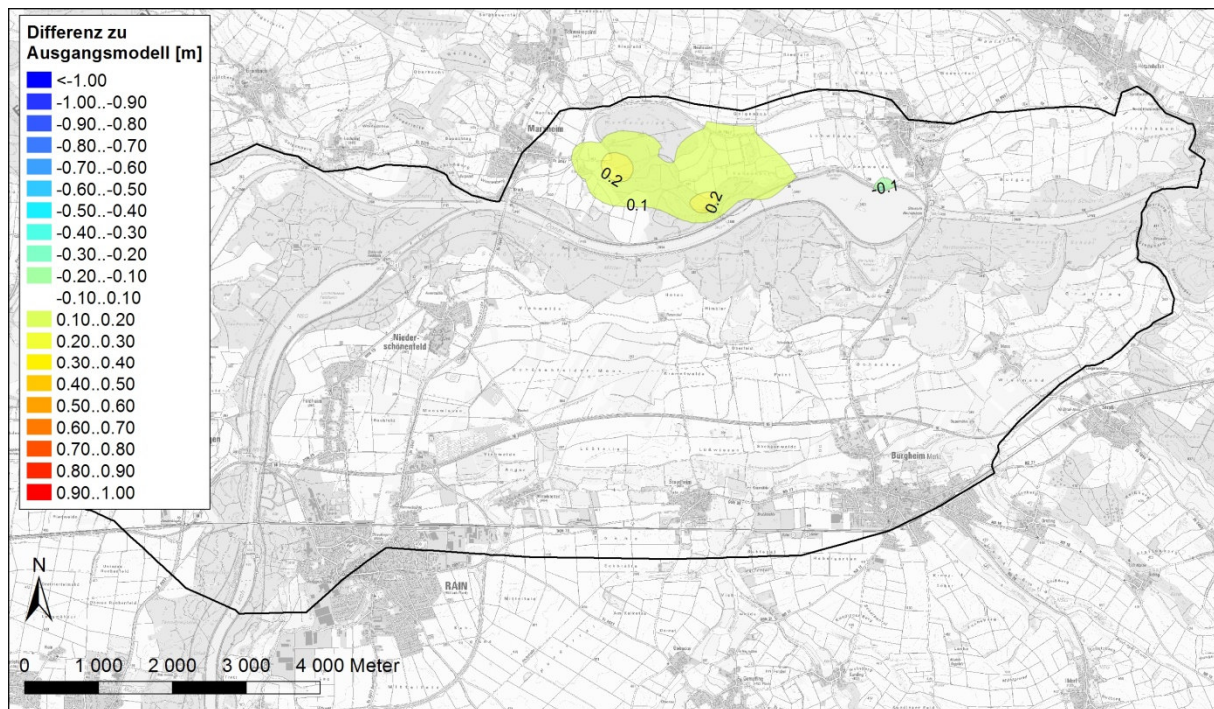


Abbildung 59: Sensitivität des Grundwasserstands bei Mittelwasser auf eine Verteilung des Leakagewerts im Entwässerungsgraben nördlich der Donau.

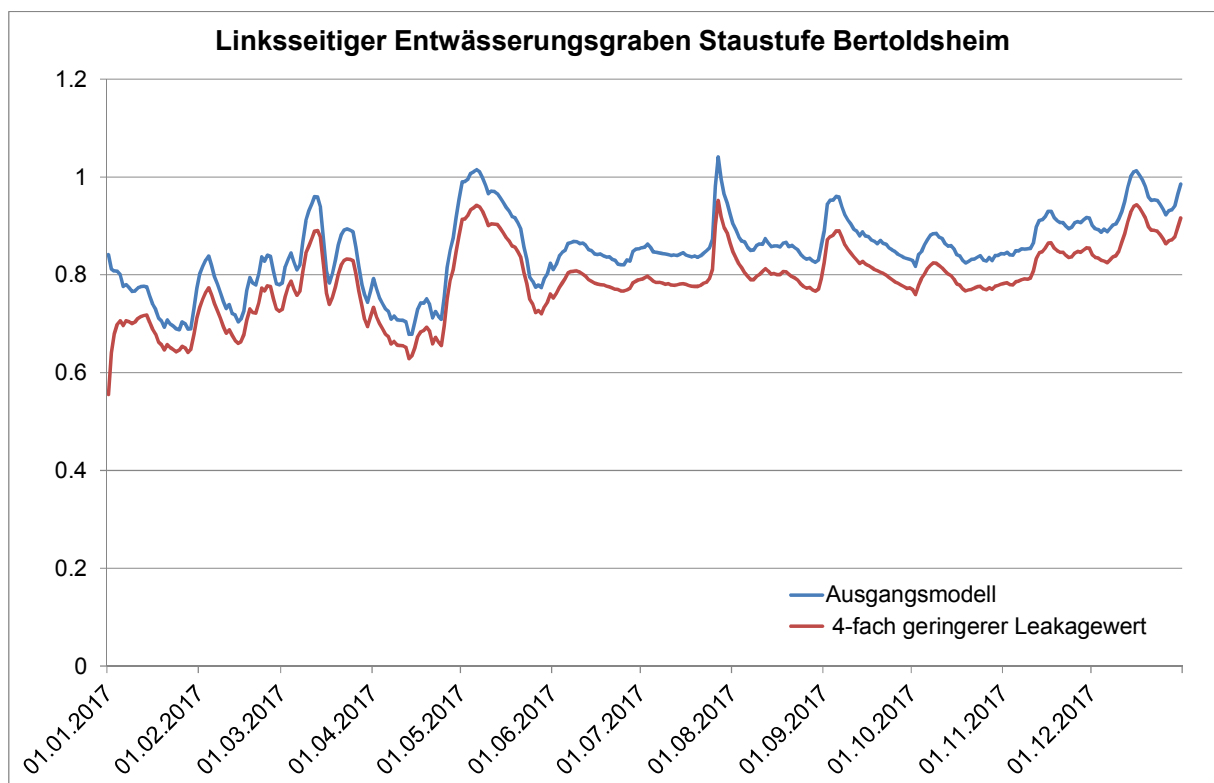


Abbildung 60: Auswirkung einer Verkleinerung des Leakagewerts auf die Drainagemenge im Entwässerungsgraben nördlich der Staustufe Bertoldsheim.

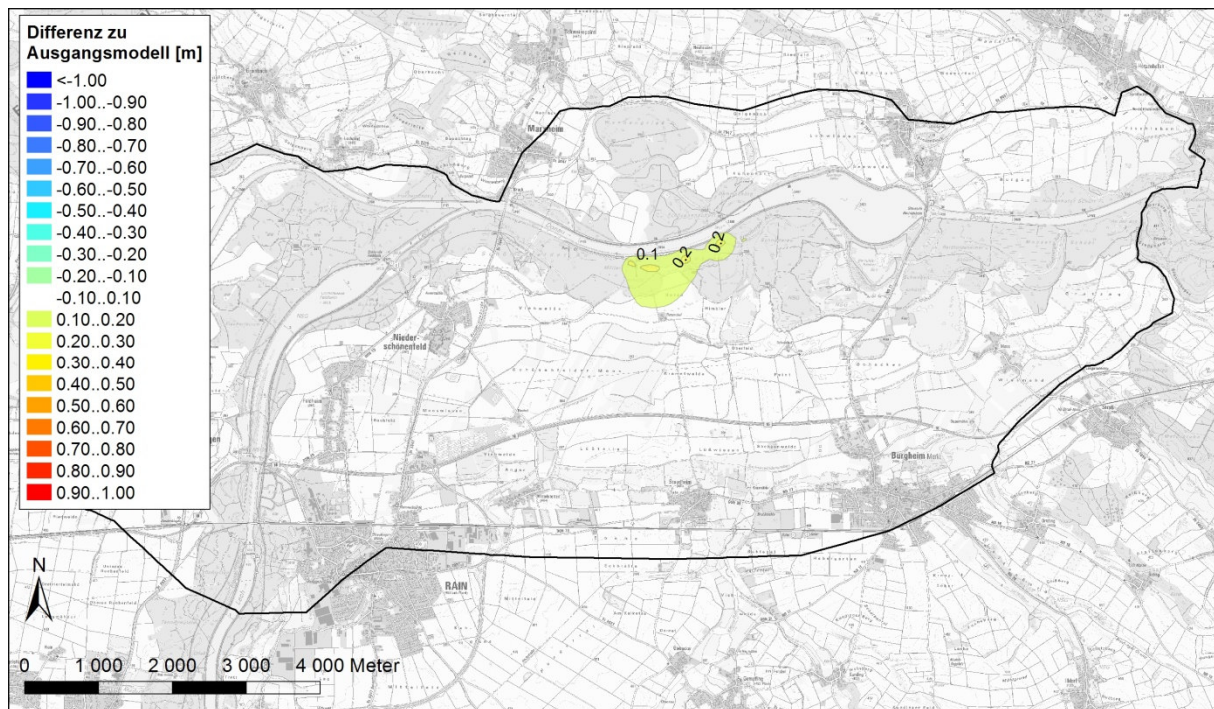


Abbildung 61: Sensitivität des Grundwasserstands bei Mittelwasser auf eine Verteilung des Leakagewerts in der Friedberger Ach südlich der Donau

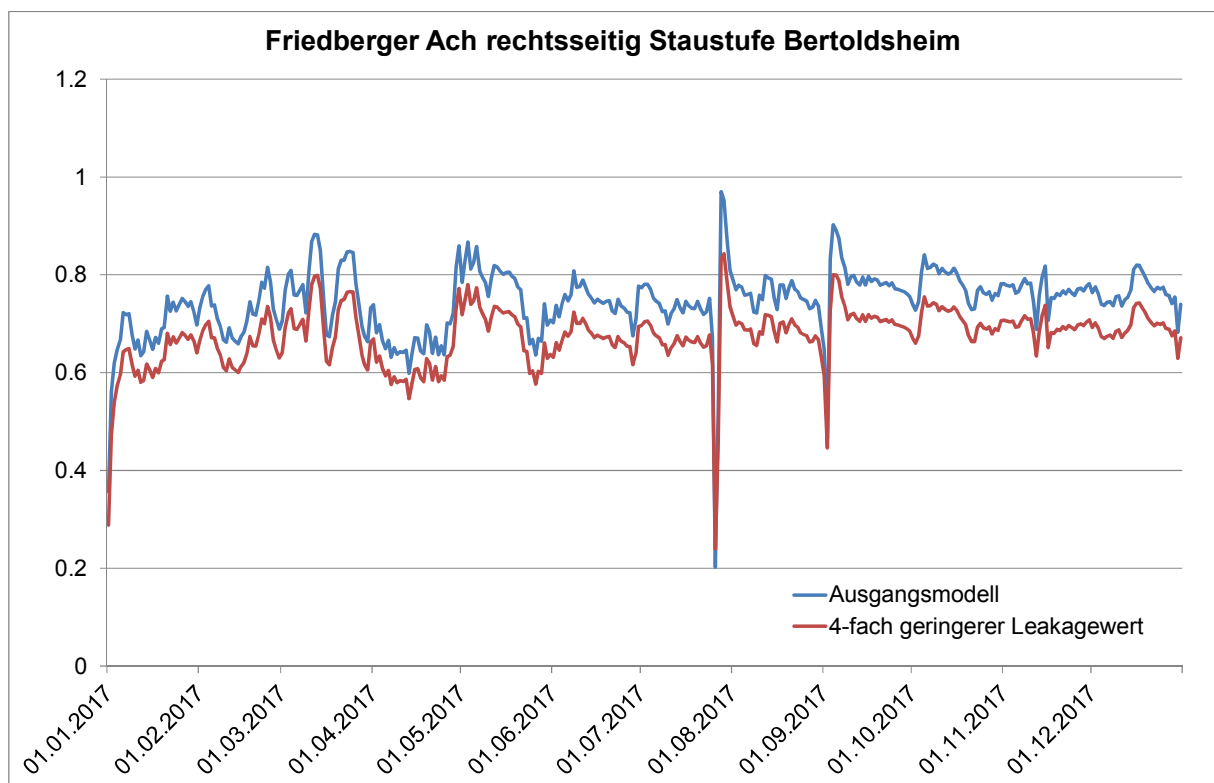


Abbildung 62: Einfluss einer Verkleinerung des Leakagewerts auf die Drainagemenge in der Friedberger Ach südlich der Stauhaltung Bertoldsheim.

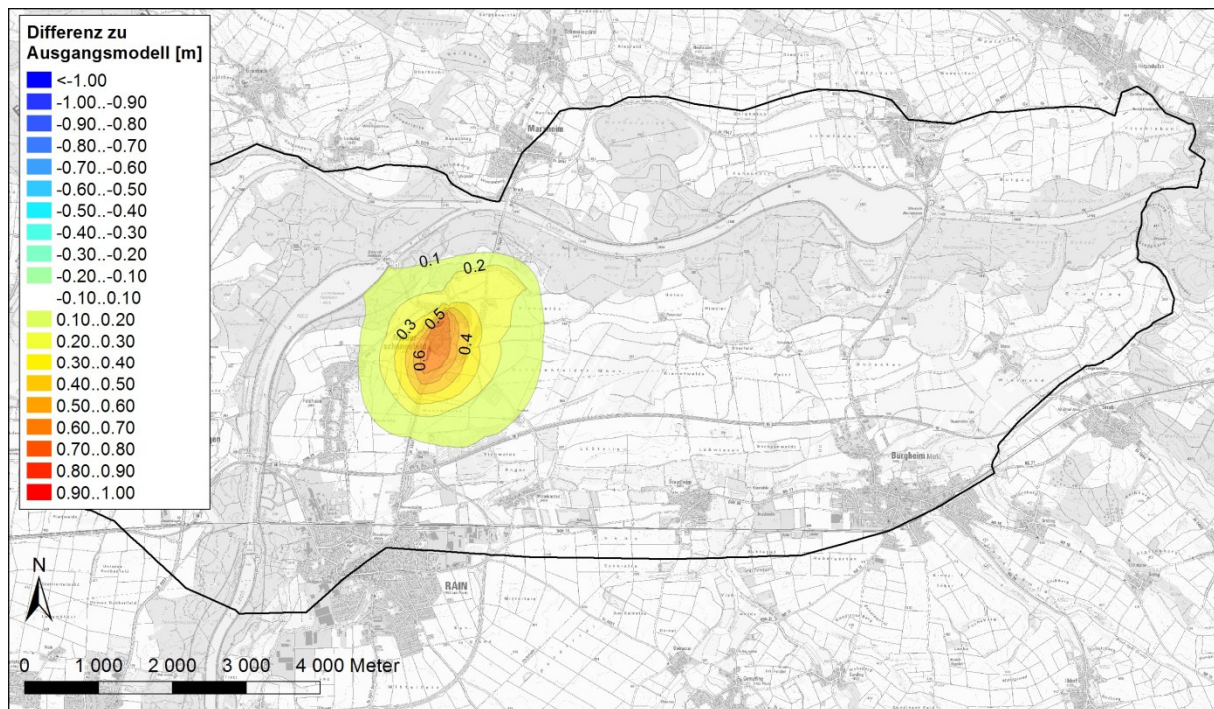


Abbildung 63: Sensitivität des Grundwasserstands bei Mittelwasser auf eine Vervielfachung des Leakagewerts in der Friedberger Ach zwischen Rain und der Nordwestecke der Poldervariante Süd.

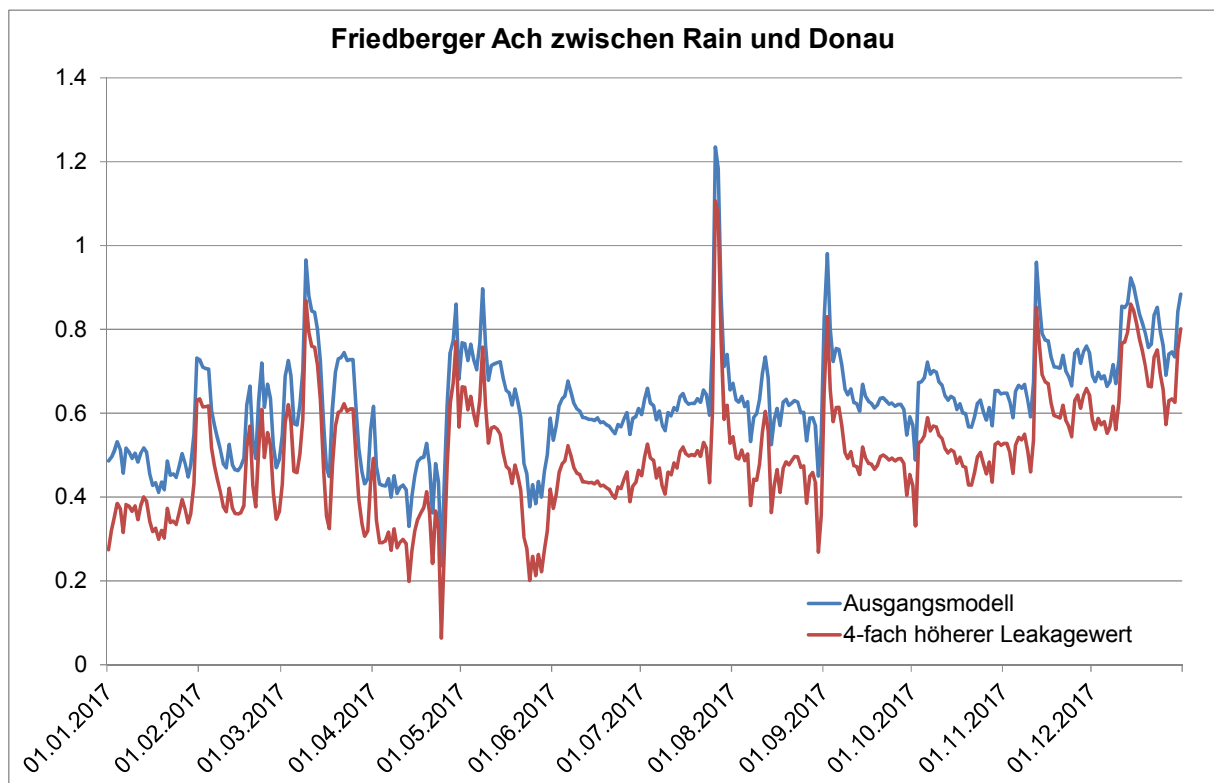


Abbildung 64: Einfluss einer Vergrößerung des Leakagewerts auf die Drainagemenge in der Friedberger Ach zwischen Rain und Nordwestecke der Poldervariante Süd.

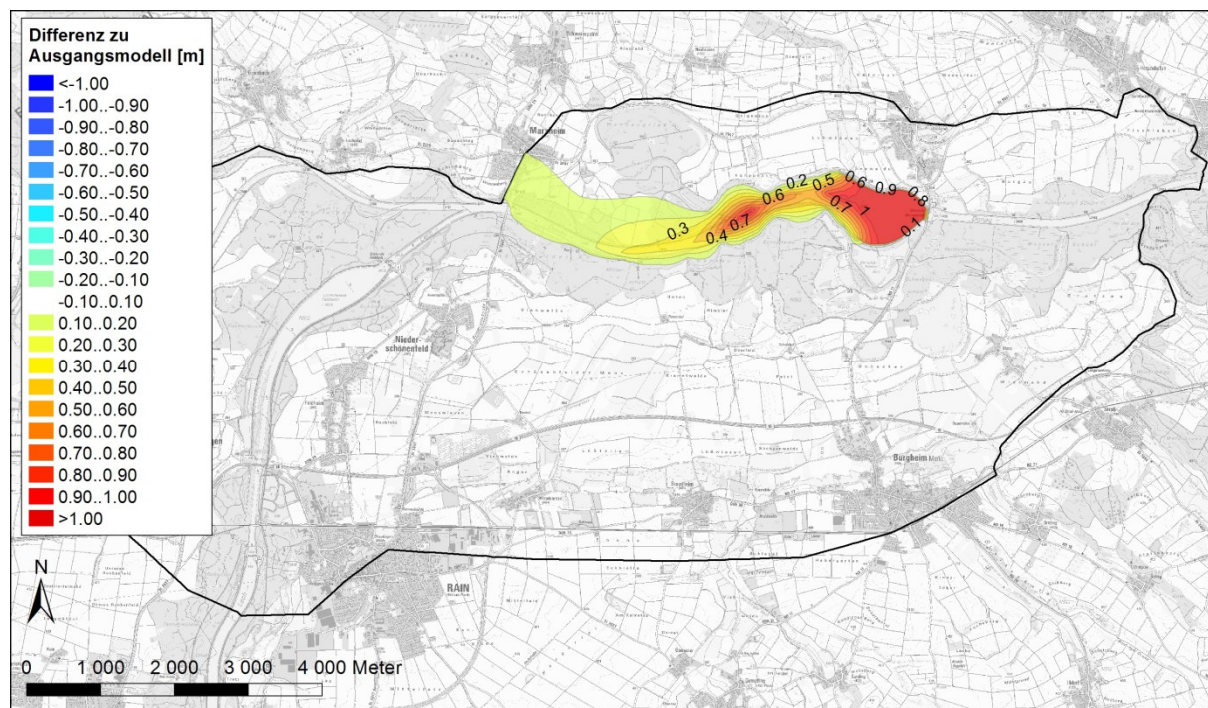


Abbildung 65: Sensitivität des Grundwasserstands bei Mittelwasser auf eine Vervielfachung des Leakagewerts in der Donau zwischen Marxheim und der Staustufe Bertoldsheim.

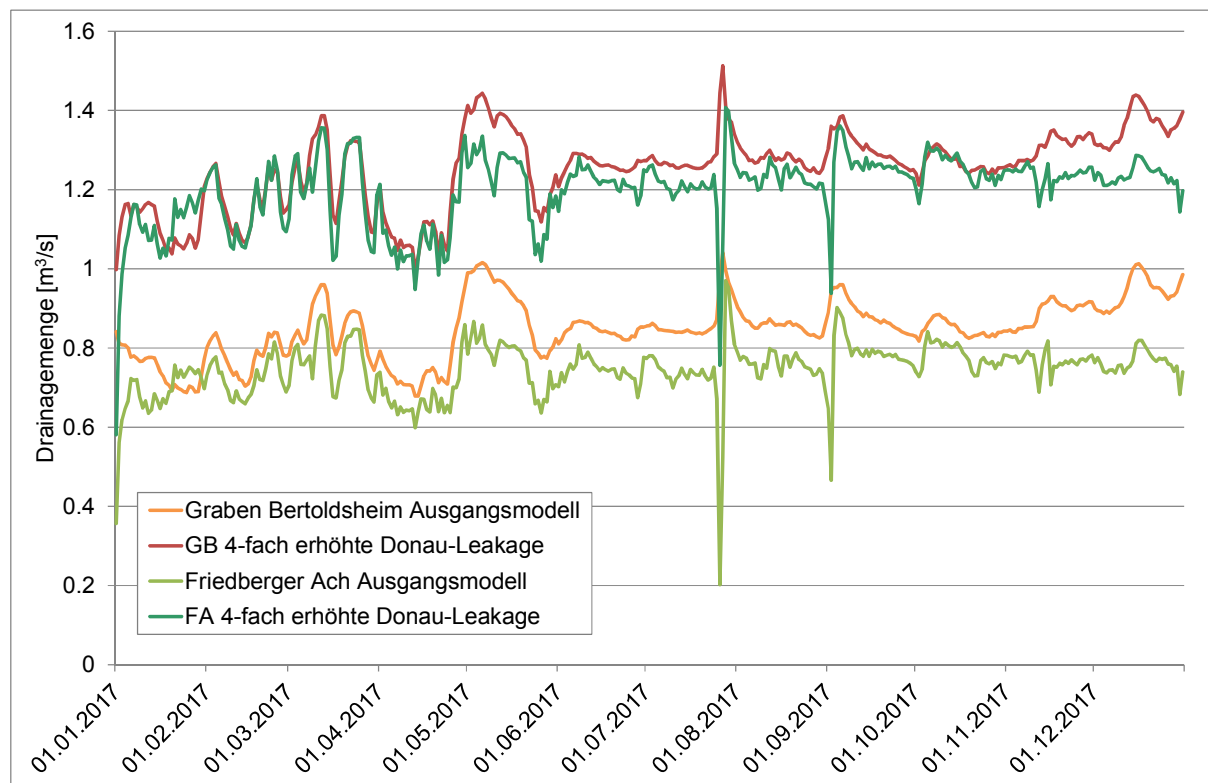


Abbildung 66: Einfluss einer Vergrößerung des Leakagewerts der Donau auf die Drainagemengen in der Friedberger Ach und dem linksseitigen Entwässerungsgraben entlang der Stauehaltung Bertoldsheim.

- Deckschicht** Am Hochwasserdurchgang des Jahres 2013 wurde untersucht, wie sich die Durchlässigkeit der Deckschichten auf die Grundwasserstände auswirkt. Abbildung 67 zeigt den Einfluss einer Verzehnfachung der Deckschichtdurchlässigkeit. Die Auswirkungen beschränken sich auf die Gebiete, in denen kein Gewässer vorhanden ist.
- Bewertung** Dies bedeutet, dass der Grundwasserstand sensitiver auf die Leakagewerte der Gewässer reagiert, als auf die Durchlässigkeit der Deckschichten. Leakagewerte von Gewässern lassen sich jedoch leichter durch Kalibrierung bestimmen.
- Die Infiltration über die Deckschichten wurde in der Wasserbilanz des Hochwasserdurchgangs 2013 (Abbildung 53) dargestellt. Auch aus dieser Darstellung wird der grosse Einfluss der Gewässer gegenüber der Infiltration über die Deckschichten erkennbar.

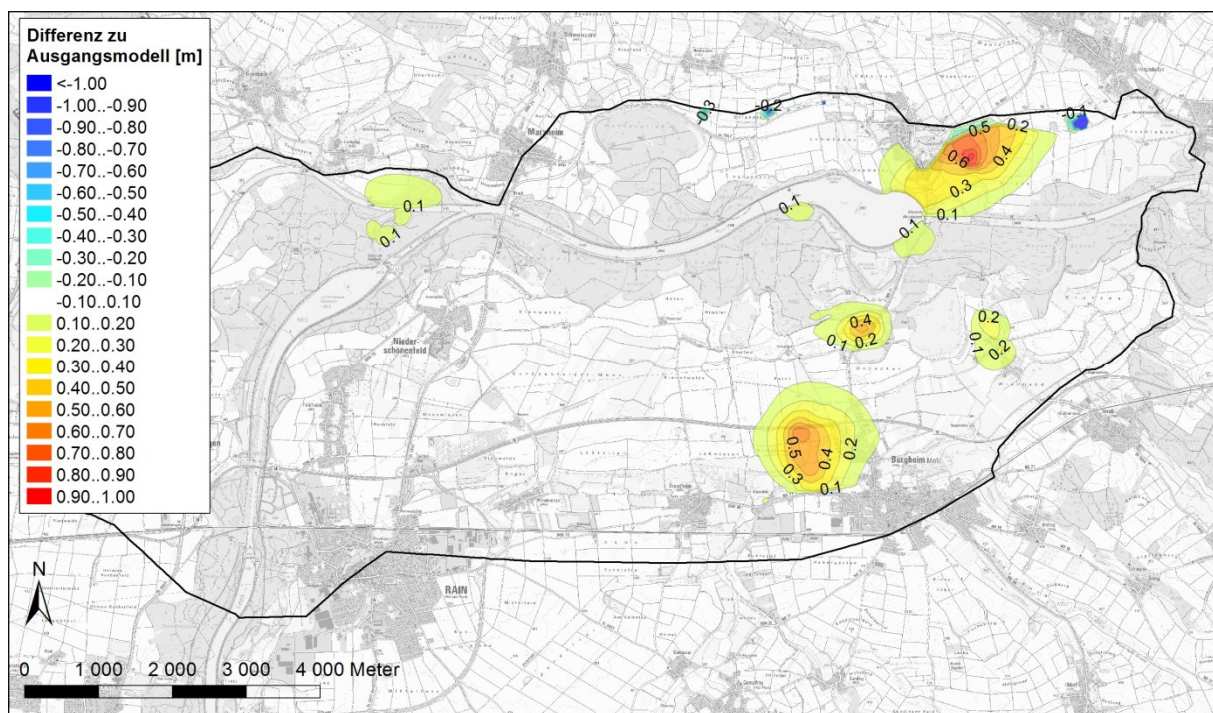


Abbildung 67: Sensitivität des Grundwasserstands bei einer Überflutung während eines Hochwasser auf die Durchlässigkeit der Deckschicht.

## 6 Zusammenfassung

---

Modellaufbau	Vom Schottergrundwasserleiter des Donautals zwischen Genderkingen und Rennertshofen wurde in ein zweidimensionales numerisches Grundwassermodell aufgebaut. Das Grundwassermodell besitzt zeitabhängige Randbedingungen, der Grundwasserspiegel wird als frei, resp. bei hohen Wasserständen als teilgespannt betrachtet. Die Schichtflächen und Randbedingungen wurden aus dem hydrogeologischen Modell übernommen [6]. Mit dem Modell sollen die Auswirkungen der geplanten Flutpoldervarianten quantifiziert werden.
Kalibrierung	<p>Das Grundwassermodell wurde an den gemessenen Grundwasserständen der Zeiträume 2017 und 2018 - 2019 kalibriert.</p> <p>Bei der Kalibrierung wurden die Durchlässigkeit des Untergrunds und die Sohlendurchlässigkeit der Gewässer variiert. Dabei wurde ein kombiniertes Verfahren aus manueller und automatischer Kalibrierung eingesetzt. Beim automatischen Verfahren mussten kürzere Zeiträume und eine beschränkte Zahl von Parametern verwendet werden, um die Rechenzeit zu begrenzen. Zur Kalibrierung wurden ebenfalls die Abflussmengen von Drainagegewässern herangezogen.</p>
Modellgenauigkeit	Mit der Kalibrierung konnte erreicht werden, dass die berechneten Grundwasserstände im Mittel nur noch 12 bis 13 cm von den gemessenen Grundwasserständen abweichen. Dies entspricht einem mittleren relativen Fehler von ca. 0.9% nach DVGW W 107. Der Median der Abweichungen liegt bei 11 cm. Eine gute Übereinstimmung wurde auch mit den Abflüssen der Drainagegewässer erzielt.
Modelltest	Das kalibrierte Modell wurde an Messdaten des Jahres 2013 getestet. Es zeigte sich, dass das Modell in diesem Zeitraum eine vergleichbare Genauigkeit erreicht wie in den Kalibrierungszeiträumen.
Modellresultate	Mit Hilfe des kalibrierten Modells wurden die Grundwasserverhältnisse im Gebiet zwischen Genderkingen und Rennertshofen visualisiert. In der Wasserbilanz machen die Infiltration aus der Donau und die Exfiltration in benachbarte Entwässerungsgräben den grössten Anteil aus.
Sensitivitäten	Die Abhängigkeit des Modells auf verschiedene Parameter wurde untersucht. Es wurden insbesondere Parameter variiert, welche von Bedeutung für die Anwendungsgebiete des Modells sind.



## 7 Literatur

---

- [1] Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (2016), Geländemodell DGM 1  
<http://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/gelaende.html>
- [2] Bayrisches Landesamt für Umwelt (2009), Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500'000
- [3] John Doherty (2007): PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual 5<sup>th</sup> Edition, *Watermark Numerical Computing*.
- [4] Diersch H-J. G. (2014): FEFLOW, Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, *Springer Verlag*.
- [5] DVGW (2016): Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten, *Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 107 (A)*.
- [6] ARGE Simultec – Geobüro Ulm (2019): Grundwassermodell Flutpolder Bertoldsheim: Hydrogeologisches Modell und Modellkonzepte. *Im Auftrag des WWA Ingolstadt*
- [7] ARGE SKI – Simultec (2019): Verbesserung des Hochwasserschutzes in der Grossen Kreisstadt Donauwörth, Grundwassermodell. *Im Auftrag des WWA Donauwörth*
- [8] Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner (2007): Grundwassermodell Genderkingen/Oberndorf, Numerisches Grundwassermodell. *Im Auftrag des Zweckverband Fränkischer Wirtschaftsraum*.