



Anlage 7.2

Grundwassermodell Flutpolder Eltheim und Wörthhof

Modellaufbau, Kalibrierung und Validierung
November 2017

Ergänzungen:

Modellpflege 2010 - 2017: November 2018

Modellpflege 2018 – 2021: Dezember 2021



Arbeitsgemeinschaft Simultec – tewag

Simultec AG, Hardturmstr. 261, CH-8005 Zürich, +41 44 563 86 20, www.simultec.ch

tewag GmbH, Blumenstr. 24, D-93055 Regensburg, +49 941 208633-60, www.tewag.de

Grundwassermodell Flutpolder Eltheim und Wörthhof
Modellaufbau, Kalibrierung und Validierung

Inhalt

1	Einleitung, Ziel	1
2	Modellaufbau	3
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	Modellparameter	6
2.3	Erweiterungen des Modellkonzepts	6
2.3.1	Karstzufluss.....	6
2.3.2	Bewässerung	7
2.3.3	Berücksichtigung des Oberflächenabflusses	7
2.3.4	Berücksichtigung gespannter Verhältnisse	8
3	Kalibrierung	10
3.1	Kalibrierungsmethode.....	10
3.1.1	Verfahren	10
3.1.2	Bewertungskriterien.....	10
3.2	Instationäre Kalibrierung mit PEST	11
3.2.1	Vorgehen.....	11
3.2.2	Zonierung für die Kalibrierung mit PEST.....	12
3.2.3	Resultate der automatischen Kalibrierung	14
3.2.4	Kovarianzanalyse	15
3.3	Manuelle Kalibrierung.....	18
3.3.1	Vergleich mit den Messdaten des Grundwasserspiegels	19
3.3.2	Vergleich der Drainagemengen an den Schöpfwerken ...	34
3.4	Resultierende Modellparameter.....	37
3.5	Resultierende Strömungsverhältnisse	41
3.6	Wasserbilanz.....	43
4	Validierung an weiteren Datensätzen	45
4.1	Grundwasserspiegeldaten der Jahre 1990 bis 1996	45
4.2	Einbezug von Abflussmessungen der Stichtage	51
5	Sensitivitäten	53
5.1	Zielsetzung.....	53
5.2	Randbedingungen in der Auestufe	53
5.3	Donausohle und Dichtwand.....	56
6	Zusammenfassung	59
7	Modellpflege Zeitraum 2010 - 2017	60
7.1	Anlass	60
7.2	Modellanpassungen	60
7.3	Validierung des Modells	63
8	Modellpflege Zeitraum 2018 – 2021	67
8.1	Einleitung	67
8.2	Datenbasis	67



8.3	Nachkalibrierung 2018 – 2019	73
8.3.1	Modellanpassungen	73
8.3.2	Kalibrierungsgenauigkeit	76
8.4	Validierung 2019 – 2021	80
9	Literatur.....	84

1 Einleitung, Ziel

Situation	<p>Der Ministerrat hat das Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz beauftragt, das Flutpolderprogramm an der Donau mit den neun Standorten Leipheim, Helmeringen, Neugeschüttwörth, Bertoldsheim, Riedensheim, Großmehring, Katzau, Wörthhofgroß und Oberauer Schleife fortzuführen. Bei der Umsetzung des Flutpolderprogramms sind die Flutpolder Wörthhof (Baubeginn frühestens ab dem Jahr 2031) und Bertoldsheim (Baubeginn frühestens ab dem Jahr 2032) zeitlich als letztes zu realisieren.</p>
Auftrag	<p>Zur Quantifizierung des Einflusses auf die Grundwasserverhältnisse wurden ein hydrogeologisches Modell und darauf aufbauend ein Grundwassermodell für den Einflussbereich der Flutpolder Eltheim und Wörthhof erstellt.</p>
Ziele	<p>Mit dem Grundwassermodell sollen folgende Ziele verfolgt werden:</p> <ul style="list-style-type: none">- Berechnung der Auswirkungen des Flutpolderbetriebs auf die Grundwasserstände.- Quantifizierung der Auswirkungen auf das Trinkwasserwerk Giffa.- Optimierung der baulichen Massnahmen.- Unterstützung im Genehmigungsverfahren und der Öffentlichkeitsarbeit.- Quantifizierung der Auswirkungen der Staustufe Geisling auf die Grundwasserstände.
Berichtsumfang	<p>Die Arbeiten werden mit drei Teilberichten dokumentiert:</p> <ul style="list-style-type: none">- Hydrogeologisches Modell und Modellkonzepte- Modellaufbau und Kalibrierung- Modelleinsatz <p>Der vorliegende Teilbericht beschreibt den Modellaufbau und die Kalibrierung des Modells.</p>

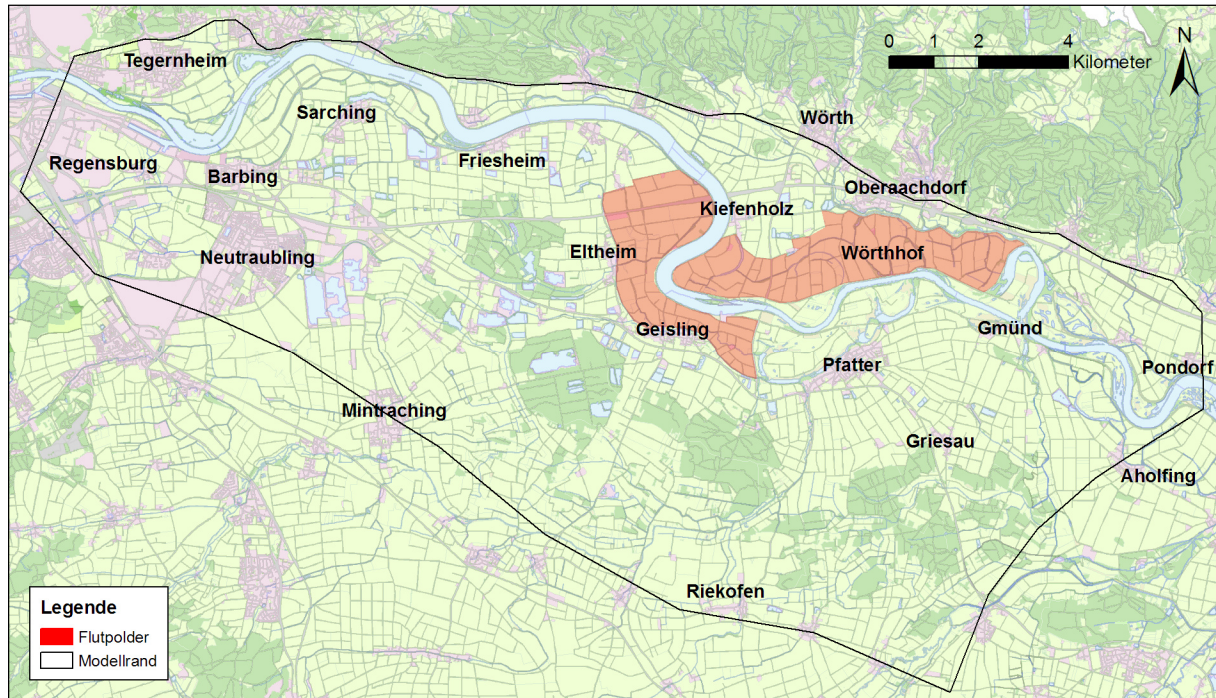


Abbildung 1: Situation mit Modellumriss und Planungsbereiche der Flutpolder.

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 gesamte Modellgebiet wurde in 73'808 Dreieckselemente mit 37'103 Knoten unterteilt. Bei einer Modellfläche von etwa 206 km² bedeutet dies eine durchschnittliche Elementfläche von 2'800 m² oder eine charakteristische Seitenlänge von etwa 75 m. Das Modellnetz wurde entlang der Entnahmestellen und der Oberflächengewässer feiner, im übrigen Gebiet gröber unterteilt. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Finite-Elemente-Netz. Für die zeitliche Diskretisierung wurden im Rahmen der Kalibrierung Tagesschritte gewählt.

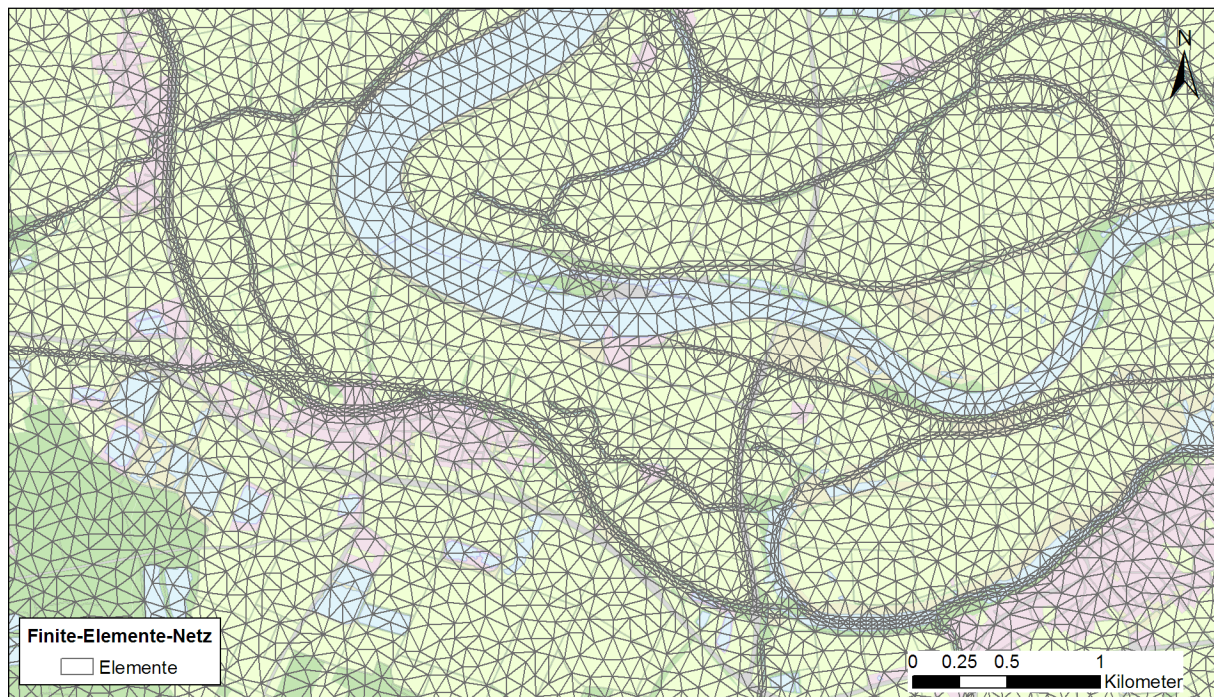


Abbildung 2: Einteilung in finite Elemente in einem Ausschnitt des Modells

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.

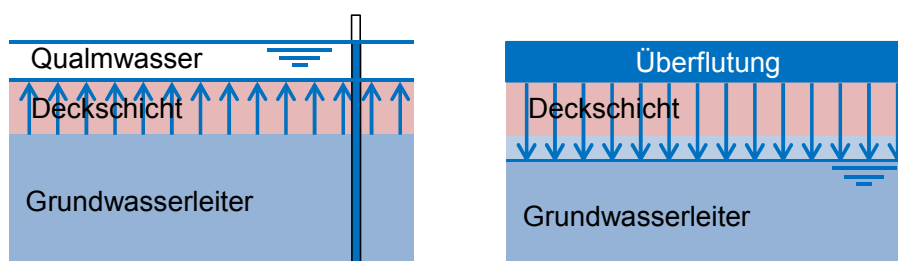


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Situation bei einem Grundwasserpotenzial über der Terrainhöhe (links) und bei Überflutung der Auebereiche.

2.2.2 Randbedingungen

Umsetzung Modellkonzept	Die Randbedingungen des Grundwassermodells wurden gemäss den in [7] beschriebenen Modellkonzepten für den Zeitraum von 1970 bis 2014 aus den Grundlagedaten berechnet. Daraus wurden für die einzelnen Berechnungszeiträume Dateien erzeugt, welche in FEFLOW [4] eingelesen werden können.
Randbedingung	Qualmwasser und Überflutung wurden im Modell mit einer Cauchy-Randbedingung nachgebildet, da die Deckschicht einen Widerstand gegen die Durchströmung ausübt. Räumlich betrifft es unterschiedliche Bereiche. Während eine Überschwemmung zwischen der Donau und den Deichen stattfinden kann, ist Qualmwasser vor allem in den tiefliegenden Bereichen hinter den Deichen zu erwarten.
Überflutung	Mit Hilfe der Programmierschnittstelle IFM wurde FEFLOW so erweitert, dass die Cauchy-Randbedingung in den potentiellen Überflutungsflächen eingeschaltet wird, sobald der Donauwasserspiegel über die Topografie ansteigt. Fällt er wieder darunter, so wird die Randbedingung wieder ausgeschaltet.
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.

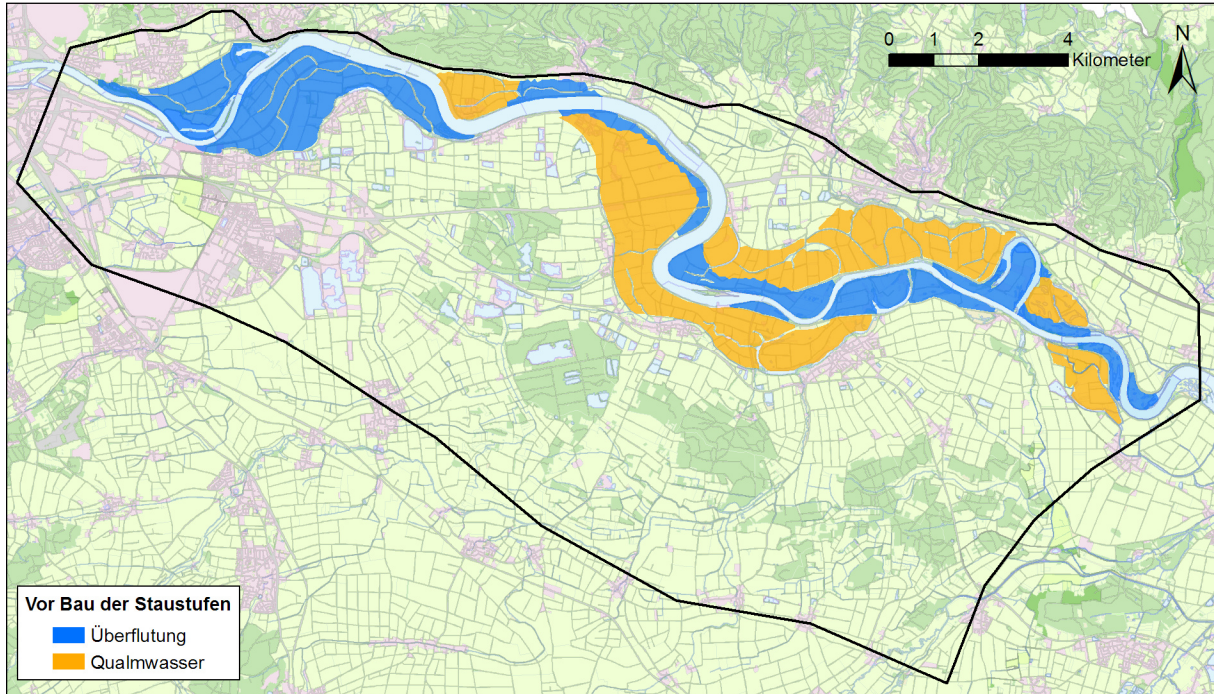


Abbildung 4: Bereiche mit Cauchy-Randbedingung zur Berücksichtigung von Überflutungen und Qualmwasser im Zustand vor dem Bau der Staustufen

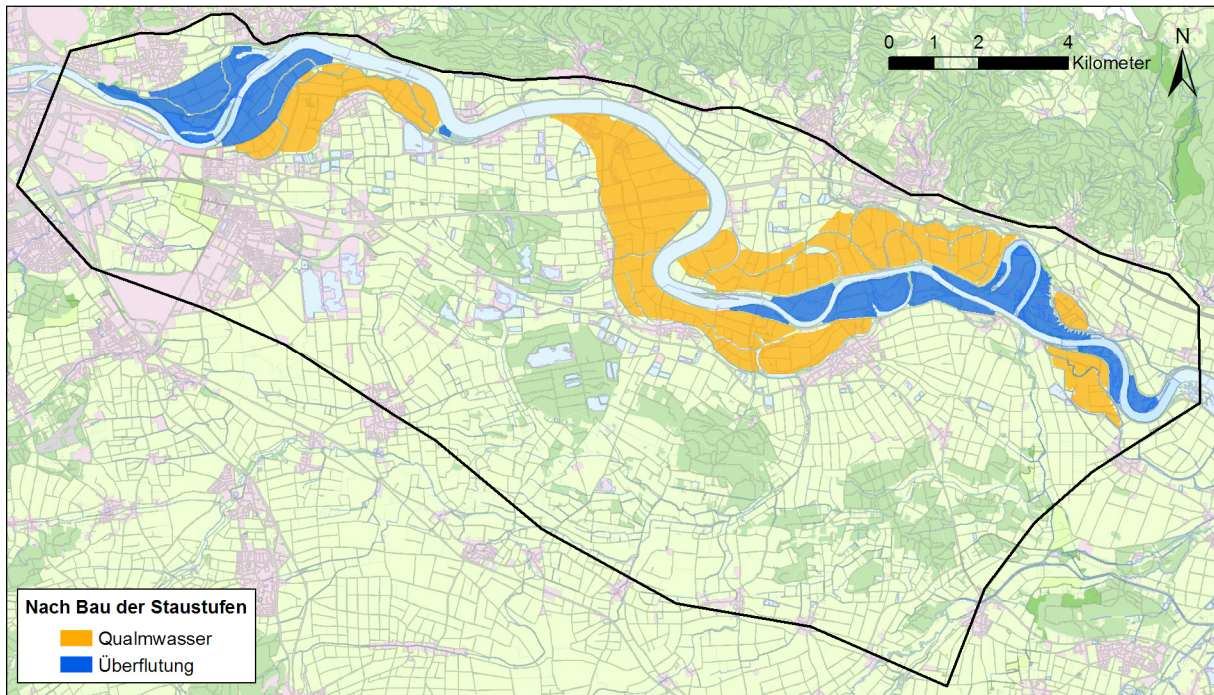


Abbildung 5: Bereiche mit Cauchy-Randbedingung zur Berücksichtigung von Überflutungen und Qualmwasser im Zustand nach dem Bau der Staustufen

Einfluss der Stauhaltungen

Beim Bau der Staustufen wurden neue Deiche angelegt, welche die Überflutungsbereiche verkleinern. Daher unterscheiden sich die in den Modellen vorgegebenen Bereiche für potentielle Überflutungen und Qualmwasseraustritte (Abbildung 4 und Abbildung 5) für die Zustände vor und nach dem Bau der Staustufen.

2.2.3 Modellparameter

Durchlässigkeit

Der Grundwasserleiter besteht im Modellgebiet aus fluvioglazialen Ablagerungen und Flussschottern [2]. Aufgrund der bekannten Durchlässigkeitsversuche kann mit einer Durchlässigkeit von etwa 5×10^{-4} bis 5×10^{-3} m/s gerechnet werden. Als Anfangswert der Durchlässigkeit wurde für die quartären Flussschotter ein Wert von 3×10^{-3} m/s, für die fluvioglazialen Ablagerungen ein Wert von 1×10^{-3} m/s vorgegeben.

Porosität

Für die Porosität im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels (Speicherkoeffizient) wurde ein Anfangswert von 15% verwendet

2.3 Erweiterungen des Modellkonzepts

2.3.1 Karstzufluss

Seitenzufluss

Am nordwestlichen Modellrand liegen unter den quartären Flussschottern Einheiten des Malm. Es ist damit zu rechnen, dass diese verkarstet und wasserführend sind. Der Seitenzufluss wurde deshalb an dieser Stelle um einen Faktor 20 erhöht.

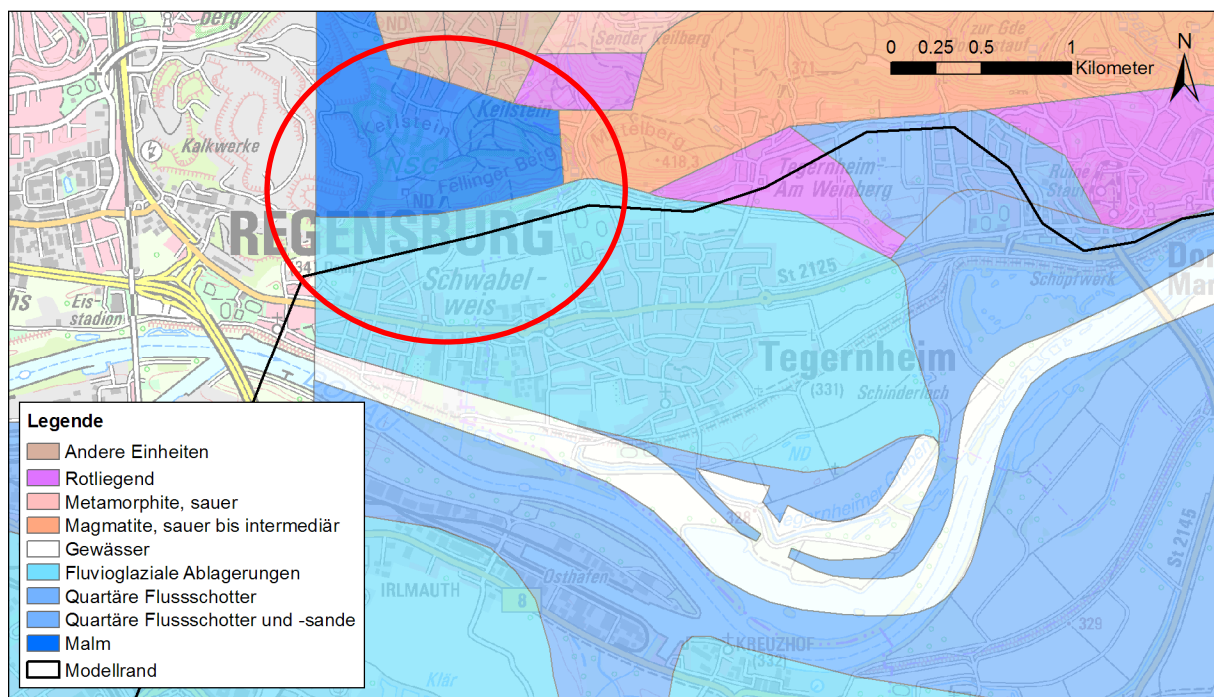


Abbildung 6:

Hydrogeologische Einheiten im Gebiet von Tegernheim (hydrogeologische Karte von Bayern 1:500 000 [2])

2.3.2 Bewässerung

Beobachtung	In Gebieten mit Bewässerungsbrunnen werden heute typischerweise jeweils im Frühsommer starke Grundwasserabsenkungen beobachtet. Bei der Kalibrierung wurde festgestellt, dass dies in den 1970er Jahren noch nicht der Fall war.
Umsetzung	Für die Bewässerung wurde deshalb ausgehend von einem Zustand ohne Bewässerung im Jahr 1967 eine lineare Zunahme der bewässerten Fläche bis ins Jahr 1997 angenommen. Danach wurde die bewässerte Fläche als konstant betrachtet.

2.3.3 Berücksichtigung des Oberflächenabflusses

Beobachtung	<p>Bei Starkniederschlägen im Sommer kann im ganzen Modellgebiet ein Anstieg des Grundwasserspiegels beobachtet werden (zum Beispiel im Juli 1997, siehe Abbildung 7), obwohl dann gemäss dem verwendeten Bodenspeichermodell der gesamte Niederschlag vom Bodenspeicher aufgenommen werden könnte.</p> <p>Die Abweichung kann mit einer Infiltration aus Entwässerungsgräben erklärt werden, welche nach Starkniederschlägen Wasser führen. Denkbar ist auch, dass das Bodenspeichermodell extreme Niederschläge nicht korrekt behandelt.</p>
-------------	--

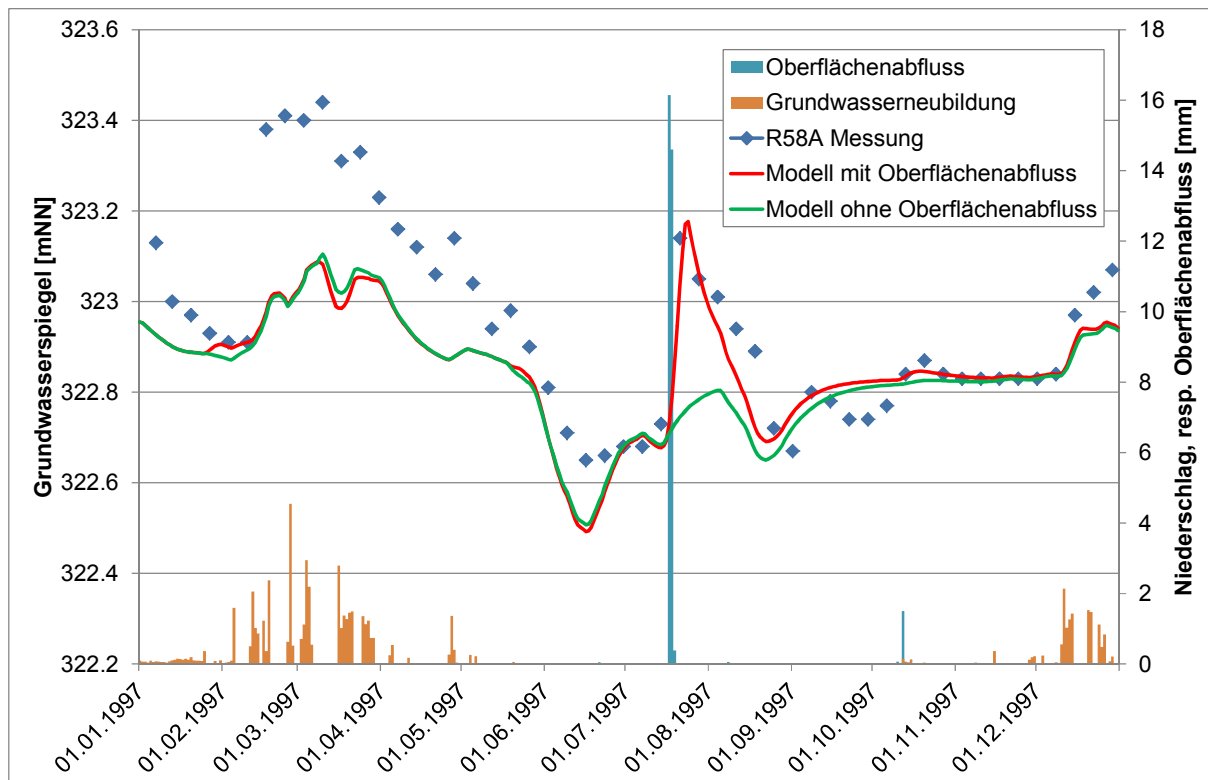


Abbildung 7: Reaktion des Grundwasserspiegels in der Messstelle R58A auf das Niederschlagsereignis im Juli 1997

Umsetzung

Im Modell wurden deshalb Drainagegräben mit grossem oberflächlichem Einzugsgebiet mit einem zeitabhängigen Wasserspiegel berücksichtigt. Der Wasserspiegel wurde aus dem Oberflächenabfluss, der Gewässerbreite und dem Längsgefälle unter Annahme eines Trapezquerschnittes mit der Abflussformel nach Strickler-Manning berechnet. Die zeitabhängig berücksichtigten Gewässer sind in Abbildung 8 dargestellt.

Da dies zur Nachbildung der beobachteten Reaktion nicht ausreicht, wurde zusätzlich bei Regenereignissen mit Oberflächenabfluss grösser als 5 mm angenommen, dass der darüber hinausgehende Abfluss zur Grundwasserneubildung beiträgt.

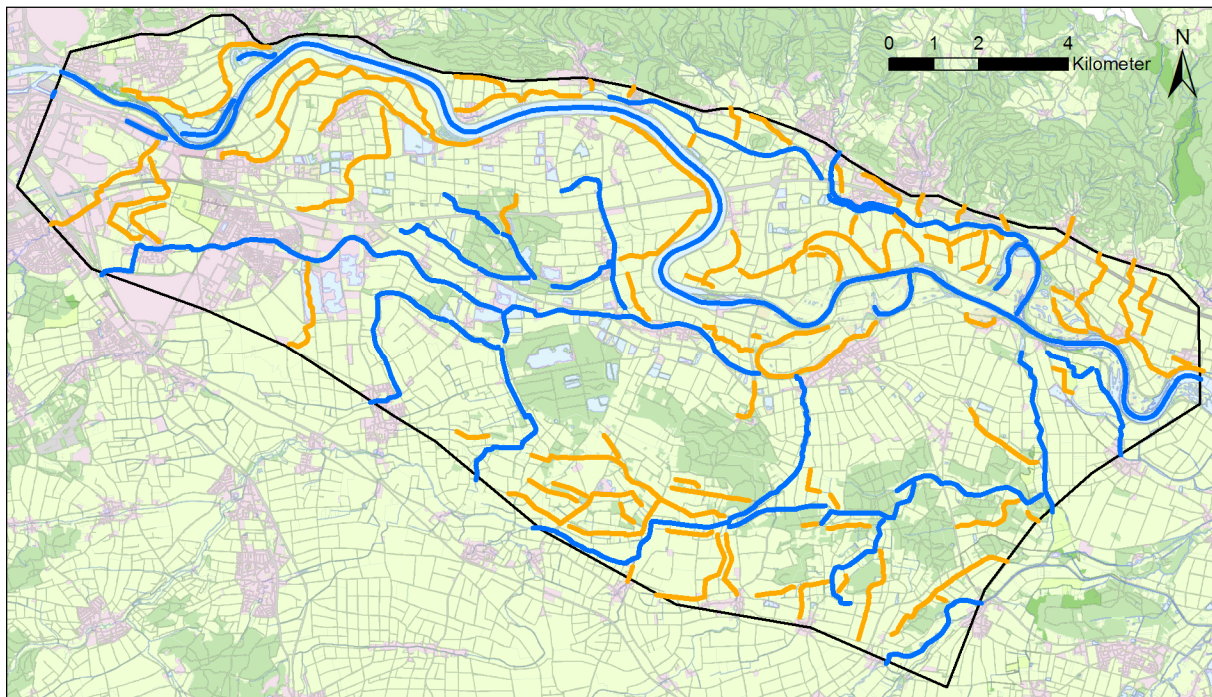


Abbildung 8:

Im Modell mit konstantem und zeitabhängigem Wasserspiegel berücksichtigte Gewässer.

2.3.4 Berücksichtigung gespannter Verhältnisse

Deckschicht

Befindet sich im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels die Unterkante der Deckschicht, so kann angenommen werden, dass bei Erreichen der Deckschicht kurzzeitig gespannte Verhältnisse auftreten. Dieses Verhalten wurde mit einer Erweiterung von FEFLOW berücksichtigt. Dabei erhält Speicherkoeffizient einen tieferen Wert, wenn der Grundwasserspiegel über die Deckschichtunterkante ansteigt. Für die Berechnung müssen die Deckschichtumrisse, die Deckschichtunterkante und der im gespannten Fall zu verwendende Speicherkoeffizient vorgegeben werden.

Speicherkoeffizient

Im Rahmen der Kalibrierung wurde der bei Erreichen der Deckschicht zu verwendende Speicherkoeffizient variiert. Es stellte sich heraus,

dass eine Reduktion auf etwa 4% genügt, um die beobachteten Grundwasserspiegelschwankungen richtig nachzubilden. Der Effekt wird im Kapitel 0 nochmals ausführlich erläutert. In Abbildung 9 ist die im Modellvorgegebene Ausdehnung der Deckschicht dargestellt. Sie entspricht dem Bereich mit einer Deckschichtmächtigkeit grösser als ein Meter.

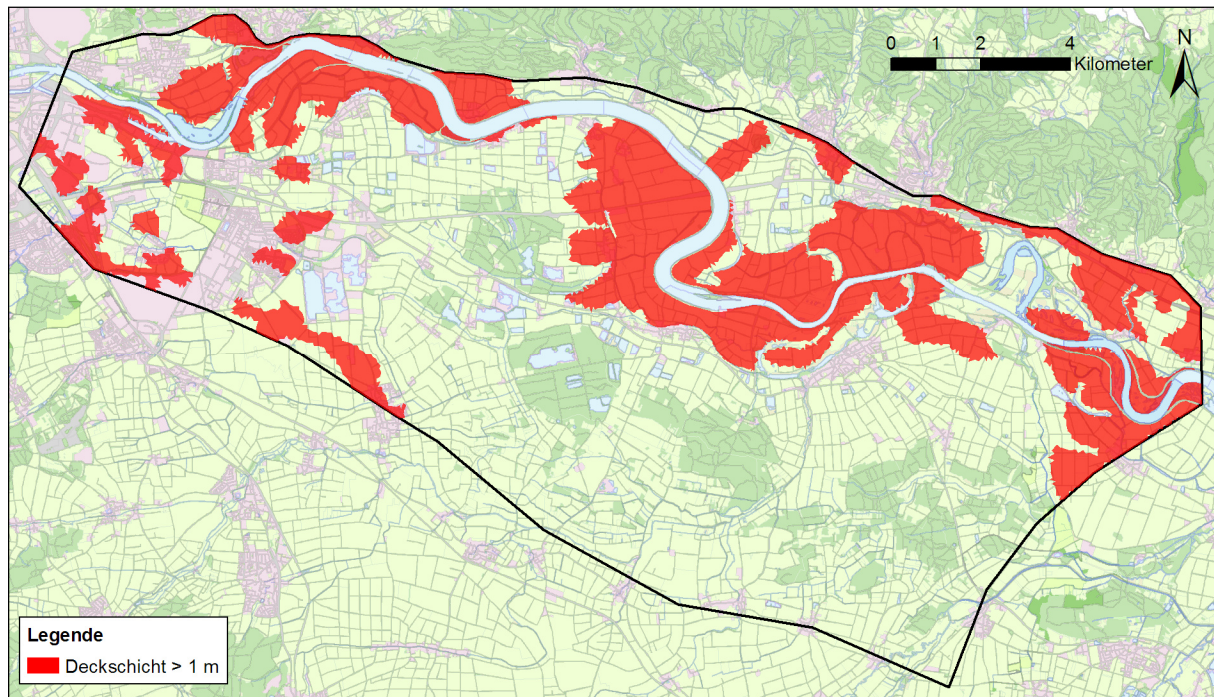


Abbildung 9: Bereiche, in denen die Deckschicht eine Mächtigkeit grösser als 1 m aufweist.

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 mehrmals 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">- RMSE: Root mean square deviation (Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung)- Mittel: Mittelwert der Absolutwerte der Abweichungen- Median: Median der absoluten Abweichungen
Kalibrierungsziel	Als Kalibrierungsziel wurde ein RMSE von 40 cm, ein Mittelwert von 30 cm und ein Median von 20 cm angestrebt. Eine genauere Kalibrierung ist theoretisch zwar möglich, würde aber eine den Modellzielen nicht angemessene Einführung kleinräumiger Durchlässigkeitsunterschiede erfordern. Da die Qualität der Messdaten heute nicht mehr überprüfbar ist, besteht zudem die Gefahr, dass das Modell auf Messfehler gefittet würde.

Zusatzinformationen Bei der Kalibrierung mit PEST wurden zusätzlich die Drainagemengen in den Einzugsbereichen der Schöpfwerke mit deren Fördermengen verglichen. Bei der manuellen Kalibrierung wurde die Übereinstimmung mit den Schöpfmengen nur visuell beurteilt. Bei der manuellen Kalibrierung wurde zudem 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.
Systemzustände	<p>Wird eine automatische Kalibrierung für mehrere Zeitabschnitte einzeln durchgeführt, so resultieren aus jeder Kalibrierung unterschiedliche Modellparameter. Dies ist besonders in Situationen der Fall, bei denen sehr unterschiedliche Systemzustände vorliegen.</p> <p>Da die Durchlässigkeit des Untergrundes im Generellen unveränderlich ist, kann dies nicht akzeptiert werden. Deshalb wurden im vorliegenden Fall die Modelle zweier Zeiträume gemeinsam kalibriert. Die Durchlässigkeiten der beiden Modelle wurden miteinander gekoppelt.</p>
Zeiträume	<p>Für die automatische Kalibrierung wurden folgende Zeiträume verwendet:</p> <p>1.1.1976 – 31.12.1976</p> <p>1.1.1988 – 31.12.1988</p> <p>Das Jahr 1976 umfasst einen Zeitraum vor dem Bau der Staustufen. Zu diesem Zeitpunkt waren im untersuchten Donauabschnitt noch keine Dichtwände und Schöpfwerke vorhanden. Das Jahr 1988 umfasst einen Zeitraum zwischen dem Bau der Staustufen Geisling und Straubing. Vom Jahr 1976 unterscheidet es sich zudem durch ein ziemlich grosses Hochwasser im Frühjahr.</p>
Messdaten	<p>Bei der Kalibrierung wurde die Summe der quadratischen Abweichung der Modellwerte von den Messdaten minimiert. Für das Jahr 1976 stehen 4627, für das Jahr 1988 15476 Messungen des Grundwasserspiegels zur Verfügung. Alle Messdaten erhielten das gleiche Gewicht. Da im Jahr 1988 mehr Messdaten zur Verfügung standen erhält dieses also insgesamt ein höheres Gewicht.</p> <p>Im Jahr 1988 wurden zusätzlich die in den Zuflüssen zu den Schöpfwerken drainierten Wassermengen mit den gemessenen Fördermengen verglichen. Es standen 383 Messwerte zur Verfügung. Das Ge-</p>

wicht der einzelnen Messung wurde so gewählt, dass die Summe der quadratischen Abweichungen der Fördermengen und der Grundwasserspiegel etwa gleich hoch sind.

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 wie zum Beispiel der Grenze zwischen Auestufe und Niederterrasse, andererseits wurde sie mit der ersten manuellen Kalibrierung bestimmt. Abbildung 10 zeigt die Durchlässigkeitszonen des Grundwasserleiters, Abbildung 11 jene der Dichtwand. Die Dichtwandzonen wurden nur bei der Kalibrierung des Jahres 1988 verwendet.

Konstante Werte

Einige Durchlässigkeitswerte wurden während der automatischen Kalibrierung auf einem konstanten Wert gehalten. Es handelt sich um folgende Zonen:

- Die Zone 1 am nördlichen Talrand wurde konstant gehalten, da sie nur einzelne Messstellen beeinflusst.
- Die Zonen 7 und 20 wurden eingeführt, um trotz grober Diskretisierung korrekte Absenkungen in den Pumpwerken Tegernheim und Friesheim zu erhalten.
- Die Die Zone 31 wurde festgehalten, da in diesem Bereich eine grosse Korrelation zwischen der Sohlendurchlässigkeit der Donau, der Dichtwanddurchlässigkeit und der Schotterdurchlässigkeit besteht.

Leakagewerte

Da das Modellgebiet sehr viele Gewässer enthält, mussten die Leakagewerte verschiedener Gewässer in gemeinsame Zonen gruppiert werden. Abbildung 12 zeigt die gewählte Zonierung. Die Leakagewerte für Infiltration und Exfiltration wurden gleichgesetzt. Bei reinen Drainagegewässern wurde der Leakagewert für die Infiltration zu Null gesetzt.

Im Bereich der Staustufe wurde der Donau für die beiden Kalibrierungsjahre unabhängige Leakagezone zugeordnet. Unterschiedliche Zonen erhielten auch Gewässer, welche im Zuge des Staustufenbaus neu angelegt oder ertüchtigt wurden.

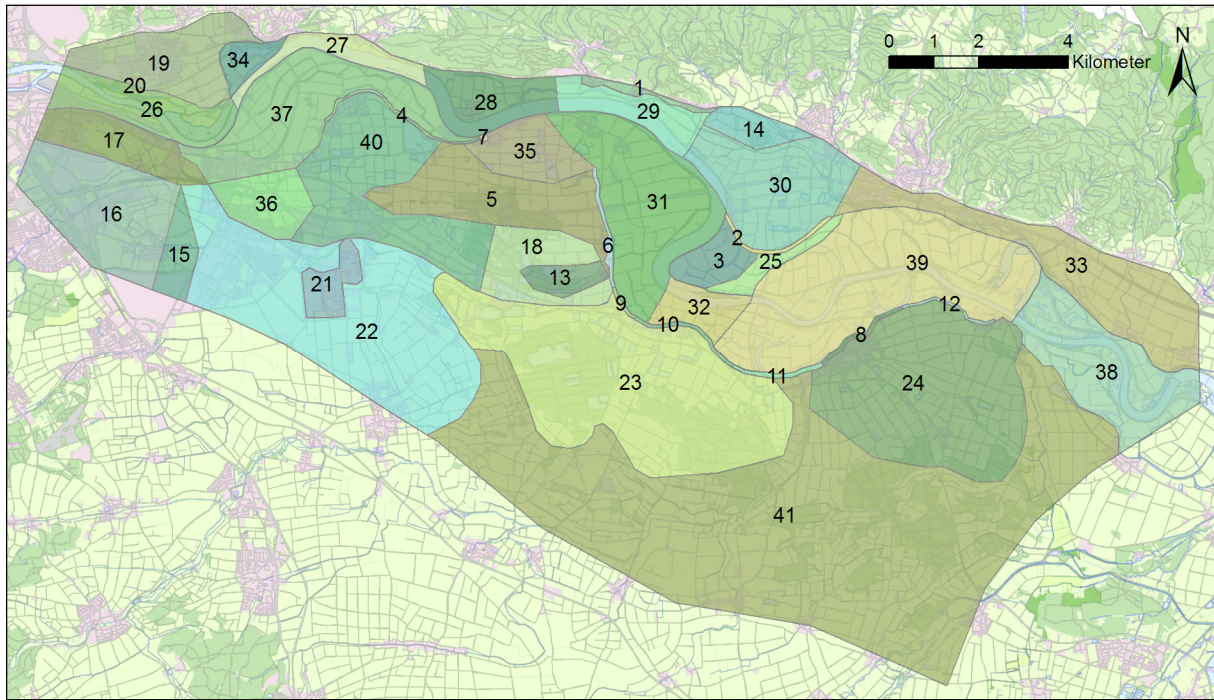


Abbildung 10: Durchlässigkeitszonen der automatischen Kalibrierung.

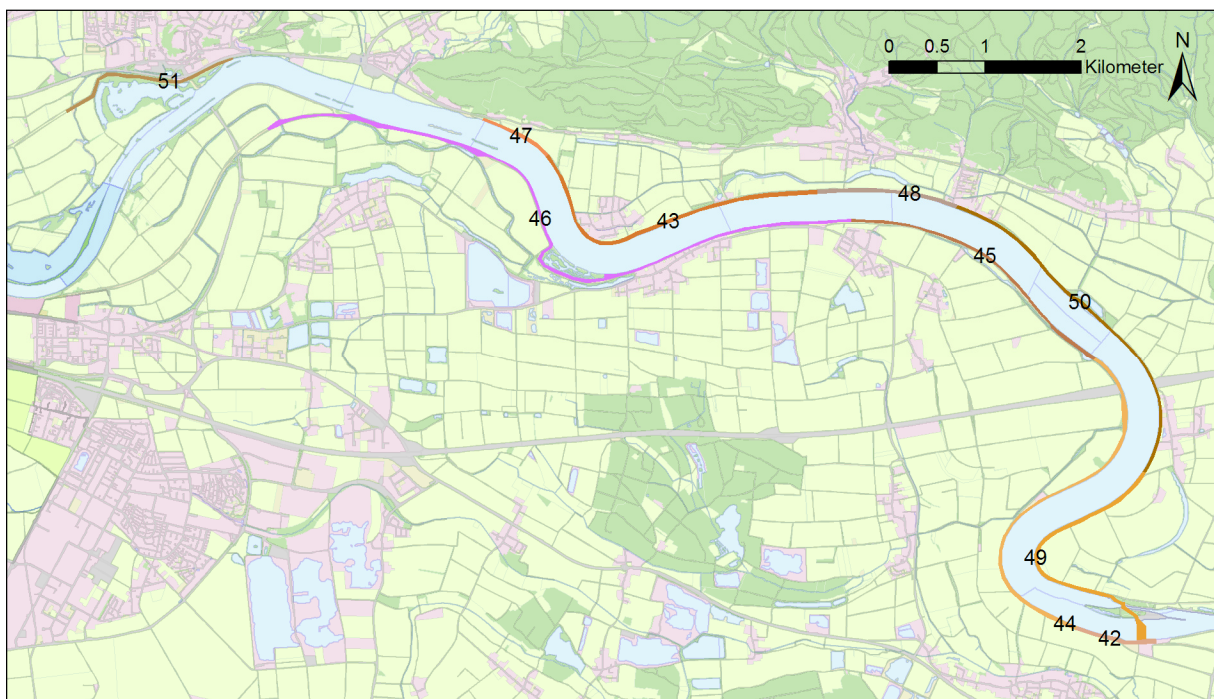


Abbildung 11: Durchlässigkeitszonen für die Dichtwand bei der Kalibrierung des Jahres 1988

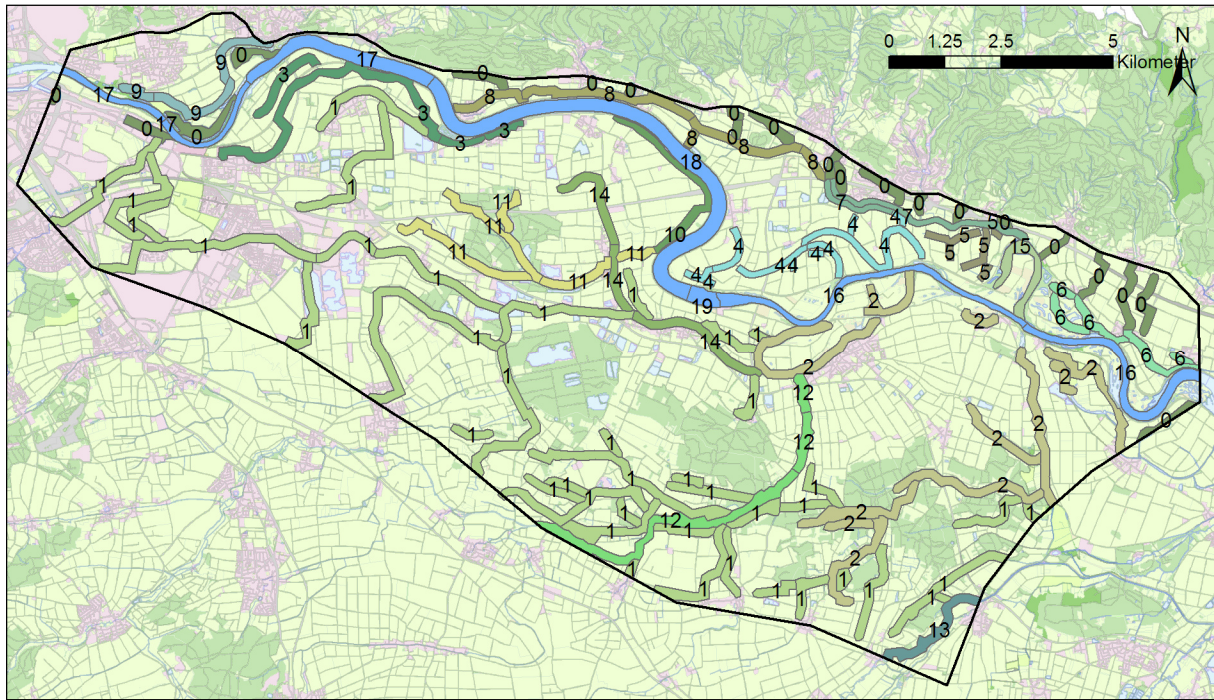


Abbildung 12: Leakagezonen der Gewässer.

3.2.3 Resultate der automatischen Kalibrierung

Modellparameter

Für die Modellparameter wurden physikalisch plausible Grenzen vorgegeben. Zwei Durchlässigkeitszonen im Auebereich erreichten das vorgegebene Maximum von 6×10^{-3} 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 47 bis Abbildung 52).

Kalibrierungsgüte

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

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichung (RMSE) [cm]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Median der Absoluten Abweichung [cm]
1976	43	31	24
1988	43	30	21

Tabelle 1: Gütewerte der automatischen Kalibrierung

3.2.4 Kovarianzanalyse

Korrelationen

Abbildung 13 bis Abbildung 15 zeigen Teilbereiche der 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.

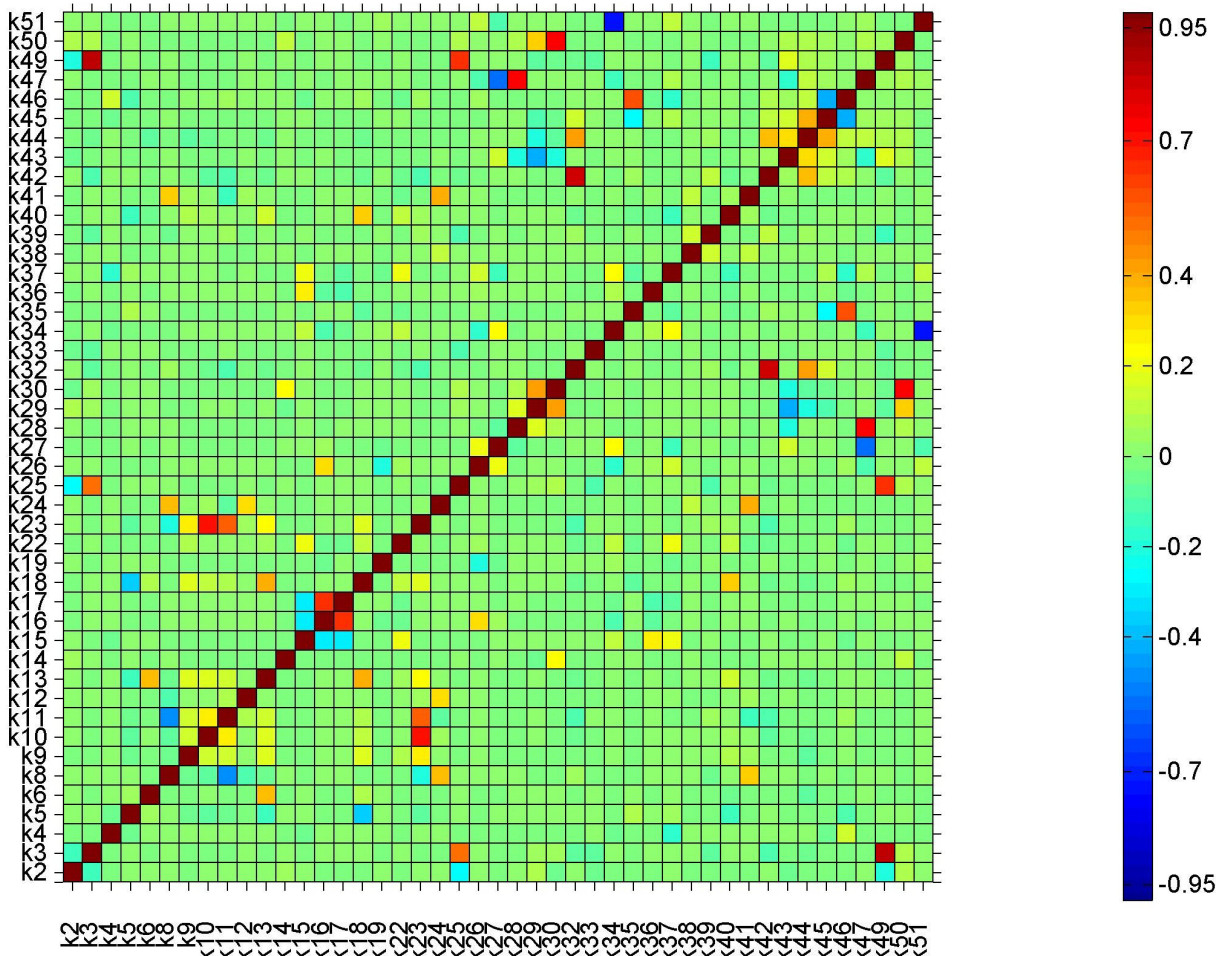


Abbildung 13: Korrelation zwischen den Durchlässigkeitszonen

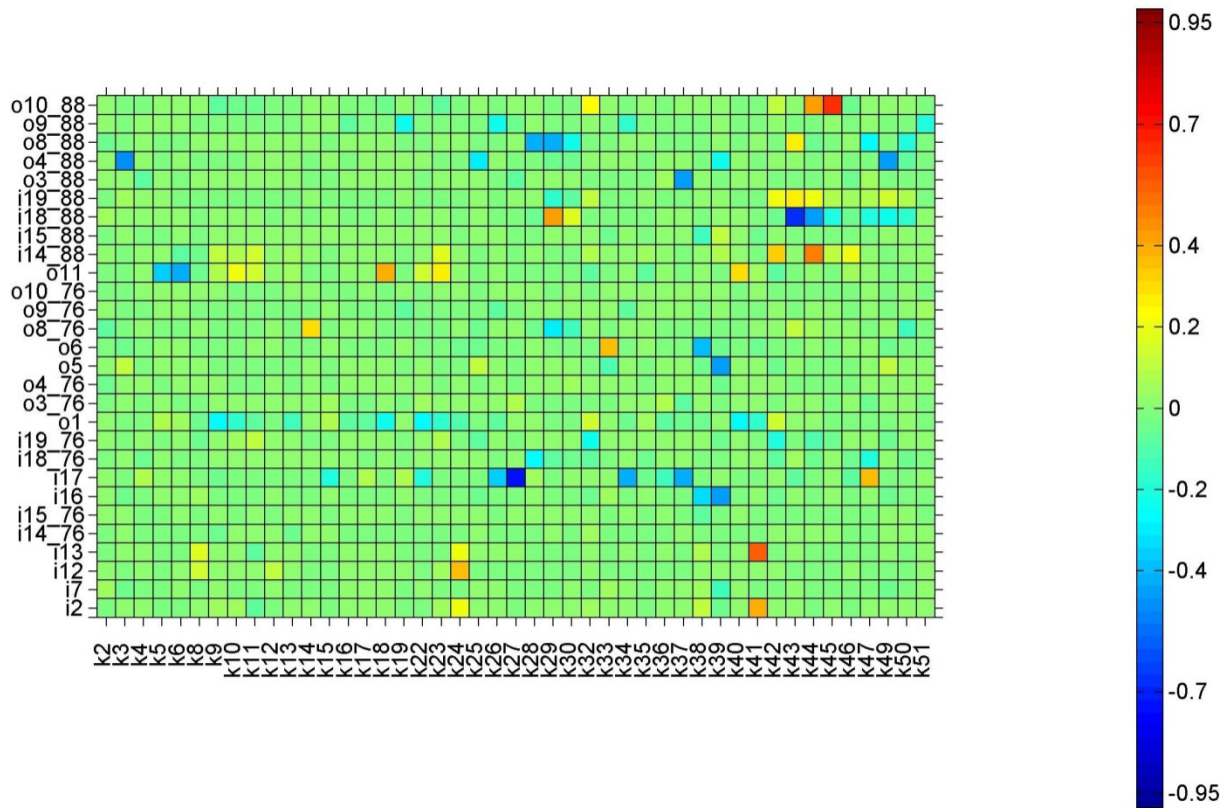


Abbildung 14: Korrelation zwischen Leakagewerten und Durchlässigkeitszonen (Leakagezonen mit i sind solche, welche sowohl Infiltration wie Exfiltration erlauben, bei unabhängigen Werten ist das Jahr angegeben)

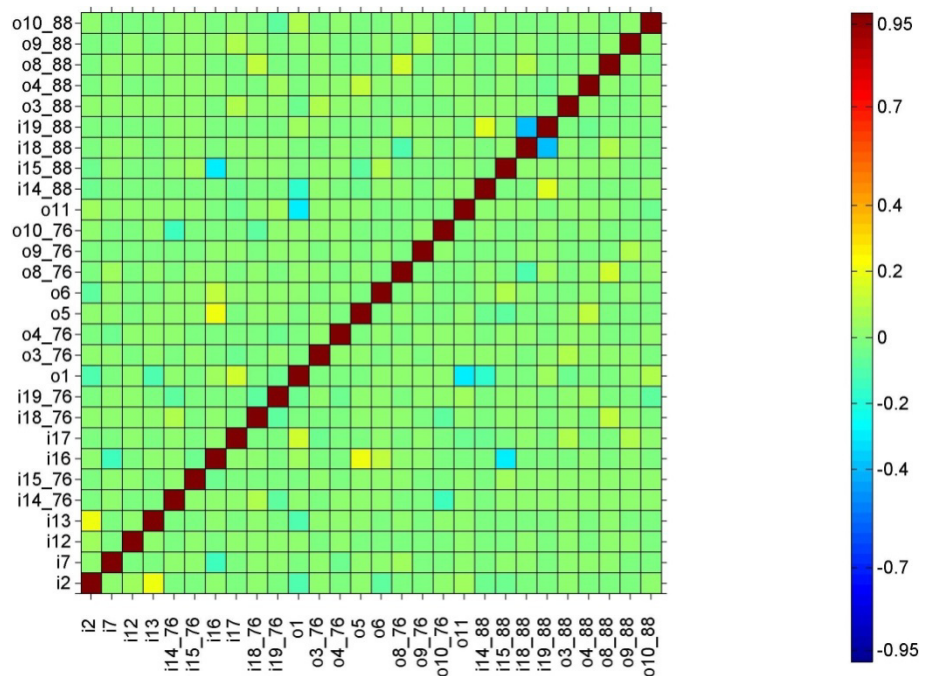


Abbildung 15: Korrelation zwischen den Leakagewerten

Dichtwand	<p>Die positiven Korrelationen zwischen den Dichtwanddurchlässigkeiten k42, k47, k49 und k50 mit den daneben liegenden Zonen k32, k28, k30 und k3 lassen sich dadurch erklären, dass bei erhöhter Dichtwanddurchlässigkeit das aus dem Stauraum austretende Wasser nur bei einer erhöhten Durchlässigkeit des Untergrundes wieder zurück in die Donau geführt werden kann. Einige Dichtwandzonen zeigen diese Abhängigkeit nicht, da das austretende Wasser in Schöpfwerken gefasst wird.</p> <p>Eine negative Korrelation besteht zwischen der Dichtwandzone k51 und der zwischen Donau und Dichtwand befindlichen Zone k34. Diese Abhängigkeit gibt sich daraus, dass diese beiden Zonen hintereinander durchflossen werden. Anschliessend gelangt das Grundwasser in den Drainagegraben des Schöpfwerks Donaustauf.</p>
Donau-Leakage	<p>Eine hohe negative Korrelation besteht zwischen der Donau-Leakage im westlichen Teil des Stauraums und der Durchlässigkeit nördlich davon. Das in diesem Bereich austretende Donauwasser gelangt ebenfalls in das Schöpfwerk Donaustauf. Um die geförderte Wassermenge zu erzeugen müssen die in Serie durchströmte Donausohle und der Untergrund zusammen eine gewisse Durchlässigkeit erreichen. Wird eine der beiden Durchlässigkeiten reduziert, muss die andere erhöht werden.</p>
Terassenkante	<p>Im Bereich von Geisling führt die Terrassenkante zu einer positiven Korrelation. Bei höherer Durchlässigkeit der Zone oberhalb der Terasse wird offenbar mehr Grundwasser zur Terrassenkante geführt, weshalb diese ebenfalls durchlässiger sein muss. Wir vermuten, dass dieser Effekt auf die Grösse und Form der Zone 23 zurückzuführen ist.</p>
Folgerungen	<p>Die Abhängigkeiten zwischen den Modellparametern wurden bei der zweiten manuellen Kalibrierung berücksichtigt. Durch die Modellierung weiterer Systemzustände konnten die Durchlässigkeit der Dichtwand und die Donau-Leakage genauer bestimmt werden. Bei Abhängigkeiten zwischen Dichtwand- und Schotterdurchlässigkeiten wurde eine Lösung mit möglichst homogener Schotterdurchlässigkeit gesucht.</p> <p>Verbleibende Unsicherheiten zu einzelnen Parametern müssen im Rahmen der Modellanwendung durch Sensitivitätsuntersuchungen quantifiziert werden.</p>

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 konnten die Berechnungszeiträume etwas länger gewählt werden, da keine systematische Variation aller Parameter erfolgte, sondern nur noch lokale Anpassungen vorgenommen wurden. Es wurden folgende Zeiträume verwendet:

1.1.1976 – 31.12.1977 (9 970 Messdaten)

1.1.1988 – 31.12.1989 (30 800 Messdaten)

1.1.1997 – 31.12.1999 (25 350 Messdaten)

1.1.2009 – 31.12.2009 (1 990 Messdaten)

Güte der Kalibrierung Tabelle 2 zeigt die Gütewerte nach der manuellen Kalibrierung. Für die Jahre 1976-77 und 1988-89 ist die Übereinstimmung mit den Messwerten des Grundwasserspiegels etwas besser als in der automatischen Kalibrierung. Deutlich besser ist die Übereinstimmung für die Jahre 1997-99 und 2009. Werden nur die Messstellen innerhalb der geplanten Flutpolder und eines Puffers von 1 km darum herum betrachtet, sind die Gütewerte in diesen Jahren noch besser.

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichung (RMSE) [cm]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Median der Absoluten Abweichung [cm]
1976 - 1977	41	30	22
1988 - 1989	41	28	20
1997 - 1999	31	22	16
2009	40	28	17

Tabelle 2: Gütewerte der Kalibrierung über das ganze Modellgebiet

Zeitraum	RMSE [cm]	Mittelwert [cm]	Median [cm]
1976 - 1977	35	27	21
1988 - 1989	35	25	18
1997 - 1999	25	18	13
2009	35	20	10

Tabelle 3: Gütewerte der Kalibrierung innerhalb der geplanten Flutpolder und einem Puffer von 1000 m darum herum.

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 Gütewerte in Tabelle 4 zusammengestellt. Für die vorliegende Kalibrierung liegen die Werte zwischen 1% (sehr gute Modellanpassung) und 5% (gute Modellanpassung).

Zeitraum	Maximale Differenz der Standrohrspiegelhöhen [m]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Verhältnis nach DVGW W 107 (A) [%]
1976 - 1977	15	30	2.0
1988 - 1989	16	28	1.8
1997 - 1999	14	22	1.6
2009	17	28	1.6

Tabelle 4: Gütewerte der Kalibrierung nach DVGW W 107 (A) [5]

Prognosegenauigkeit Die Kalibrierungsgenauigkeit entspricht nicht der Prognosegenauigkeit. Diese ist abhängig von der Unsicherheit bezüglich neu eingeführter Parameter wie z.B. dem Leakagewert geplanter Drainagen oder der Durchlässigkeit der Deckschichten im Polderraum. Die Prognosegenauigkeit soll deshalb 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 zu den gemessenen Potentialen gewonnen werden. Abbildung 16 und Abbildung 18 zeigen die Scatterplots für die Jahre 1976 – 77, 1988 – 89, 1997 – 99 und 2009.

Einzelne grosse Abweichungen sind auf Messfehler zurückzuführen (siehe z.B. Messstelle R13 in Abbildung 33). Da für die Kalibrierung sehr viele Messdaten verwendet wurden, fallen diese nicht ins Gewicht.

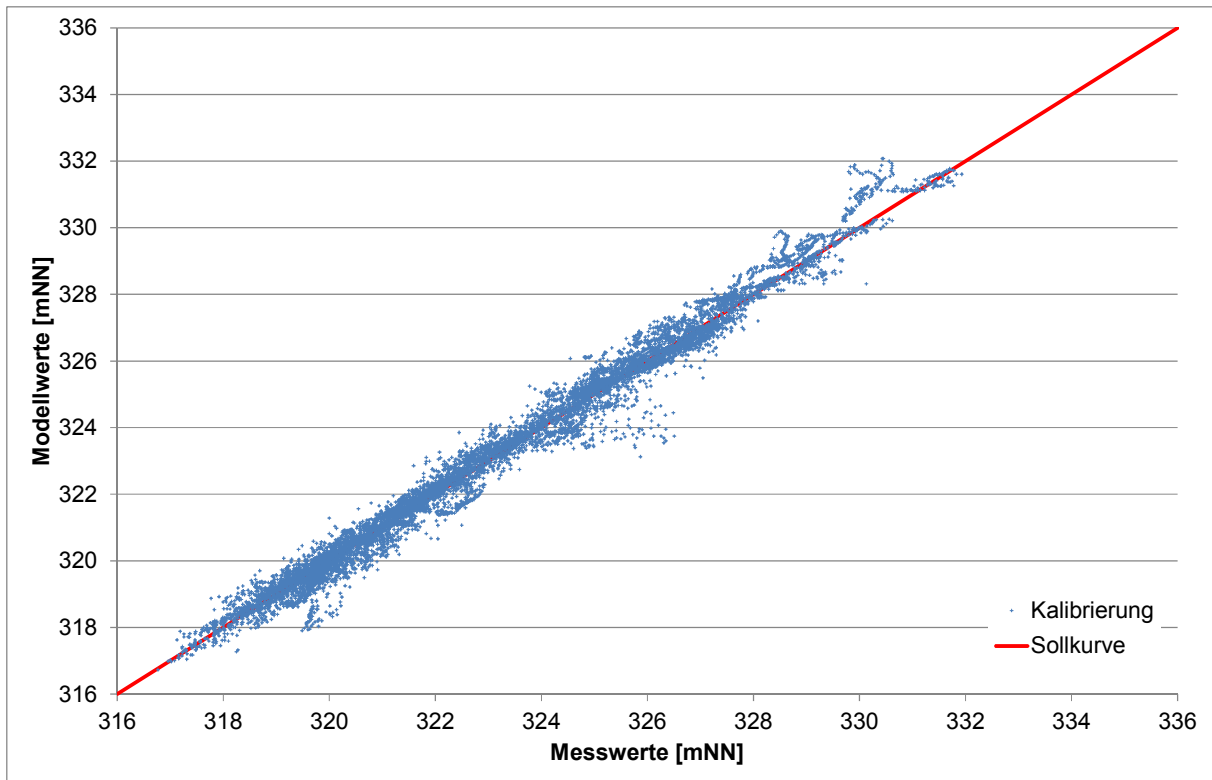


Abbildung 16: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte der Jahre 1976-1977

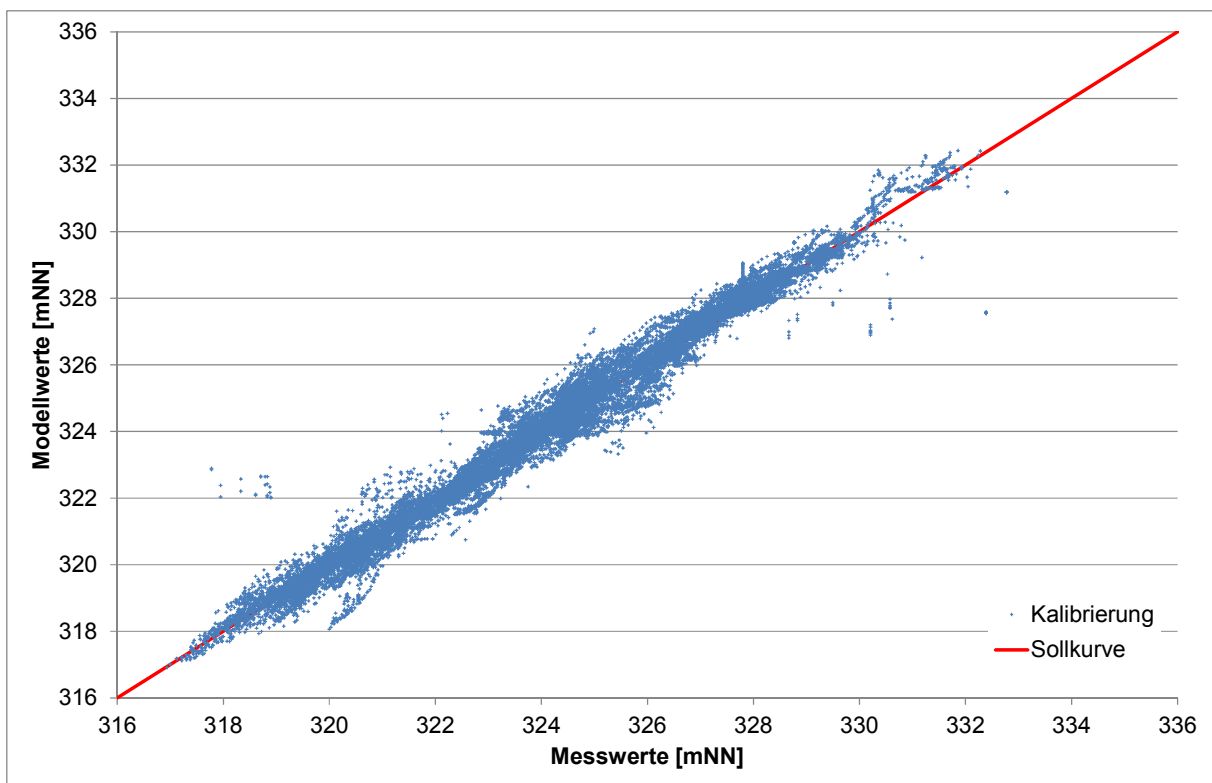


Abbildung 17: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte der Jahre 1988-1989

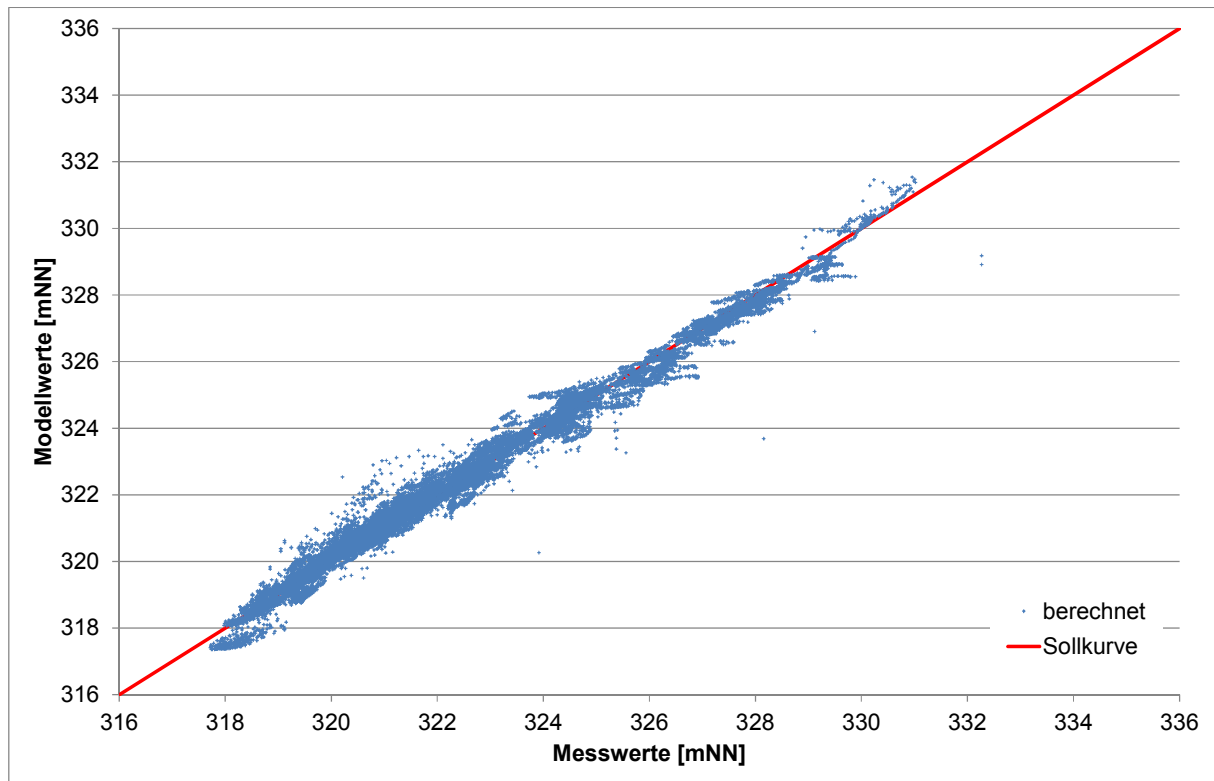


Abbildung 18: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte der Jahre 1997-1999

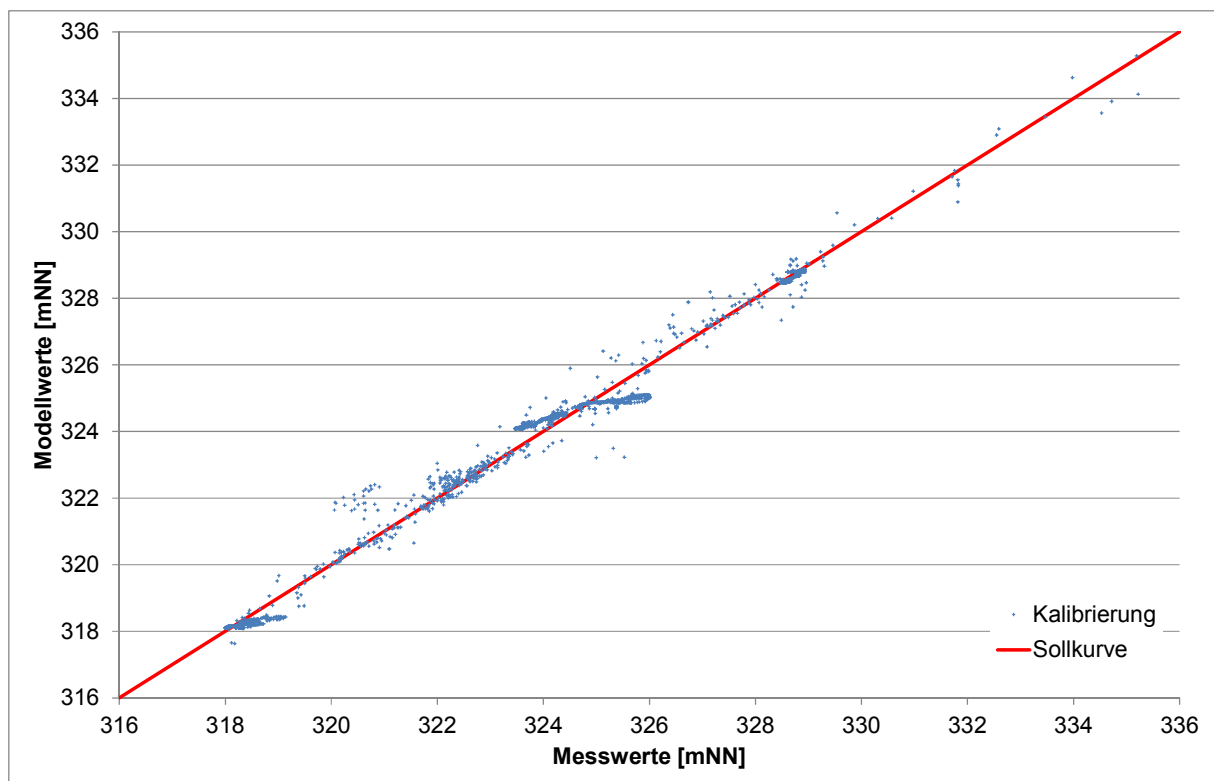


Abbildung 19: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte des Jahres 2009

Räumlicher Vergleich	Der räumliche Vergleich zwischen Modell und Messung wird an vier Zeitpunkten aus den vier Kalibrierungszeiträumen dargestellt (Abbildung 22 - Abbildung 26). Im Jahr 1988 wird der Hochwasserzustand dargestellt. Bei den übrigen Zeiträumen handelt es sich um Niederwasserstände.
Abweichungen	Die Darstellungen zeigen, dass die Übereinstimmung im donaanahen Bereich sehr gut ist. Grössere Abweichungen gibt es entlang der Terrassengrenze, sowie in der Nähe der Modellränder. Der Grundwasserspiegel im donaufernen Bereich wird vor allem durch die Grundwasserneubildung bestimmt. Da sich die Niederschlagshöhe kleinräumig unterscheidet, ist eine genauere Übereinstimmung nur sehr schwer zu erreichen.
Hochwasser	Bei Hochwasser sind die Abweichungen tendenziell etwas grösser. Lokale Unterschiede des Speicherkoeffizienten und der Mächtigkeit der Deckschicht besitzen bei Hochwasser einen grossen Einfluss, siehe auch die Sensitivitätsuntersuchungen am Ende dieses Berichts.
Diskussion	Die Abweichungen während des Hochwassers 1988 werden im Folgenden an Hand von drei Messstellen in der Auestufe illustriert (Abbildung 20). Während des Hochwassers erreicht der Grundwasserspiegel die Unterkante der Deckschicht. Das Modell rechnet dann mit gespannten Verhältnissen.
R67	Bei der Messstelle R67 stimmt das Modell mit den Messungen überein. Die Annahmen des Modells sind also korrekt. Die Messstelle entspricht dem Typ A in Abbildung 21.
R75	Bei der Messstelle R75 stimmt das Modell sehr gut mit den Messungen überein. Während des Hochwassers bleibt jedoch der gemessene Wasserstand auf einer konstanten Höhe stehen. Dies deutet daraufhin, dass das Grundwasser ober aus dem Pegelrohr ausströmt. Die gemessene Höhe entspricht der Rohroberkante. Die Messstelle entspricht dem Typ B in Abbildung 21.
L52A/A	Bei der Messstelle L52A/A stimmt das Modell vor und nach dem Hochwasser sehr gut. Während des Hochwassers steigen die gemessenen Grundwasserspiegel weniger stark an als im Modell. Die Annahme von gespannten Verhältnissen unter der Deckschicht stimmt an dieser Stelle nicht. Die Unterkante der Deckschicht liegt also höher oder es ist keine Deckschicht vorhanden, so dass der Grundwasserspiegel auf Terrainhöhe drainiert wird. Die Messstelle entspricht dem Typ C in Abbildung 21.

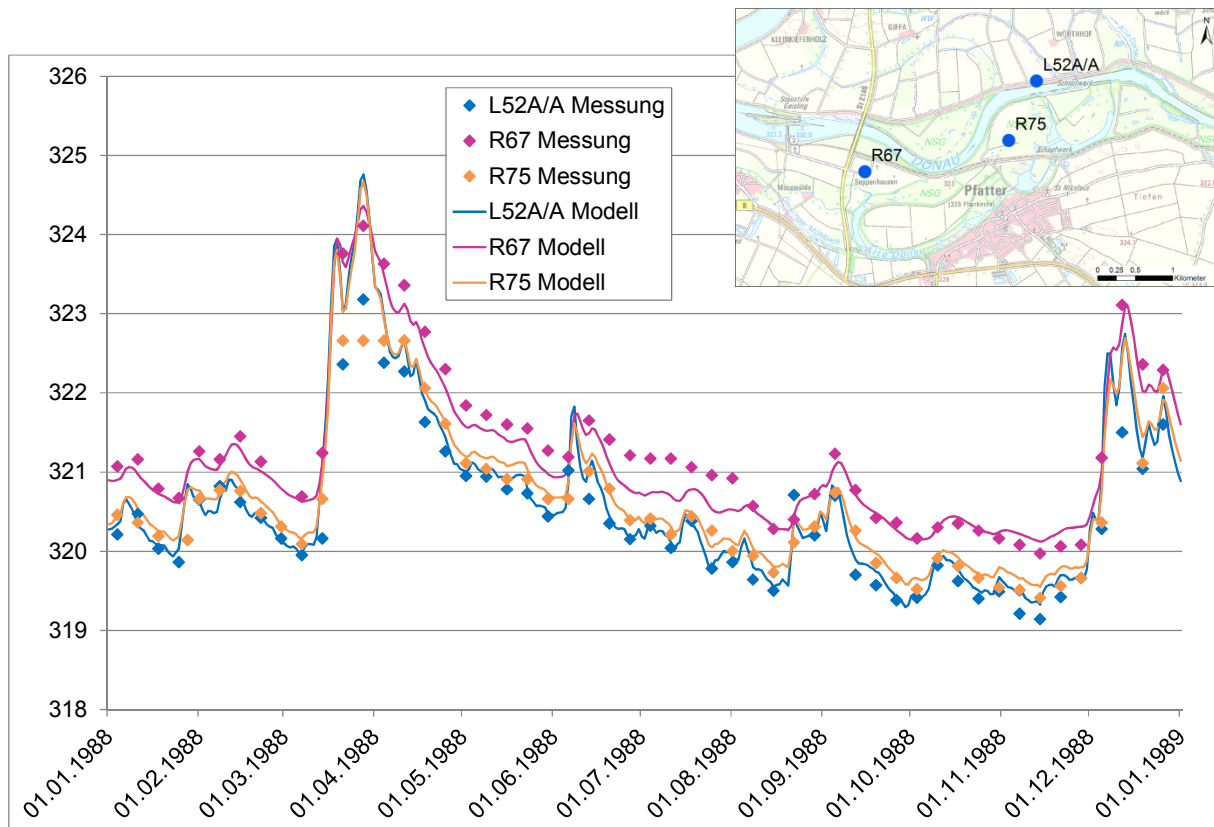


Abbildung 20: Ganglinien ausgewählter Messstellen während des Hochwassers 1988.

Abbildung 21 zeigt mögliche Situationen in der Auestufe. Bei Fall A ist das Grundwasser an der Deckschicht gespannt. Im Messrohr steigt es bis über das Terrain hoch. Im Fall B ist die Situation gleich wie im Fall A, das Messrohr ist jedoch zu wenig hoch und überläuft. Die gemessene Grundwasserspiegelhöhe ist durch die Rohroberkante begrenzt. Im Fall C ist das Grundwasser nicht gespannt. Über tiefere Stellen des Geländes kann es drainiert werden..

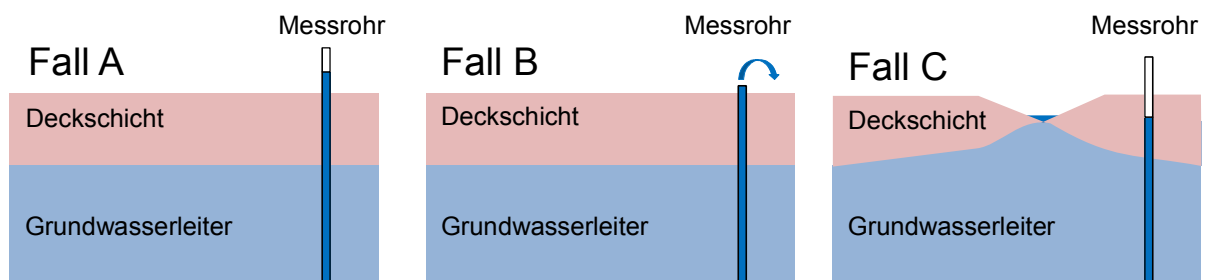


Abbildung 21: Mögliche Situationen in der Auestufe

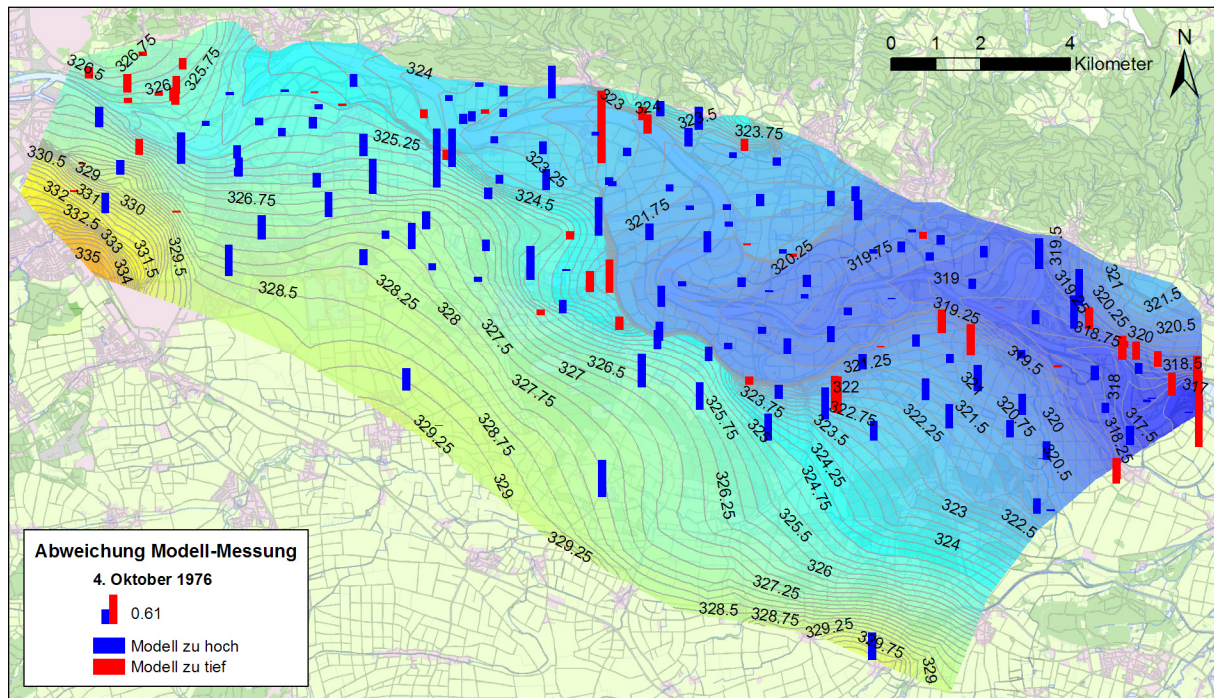


Abbildung 22: Grundwasserhöhengleichen bei Niederwasserstand am 4.10.1976. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten des 3.10. und 4.10.1976 sind mit Balken dargestellt.

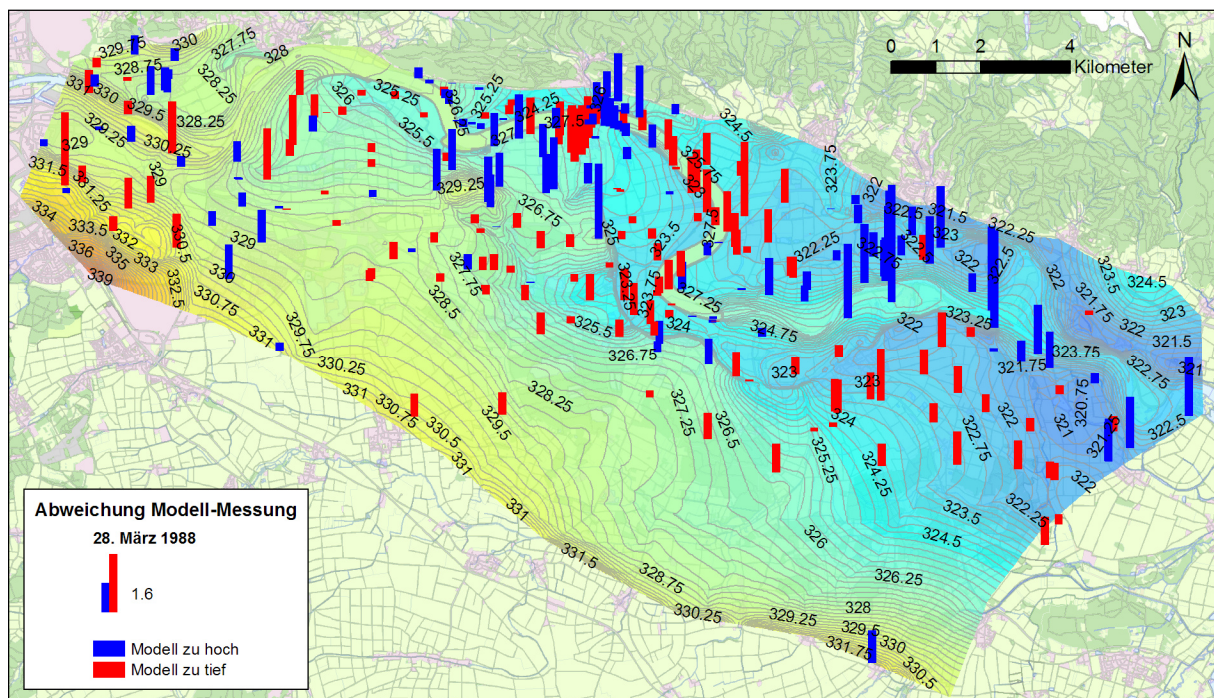


Abbildung 23: Grundwasserhöhengleichen bei Hochwasserstand am 28.03.1988. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten des 27.3. und 28.3.1988 sind mit Balken dargestellt.

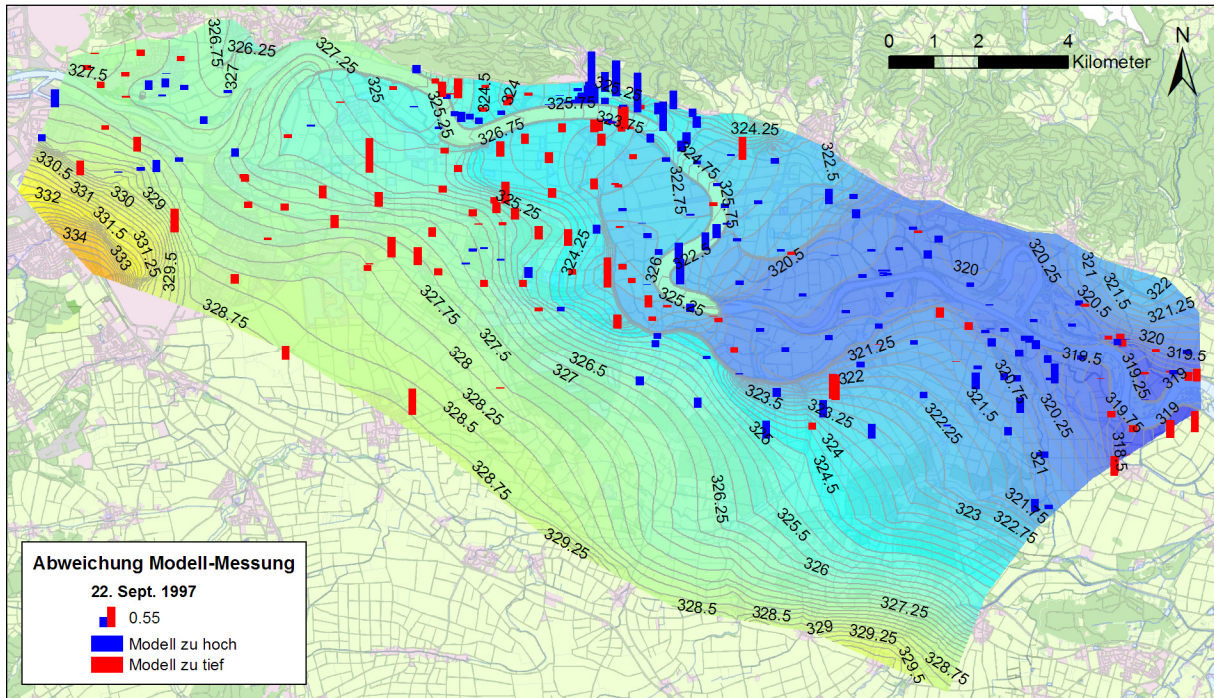


Abbildung 24: Grundwasserhöhengleichen bei Niederwasserstand am 22.9.1997. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten des 21.9. und 22.9.1997 sind mit Balken dargestellt.

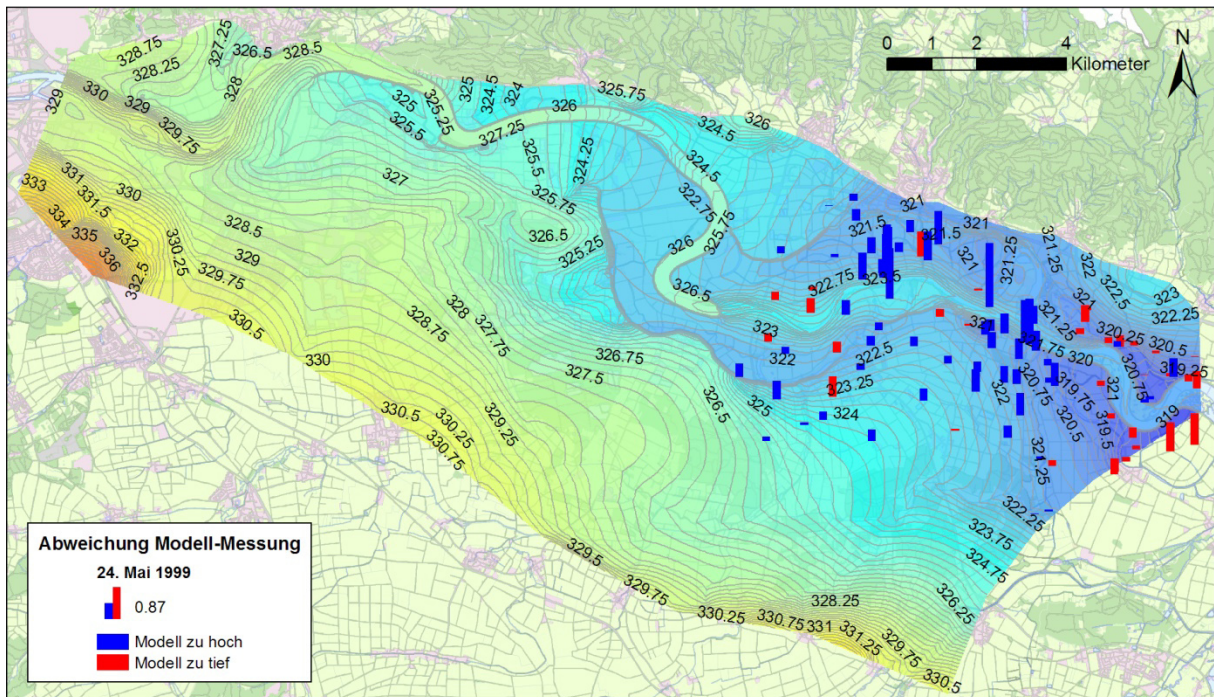


Abbildung 25: Grundwasserhöhengleichen bei Hochwasserstand am 24.5.1999. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten des 24.5.1999 sind mit Balken dargestellt.

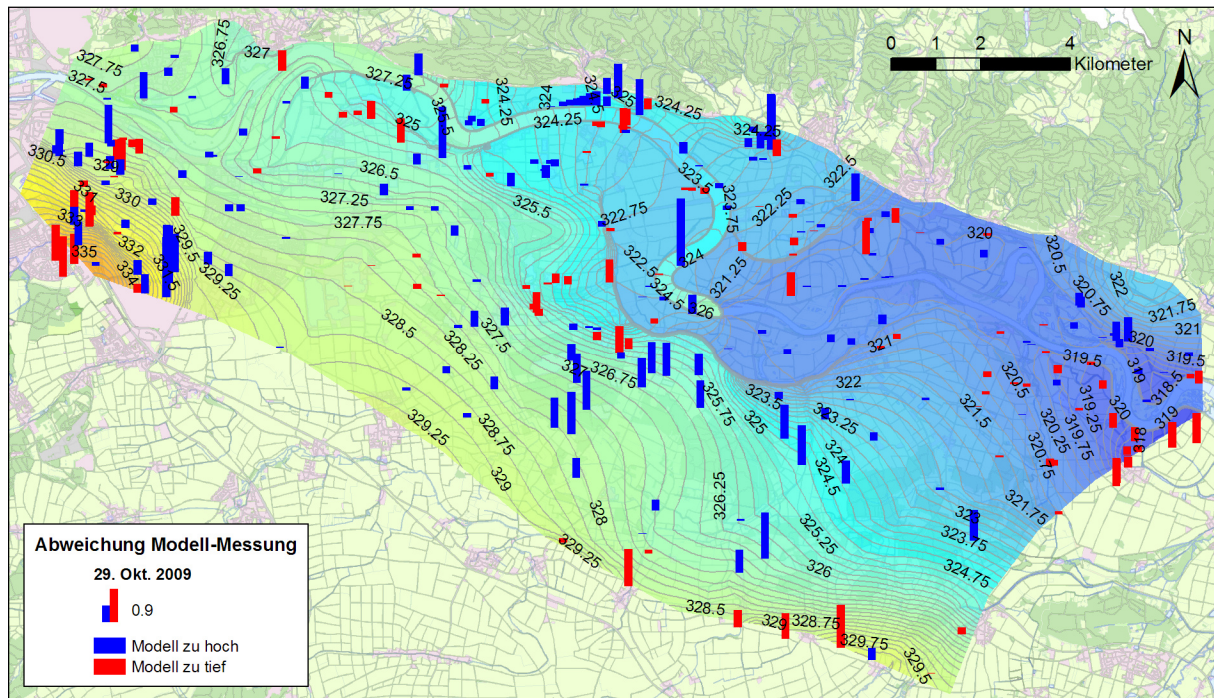


Abbildung 26: Grundwasserhöhengleichen bei Niederwasserstand am 29.10.2009. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten der Ende Oktober 2009 durchgeführten Stichtagsmessungen des LfU sind mit Balken dargestellt.

Zeitliches Verhalten Für die Dokumentation der Übereinstimmung des zeitlichen Verhaltens wurden einige, über das Modellgebiet verteilte Messstellen ausgewählt (Abbildung 27). Die Zeitkurven sind in Abbildung 33 bis Abbildung 37 dargestellt. Die Übereinstimmung ist mit wenigen Ausnahmen sehr gut.

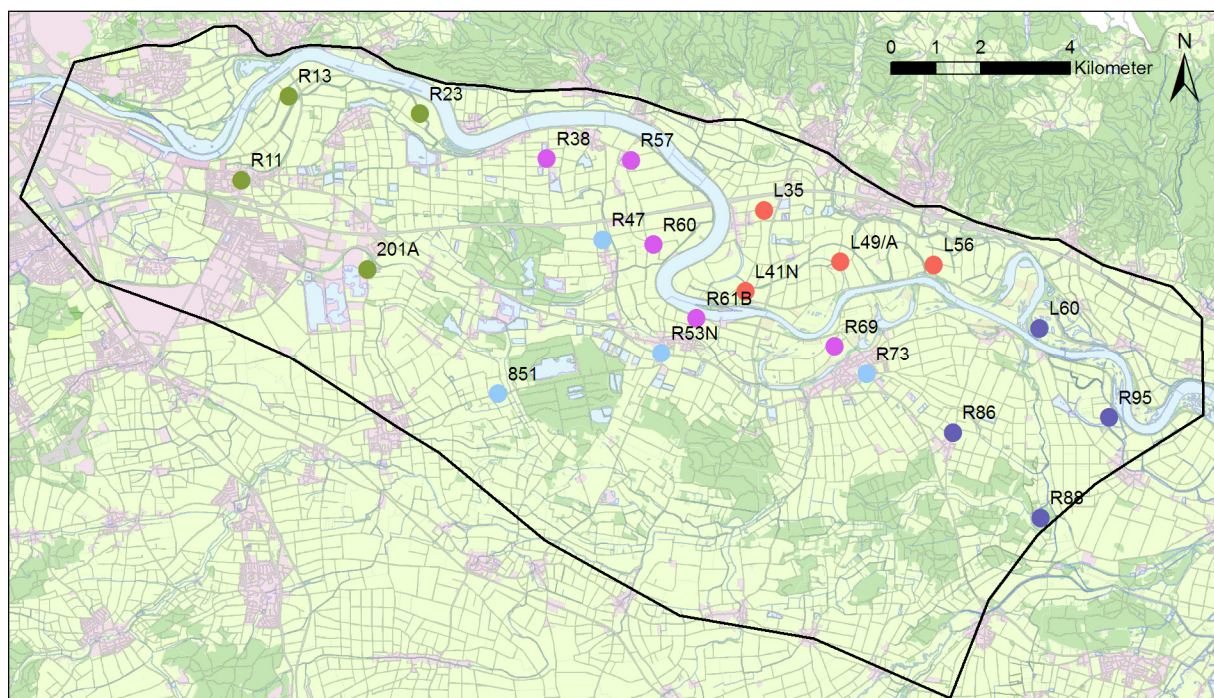


Abbildung 27: Ausgewählte Messstellen für den Vergleich des zeitlichen Verhaltens.

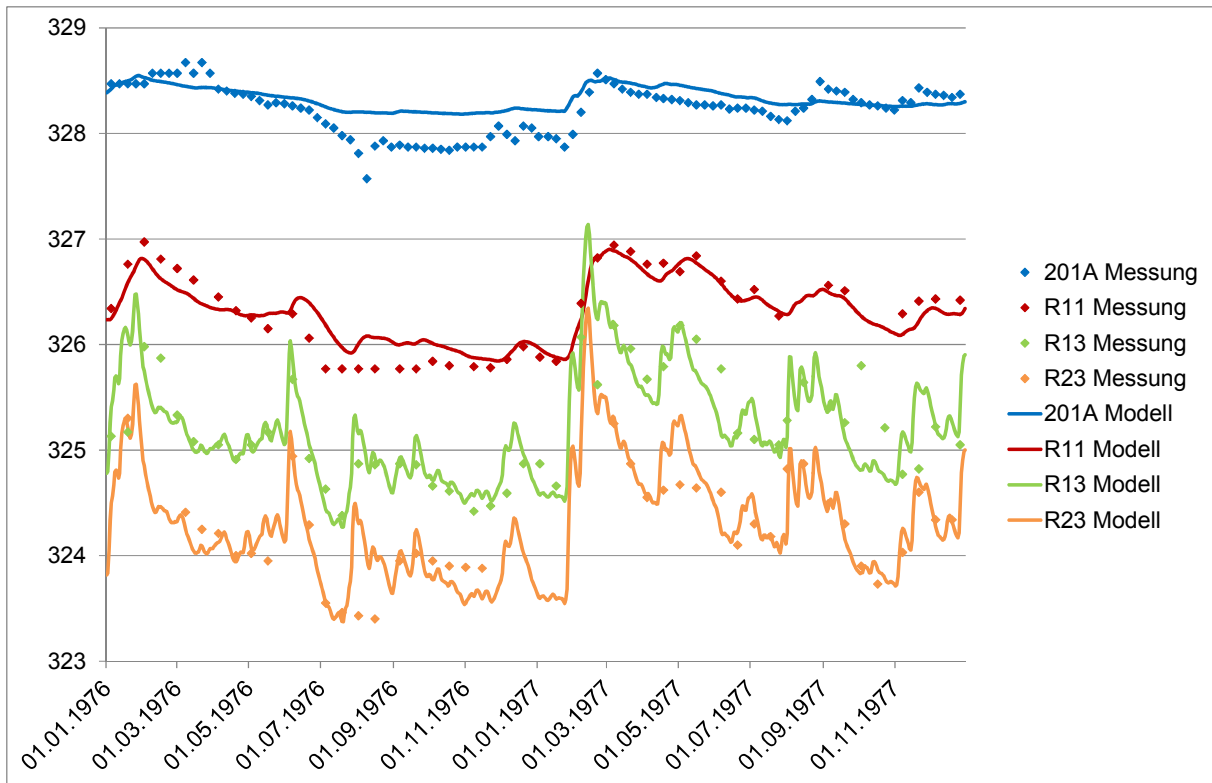


Abbildung 28: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Neutraubling – Sarching im Zeitraum 1976 – 1977.

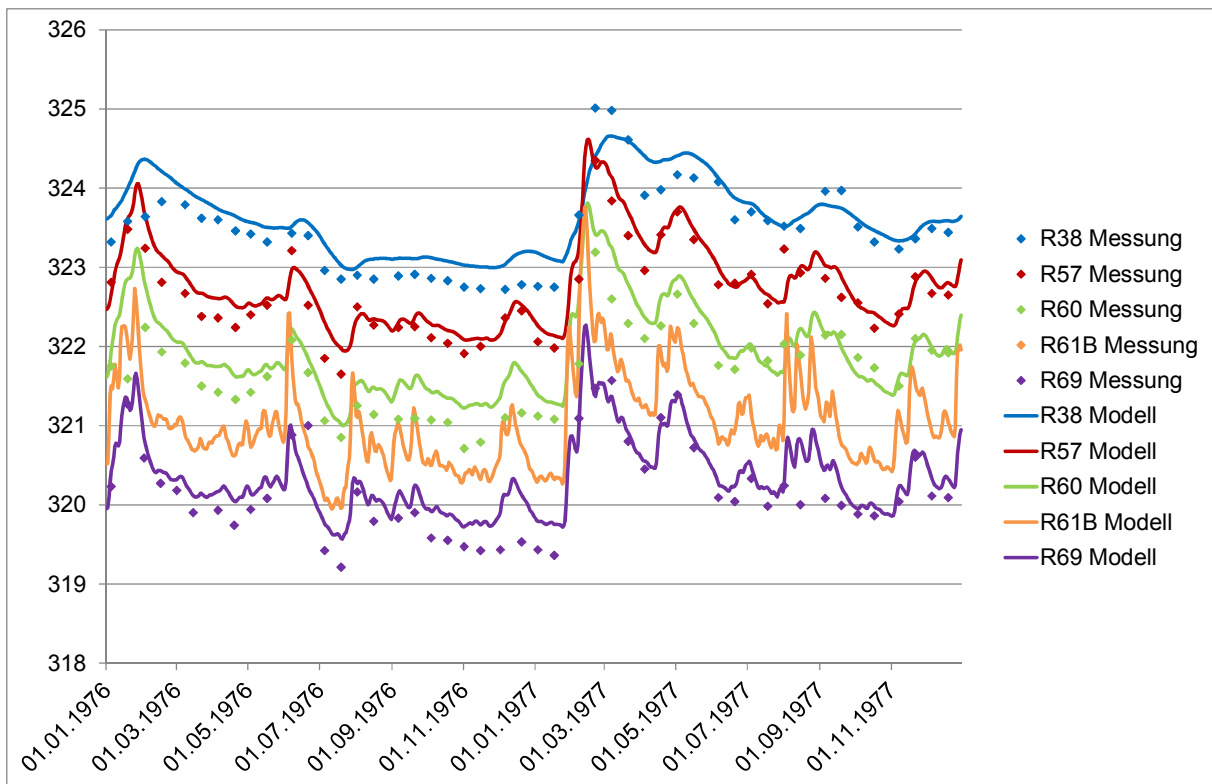


Abbildung 29: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Auestufe zwischen Friesheim und Pfatter im Zeitraum 1976 – 1977.

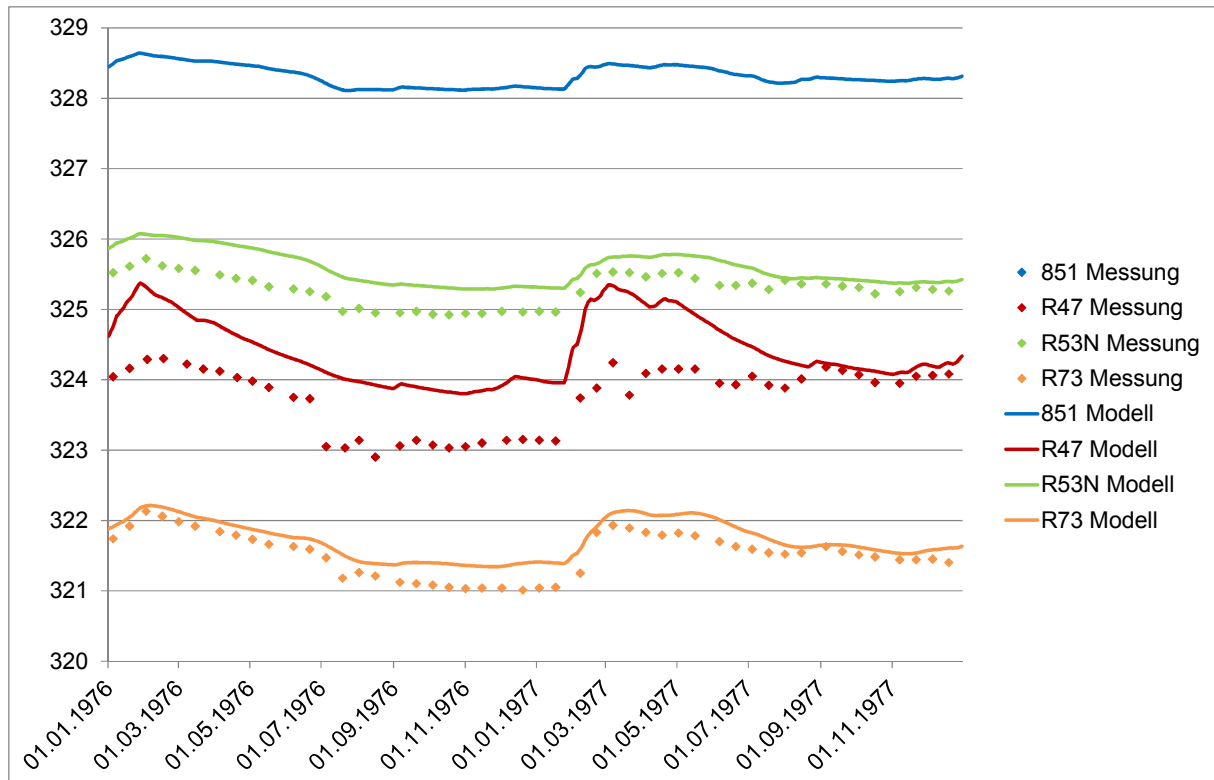


Abbildung 30: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Terrassenstufe zwischen Eltheim und Pfatter im Zeitraum 1976 – 1977.

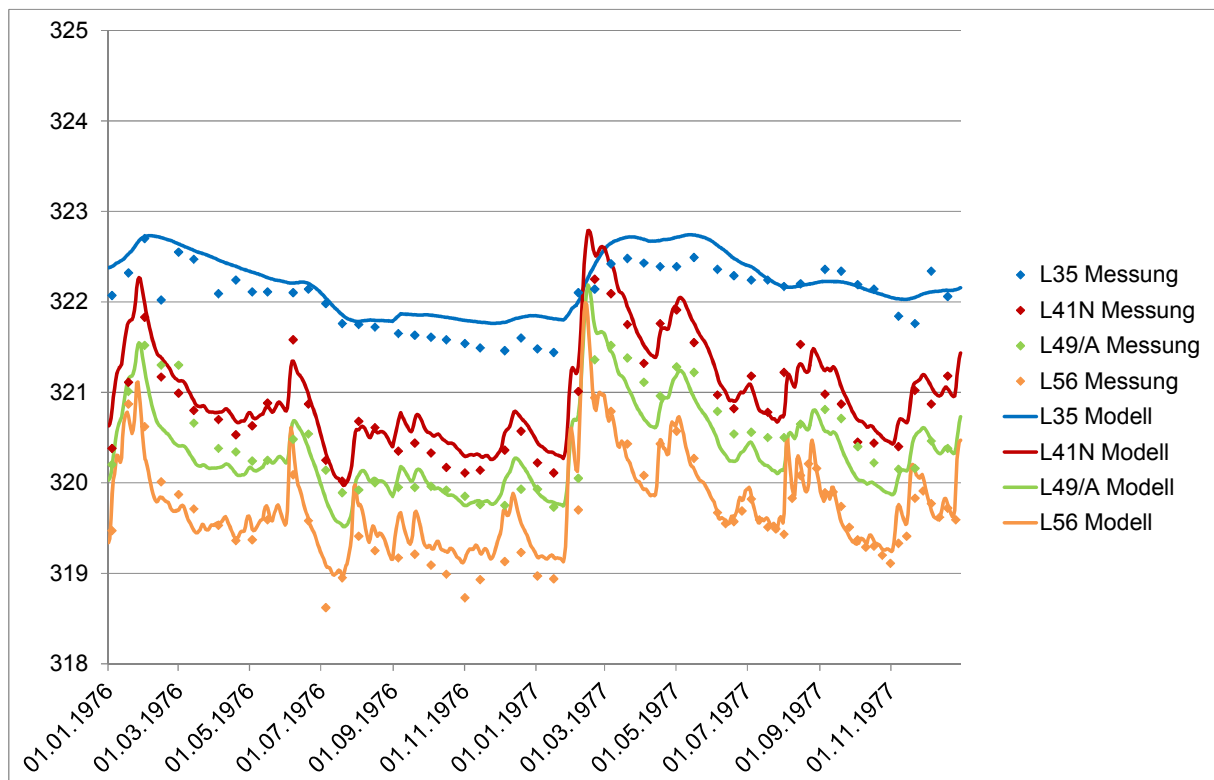


Abbildung 31: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der linksseitigen Auestufe zwischen Kiefenholz und Gmünder Au im Zeitraum 1976 – 1977.

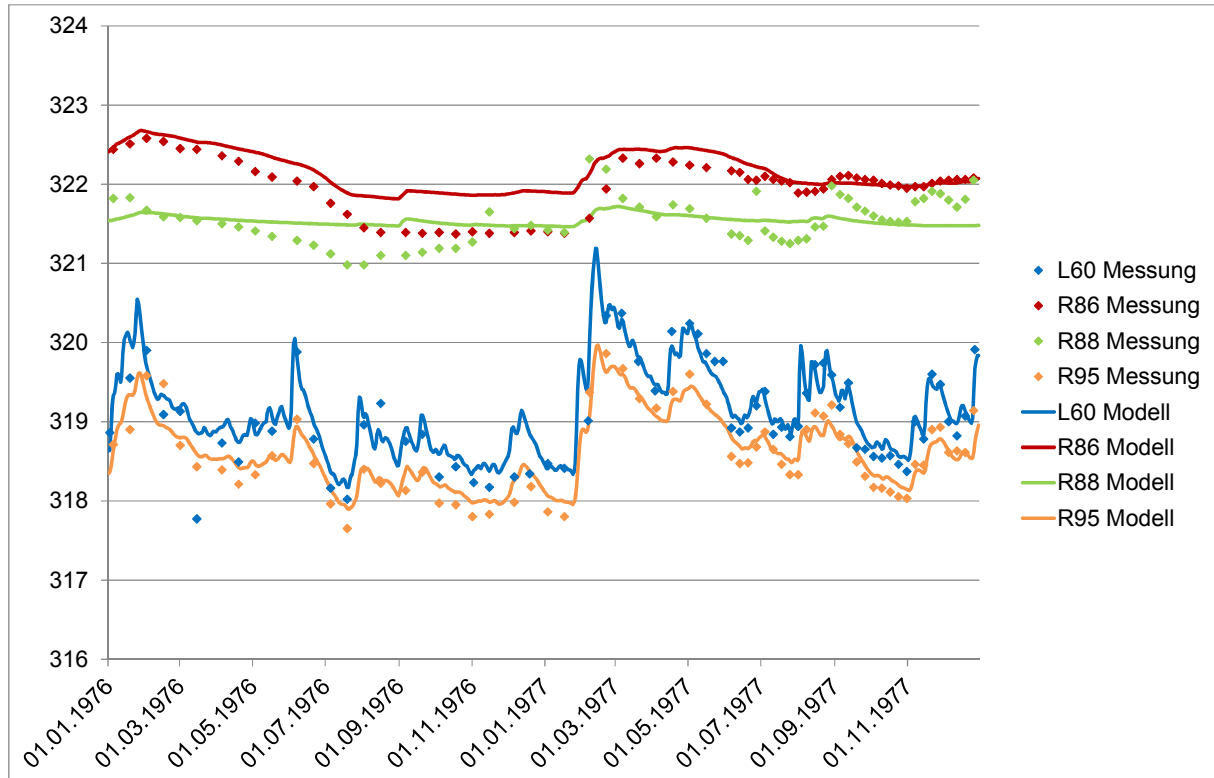


Abbildung 32: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des östlichen Modellrandes im Zeitraum 1976 – 1977.

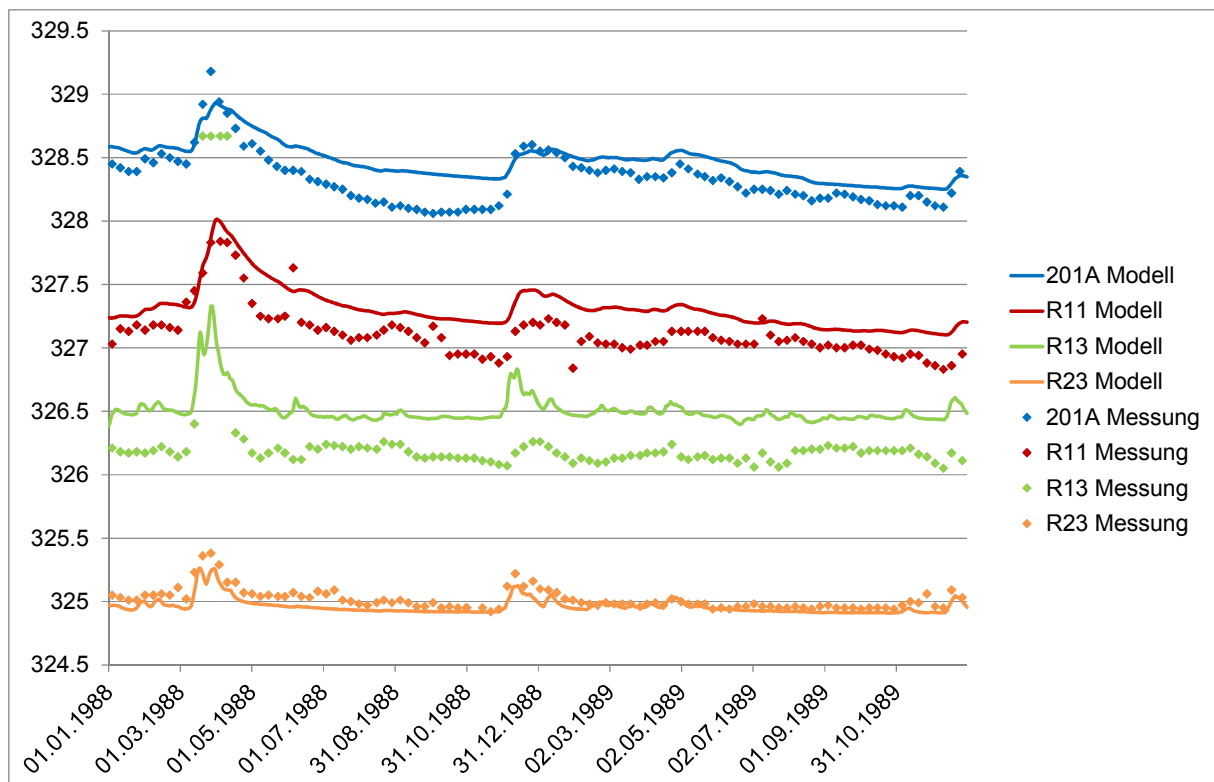


Abbildung 33: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Neutraubling – Sarching im Zeitraum 1988 – 1989.

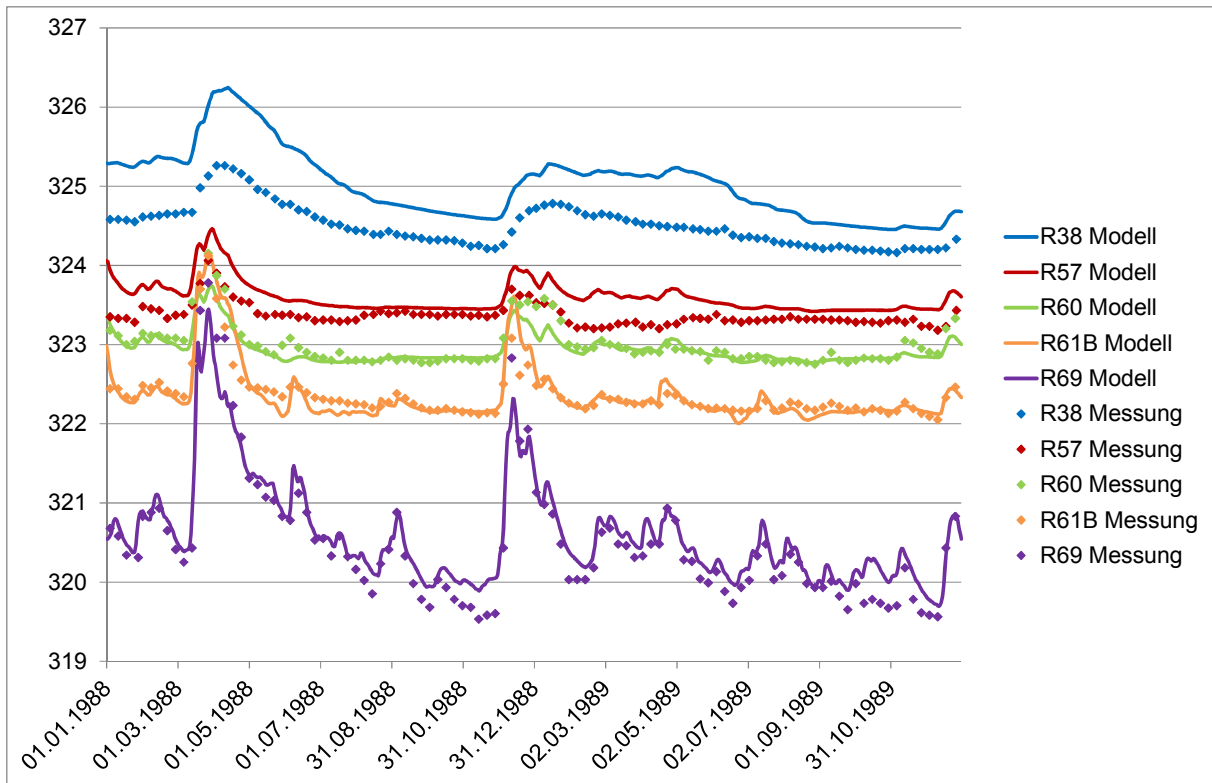


Abbildung 34: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Auestufe zwischen Friesheim und Pfatter im Zeitraum 1988 – 1989.

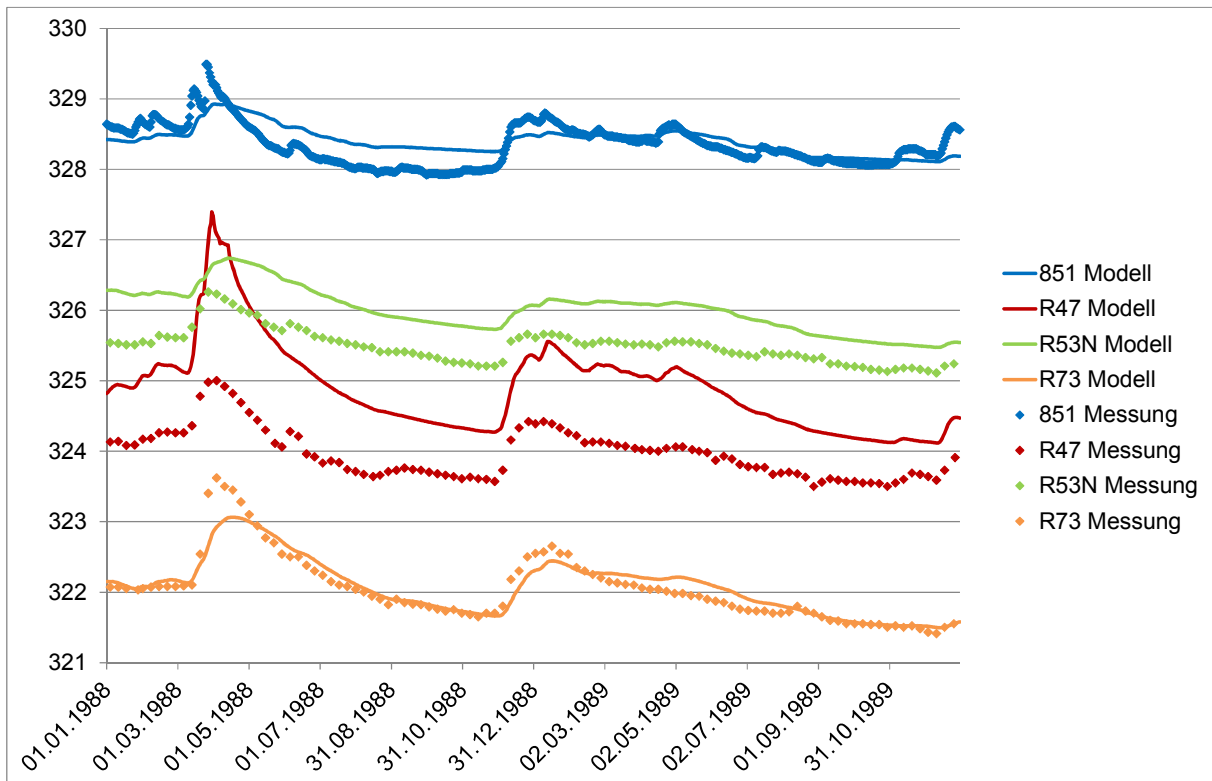


Abbildung 35: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Terrassenstufe zwischen Eltheim und Pfatter im Zeitraum 1988 – 1989.

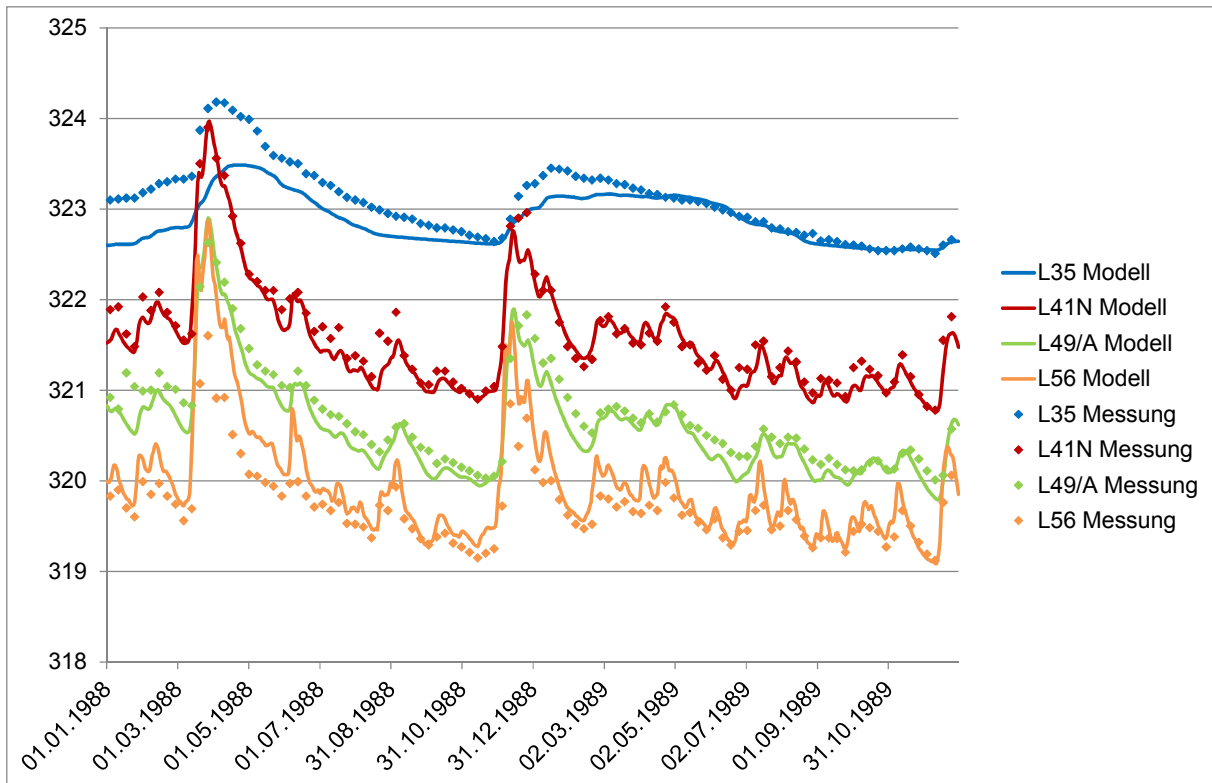


Abbildung 36: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der linksseitigen Auestufe zwischen Kiefenholz und Gmünder Au im Zeitraum 1988 – 1989.

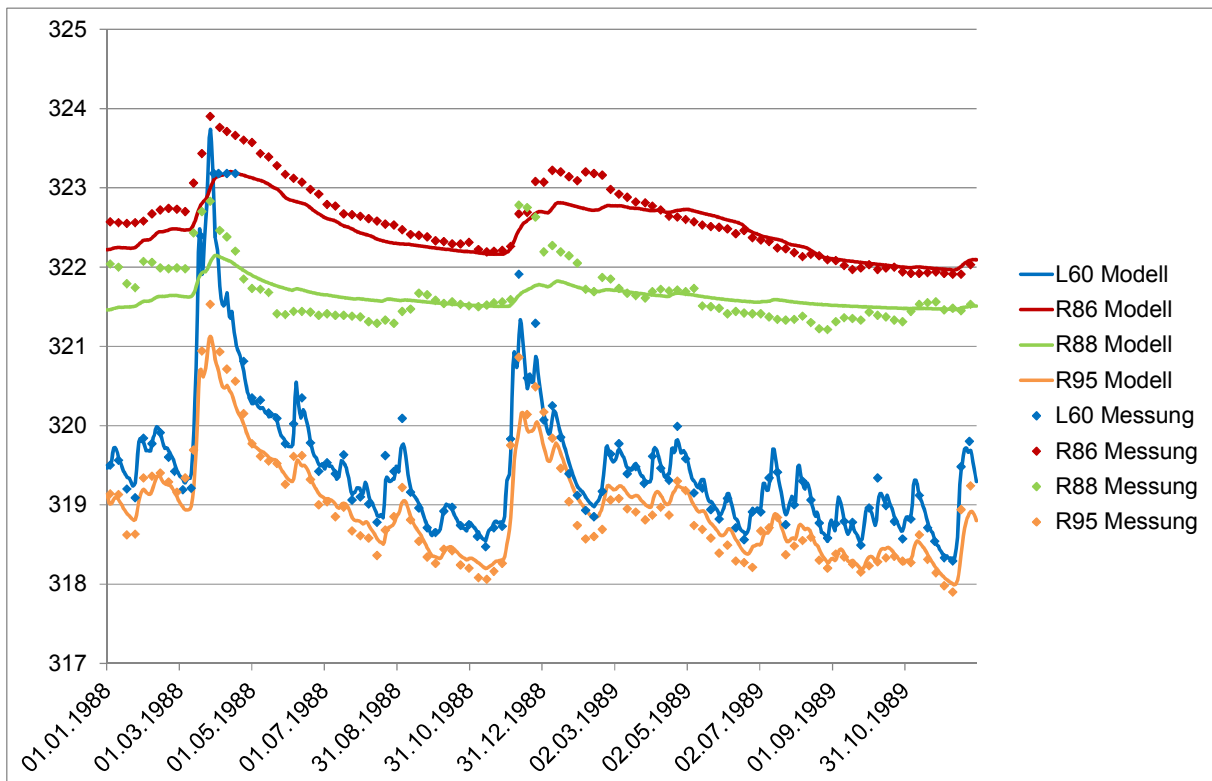


Abbildung 37: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des östlichen Modellrandes im Zeitraum 1988 – 1989.

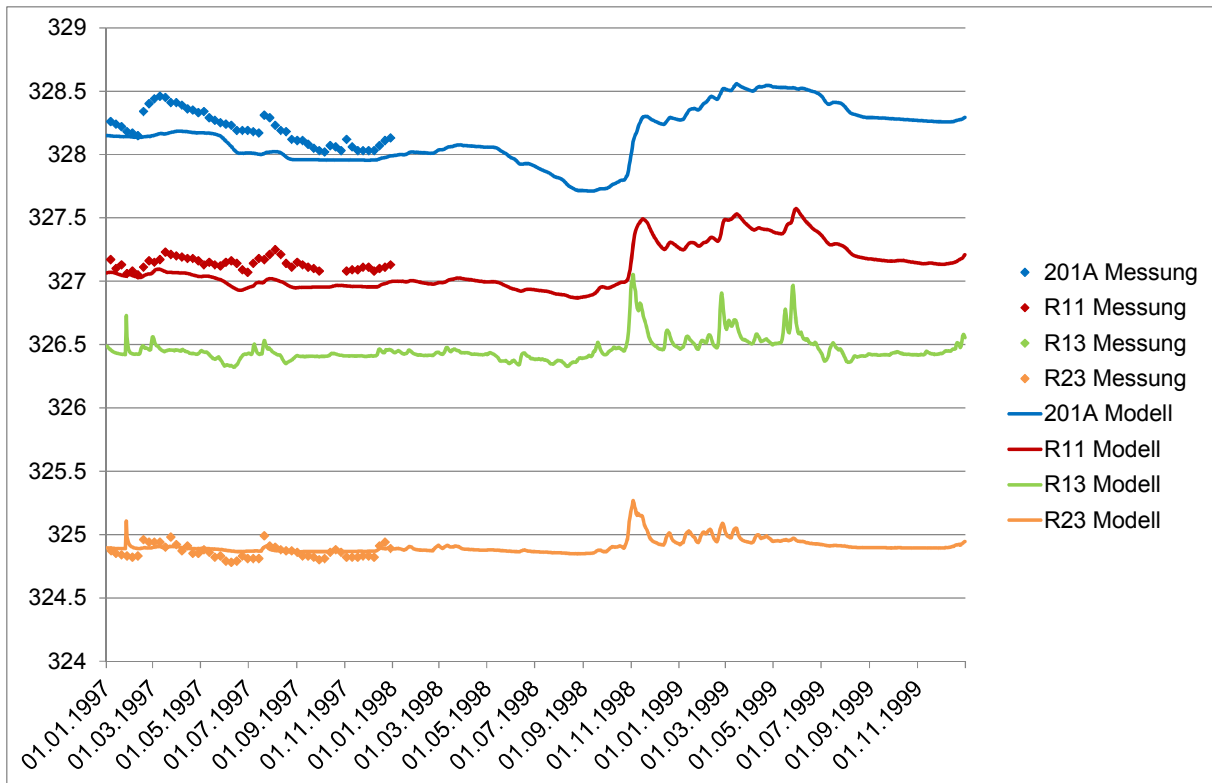


Abbildung 38: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Neutraubling – Sarching im Zeitraum 1997 – 1999.

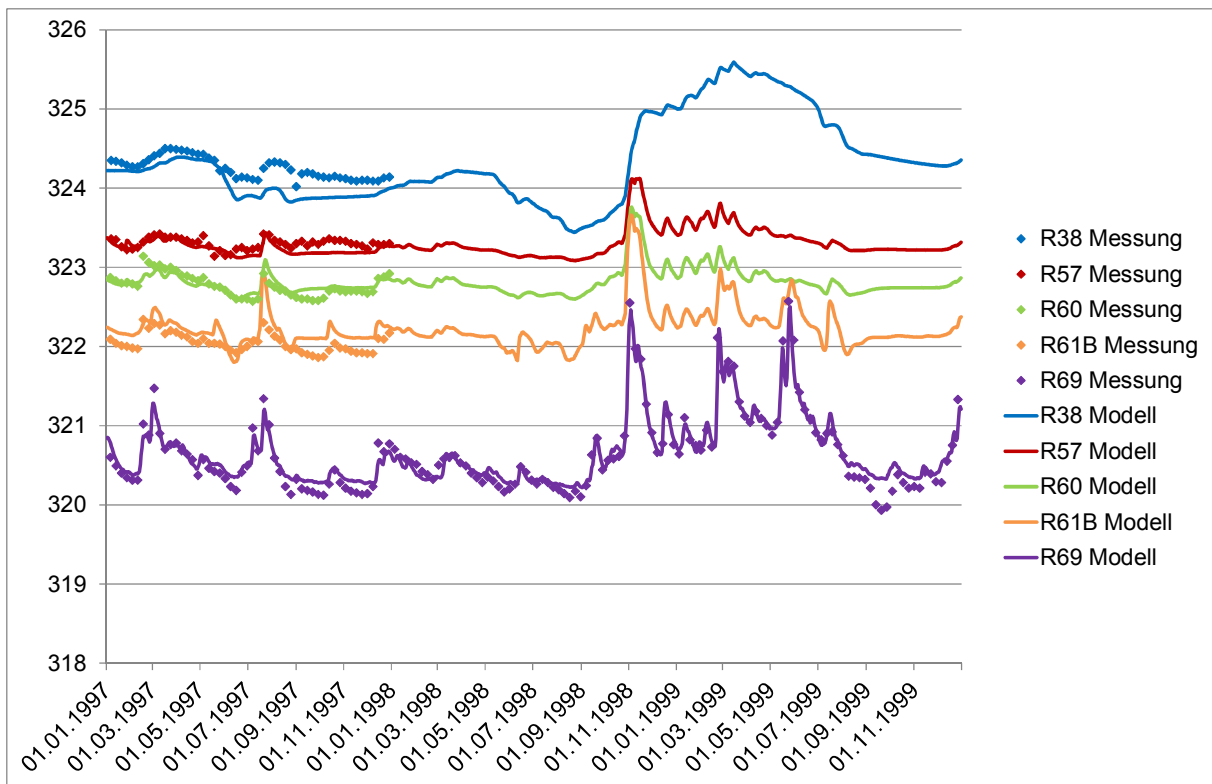


Abbildung 39: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Auestufe zwischen Friesheim und Pfatter im Zeitraum 1997 – 1999.

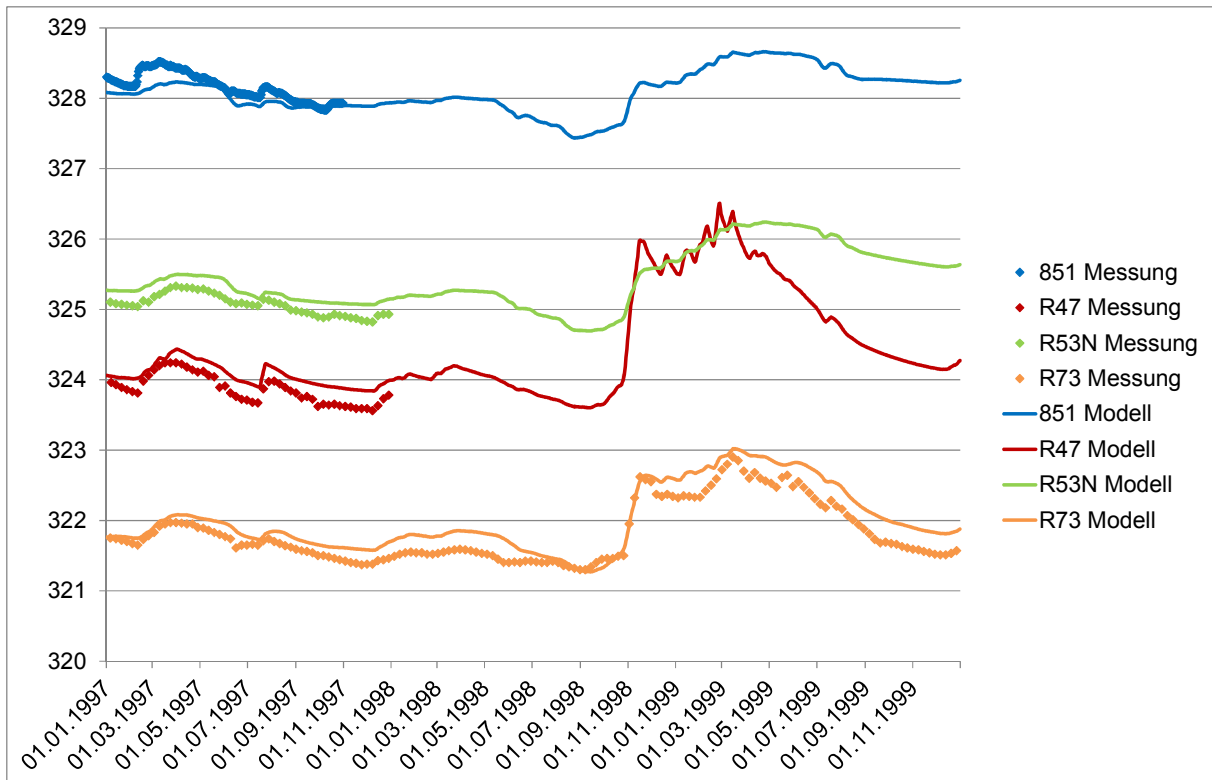


Abbildung 40: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Terrassenstufe zwischen Eltheim und Pfatter im Zeitraum 1997 – 1999.

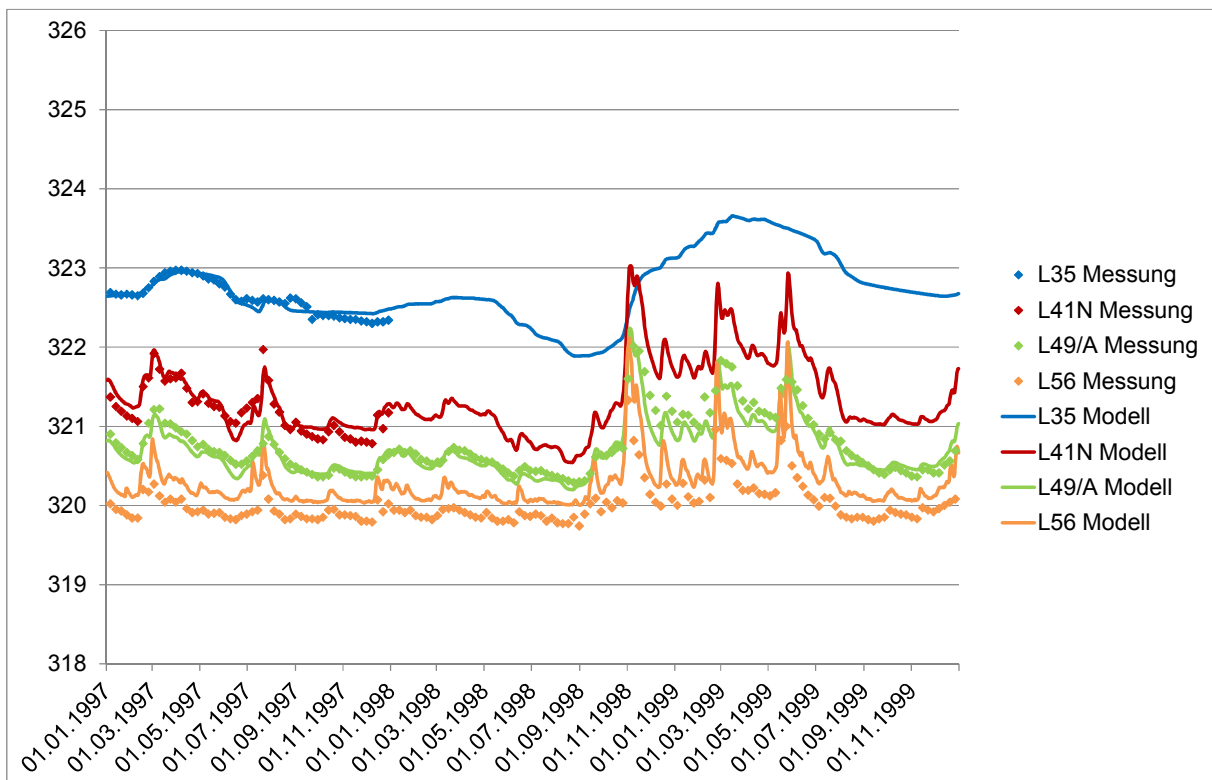


Abbildung 41: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der linksseitigen Auestufe zwischen Kiefenholz und Gmünder Au im Zeitraum 1997 – 1999.

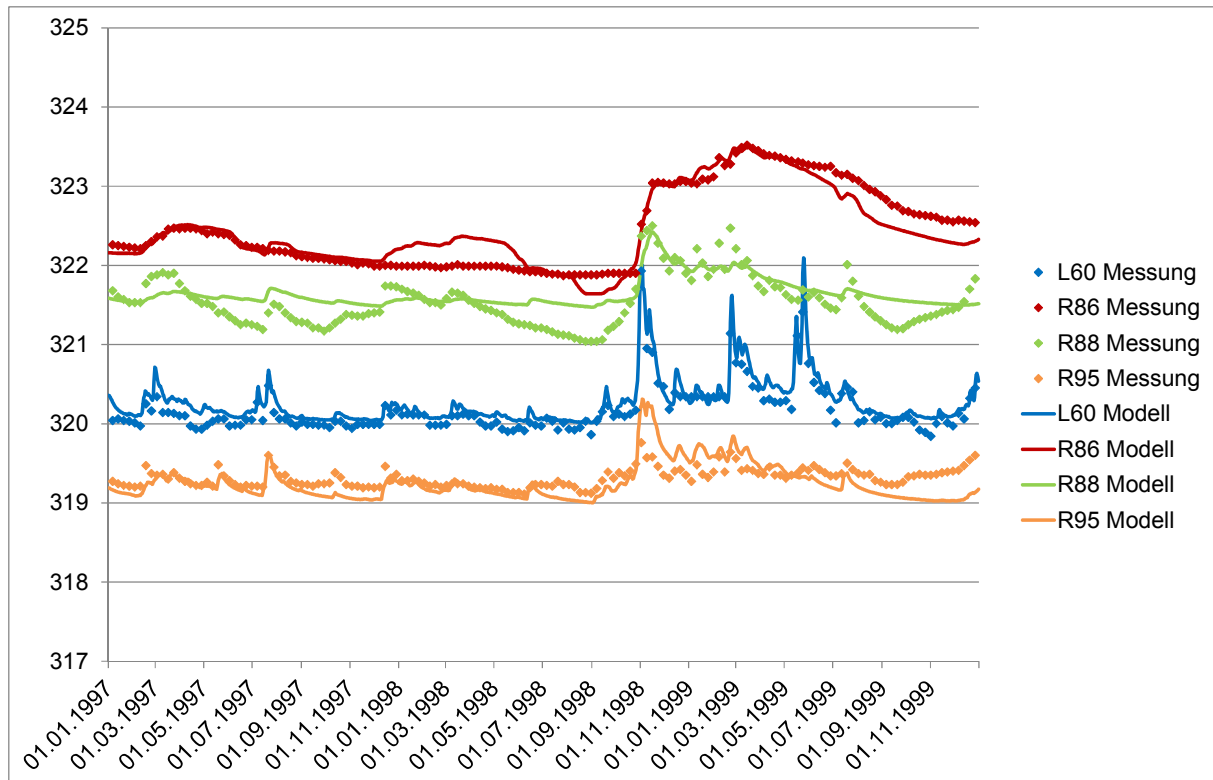


Abbildung 42: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des östlichen Modellrandes im Zeitraum 1997 – 1999.

3.3.2 Vergleich der Drainagemengen an den Schöpfwerken

Schöpfwerke

Die im Modell entlang der Drainagegewässer anfallenden Abflüsse wurden mit den Fördermengen in den Schöpfwerken verglichen. Bei starken Niederschlägen fördern diese zwar auch oberflächlich abgeleitetes Wasser, im Normalfall entspricht die Fördermenge jedoch dem drainierten Grundwasser in den Zuleitungen.

Übereinstimmung

Die Übereinstimmung der Modellwerte mit den gemessenen Fördermengen ist sehr gut. Eine Ausnahme bilden die Schöpfwerke Demling und Pondorf, bei welchen die Modellwerte deutlich kleiner sind als die Fördermenge. Dies kann dadurch erklärt werden, dass diese beiden Schöpfwerke auch Wasser aus Bächen fördern, welche den nördlichen Talhang entwässern.

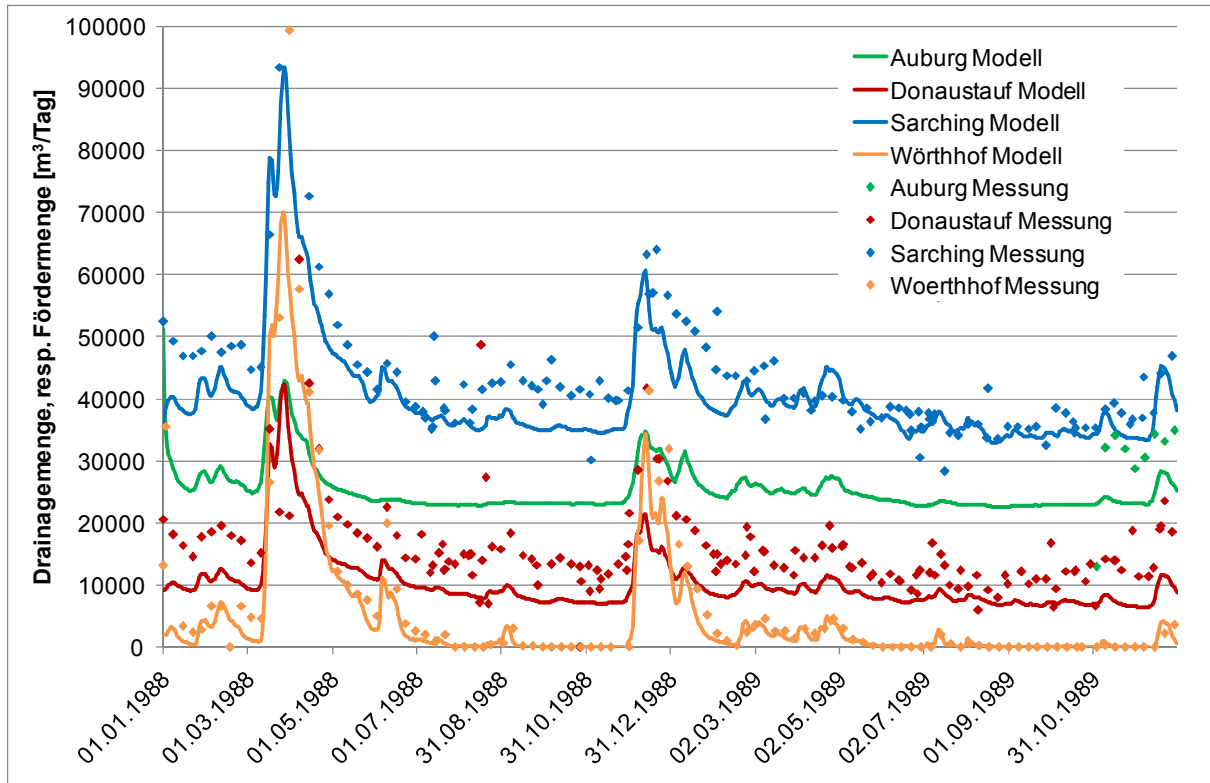


Abbildung 43: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 1988 – 1989.

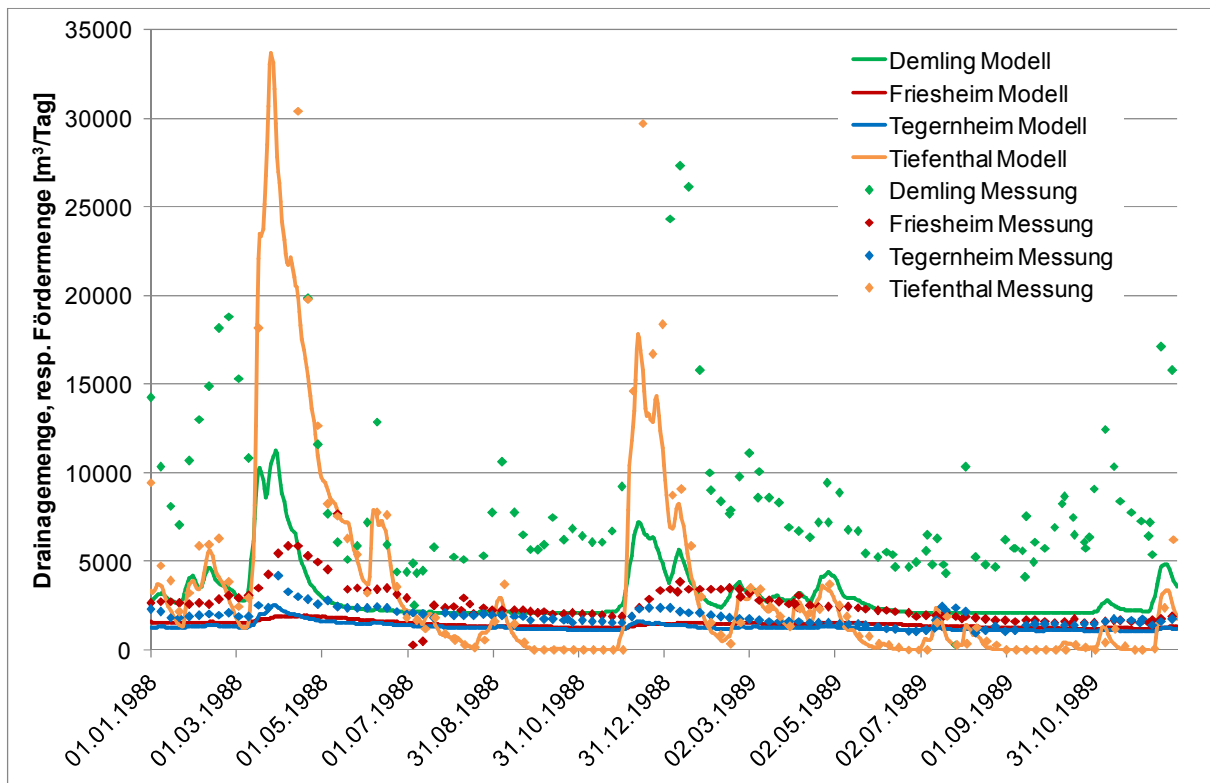


Abbildung 44: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 1988 – 1989.

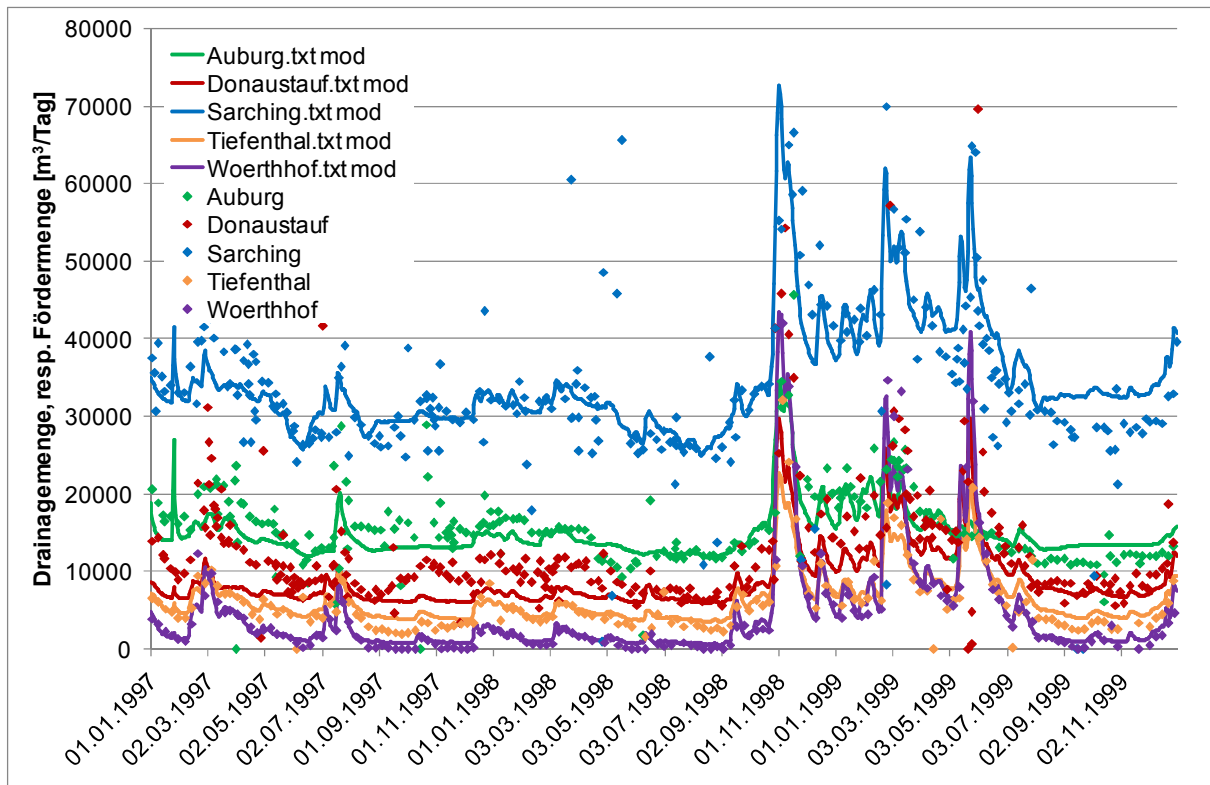


Abbildung 45: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 1997 - 1999

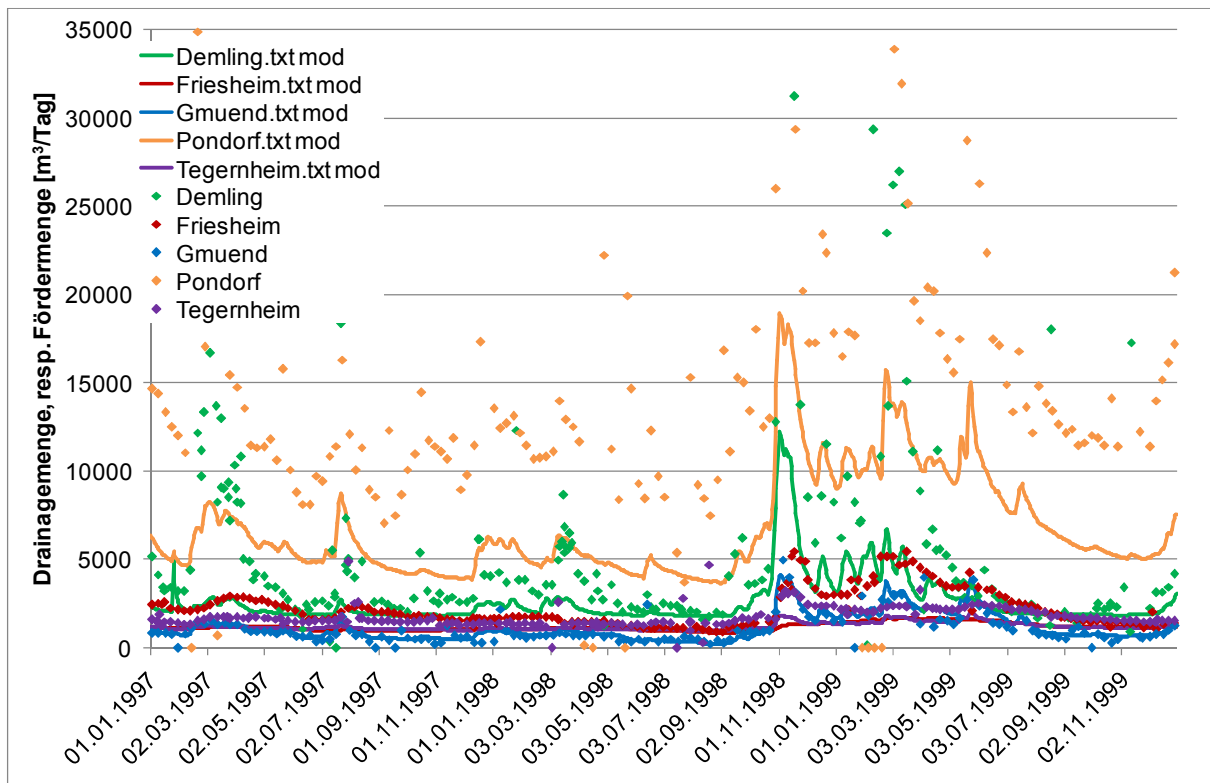


Abbildung 46: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 1997 - 1999

3.4 Resultierende Modellparameter

Durchlässigkeit

Die resultierenden Modellparameter sind in Abbildung 47 bis Abbildung 52 dargestellt. Die Durchlässigkeitswerte des Grundwasserleiters bewegen sich mit Werten zwischen 5×10^{-4} bis 5×10^{-3} m/s im Rahmen der erwarteten Spannweite. Die Durchlässigkeiten der Auestufe sind tendenziell etwas höher als jene der Niederterrasse.

Extremwerte

Im Bereich des umspundeten BMW-Werks und des Modellrandes bei Bach an der Donau mussten tiefere Durchlässigkeiten vorgegeben werden. Dem Bereich der neu gebaggerten Kiesgrubenseen in Neutraubling wurden höhere Werte zugeordnet.

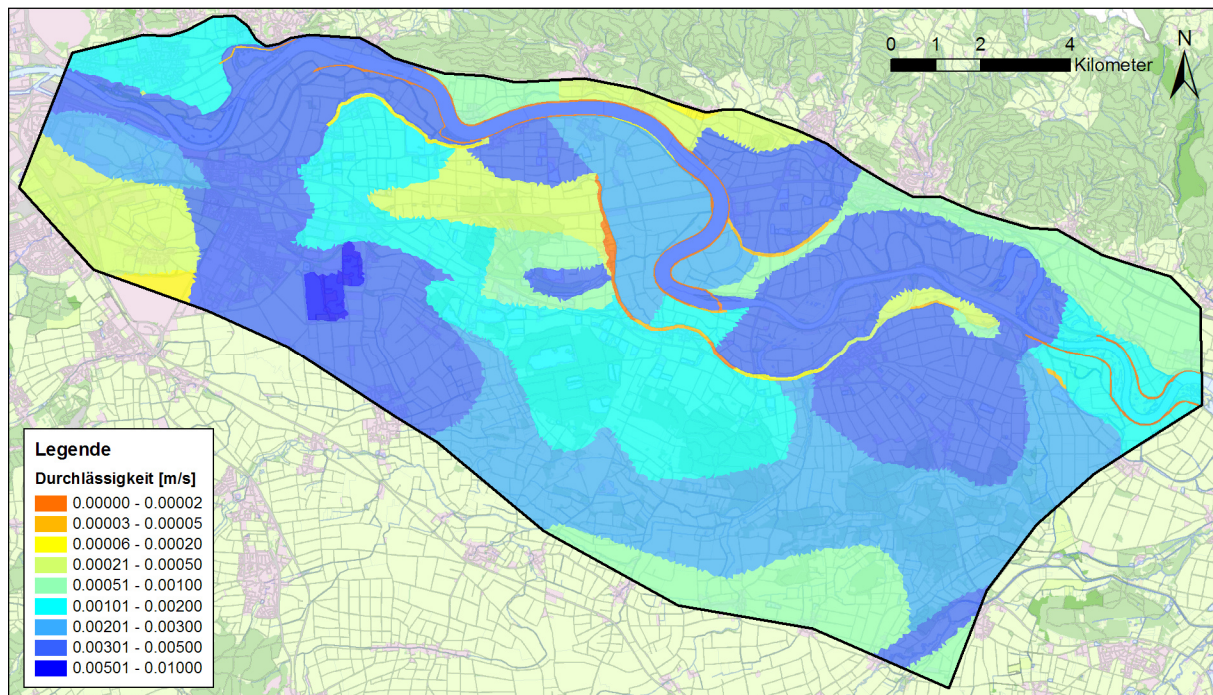


Abbildung 47:

Resultierende Durchlässigkeitswerte des Modells im Zustand nach Bau der Staustufen

Speicherkoefizient

Abbildung 48 zeigt die wirksame Porosität im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels (Speicherkoefizient). Bei der Kalibrierung zeigte sich, dass die Ganglinien des Grundwasserspiegels im Bereich der Niederterrasse mit einem Speicherkoefizient von 20% nachgebildet werden können. In der Auestufe wurde der Speicherkoefizient auf 15% belassen. Bei Einstau der Deckschicht wird dort ein Speicherkoefizient von 4% angesetzt. Auf diesen Wert reagiert das Modell sensibler als auf den Grundwert.

Tiefere Speicherkoefizienten wurden dem Gebiet westlich von Eltheim zugeordnet. In diesem Gebiet ist auch die aus der Kalibrierung resultierende Durchlässigkeit tiefer. Unter der Donau wurde ebenfalls ein tiefer Speicherkoefizient gewählt, um die in Donaumitte vorgegebenen Wasserspiegelschwankungen ohne Zeitverlust ans Ufer zu übertragen. Grösseren Wasserflächen wurde ein Speicherkoefizient von 100% zugeordnet.

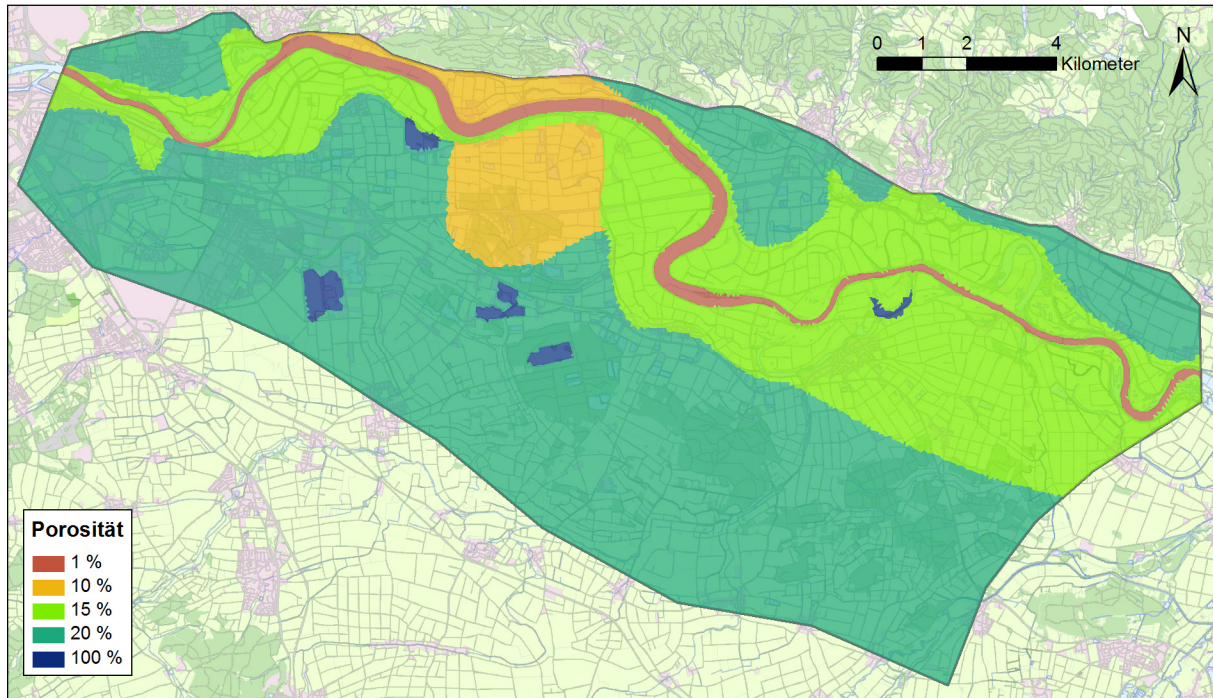


Abbildung 48: Im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels wirksame Porosität.

Leakagewerte

Die aus der Kalibrierung resultierenden Leakagewerte der Gewässer vor und nach dem Bau der Staustufen sind in Abbildung 49 bis Abbildung 52 dargestellt. Die höchsten Leakagewerte wurden der Donau, gefolgt von Laber, Pfatter und Wiesent zugeordnet. Die Drainagegewässer erhielten tiefere Leakagewerte.

Bau der Staustufen

Beim Bau der Staustufen wurde die Binnenentwässerung teilweise neu angelegt, teilweise wurden die bestehenden Kanäle durch Kiespfähle ertüchtigt. Dies zeigt sich auch in den aus der Kalibrierung resultierenden, höheren Leakagewerten.

Kolmation

Aufgrund der kleinen Fließgeschwindigkeit lagert sich im Stauration Feinmaterial ab. Dieses Material dichtet nach und nach die Sohle der Donau ab. Dies wirkt sich auf die Fördermengen im Schöpfwerk Auburg aus. Die Fördermenge des Schöpfwerks wurde zur Kalibrierung der Donau-Leakage in den Jahren 1976, 1988 und 1997 verwendet. In den dazwischen liegenden Validierungszeiträumen wurde eine stufenweise Abnahme angenommen.

Zeitabschnitt	Stauwurzel	Stauration	Staustufe
Vor 1985	100	200	100
1988 - 1989	60	10	20
1990 - 1991	53	8	18
1992 - 1993	45	5	15
1994 - 1996	37	3	12
1997 - 1999	30	1	10

Tabelle 5: Abnahme des Leakagewerts infolge Kolmation im Stauration

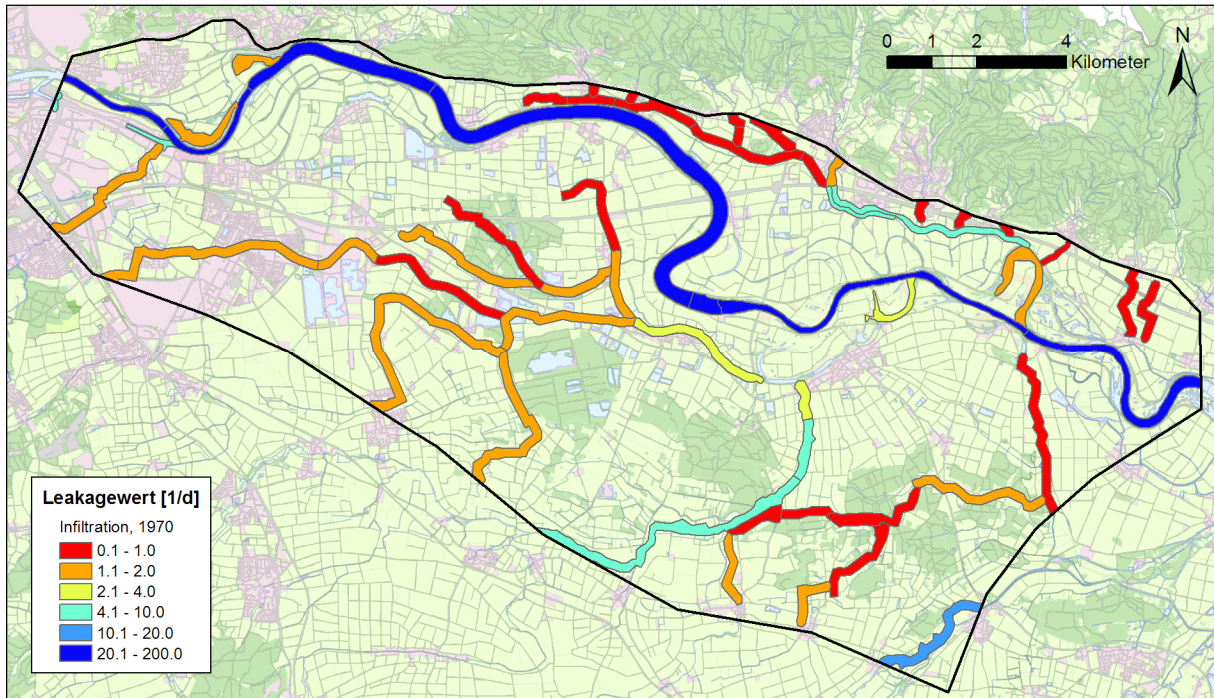


Abbildung 49: In-Leakage (Infiltration) im Zustand vor Bau der Staustufen (1976)

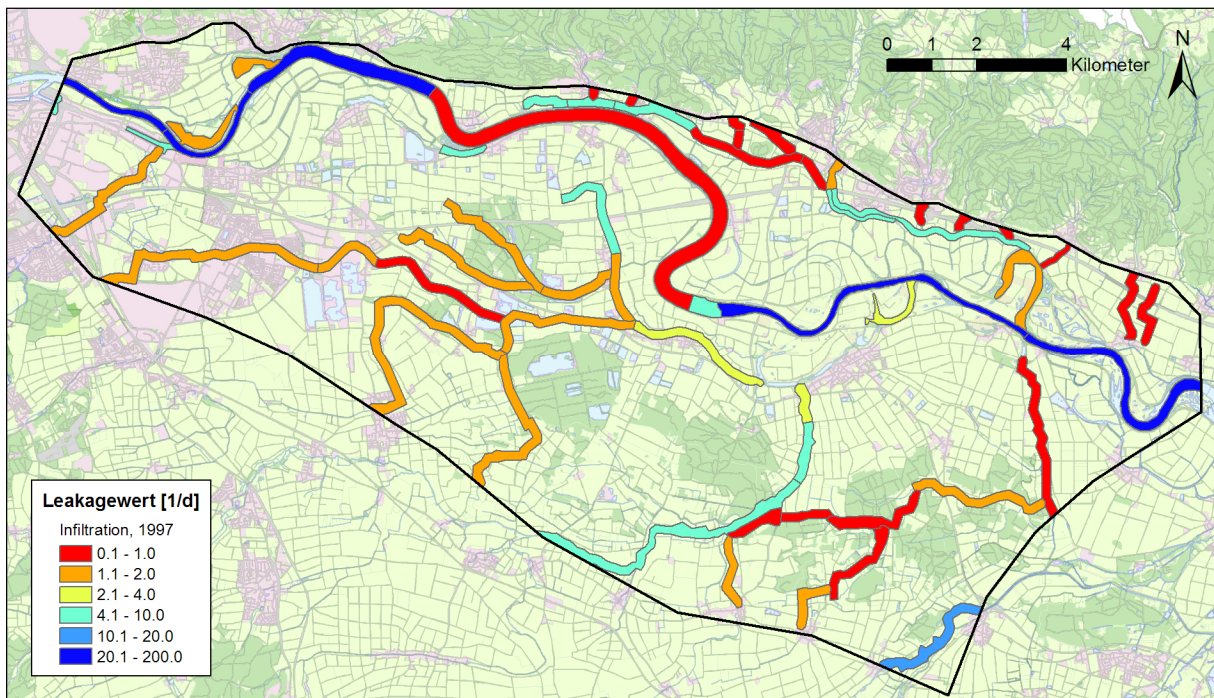


Abbildung 50: In-Leakage (Infiltration) im Zustand nach Bau der Staustufen (1997)

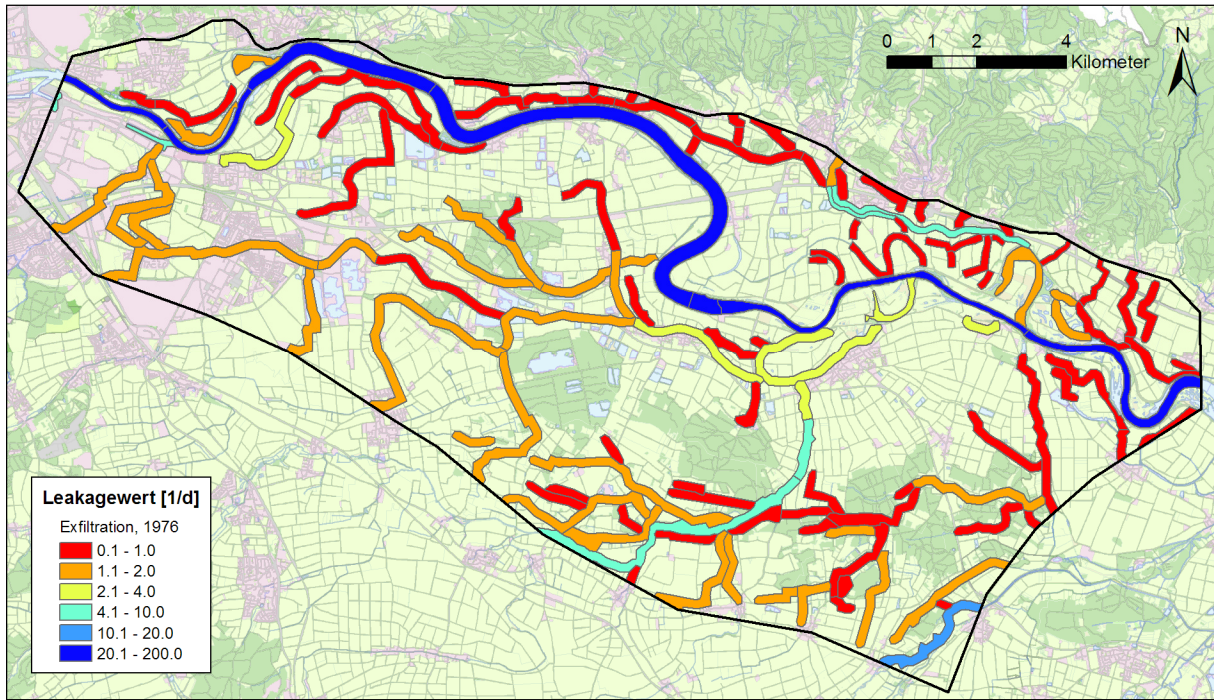


Abbildung 51: Out-Leakage (Exfiltration) im Zustand vor Bau der Staustufen (1976)

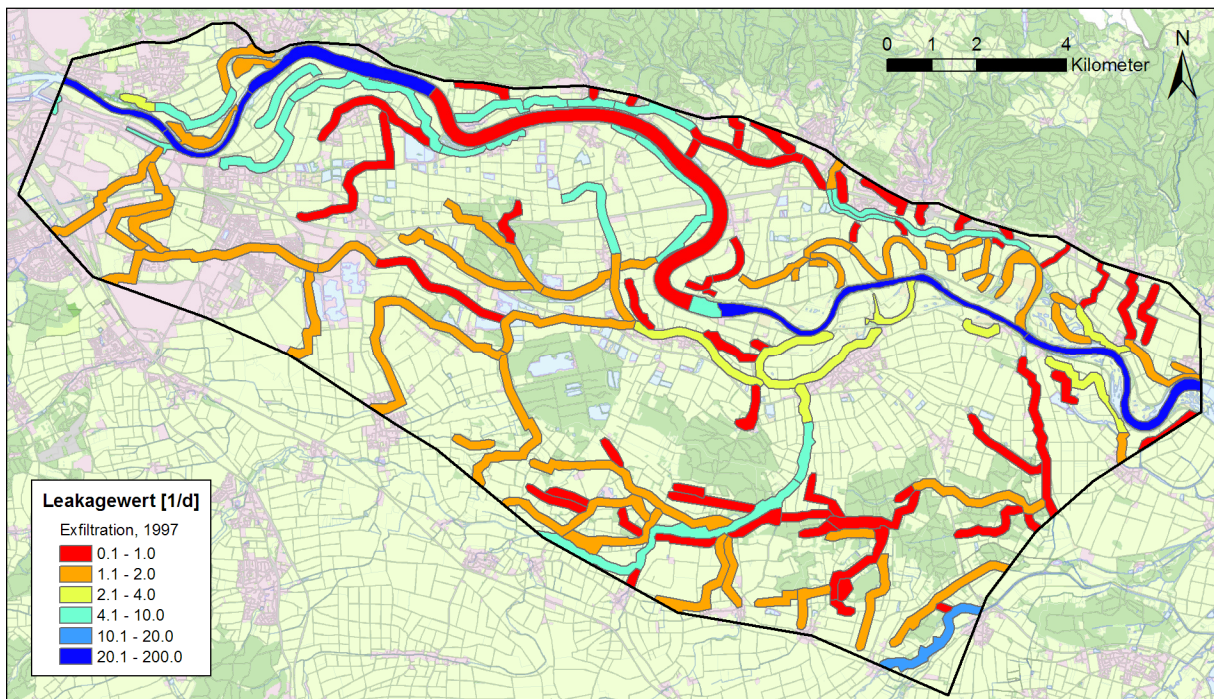


Abbildung 52: Out-Leakage (Exfiltration) im Zustand nach Bau der Staustufen (1997)

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 53 zeigt den Zustand vor, Abbildung 54 nach dem Bau der Staustufe. Die beiden Zustände unterscheiden sich vor allem entlang der Donau. Während im Jahr 1976 die Donau im Bereich der Staustufe noch als Vorfluter wirkte, strömt heute Wasser aus der Staustufe ins Grundwasser.

Hochwasser

In Abbildung 55 sind die Darcy-Geschwindigkeiten bei Hochwasser dargestellt. In diesem Zustand infiltriert kurzfristig auf der gesamten Länge der Donau Wasser ins Grundwasser. Die Strömungsmengen sind im Vergleich zum Niederwasser deutlich erhöht. Klar erkennbar ist auch der durchlässigere Abschnitt der Dichtwand bei Auburg.

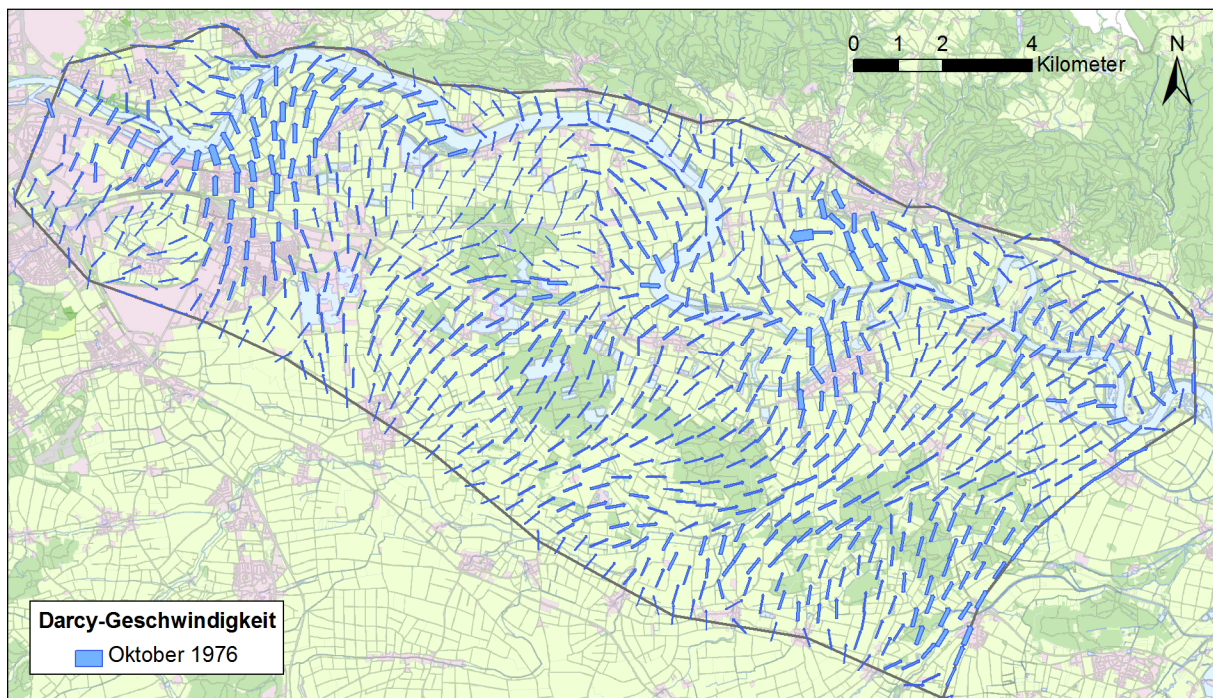


Abbildung 53: Darcy-Geschwindigkeiten am 4. Oktober 1976 (Niederwasser vor dem Bau der Staustufen)

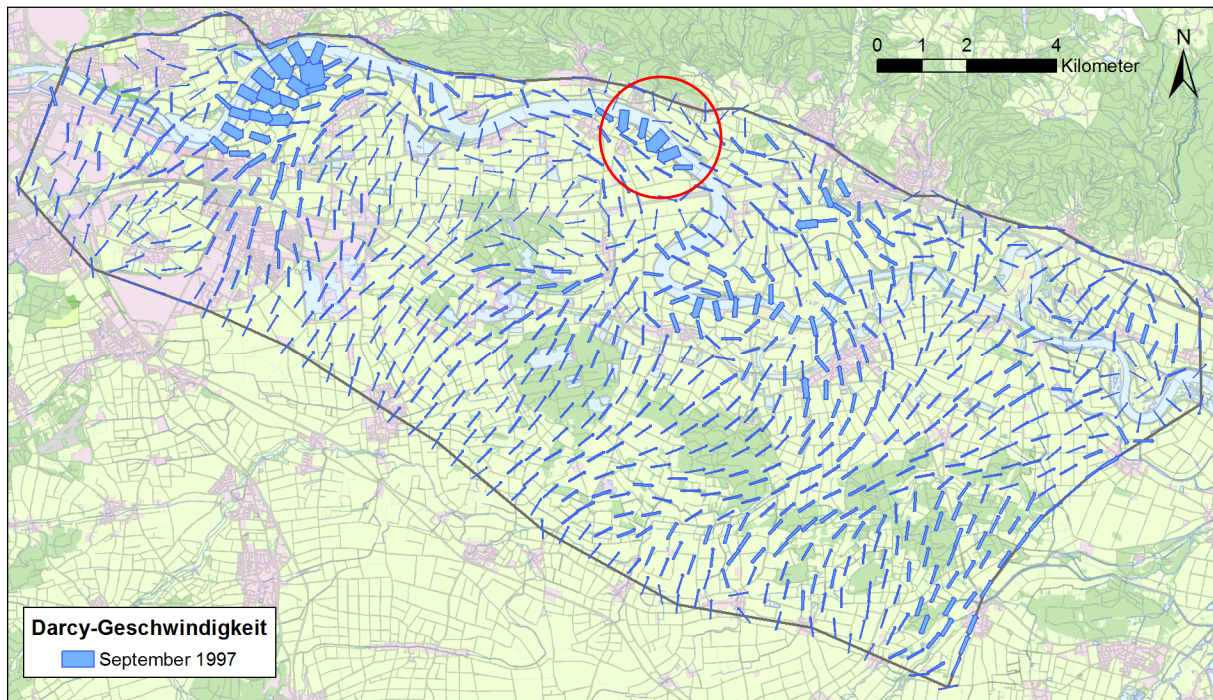


Abbildung 54: Darcy-Geschwindigkeiten am 22. September 1997 (Niederwasser nach dem Bau der Staustufen). Roter Kreis: Bereich der grösseren Dichtwanddurchlässigkeit bei Auburg.

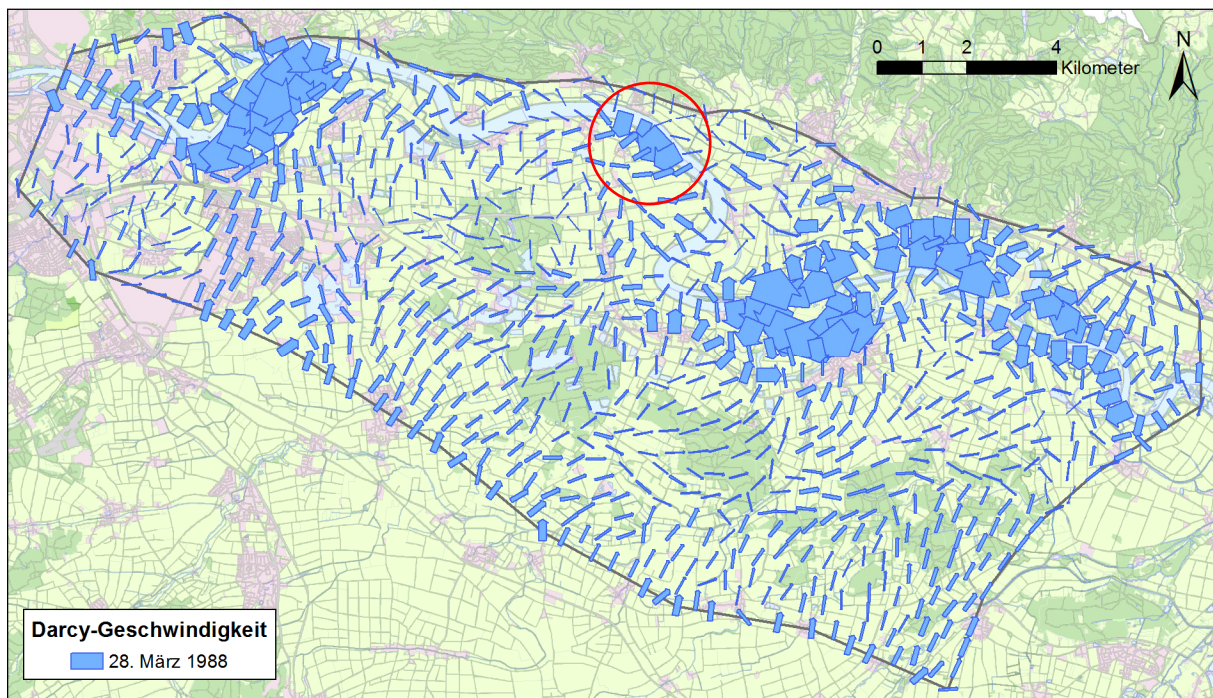


Abbildung 55: Darcy-Geschwindigkeiten am 28. März 1988 (Donau-Hochwasser). Roter Kreis: Bereich der grösseren Dichtwanddurchlässigkeit bei Auburg.

3.6 Wasserbilanz

Überblick

Zur Darstellung der Wasserbilanz wurden die beiden Jahre 1977 und 1993 herangezogen. Die beiden Jahre entsprechen von den klimatischen Bedingungen etwa dem Mittelwert der Jahre 1970 bis 2014 [8]. Die Wasserbilanzen sind in Abbildung 56 und Abbildung 57 dargestellt. Die grössten Anteile an der Wasserbilanz besitzen die Neubildung aus Niederschlag, sowie der Austausch mit den Oberflächengewässern. Fördermenge, Entnahme für die Bewässerung und Seitzufluss besitzen nur eine untergeordnete Bedeutung.

Unterschiede

Im Jahr 1977 waren die beiden Staustufen noch nicht gebaut. Die Strömung zur Donau hin (Exfiltration) überstieg deutlich jene von der Donau ins Grundwasser (Infiltration). Gesamthaft gesehen wirkte die Donau als Vorfluter. Im Jahr 1993, nach dem Bau der Staustufen, hat sich die Situation verändert. Die Exfiltration in die Donau hat deutlich abgenommen. Stattdessen exfiltriert das Grundwasser in die Binnenentwässerung und wird über die Schöpfwerke in die Donau zurückgeführt.

Maximalwerte der Schöpfungsmengen

Für die Planung der landseitigen Entwässerung der Flutpolder ist der Grundwasseranfall in den Schöpfwerken bei Hochwassersituationen von Interesse. Tabelle 6 zeigt die berechnete maximale Förderrate der Schöpfwerke im Zeitraum 1997 – 1999. In allen Schöpfwerken zusammen beträgt diese 2.8 m³/s. Dies entspricht etwa dem dreifachen der mittleren Schöpfprate gemäss Abbildung 57.

Schöpfwerk	Maximale Förderrate [m ³ /s]
Auburg	0.40
Demling	0.14
Donaustauf	0.34
Friesheim	0.02
Gmuend	0.05
Pondorf	0.22
Sarching	0.84
Tegernheim	0.02
Tiefenthal	0.26
Woerthhof	0.50

Tabelle 6: Berechnete maximale Schöpfprate im Zeitraum 1997 bis 1999.

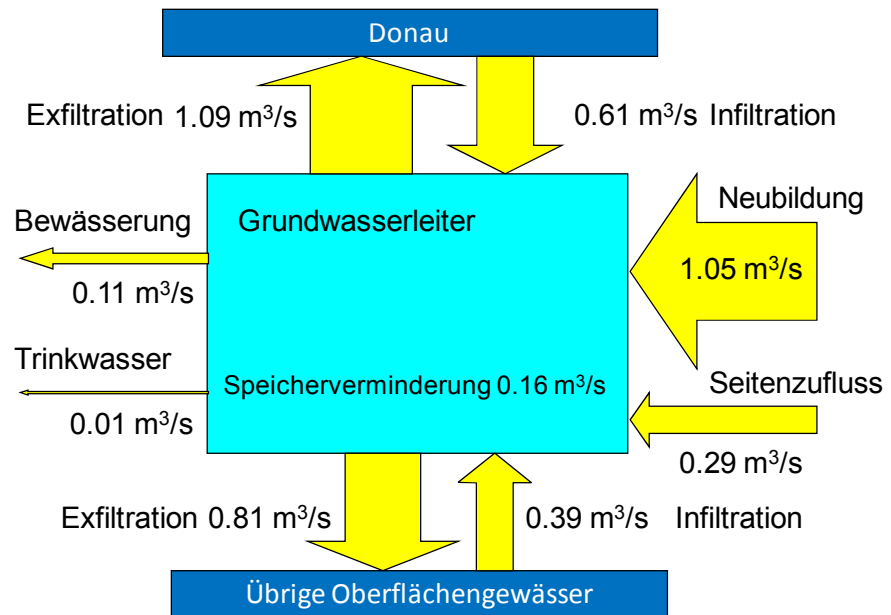


Abbildung 56:

Wasserbilanz über das hydrologische Jahr 1977, vor dem Bau der Staustufen

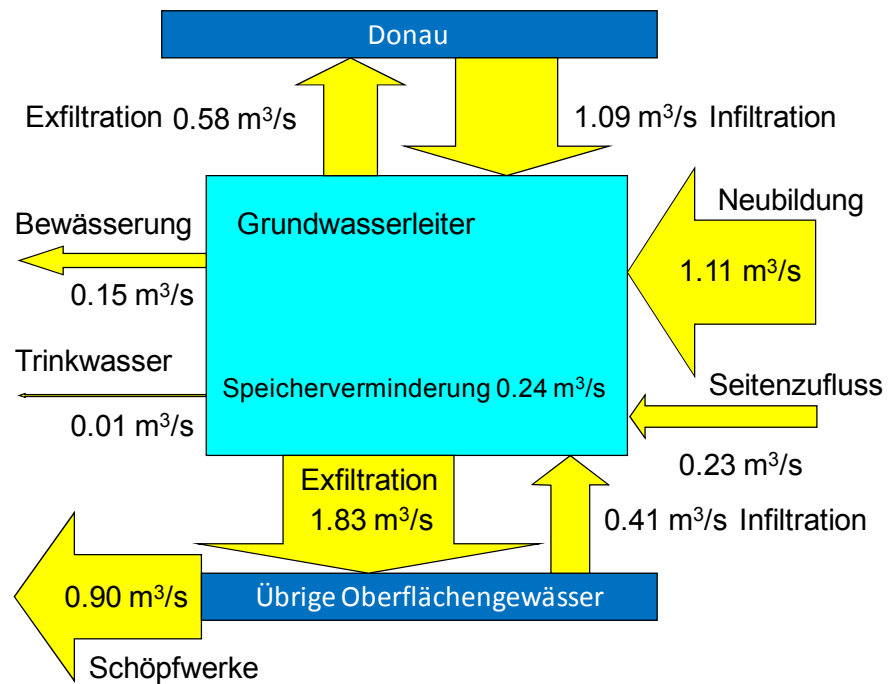


Abbildung 57:

Wasserbilanz über das hydrologische Jahr 1993, nach dem Bau der Staustufe Geisling

4 Validierung an weiteren Datensätzen

4.1 Grundwasserspiegeldaten der Jahre 1990 bis 1996

Datenauswahl	Zur Validierung der Kalibrierung wurden die Grundwasserstände der Jahre 1990 bis 1996 ausgewählt. In diesen Jahren wurden besonders viele Messdaten erhoben, da die Beweissicherung für beide Staustufen in Betrieb war. Insgesamt stehen im Zeitraum 109'000 Messdaten des Grundwasserspiegels zur Verfügung.
Bauzustände	Im Validierungszeitraum wurden die Dichtwände der Staustufe Straubing erstellt, sowie die Schöpfwerke Gmünd, Kirchenbach und Pfatter in Betrieb genommen. Der Bau der Dichtwände wurde durch entsprechende Zuordnung der Durchlässigkeit berücksichtigt. Die Binnenentwässerung wurde als unverändert betrachtet.
Kolmation	Bei der Kalibrierung der Zeiträume 1988-89 und 1997-1999 wurde die Kolmation der Donausohle infolge der Stauhaltung ermittelt. Für die dazwischen liegenden Jahre des Validierungszeitraums wurde die Sohlendurchlässigkeit jeweils in Schritten von zwei Jahren verkleinert (Tabelle 5).
Gütwerte	Tabelle 7 zeigt die Gütwerte der Validierung. Die Übereinstimmung der Modellwerte mit den Messungen ist gleich gut wie bei der Kalibrierung. Damit wird gezeigt, dass das Modell auch weitere Zeiträume abbilden kann.

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichung (RMSE) [cm]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Median der Absoluten Abweichung [cm]
1990 - 1991	39	26	19
1992 - 1993	35	25	18
1994 - 1996	34	24	18

Tabelle 7: Gütwerte der Validierung

Zeitliche Übereinstimmung	In Abbildung 58 bis Abbildung 67 sind die Zeitkurven des Grundwasserspiegels an ausgewählten Messstellen für die Validierungszeiträume dargestellt. Die Lage der Messstellen ist in Abbildung 27 dargestellt.
---------------------------	---

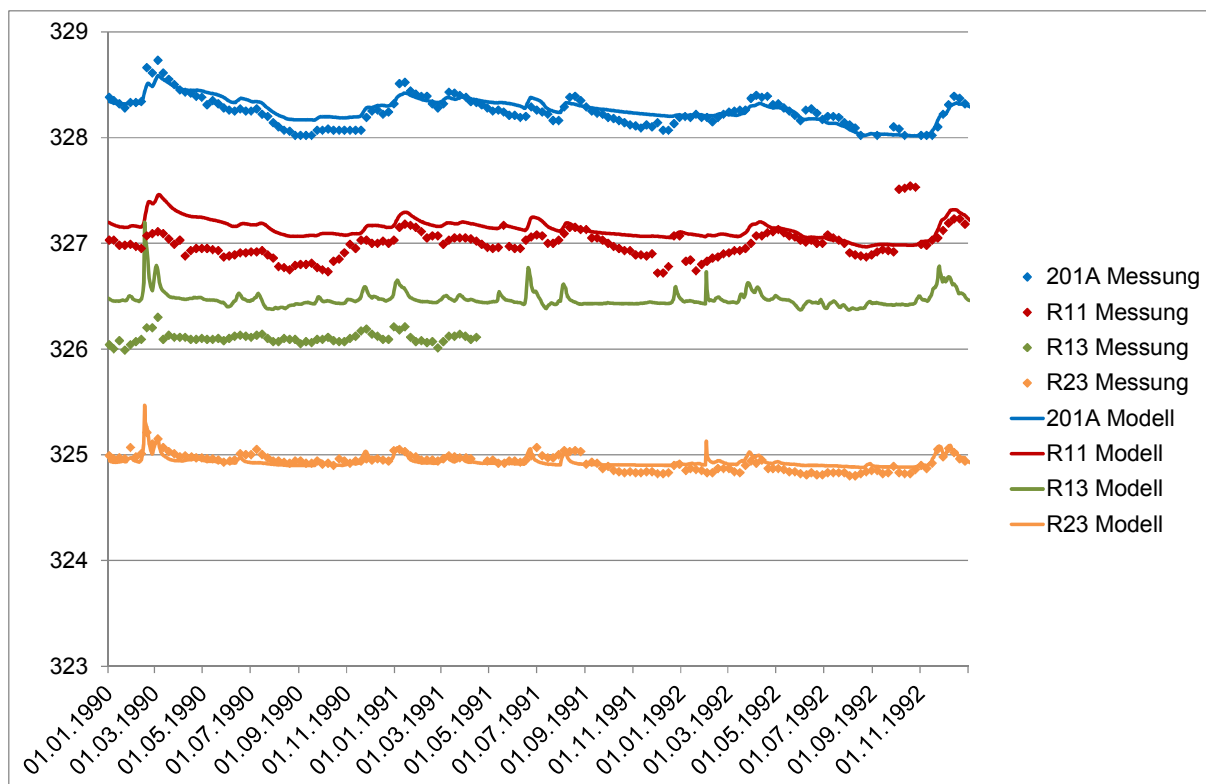


Abbildung 58: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Neutraubling – Sarching im Zeitraum 1990 – 1992

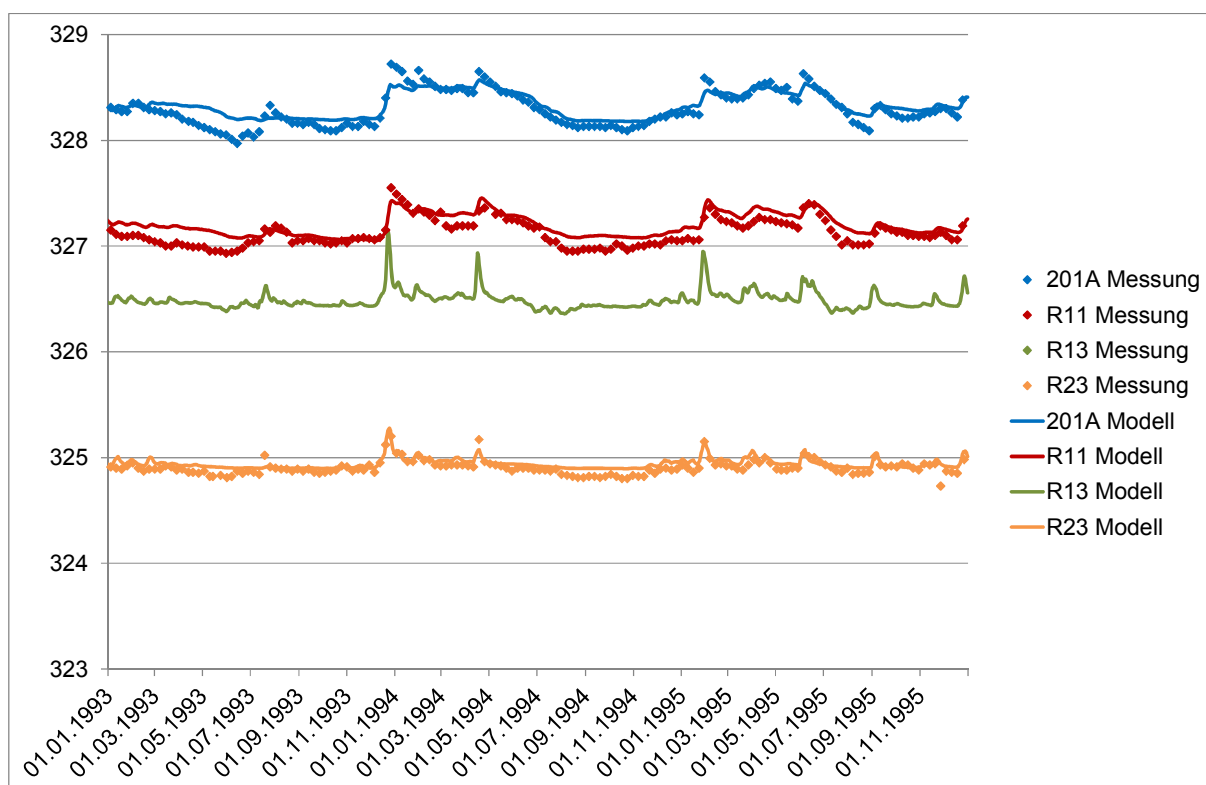


Abbildung 59: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Neutraubling – Sarching im Zeitraum 1993 – 1995

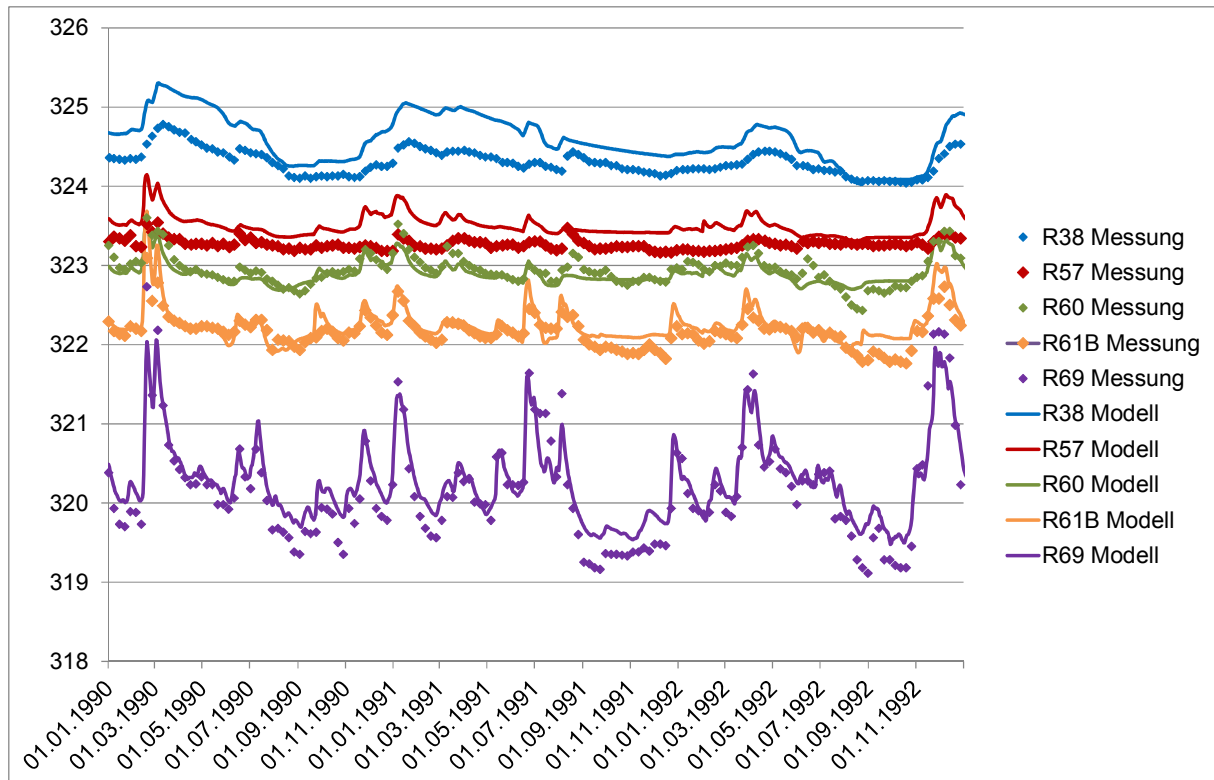


Abbildung 60: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Auestufe zwischen Friesheim und Pfatter im Zeitraum 1990 – 1992.

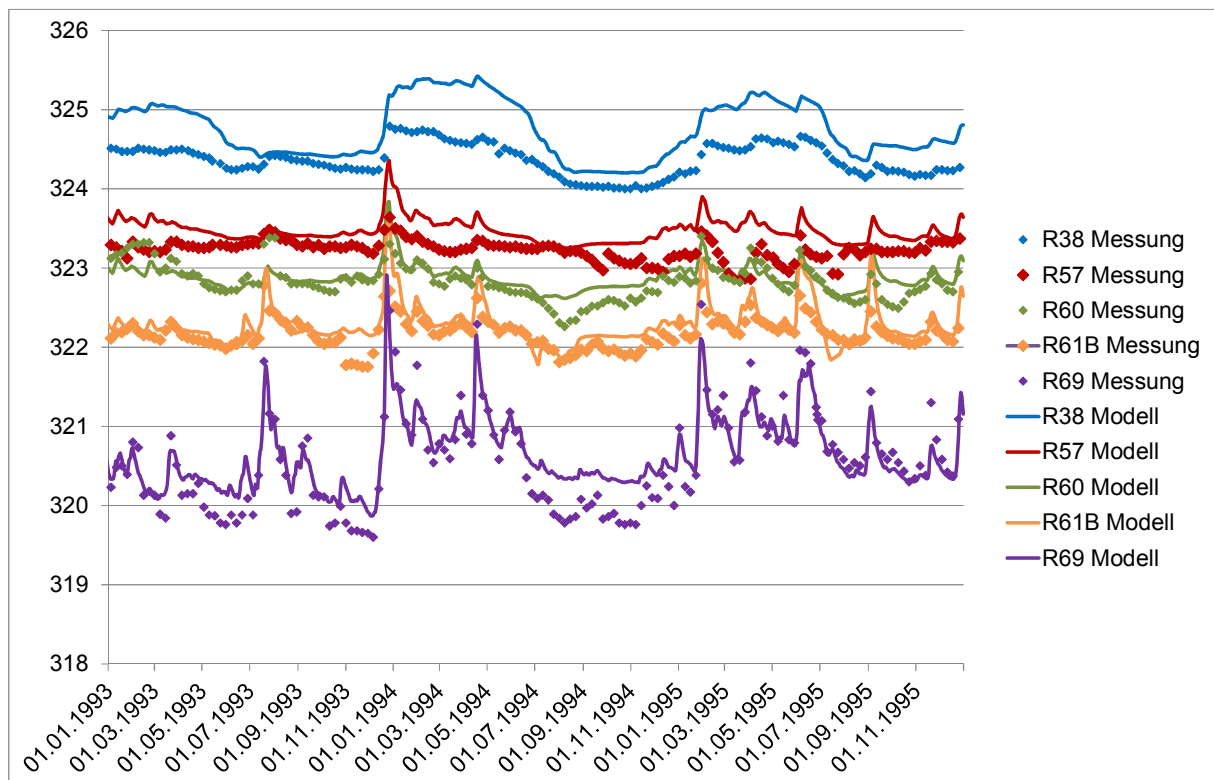


Abbildung 61: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Auestufe zwischen Friesheim und Pfatter im Zeitraum 1993 – 1995.

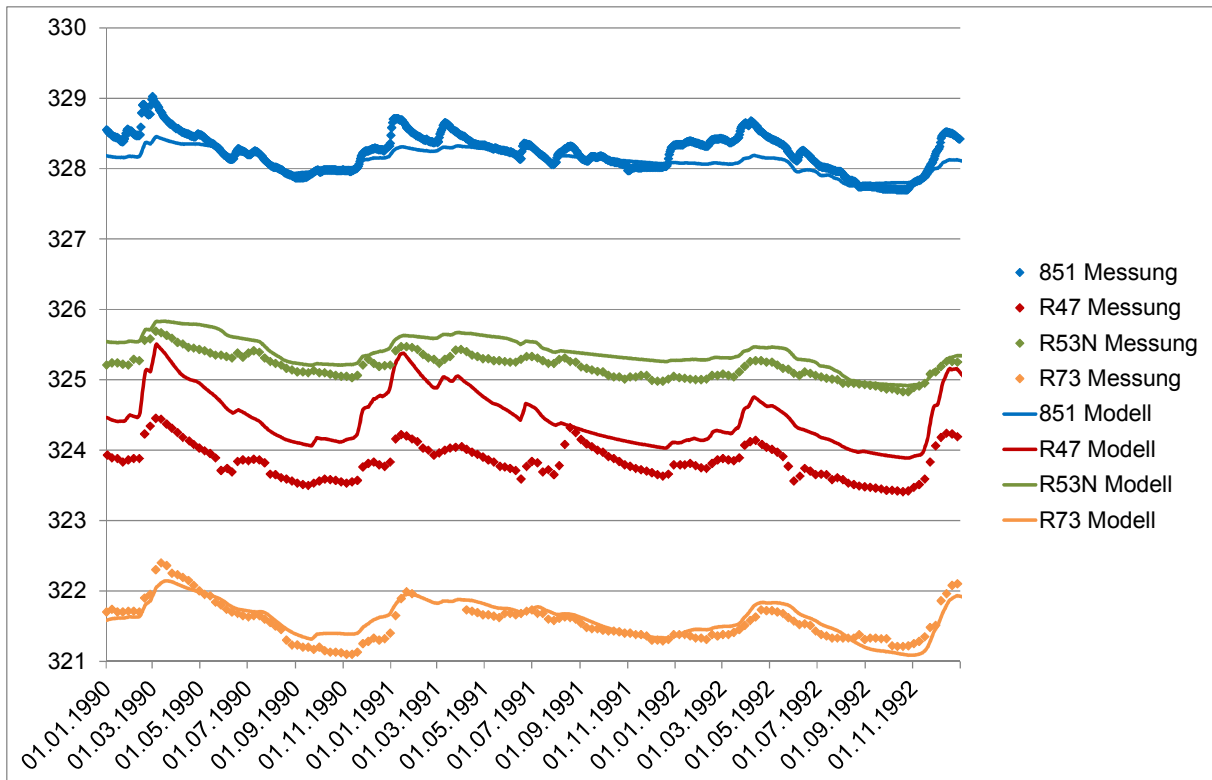


Abbildung 62: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Terrassenstufe zwischen Eltheim und Pfatter im Zeitraum 1990 – 1992.

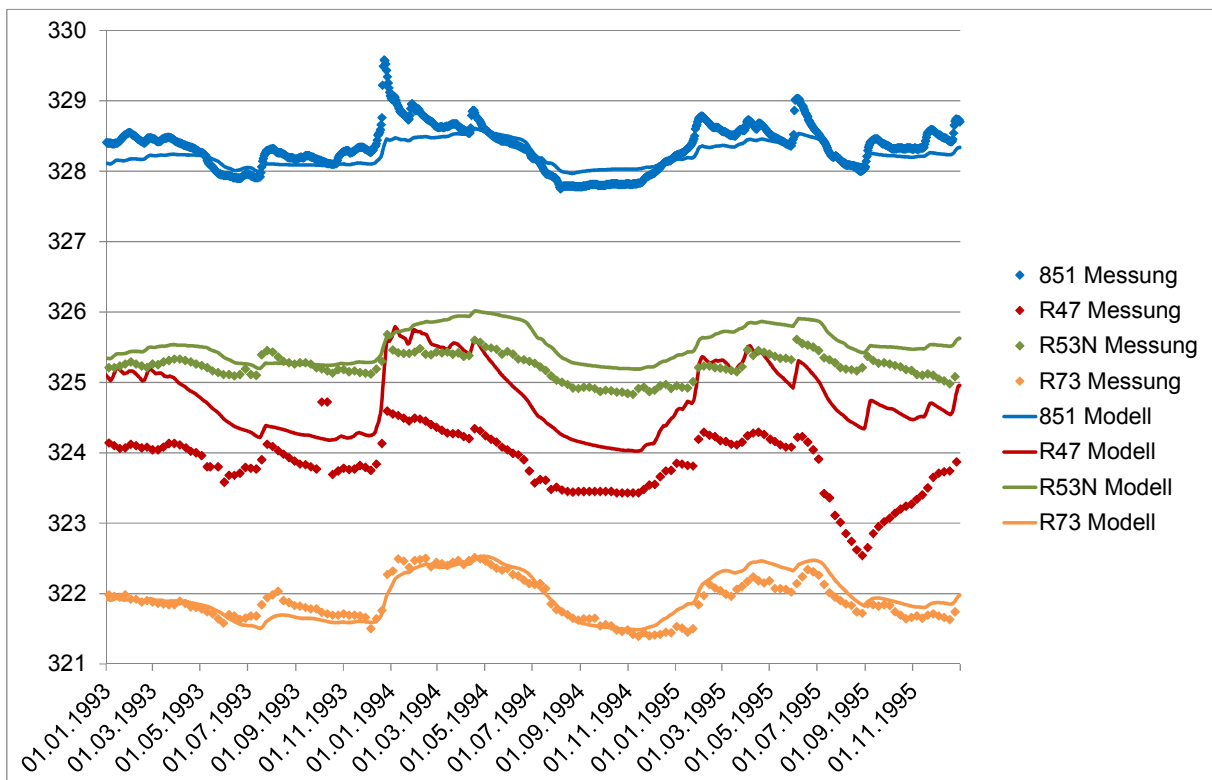


Abbildung 63: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Terrassenstufe zwischen Eltheim und Pfatter im Zeitraum 1993 – 1995.

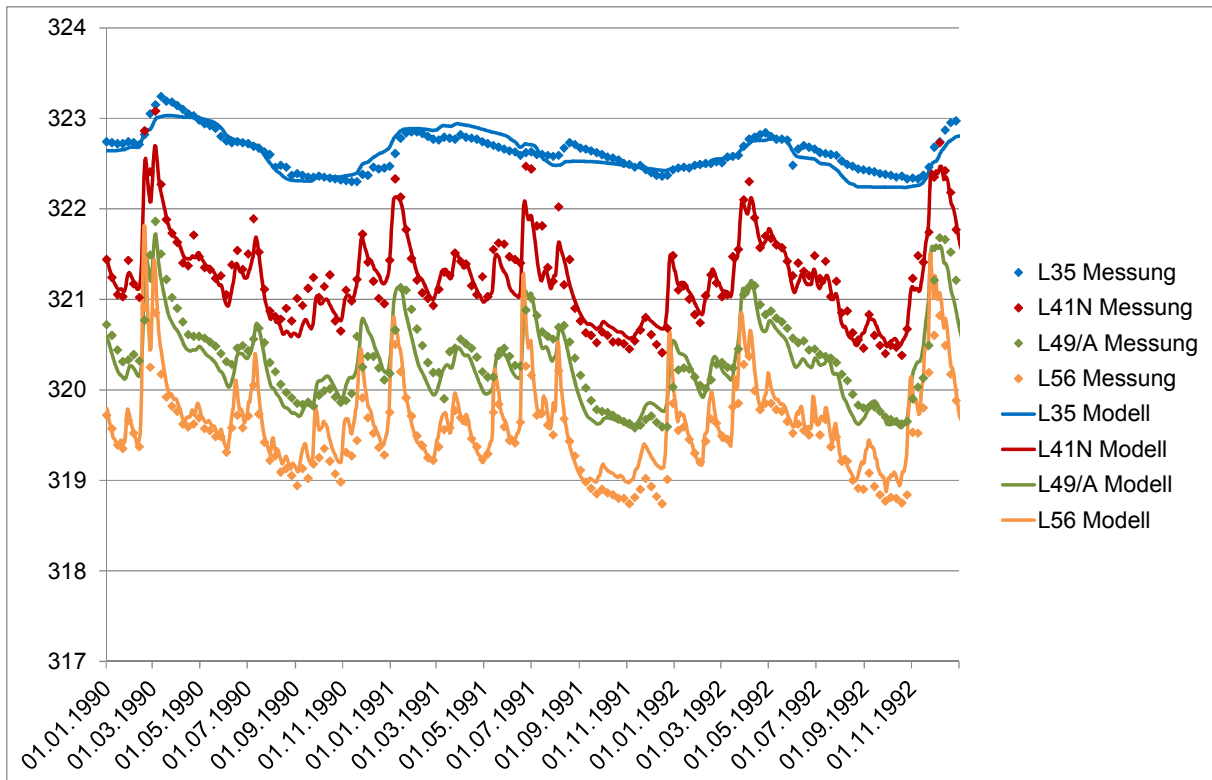


Abbildung 64: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der linksseitigen Auestufe zwischen Kiefenholz und Gmünder Au im Zeitraum 1990 – 1992.

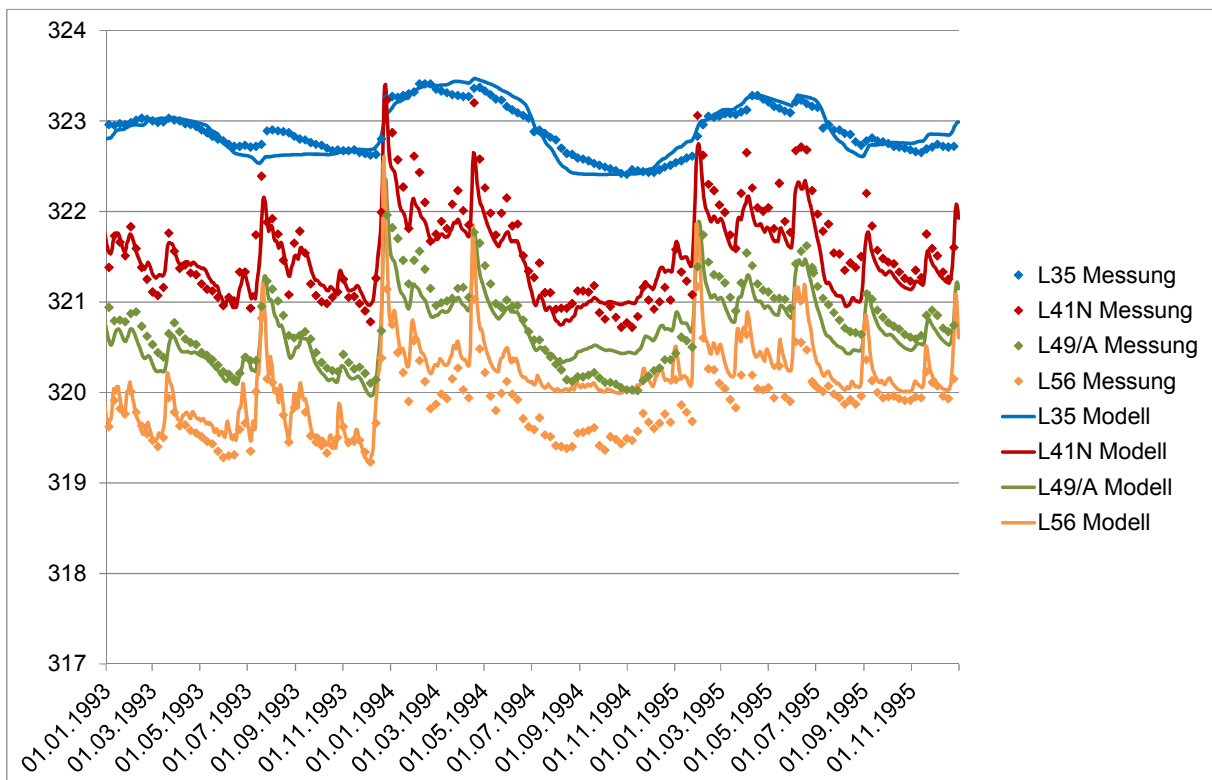


Abbildung 65: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der linksseitigen Auestufe zwischen Kiefenholz und Gmünder Au im Zeitraum 1993 – 1995.

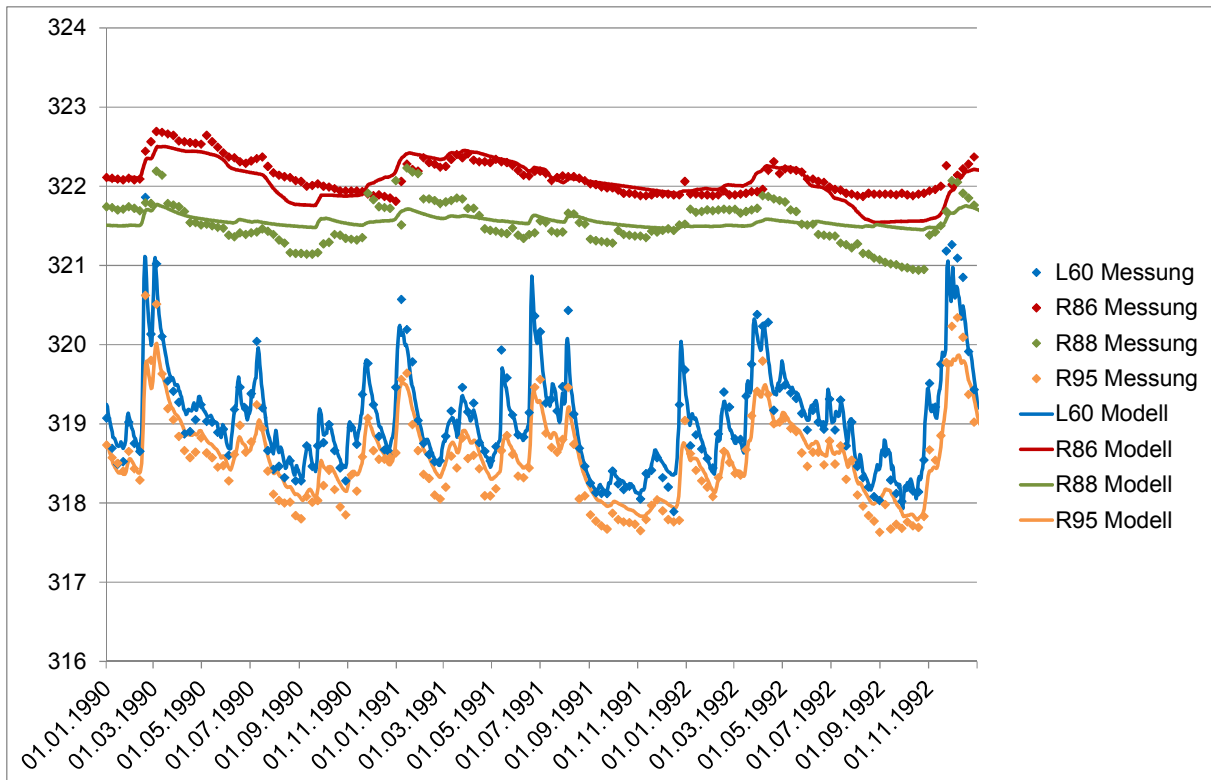


Abbildung 66: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des östlichen Modellrandes im Zeitraum 1990 – 1992.

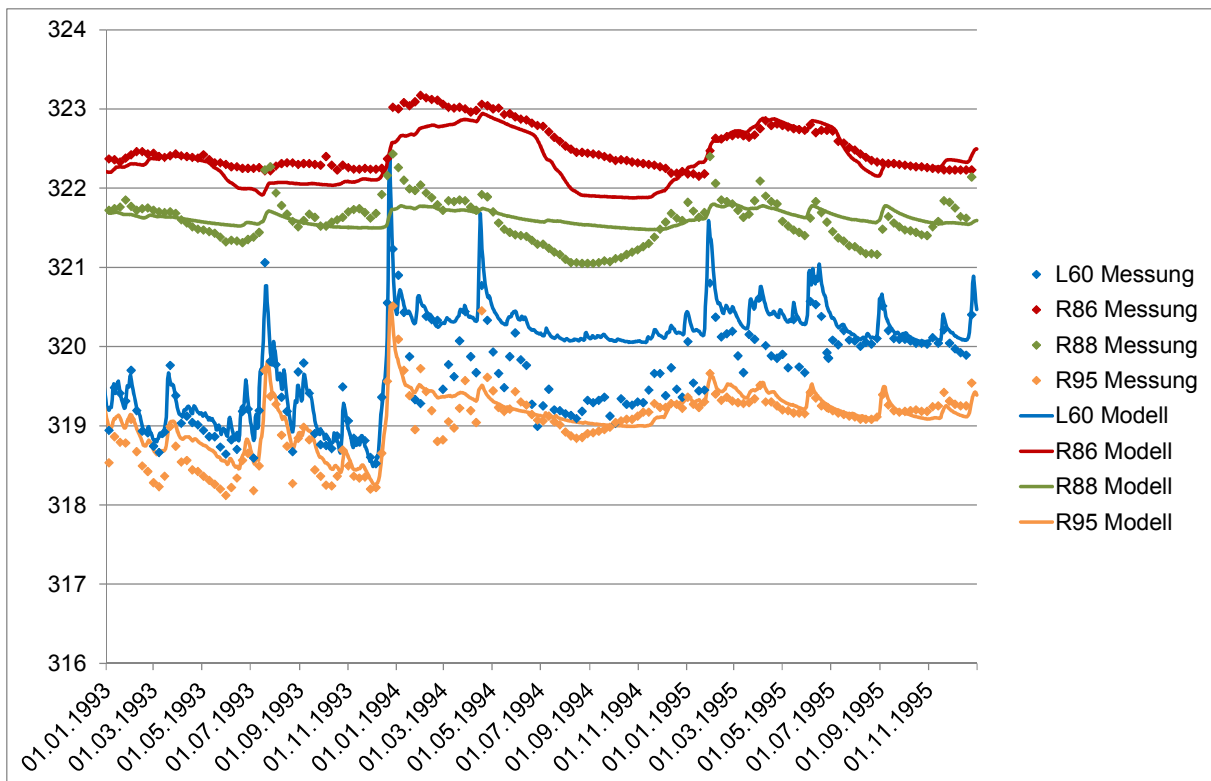


Abbildung 67: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des östlichen Modellrandes im Zeitraum 1993 – 1995 (Aufstau der Staustufe im Januar 1994).

4.2 Einbezug von Abflussmessungen der Stichtage

Stichtage	Im Jahr 2016 wurde an zwei Stichtagen bei Trockenwetter die Abflussmenge an reinen Drainagegewässern gemessen. Da das Modell nicht bis ins Jahr 2017 nachgeführt wurde, können die Messungen nicht direkt mit dem Modell verglichen werden.
Vergleichszeitraum	Für den Vergleich wurden Zeiträume im Jahr 2009 gesucht, bei welchen die Niederschlagsbedingungen ähnlich sind wie während der Stichtage. Dazu wurde das gleitende Mittel des Niederschlages über 7 Tage in den Jahren 2009 und 2016 miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass die Bedingungen ähnlich sind, wenn das Jahr 2016 um einen Monat nach hinten verschoben wird.
Resultate	Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen ist in Abbildung 69 dargestellt. Die berechneten Abflüsse des Röhretgrabens, des Mühlebachs und des Kirchenbachs stimmen in der Größenordnung mit den gemessenen Abflüssen überein. Die berechneten Abflüsse sind im Eltheimgraben deutlich zu tief, im Mühlegraben bei Irlbruck und im Johannesgraben deutlich zu hoch. Auf eine Modellanpassung wird verzichtet, da die fehlerhaften Abflüsse im Vergleich zur Gesamtbilanz des Modells klein sind.

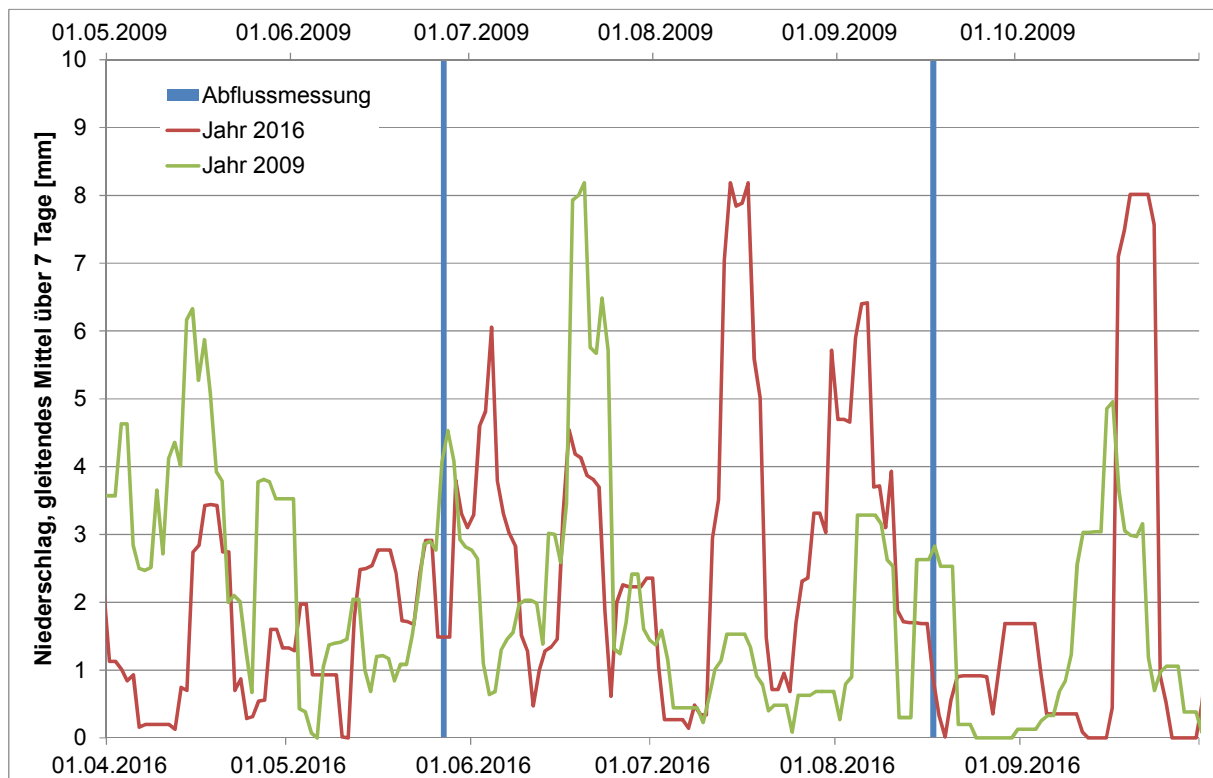


Abbildung 68: Niederschlagsbedingungen vor den Stichtagsmessungen im Vergleich zu einer Zeitperiode im Jahr 2009

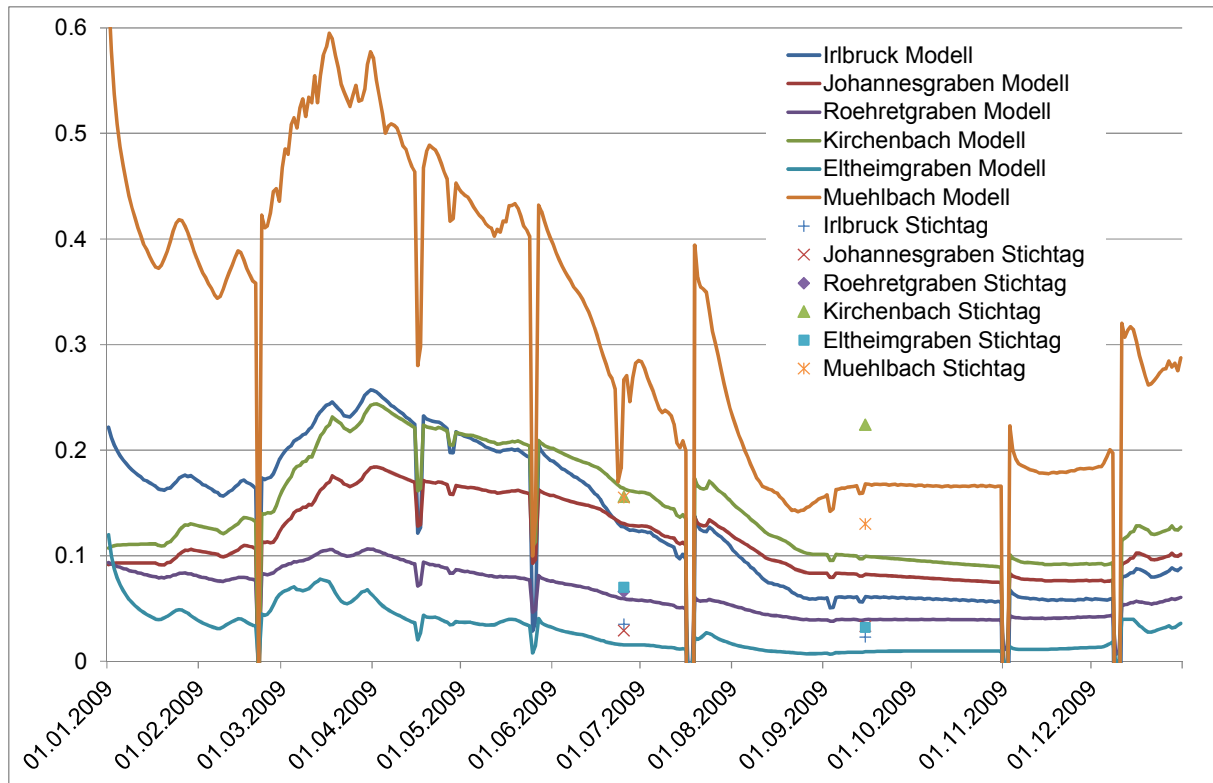


Abbildung 69: Vergleich der berechneten Abflussmengen im Jahr 2009 mit den Abflussmengen des Stichtags. Die Stichtagsmessungen wurden so verschoben, dass die Niederschlagsbedingungen zuvor ähnlich sind.

5 Sensitivitäten

5.1 Zielsetzung

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.

5.2 Randbedingungen in der Auestufe

Varierte Parameter

In der Auestufe treten bei Hochwasserereignissen verschiedene Besonderheiten auf. In Donaunähe wird das Gelände einerseits überflutet, andererseits wird die Deckschicht von unten eingestaut. Hinter den Dämmen ist an vielen Stellen die Geländehöhe tiefer als der Donauwasserspiegel. An diesen Stellen kann Grundwasser als Qualmwasser an die Oberfläche treten. Die Auswirkung dieser Besonderheiten im Grundwassermodell wird im Folgenden dokumentiert. Dazu wurden folgende Fälle untersucht:

1. **„Gespannt“**: In diesem Fall wirkt die Deckschicht bei Einstau gespannt (resp. teilgespannt mit 4% Speicherkoeffizient). Die anderen Effekte werden nicht berücksichtigt.
2. **„Gespannt + Qualmwasser“**: Zusätzlich zum Fall 1 wird hinter den Deichen die Topografie mit einer Leakage-Randbedingung berücksichtigt. Dabei wird der Wert für Infiltration auf 0, jener für Exfiltration auf 1 [d] gesetzt.
3. **„Gespannt + Qualmwasser + überflutet“**: Zusätzlich zum Fall 2 wird im Gelände vor den Deichen der jeweilige Donauwasserspiegel mit einer Leakage-Randbedingung vorgegeben, sofern er die Topografie übersteigt. Um die Infiltration auf die effektive Überflutungszeit zu begrenzen, musste FEFLOW entsprechend erweitert werden.
4. **„Frei + Qualmwasser“**: Die im Schwankungsbereich des Grundwassers wirksame Porosität wird konstant bei 10% gehalten, hinter den Teichen wird die Topografie mit einer Leakage-Randbedingung berücksichtigt.
5. **„Frei + Qualmwasser + überflutet“**: Zusätzlich zum Fall 4 wird im Gelände vor den Deichen der jeweilige Donauwasserspiegel mit einer Leakage-Randbedingung vorgegeben, sofern er die Topografie übersteigt.

Resultate

Die resultierenden Ganglinien des Grundwasserstandes während des Hochwassers 1988 sind für typische Messstellen in Abbildung 71 bis Abbildung 73 dargestellt. Die Lage der ausgewählten Messstellen ist aus Abbildung 70 ersichtlich. Es zeigt sich, dass der Fall „Gespannt +

Qualmwasser“ in allen drei Messstellen einen befriedigende Übereinstimmung ergibt. Auf eine Modellierung der Überflutung wurde deshalb im Folgenden verzichtet.

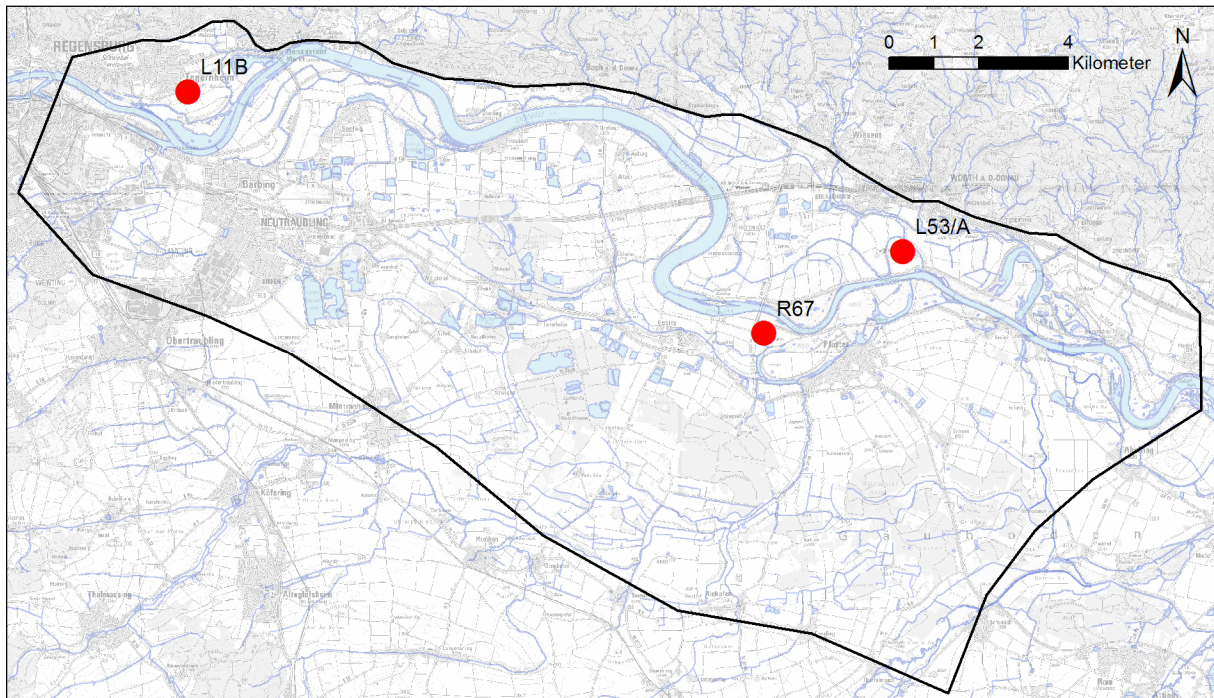


Abbildung 70: Lage der für die Darstellung der Sensitivität verwendeten Messstellen.

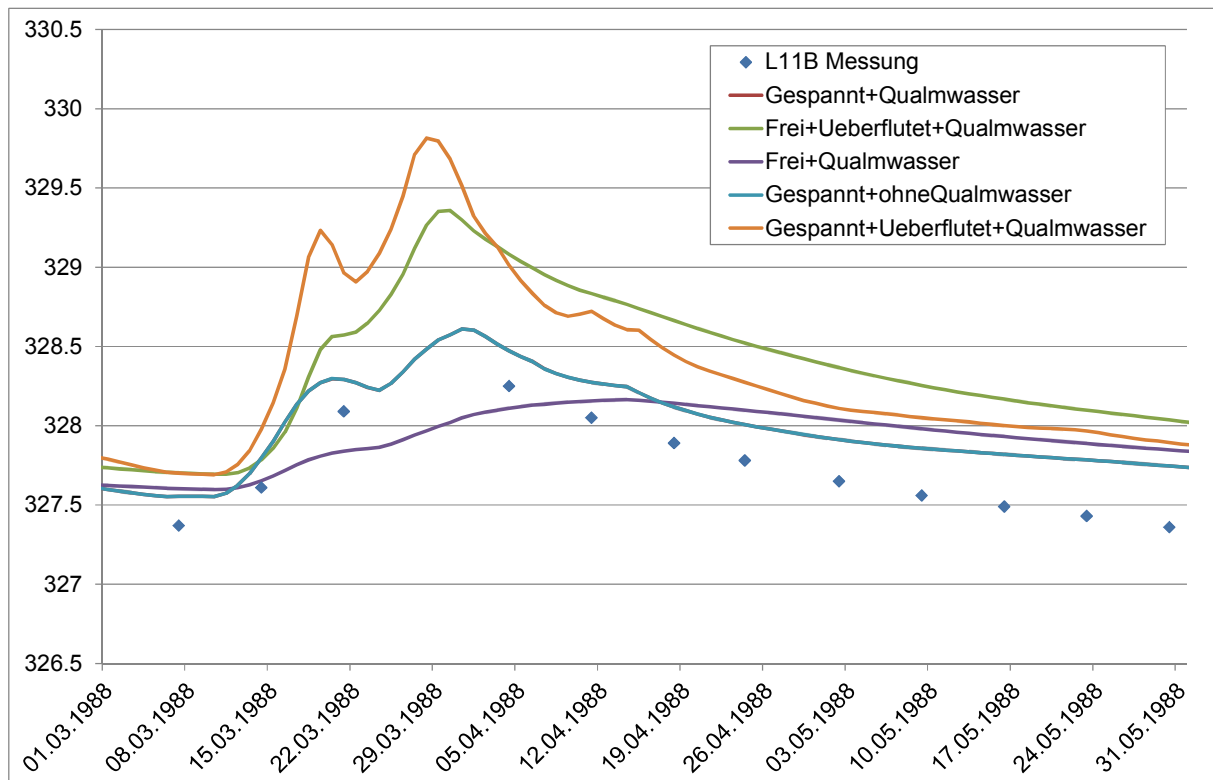


Abbildung 71: Sensitivität des Grundwasserspiegels bei Tegernheim auf die Randbedingungen in der Auestufe. Die Kurve „Gespannt + Qualmwasser“ ist identisch mit derjenigen von „Gespannt ohne Qualmwasser“.

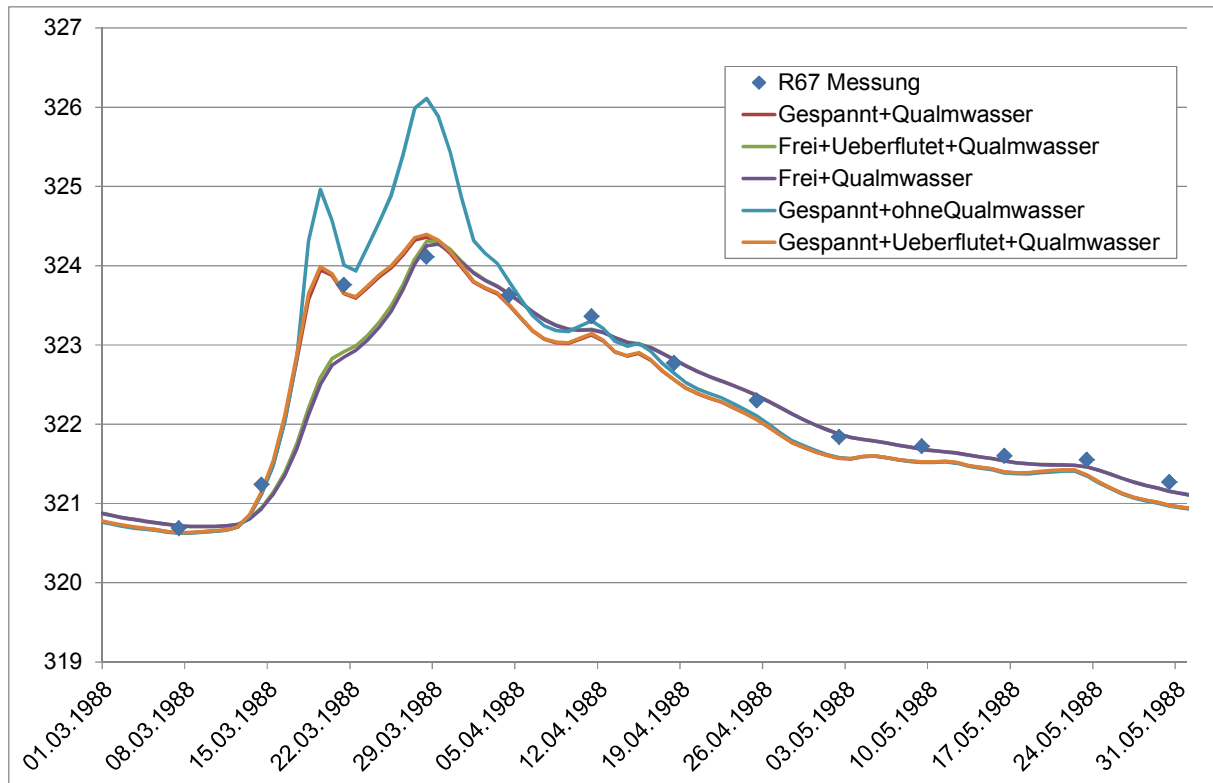


Abbildung 72: Sensitivität des Grundwasserspiegels bei Pfatter auf die Randbedingungen in der Auestufe. Die Kurven von „Gespannt + Qualmwasser“ und „Gespannt + überflutet + Qualmwasser“, sowie die Kurven von „Frei + überflutet + Qualmwasser“ und „Frei + Qualmwasser“ überdecken sich.

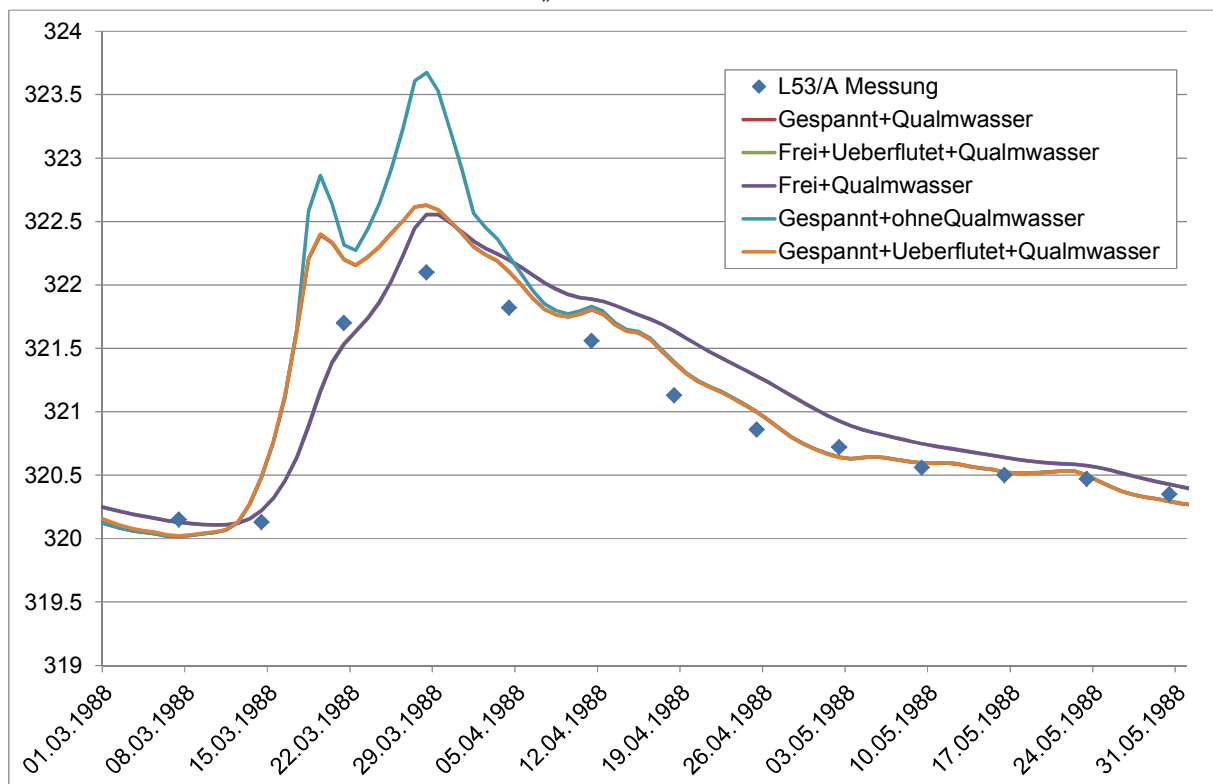


Abbildung 73: Sensitivität des Grundwasserspiegels beim Wörthhof auf die Randbedingungen in der Auestufe. Die Kurven von „Gespannt + Qualmwasser“ und „Gespannt + überflutet + Qualmwasser“, sowie die Kurven von „Frei + überflutet + Qualmwasser“ und „Frei + Qualmwasser“ überdecken sich.

5.3 Donausohle und Dichtwand

Varierte Parameter	<p>Die Durchlässigkeitswerte der Donausohle und der Dichtwand können nicht eindeutig kalibriert werden, da eine Erhöhung der Durchlässigkeit der Donau durch eine tiefere Durchlässigkeit der Dichtwand kompensiert werden kann. Die Auswirkungen dieser Parameter wurden deshalb mit folgenden Rechenfällen untersucht:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Erhöhung der Dichtwanddurchlässigkeit um den Faktor 10,2. Erhöhung der Donau-Leakage um den Faktor 103. Kombination der beiden Erhöhungen <p>Als Referenz wurde das kalibrierte Modell des Zeitraums 1997 – 1999 verwendet.</p>
Resultate	<p>Abbildung 74 bis Abbildung 76 zeigen die Differenzen des Grundwasserspiegels der untersuchten Fälle zur Referenz. Eine Erhöhung der Dichtwanddurchlässigkeit allein wirkt sich nur auf den Bereich der Donau aus. Wird die Donau-Leakage erhöht, so führt dies zu einem starken Grundwasseranstieg unter der Donau, aber nur zu einem schwachen Anstieg ausserhalb der Dichtwand. Werden beide Parameter erhöht, so ist der Anstieg ausserhalb der Dichtwand deutlich höher.</p> <p>Vergleicht man die Drainagemengen im Zustrom zum Schöpfwerk Auburg (Abbildung 77), so ergibt sich ein ähnliches Bild. Eine Erhöhung der Dichtwanddurchlässigkeit allein bewirkt nur einen kleinen Anstieg der Drainagemenge. Kombiniert mit einer Erhöhung der Donau-Leakage wird die Drainagemenge deutlich höher.</p>
Erkenntnisse	<p>Der Wasserspiegel und der Zustrom zum Schöpfwerk Auburg werden durch die Kombination von Dichtwanddurchlässigkeit und Donau-Leakage kontrolliert. Dabei ist der Einfluss des einen Parameters auch von der absoluten Grösse des anderen abhängig. Bei kleiner Donau-Leakage reagiert das Modell nicht sensitiv auf die Dichtwanddurchlässigkeit. Umgekehrt ist zu erwarten, dass bei kleiner Dichtwanddurchlässigkeit das Modell nicht sensitiv auf die Donau-Leakage reagiert.</p>
Umsetzung	<p>Die Auswertung der Schöpfwerksdaten zeigt, dass zwischen dem Aufstau der Staustufe Geisling und heute die Drainagemenge deutlich gesunken ist. Bei gleichbleibender Dichtwanddurchlässigkeit kann dies nur durch eine Abnahme der Donau-Leakage erklärt werden. Bei der Kalibrierung musste deshalb die Dichtwanddurchlässigkeit genug hoch gewählt werden, damit das Modell noch sensitiv auf die Abnahme der Donau-Leakage reagiert.</p>

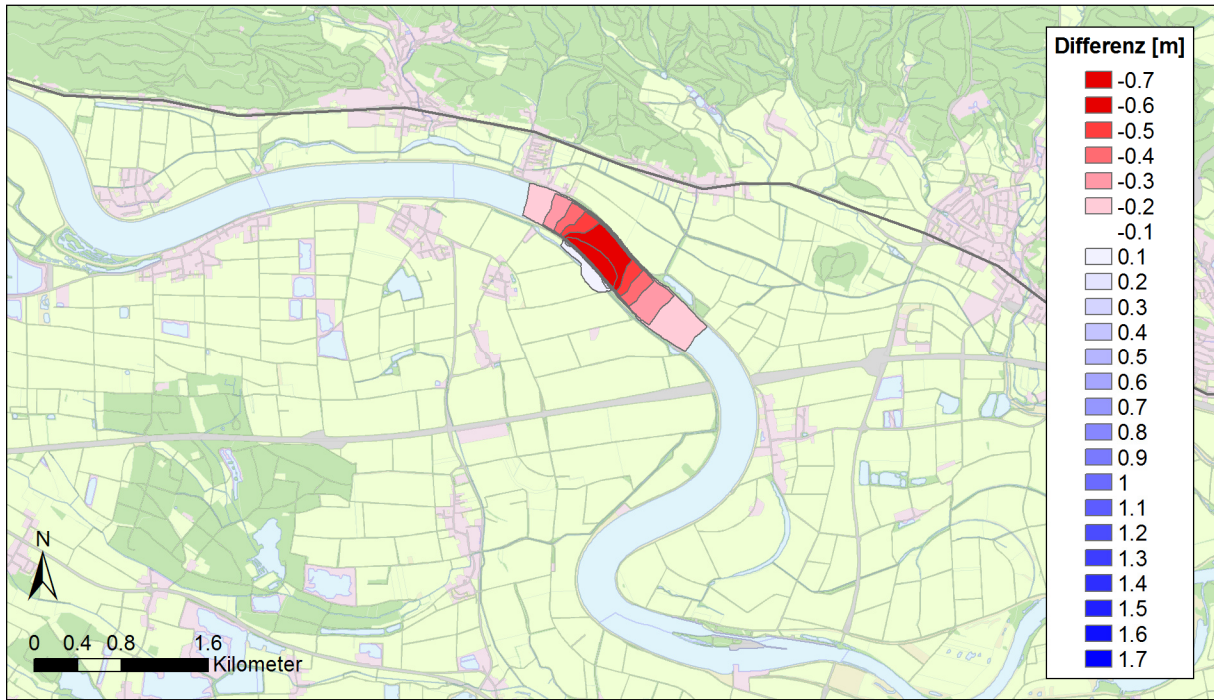


Abbildung 74: Differenz zwischen dem Fall mit erhöhter Dichtwanddurchlässigkeit und dem kalibrierten Modell am 22.09.1997 (Niederwasser).

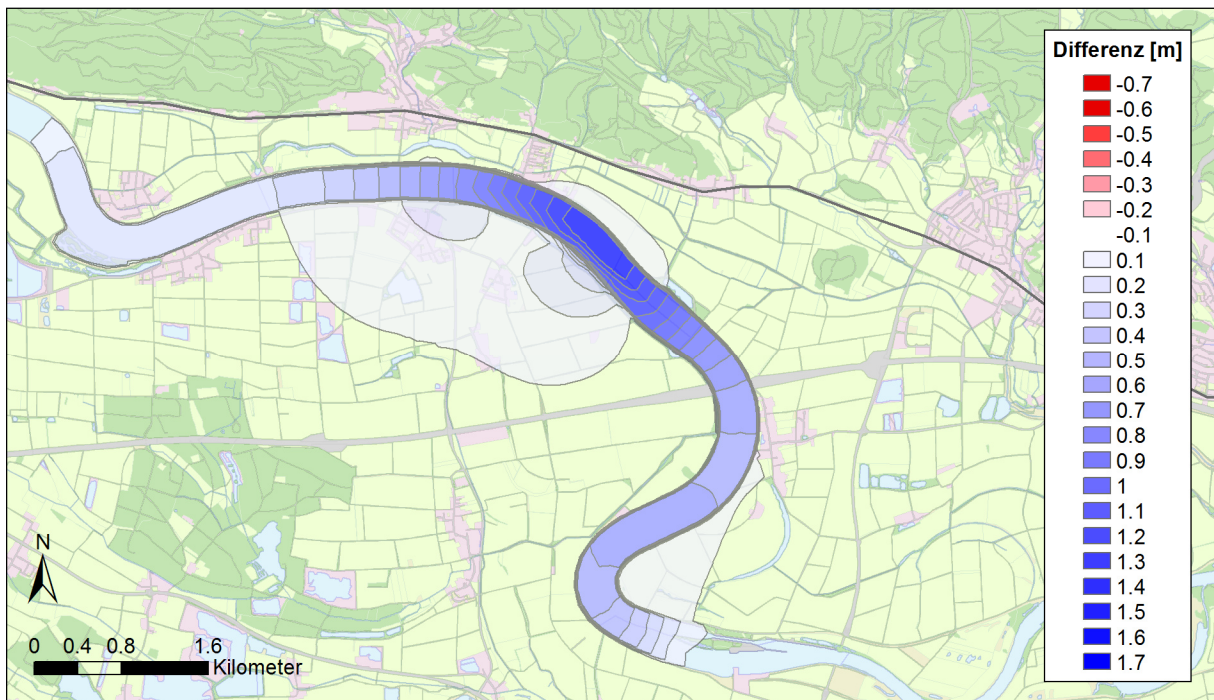


Abbildung 75: Differenz zwischen dem Fall mit erhöhter Donau-Leakage und dem kalibrierten Modell am 22.09.1997 (Niederwasser).

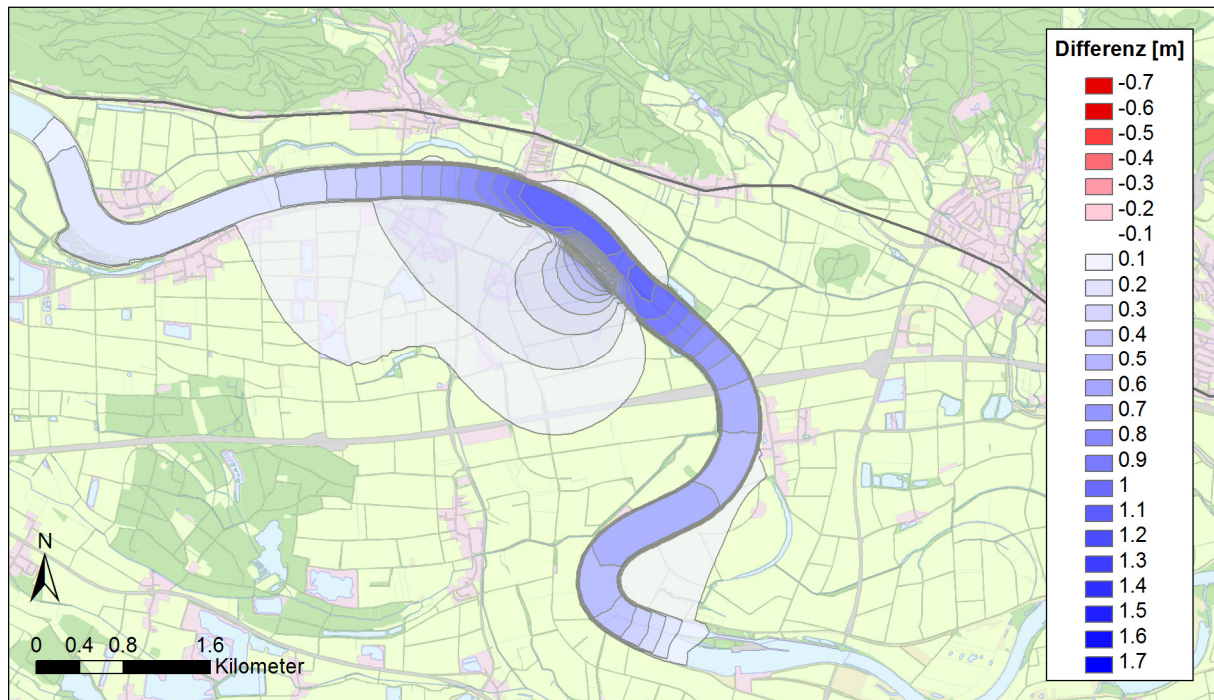


Abbildung 76: Differenz zwischen dem Fall mit erhöhter Dichtwanddurchlässigkeit und erhöhter Donau-Leakage und dem kalibrierten Modell am 22.09.1997 (Niederwasser).

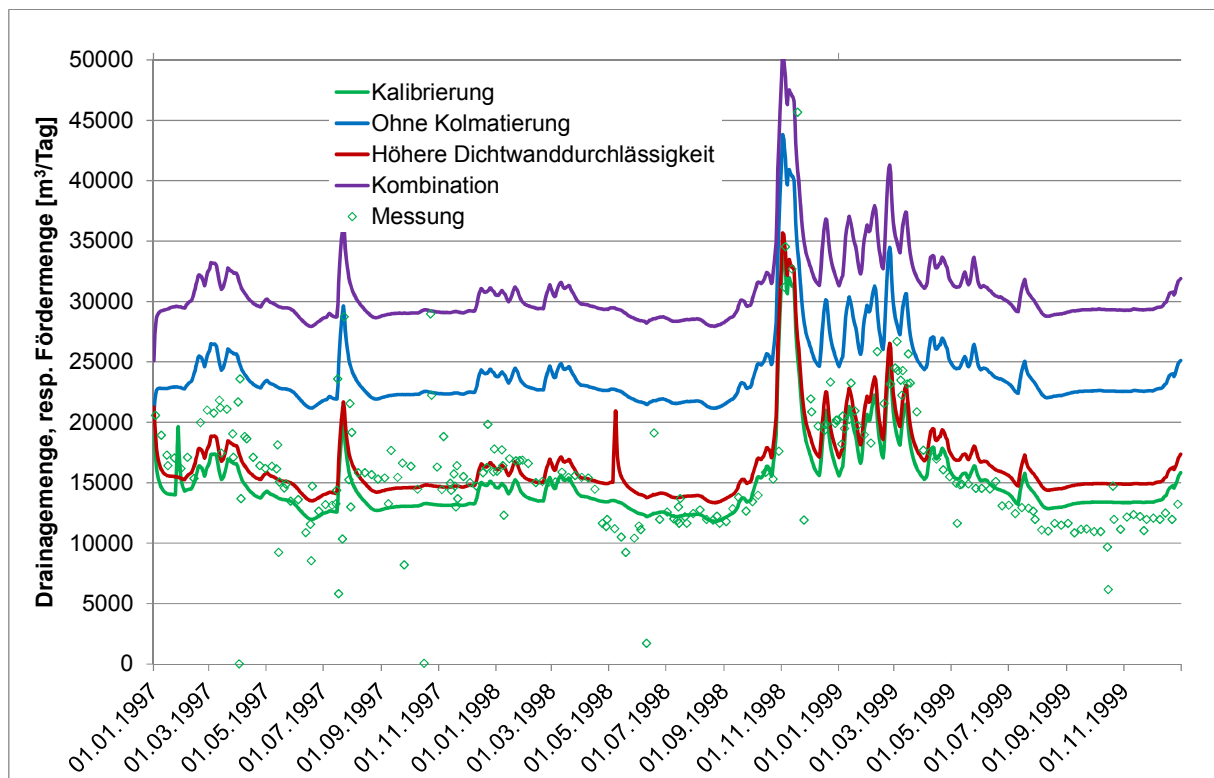


Abbildung 77: Vergleich der drainierten Wassermenge im Zufluss zum Schöpfwerk Auburg.

6 Zusammenfassung

Modellaufbau	<p>Vom Schottergrundwasserleiter des Donautals zwischen Regensburg und Aholting wurde in ein zweidimensionales numerisches Grundwassermodell aufgebaut. Das Grundwassermodell besitzt zeitabhängige Randbedingungen, der Grundwasserspiegel wird als frei, resp. in der Auestufe als teilgespannt betrachtet. Die Schichtflächen und Randbedingungen wurden aus dem hydrogeologischen Modell übernommen [7]. Mit dem Modell sollen die Auswirkungen der geplanten Flutpolderprojekte quantifiziert werden.</p>
Kalibrierung	<p>Das Grundwassermodell wurde an den gemessenen Grundwasserständen der Zeiträume 1976-1977, 1988-1989, 1997-1999 und 2009 kalibriert. Die Zeiträume umfassen unterschiedliche Systemzustände, da zwischen 1977 und 1988 die Staustufe Geisling, zwischen 1989 und 1997 die Staustufe Straubing realisiert wurden.</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 Fördermengen der Schöpfwerke herangezogen, da diese vorwiegend aus dem Grundwasser drainiertes Wasser fördern.</p>
Modellgenauigkeit	<p>Mit der Kalibrierung konnte erreicht werden, dass die berechneten Grundwasserstände im Mittel nur noch 22 bis 30 cm von den gemessenen Grundwasserständen abweichen. Der Median der Abweichungen liegt je nach Zeitraum zwischen 16 und 22 cm. Nach DVGW W 107 entspricht dies einem mittleren relativen Fehler von 1.6 - 2%. Eine sehr gute Übereinstimmung wurde auch mit den Fördermengen der Schöpfwerke erzielt.</p>
Validierung	<p>Das kalibrierte Modell wurde an Messdaten der Jahre 1990 bis 1996 validiert. Es zeigte sich, dass das Modell in diesem Zeitraum die gleiche Genauigkeit erreicht wie in den Kalibrierungszeiträumen.</p>
Modellresultate	<p>Mit Hilfe des kalibrierten Modells wurden die Grundwasserverhältnisse im Gebiet zwischen Regensburg und Aholting für die Zustände vor und nach dem Bau der Staustufen visualisiert. In der Wasserbilanz macht die Grundwasserneubildung aus Niederschlag den grössten Anteil aus, gefolgt vom Austausch mit der Donau und den übrigen Gewässern. Nach dem Bau der Staustufen verschiebt sich ein Teil der Exfiltration in die Donau zu einer Exfiltration in die Binnenentwässerung, welche über die Schöpfwerke zurück in die Donau geführt wird.</p>
Sensitivitäten	<p>Die Abhängigkeit des Modells auf verschiedene Parameter wurde untersucht. Es wurden insbesondere Parameter variiert, welche von Bedeutung für die Anwendungsgebiete des Modells sind.</p>

7 Modellpflege Zeitraum 2010 - 2017

7.1 Anlass

Bestehende Nachbildungen	Zur Kalibrierung des Grundwassermodells wurden die Zeiträume 1976 - 1977, 1988 - 1989, 1997 - 1999 und 2009 nachgebildet. Der Zeitraum von 1990 - 1996 diente zur Validierung des Modells.
Neue Messdaten	Leider wurden die Grundwasserspiegelbeobachtungen im Rahmen der Beweissicherung zur Staustufe Geisling im Jahr 1997 eingestellt, jene für die Staustufe Straubing im Jahr 2004. Danach gab es nur noch im Jahr 2009 eine nennenswerte Zahl von Grundwasserspiegelbeobachtungen. Erst im Lauf des Jahres 2016 wurde ein neues Messnetz aufgebaut, welches seit dem Januar 2017 kontinuierliche Messdaten liefert.
Abweichungen	Mit den vom Landratsamt gewünschten Nachbildungen der Grundwasserhochstände der Jahre 2003 und 2013 auf der Niederterrasse wurden die Zielsetzungen des Modells erweitert. Bei der Nachbildung des Grundwasserhochstandes vom Januar 2003 wurde festgestellt, dass die im Modell angesetzten Speicherkoeffizienten zu hoch sind.
Modellpflege	Die verbesserte aktuelle Datenlage und die erweiterte Zielsetzung des Modells rechtfertigen eine Modellpflege. Dazu wurde der Nachbildungszeitraum des Modells bis zum Jahr 2017 verlängert. Das Modell wurde im Hinblick auf die Übereinstimmung mit den aktuellen Daten, insbesondere im Hinblick auf die Übereinstimmung von Hochwasserständen auf der Niederterrasse nachkalibriert.

7.2 Modellanpassungen

Anpassungen	<p>Bei der Nachkalibrierung wurden die folgenden Modellanpassungen vorgenommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Die Bohrungen des Gutachtens Solum [10] wurden nach der Höhenlage der Deckschicht ausgewertet und in die Datenbasis des hydrogeologische Modells integriert. Die Deckschichtunterkante wurde neu interpoliert und ins Grundwassermodell übernommen - Das Gebiet, in welchem der Speicherkoeffizient bei Erreichen der Deckschicht heruntersetzt wird, wurde um den Bereich südlich von Pfatter erweitert. - Im Bereich der Niederterrasse wurde der Speicherkoeffizient nachkalibriert. - Die Leakagewerte der Drainagegewässer wurden überprüft, da sich deren Sohldurchlässigkeiten durch Kolmation verkleinern oder durch Unterhaltsarbeiten vergrößern können. Für die Pfatter wurde die Leakage auf dem renaturierten Abschnitt verdoppelt. - Einige Durchlässigkeitszonen am südlichen Modellrand wurden nachkalibriert, da dort zusätzliche Messstellen zur Verfügung standen.
-------------	---

Resultate

Die resultierende Durchlässigkeitsverteilung und die Speicherkoeffizienten sind in Abbildung 78 und Abbildung 79 dargestellt. Die Durchlässigkeitsverteilung bleibt gegenüber dem bisherigen Modell praktisch unverändert, die Speicherkoeffizienten der Niederterrasse wurden deutlich erniedrigt.

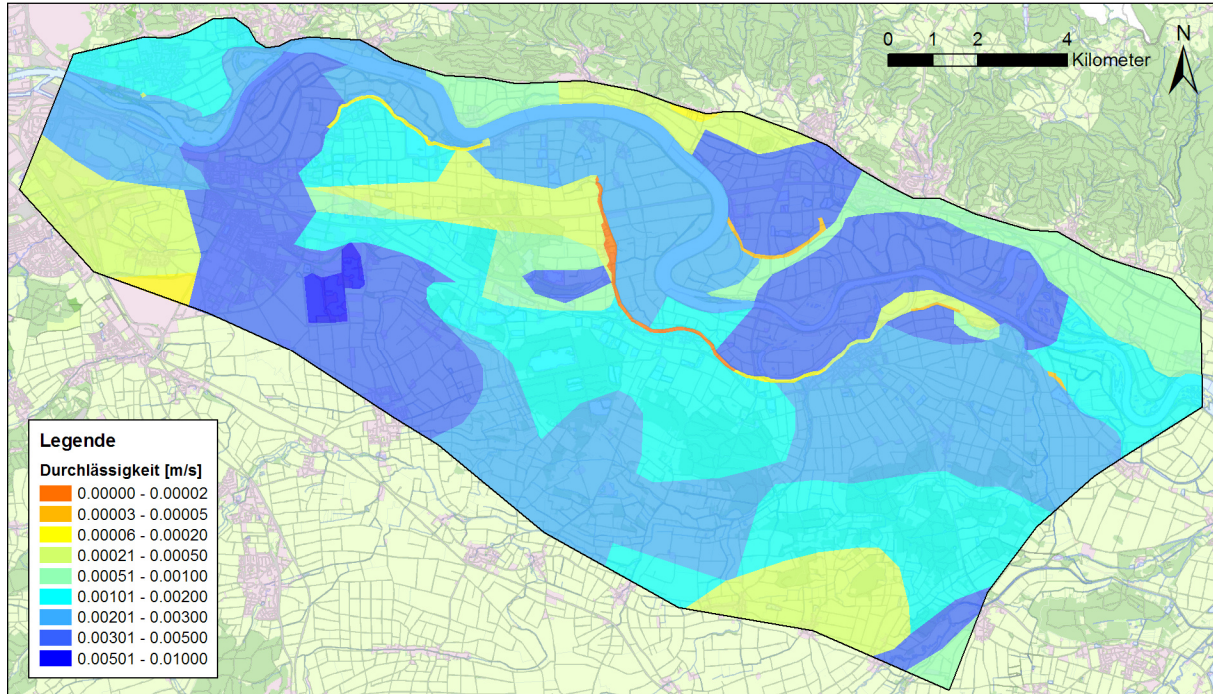


Abbildung 78: Durchlässigkeitsverteilung im nachkalibrierten Modell.

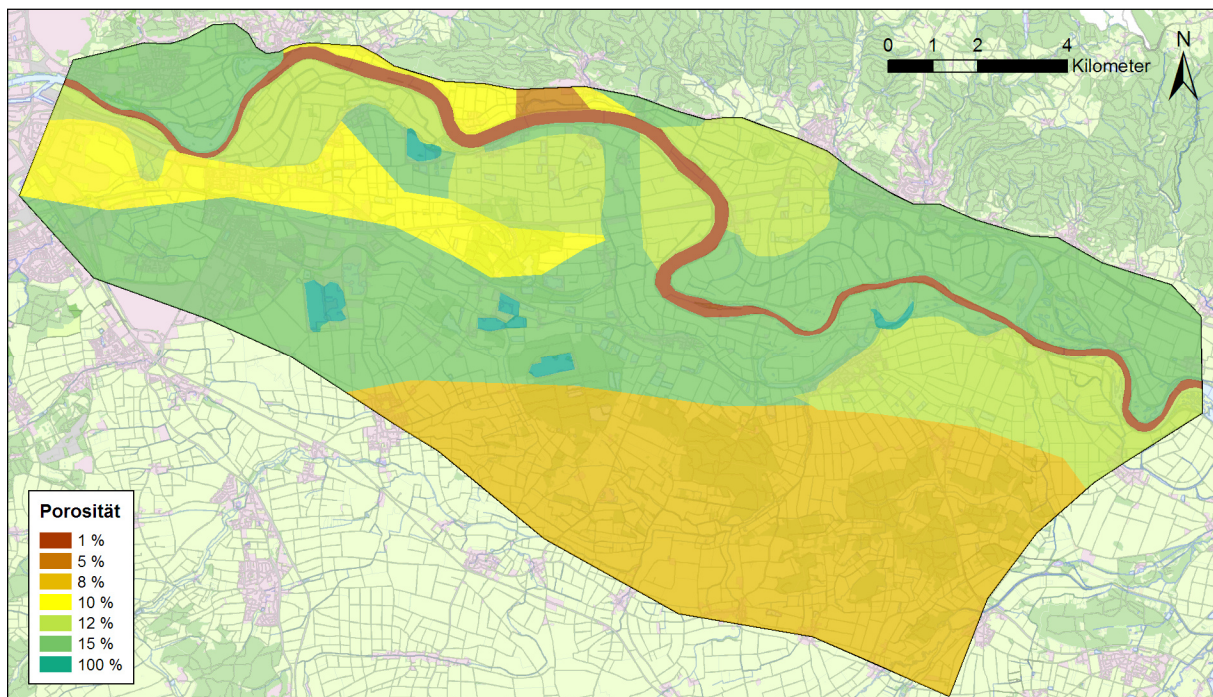


Abbildung 79: Speicherkoeffizienten des nachkalibrierten Modells

Gewässer

Die aus der Nachkalibrierung resultierenden Leakage-Werte sind in Abbildung 80 und Abbildung 81 dargestellt. Mit Ausnahme der Pfatter wurden keine Veränderungen vorgenommen.

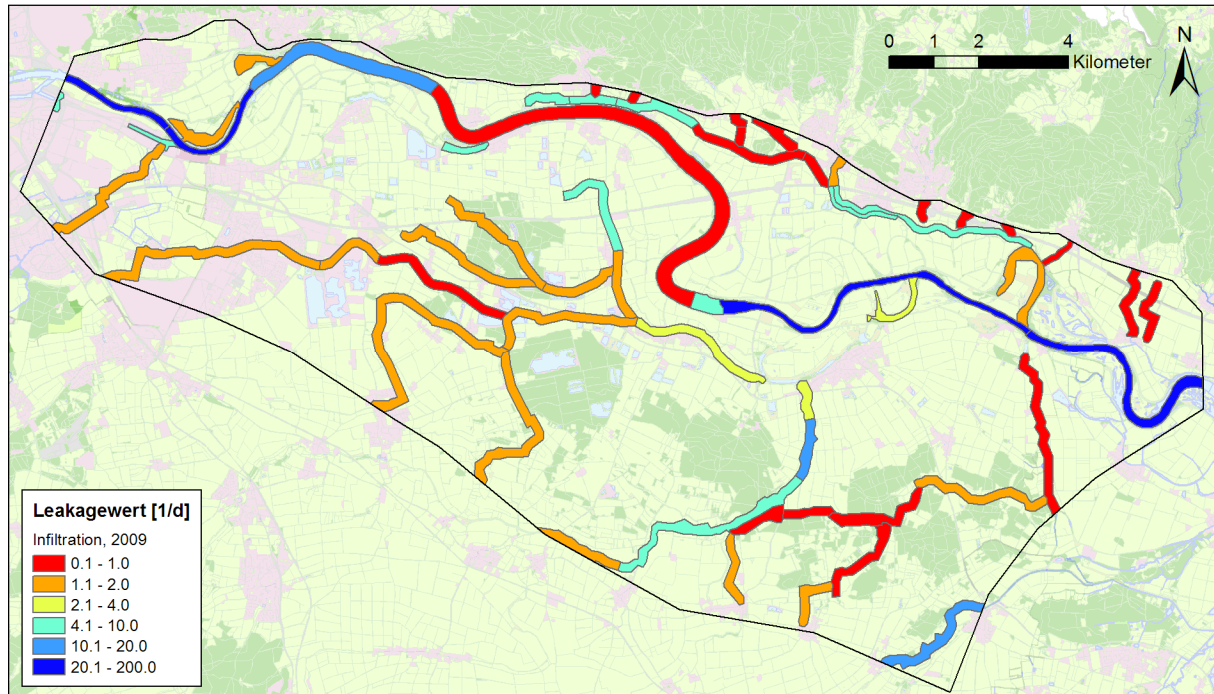


Abbildung 80: In-Leakage (Infiltration) im Zustand nach Renaturierung der Pfatter

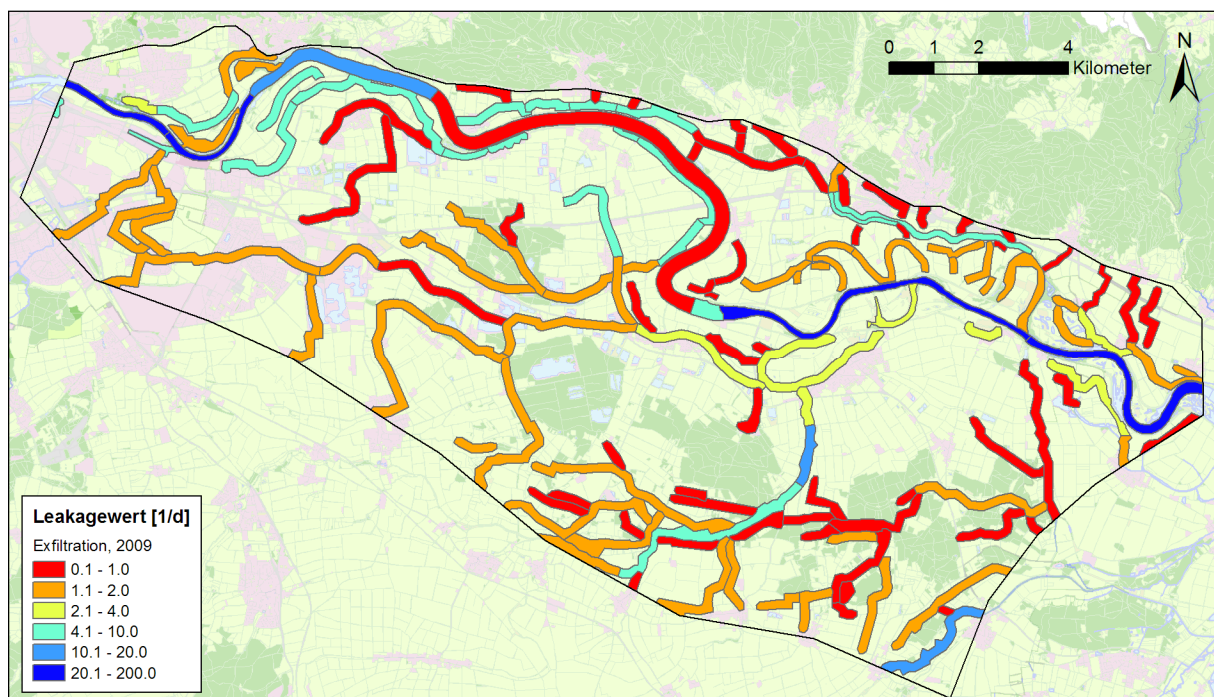


Abbildung 81: Out-Leakage (Exfiltration) im Zustand nach Renaturierung der Pfatter

7.3 Validierung des Modells

Messdaten

Im Nachbildungszeitraum von 2010 bis 2017 gibt es nur in der Gemeinde Pfatter durchgehend Grundwasserspiegelmessungen, allerdings sind hier die genauen Zeitpunkte der Messungen nicht immer festgehalten worden. Entlang der Autobahn existieren einige Messstellen, welche seit dem Jahr 2013 mit Datenloggern ausgerüstet sind und daher tägliche Messdaten liefern. Im übrigen Gebiet können nur die Messstellen des neuen Messnetzes für die Validierung des Modells verwendet werden.

Grundwasserstände

Die Abbildung 82 zeigt den Vergleich der berechneten und gemessenen Grundwasserstände am Ende des Nachbildungszeitraums. Die mittlere Abweichung beträgt weniger als 30 cm, der Median der Abweichung liegt bei 20 cm.

Abbildung 84 und Abbildung 85 zeigen die nachgebildeten und gemessenen Grundwasserstände in ausgewählten Messstellen gemäss Abbildung 83.

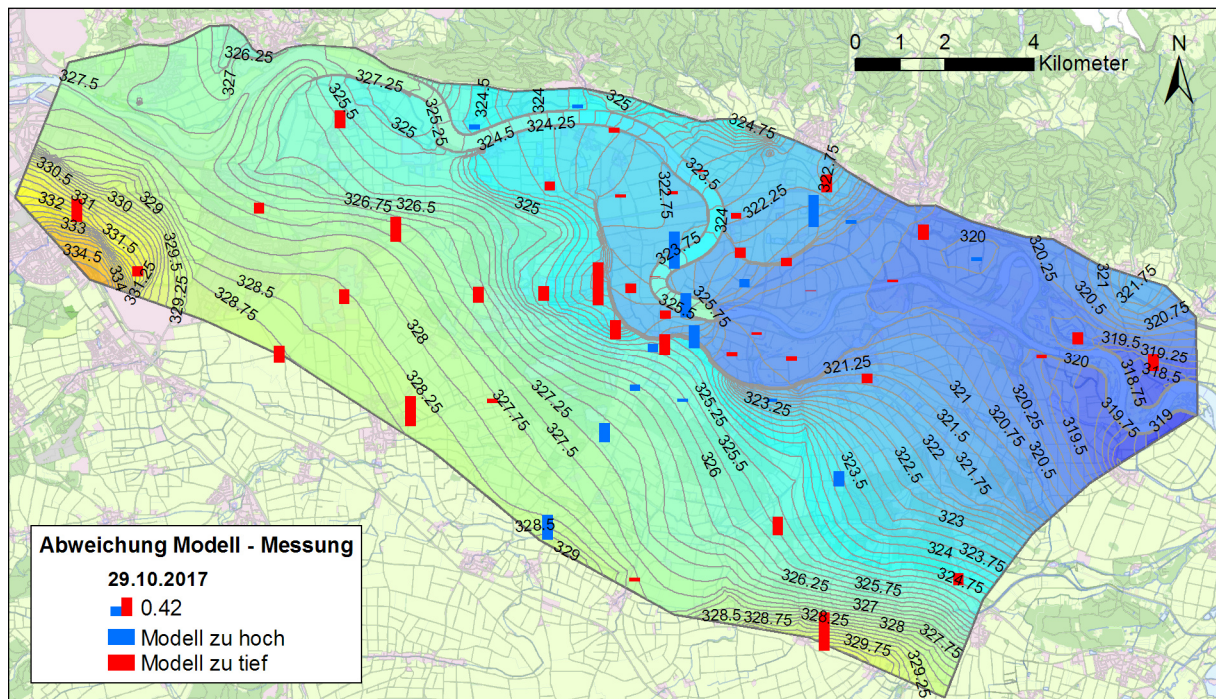


Abbildung 82: Höhenkurven des Grundwasserspiegels am 29.10.2017. Abweichungen von Modell und Messungen sind mit Balken dargestellt.

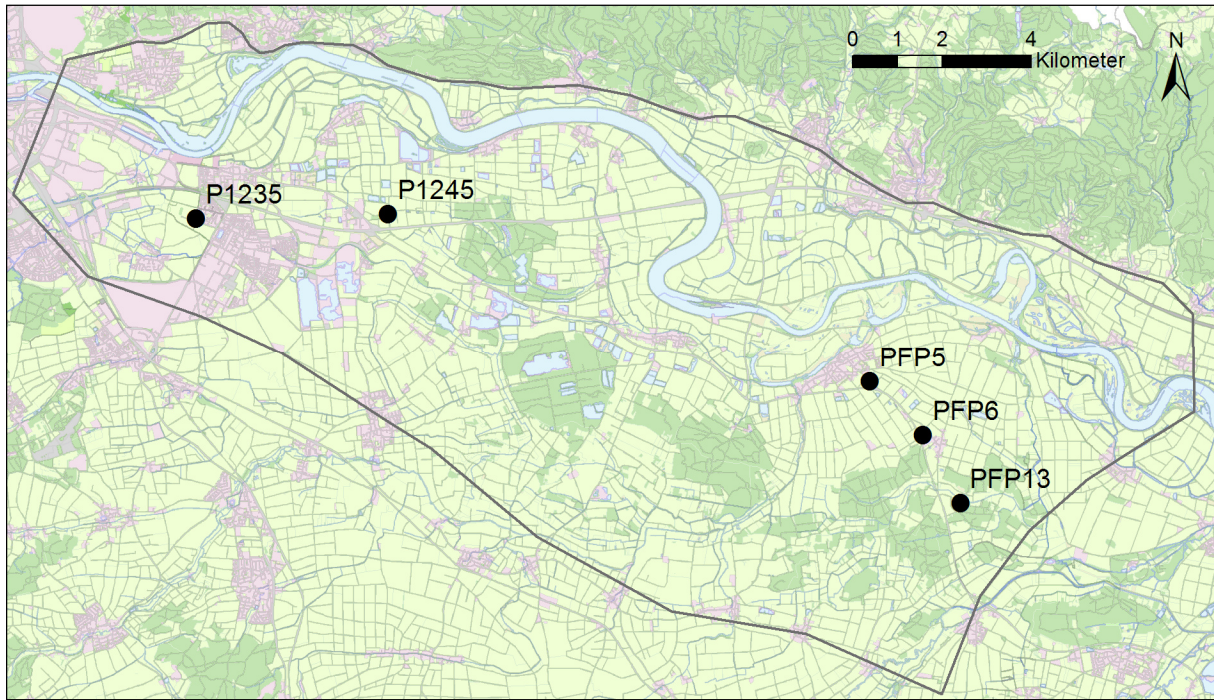


Abbildung 83: Lage der Messstellen, von welchen die Ganglinien gezeigt werden.

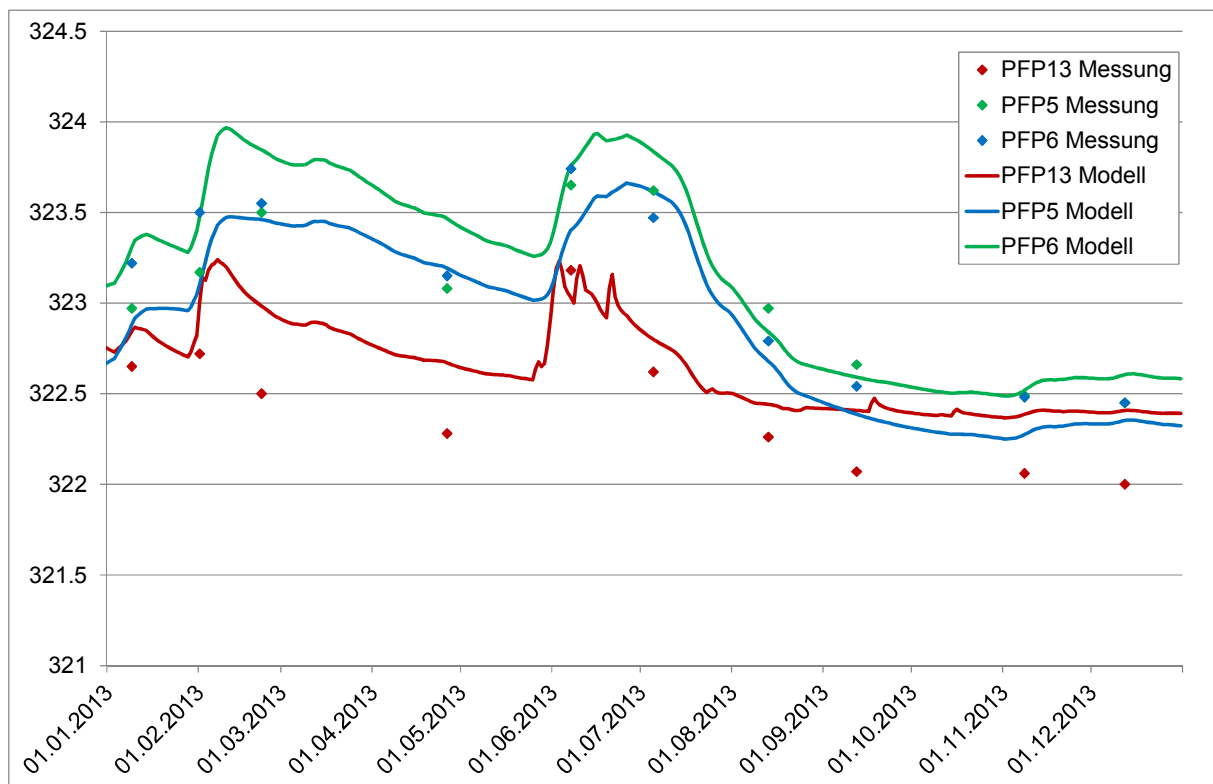


Abbildung 84: Ganglinien der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Pfatter.

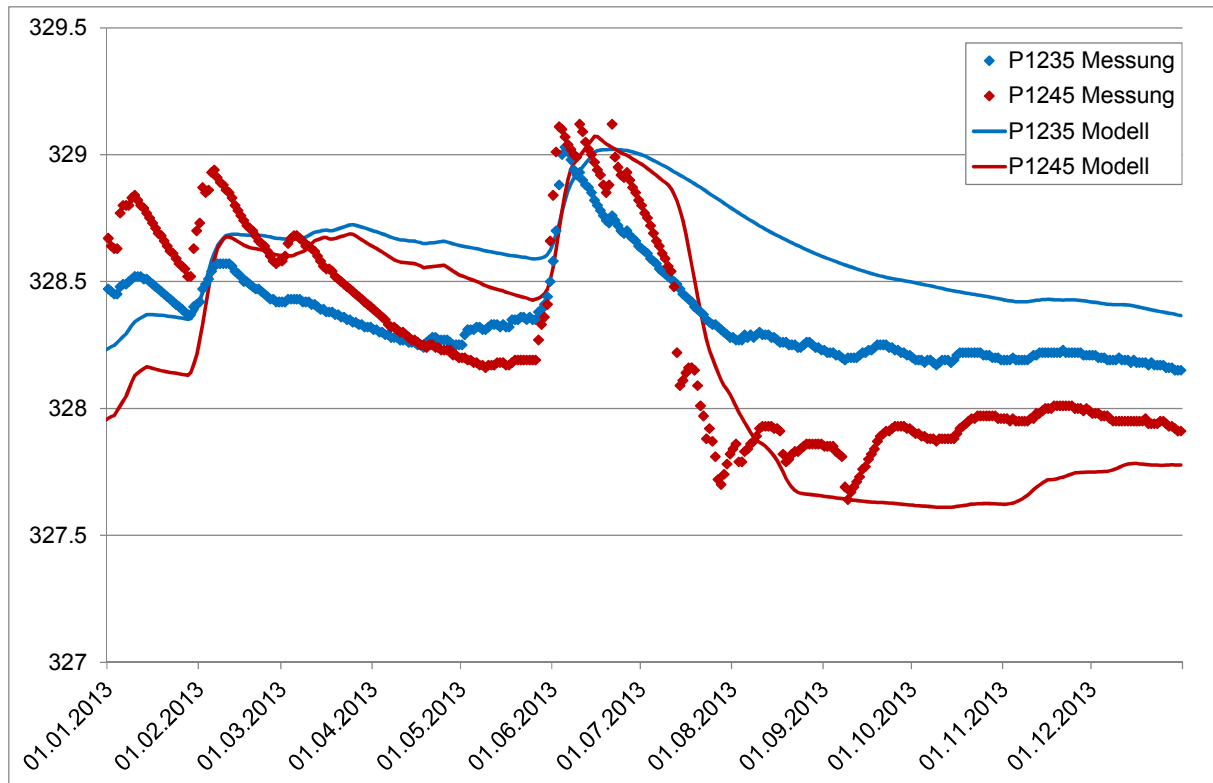


Abbildung 85: Ganglinien der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Neutraubling

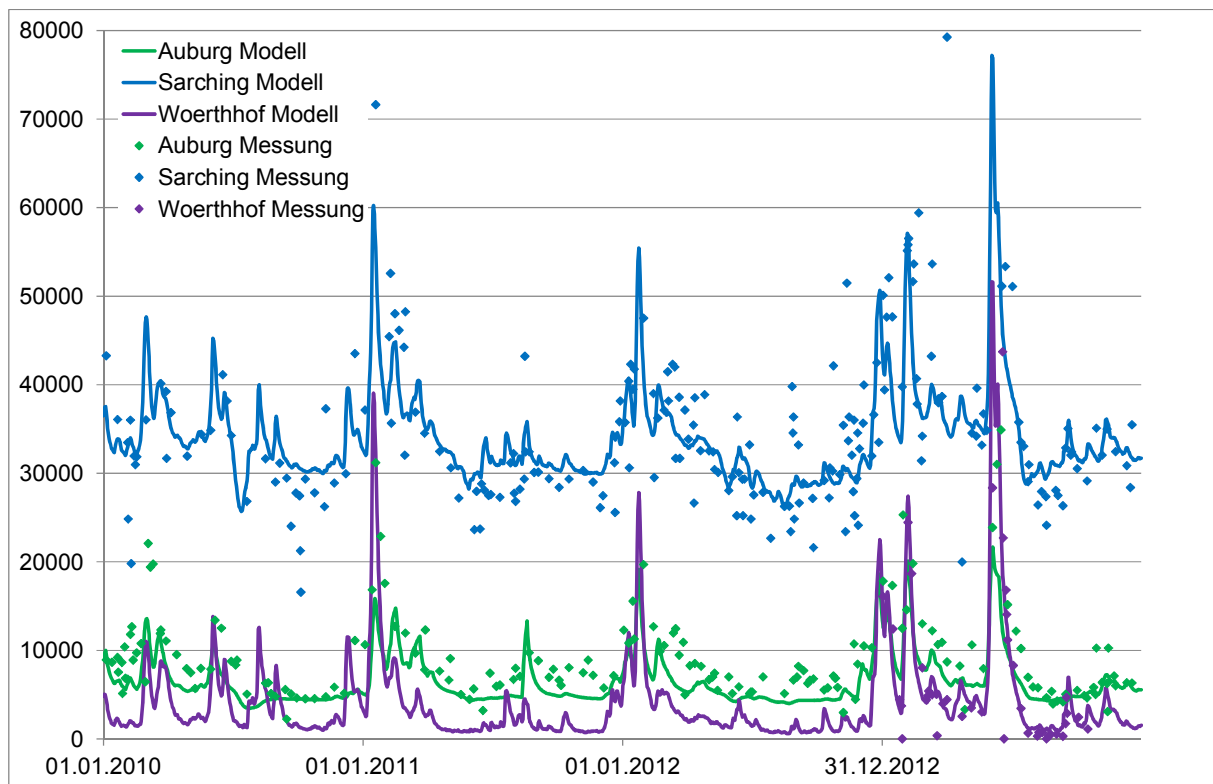


Abbildung 86: Ganglinien der berechneten und gemessenen Schöpfungsmengen in den Schöpfwerken Sarching, Auburg und Wörthhof.

Schöpfungsmengen

Die Abbildung 86 zeigt den Vergleich der nachgebildeten mit den gemessenen Fördermengen der Schöpfwerke Sarching, Auburg und Wörthhof in den Jahren 2009 bis 2013. Es fällt auf, dass die Fördermengen des Schöpfwerks Auburg nach 2009 nicht mehr weiter abnehmen. Offenbar hat die Sohlendurchlässigkeit der Donau soweit abgenommen, dass praktisch nur noch landseitiges Grundwasser gefördert wird. Dies bestätigt die geringe Sohlendurchlässigkeit des Modells.

Modellgüte

Da am Modell einige lokale Anpassungen vorgenommen wurden, wurden die Kalibrierungsrechnungen der Jahre 1997 und 2009 nochmals wiederholt. Die Gütwerte der Kalibrierung und Validierung werden durch die Anpassungen generell eher verbessert. Sie sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichung (RMSE) [cm]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Median der Absoluten Abweichung [cm]
1997 - 1999	31	23	17
2009	33	24	17
2010 - 2013	36	29	24
2014 - 2017	35	27	21

Tabelle 8: Gütwerte der Kalibrierung über das ganze Modellgebiet

8 Modellpflege Zeitraum 2018 – 2021

8.1 Einleitung

Anlass Das Grundwassermodell *Flutpolder Eltheim und Wörthhof* wurde in den Jahren 2015-2017 aufgebaut. Zu diesem Zeitpunkt standen hauptsächlich Grundwasserstandsmessungen der beiden Staustufenprojekte Geisling und Straubing zur Verfügung. Die Messungen decken nicht das gesamte Modellgebiet ab und es war auch keine nachträgliche Qualitätskontrolle der Messpunkthöhen möglich. Im Rahmen der Erarbeitung des Grundwassermodells wurde deshalb ein neues Beobachtungsnetz für die Grundwasserstände geplant und im Jahr 2017 in Betrieb genommen. Aus diesem Beobachtungsnetz stehen inzwischen über 100'000 Messwerte zur Verfügung, die nun zu einer Weiterentwicklung des Grundwassermodells verwendet werden sollen.

Vorgehen Für das Modellgebiet wurden alle verfügbaren Daten zum Klima, den Abflüssen, den Fördermengen von Trinkwasserbrunnen und Schöpfwerken, sowie den Grundwasserständen zusammengestellt. Auf dieser Datenbasis wurde der Modellzeitraum um die Jahre 2018 bis August 2021 verlängert. Das resultierende Modell wurde zuerst an den Messdaten der Jahre 2018-2019 nachkalibriert und danach an den Messdaten der Jahre 2020-2021 validiert. Zur Validierung wurden zusätzlich die Fördermengen der Schöpfwerke hinzugezogen.

8.2 Datenbasis

Datenquellen Zur Beschaffung der Daten wurden die folgenden Quellen ausgewertet:

- Klimadaten: Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes DWD
- Abflüsse: Gewässerkundlicher Dienst Bayern GDK
- Grundwasserstände, Fördermengen: Wasserwirtschaftsamt Regensburg WWA
- Schöpfwerksdaten: Wasserstrassen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Beschaffung durch WWA)

Klimadaten Da die gesamte Nachbildungszeit des Grundwassermodells inzwischen 45 Jahre beträgt, ist es unvermeidlich, dass die Klimadaten nicht über den gesamten Zeitraum an den gleichen Stellen zur Verfügung stehen. Für den Zeitraum 2018-2021 standen die Stationen Donaustauf und Riekofen nicht mehr zur Verfügung. Neu dazu kamen die Messdaten der Stationen Sarching und Koefering. In Abbildung 87 und Abbildung 88 sind die wichtigsten klimatischen Parameter des Nachführungszeitraums am Beispiel der Station Sarching dargestellt. Auffallend sind die hohen Sommerniederschläge in den

Jahren 2020 und 2021 und die hohen Winterniederschläge im Jahr 2018. Die Temperaturen unterscheiden sich vor allem im Frühjahr. Die mittlere Temperatur im April war zum Beispiel im Jahr 2018 um mehr als 6 Grad höher als im Jahr 2021. Die Windgeschwindigkeit ist generell im Winter höher als im Sommer. Im Jahr 2021 wurden im Sommer auffallend hohe Windgeschwindigkeiten gemessen.

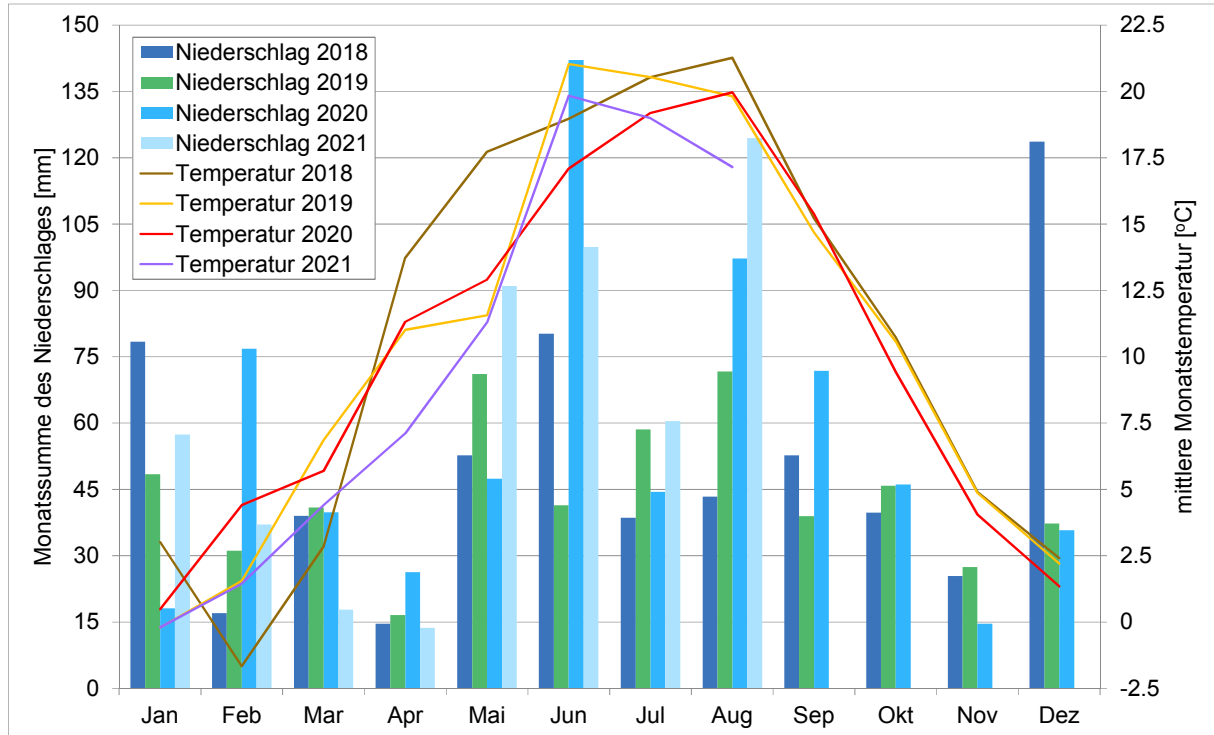


Abbildung 87: Monatsniederschläge und mittlere Monatstemperaturen

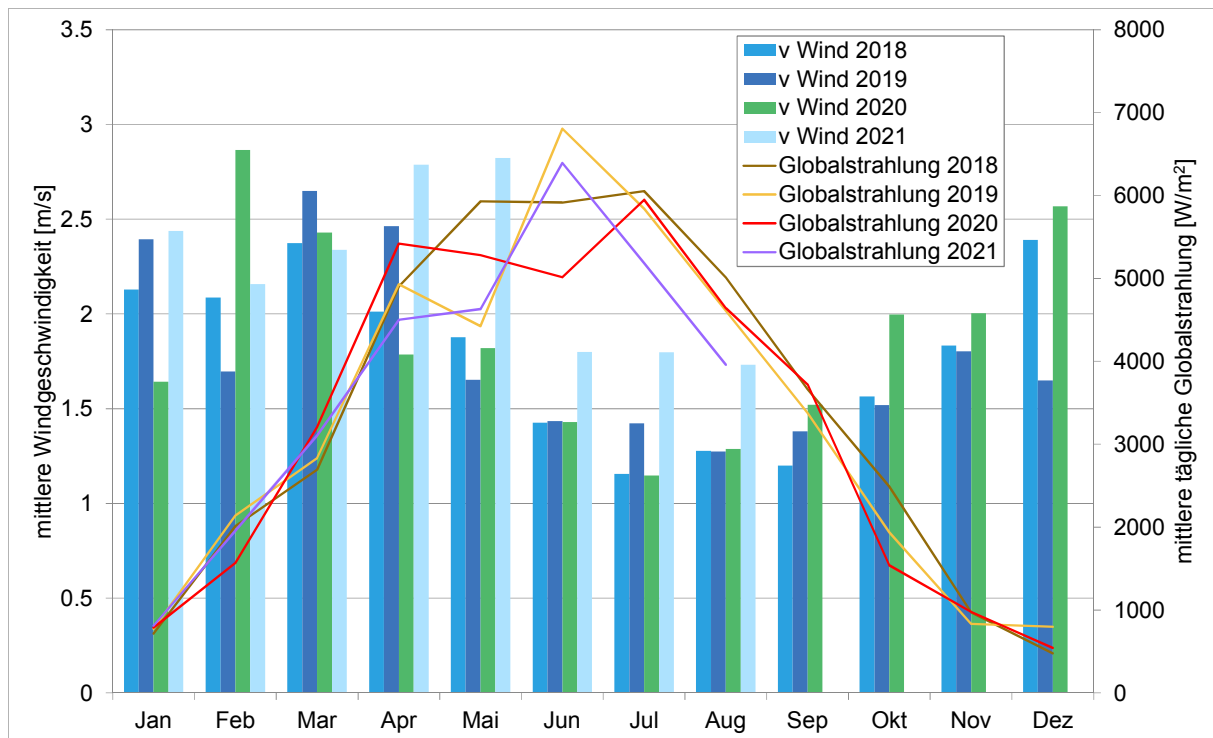


Abbildung 88:
Fördermengen

mittlere Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung
Die Fördermengen der Brunnen Wiesent und Wörth sind über die Nachbildungsjahre unverändert, jeweils mit etwas höheren Entnahmen im Sommer. Im Jahr 2020 war der Brunnen II in Wiesent für drei Monate ausser Betrieb. Seine Fördermenge wurde durch die beiden anderen Brunnen kompensiert.

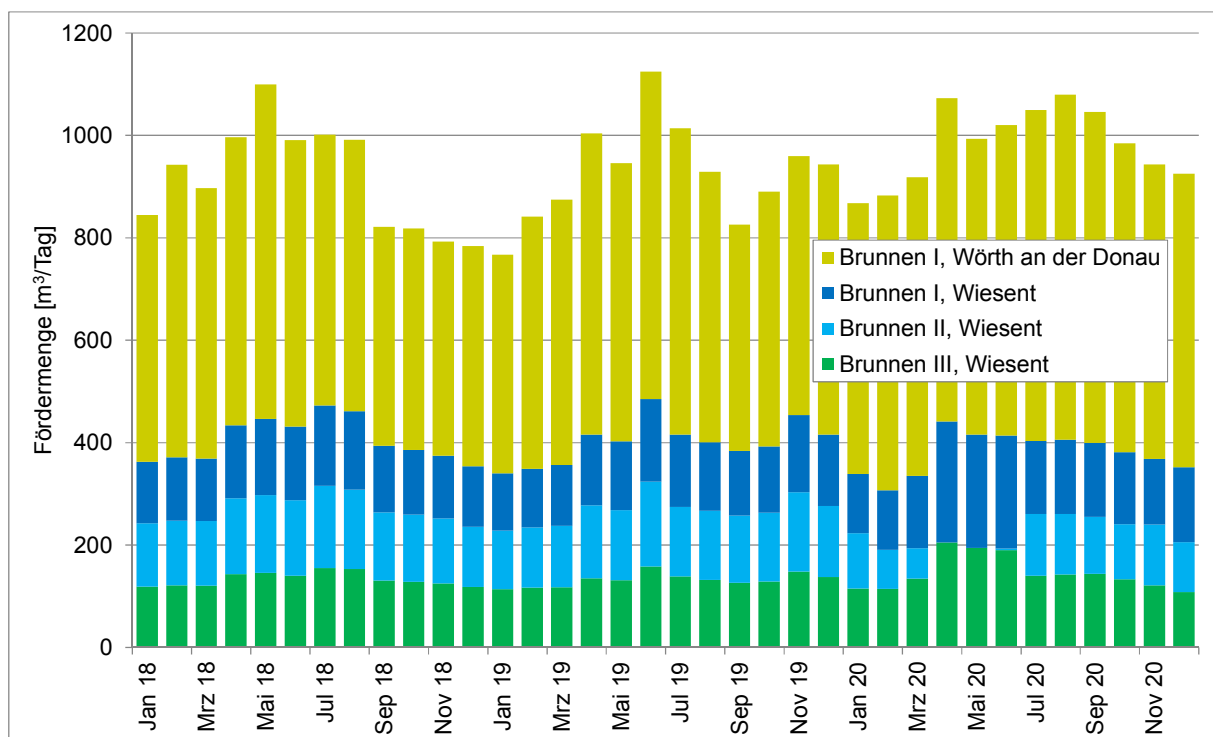


Abbildung 89: Fördermengen der Brunnen Wiesent und Wörth

Schöpfwerke

Bei den Schöpfwerken werden periodisch die Betriebsstunden ausgelesen und in Datenblättern handschriftlich festgehalten. Aus den Pumpenleistungen können die zwischen zwei Auslesezeitpunkten geförderten Wassermengen abgeschätzt werden. Eine genaue zeitliche Zuordnung ist nicht möglich. Unsicherheiten ergeben sich auch aus Fehlern beim Eintrag und der manuellen Digitalisierung der handschriftlichen Einträge.

Auswertung

Die Datenblätter liegen seit der Inbetriebnahme der Schöpfwerke vor. Die Daten ausgewählter Jahre wurden in digitale Form gebracht. Abbildung 90 zeigt die zeitliche Entwicklung der Fördermenge in Abständen von jeweils etwa 10 Jahren. Auffallend ist die starke Abnahme im Schöpfwerk Auburg in den Jahren 1989 bis 2009. Seit diesem Zeitpunkt bleibt die Fördermenge etwa gleich. Ein ähnliches Verhalten ist auch in den Schöpfwerken Sarching und Donaustauf zu beobachten, jedoch weniger ausgeprägt. Die Abnahme der Fördermengen kann auf die zunehmende Kolmatierung der Donausohle im Stauraum in Folge der Ablagerung von Feinmaterialien zurückgeführt werden. Die immer noch abnehmenden Fördermengen im Schöpfwerk Donaustauf zeigen, dass dieser Prozess im hinteren Bereich des Stauraums heute noch nicht abgeschlossen ist..

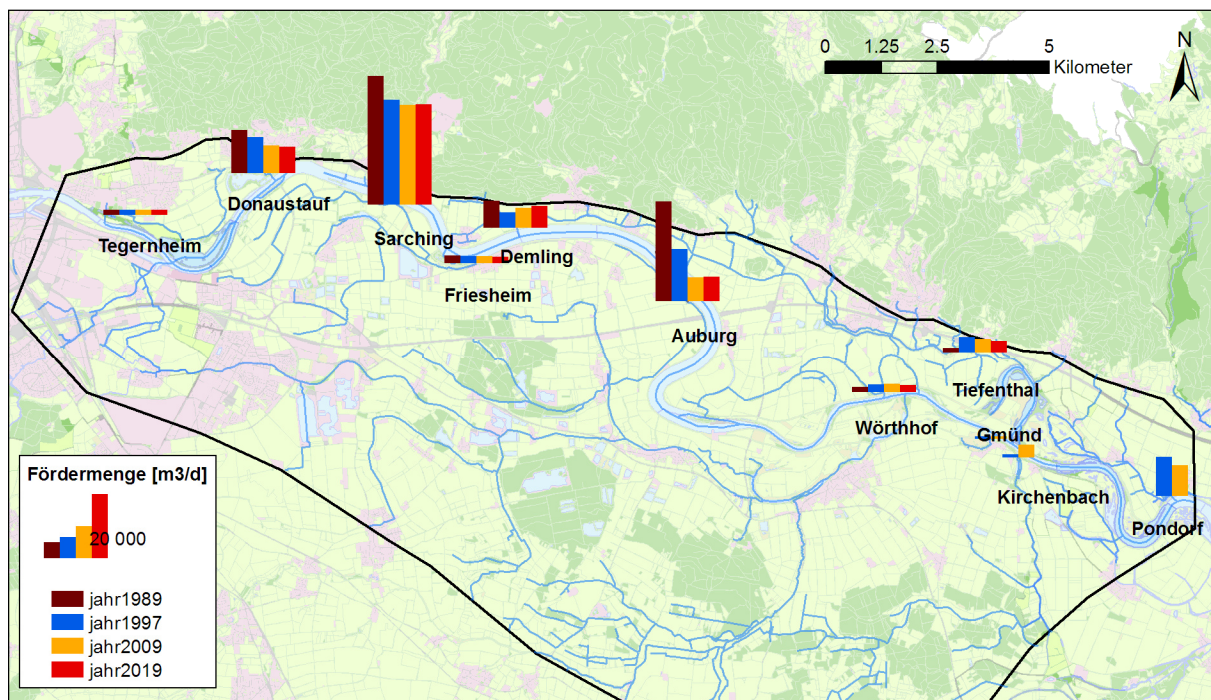


Abbildung 90: Zeitliche Entwicklung der Fördermenge in den Schöpfwerken

Grundwasserstände

Abbildung 91 zeigt die Lage der Messstellen im 2016-2017 realisierten Beobachtungsnetz der Grundwasserstände. Das Beobachtungsnetz deckt den gesamten Modellbereich ab und ist im zentralen Modellbereich verdichtet. Das zeitliche Verhalten der Grundwasserstände wird weiter unten im Rahmen der Kalibrierung dokumentiert.

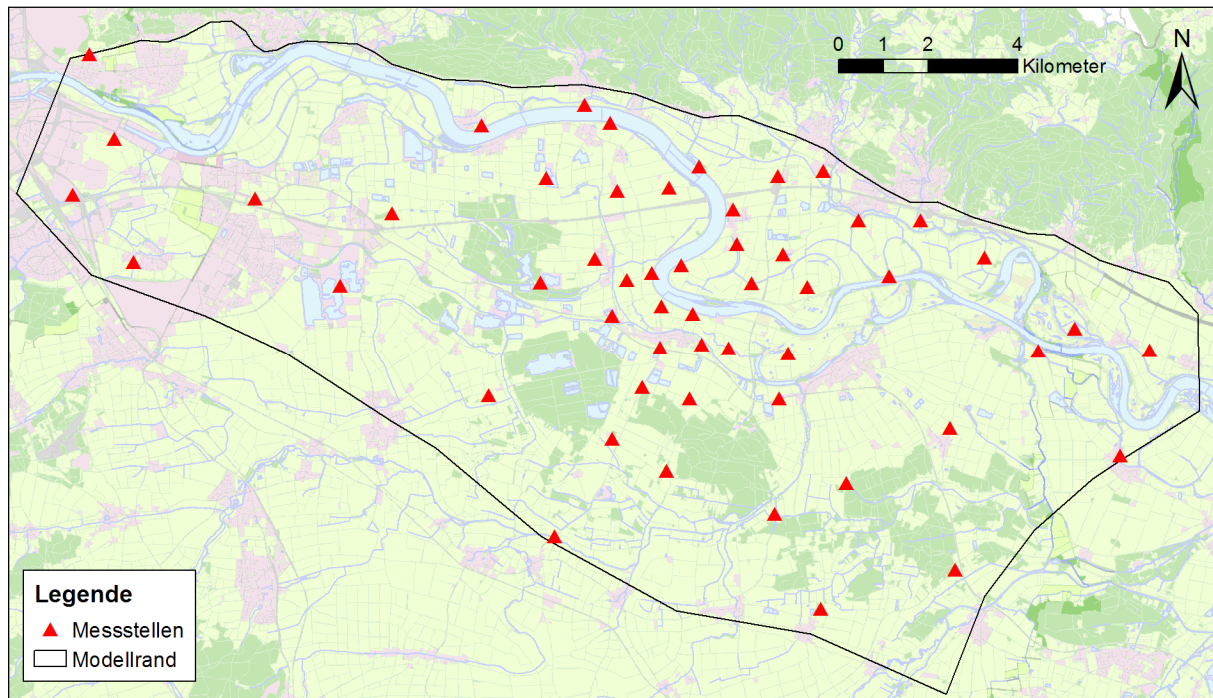


Abbildung 91: Räumliche Verteilung der aktuell betriebenen Messstellen im Modellgebiet

Donau und Pfatter

Von den Gewässern im Modellgebiet stehen nur für die Donau und die Pfatter kontinuierliche Abflussmessungen zur Verfügung. Die Messungen werden bei Schwabelweis und bei Köfering vorgenommen. Im Modellzeitraum enthalten die Abflussmessungen der Donau grosse Datenlücken. Aus den Wasserstandsmessungen und einer aus den vorhandenen Abflussdaten erzeugten Pegel / Abfluss-Beziehung konnten die Datenlücken ergänzt werden. Da die Pfatter zwischen der Messstelle Köfering und dem Eintritt ins Grundwassermodell noch ein relativ grosses Einzugsgebiet aufweist, wurden die Abflussmessungen der Pfatter mit den im Niederschlags- / Abflussmodell des restlichen Einzugsgebietes bestimmten Abflüssen ergänzt.

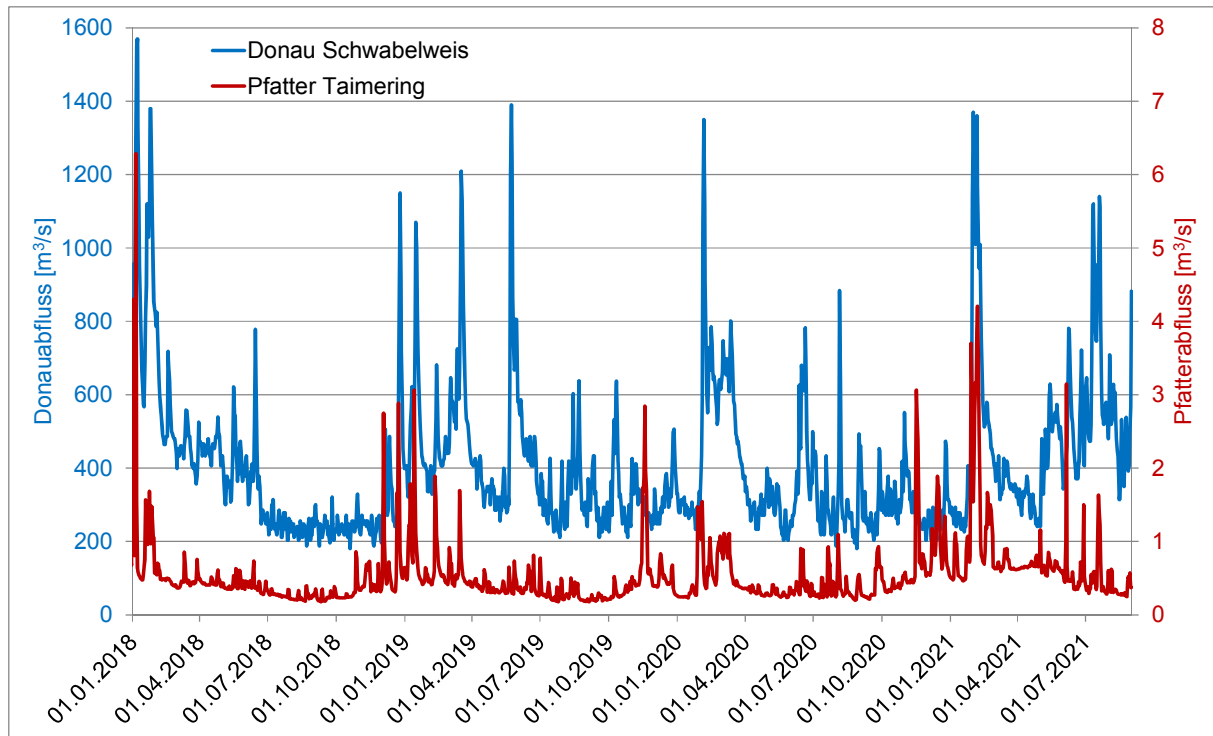


Abbildung 92: Im Grundwassermodell berücksichtigte Abflüsse der Donau und der Pfatter

Grosse Lauer

Da für die Grosse Lauer keine Abflüsse erhältlich sind, wurden im Grundwassermodell die gemessenen Wasserstände verwendet.

Übrige Gewässer

Zur Bestimmung der Abflüsse im Eltheimer Graben, dem Geislinger Mühlbach und der Wiesent wurden Abflussmessstellen vorgeschlagen. An diesen Stellen wurden kontinuierliche Pegelmessungen vorgenommen. Für den Eltheimer Graben und den Mühlbach liegen in der Zwischenzeit auch einige Abflussmessungen vor (Abbildung 93). Die Messstelle an der Wiesent erwies sich als ungeeignet, weshalb keine Abflussdaten vorliegen.

Die Abflussmessungen im Eltheimer Graben und im Mühlbach zeigen, dass die beiden Gewässer eine kontinuierliche Wasserführung aufweisen. Die tiefsten Abflüsse dürften dabei etwa der Drainage aus dem Grundwasser entsprechen.

Pegel Eltheim		
Datum	Wasserstand	Q m ³ /s
05.08.2021	82	0,106
26.05.2021	83	0,087
21.04.2021	74	0,089
03.03.2021	80	0,155
27.01.2021	75	0,094
15.10.2020	95	0,071
02.09.2020	95	0,05
26.08.2020	93	0,052
14.07.2020	78	0,047
11.06.2018	75	0,049
31.01.2018	90	0,235

Pegel Geisling		
Datum	Wasserstand	Q m ³ /s
05.08.2021	112	0,208
26.05.2021	80	0,175
21.04.2021	69	0,185
03.03.2021	78	0,359
27.01.2021	69	0,201
15.10.2020	83	0,133
02.09.2020	88	0,087
26.08.2020	79	0,078
14.07.2020	67	0,086
22.06.2020	125	0,366
03.07.2019	74	0,102
21.05.2019	80	0,262
09.08.2018	56	0,041
11.06.2018	66	0,109
31.01.2018	130	0,639

Abbildung 93: Abflussmessungen des Eltheimer Grabens und des Geislinger Mühlbachs.

8.3 Nachkalibrierung 2018 – 2019

8.3.1 Modellanpassungen

Parameter	Im Rahmen der Nachkalibrierung wurden die Sohlendurchlässigkeiten der Gewässer und die Durchlässigkeiten des Untergrundes überprüft und angepasst. Ebenfalls überprüft wurden die Ausdehnung der bewässerten Fläche, sowie die Seitenzuflüsse am Nordrand des Modells. Die resultierenden Modellparameter sind in Abbildung 94 bis Abbildung 98 dokumentiert.
Durchlässigkeit	Bei den Durchlässigkeiten wurden vor allem entlang des südlichen Modellrandes noch Anpassungen vorgenommen, welche auf die neuen Messstandorte zurückzuführen sind. Im Donaubogen linksseitig oberhalb der Staustufe Geisling musste die Durchlässigkeit erhöht werden, da die gemessenen Grundwasserstände in der Messstelle L39A deutlich tiefer waren als im Modell. Zum Ausgleich mussten die Durchlässigkeiten an der Terrassenkante bei Kleinkiefenholz etwas tiefer angesetzt werden.
Porosität	Die bisher angenommenen starken Unterschiede der Porosität im Schwankungsbereich des Grundwassers wurden aus Plausibilitätsgründen etwas abgeschwächt.
Leakage	Die Sohlendurchlässigkeit der Donau wurde im Wurzelbereich der beiden Staustufen Geisling und Straubing etwas reduziert um die zunehmende Kolmation der Donausohle nachzubilden. Im restlichen Modellbereich wurden lediglich kleine Anpassungen vorgenommen.
Neubildung aus Niederschlag	In den bewässerten Gebieten können in Folge der grossen Entnahmen in den Sommermonaten deutliche Absenkungen der Grundwasserstände beobachtet werden. Dies war jedoch im Gebiet zwischen der Donau und Wiesent nicht der Fall. Die dort angeordnete Vegeta-

tionszone wurde deshalb als Landwirtschaft ohne Bewässerung eingestuft.

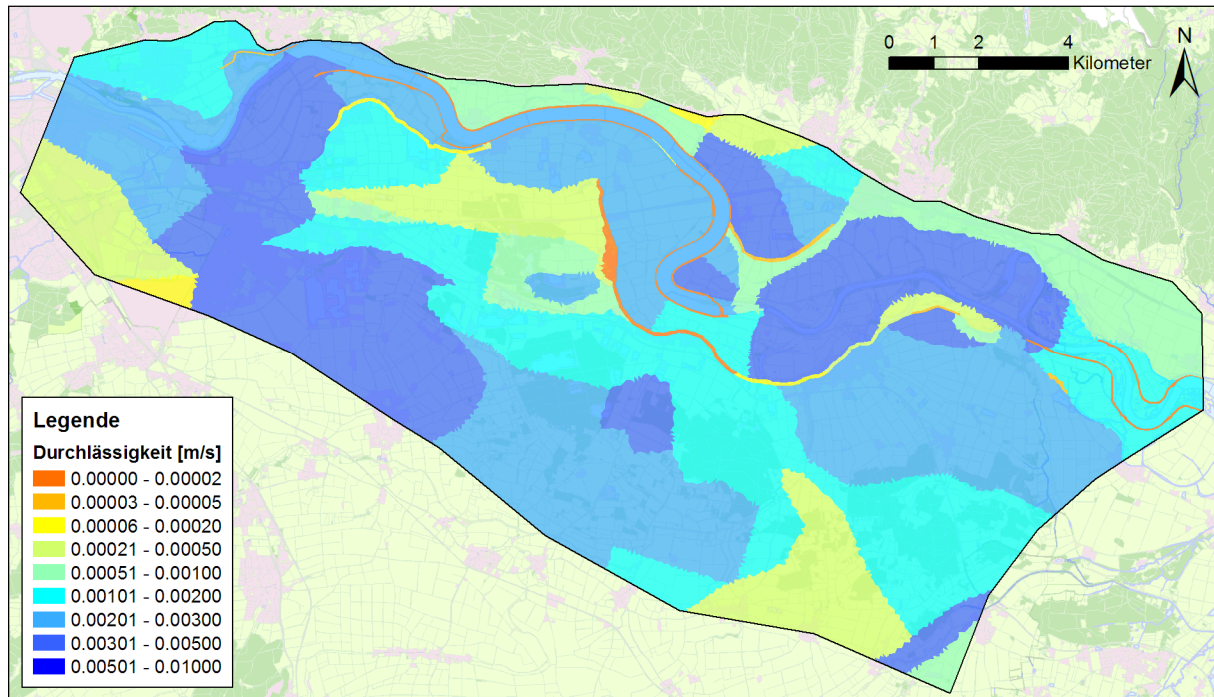


Abbildung 94: Kalibrierte Durchlässigkeitsverteilung

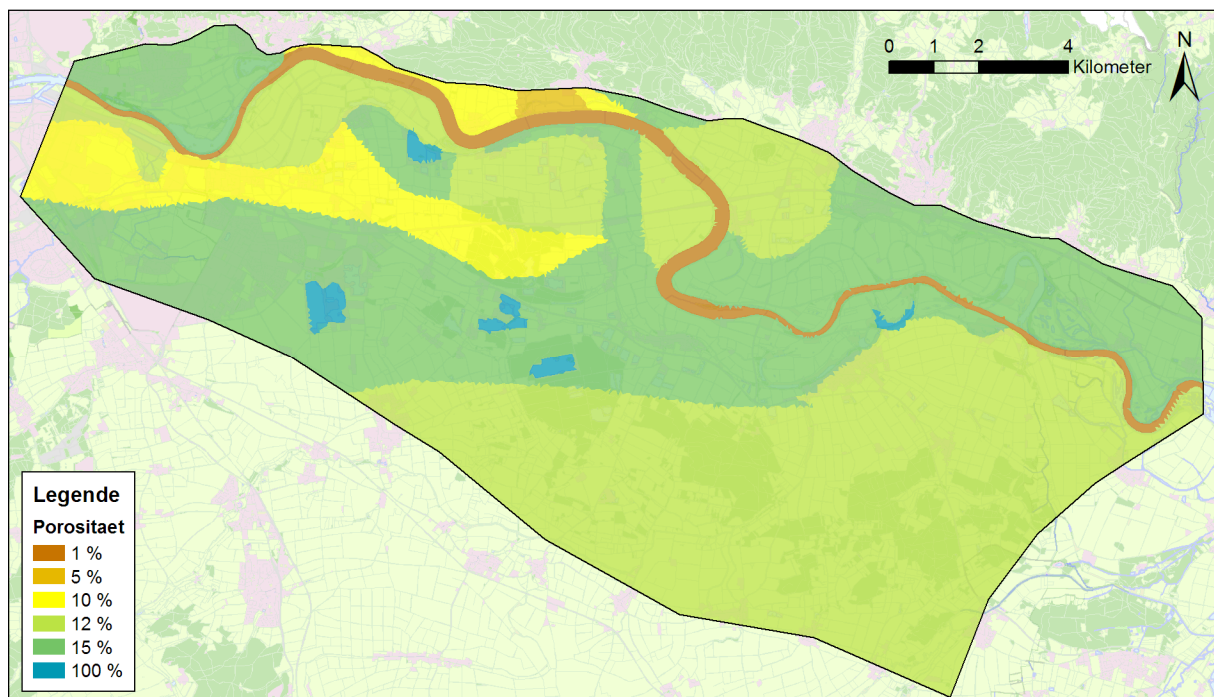


Abbildung 95: Wirksamer Porenanteil im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels

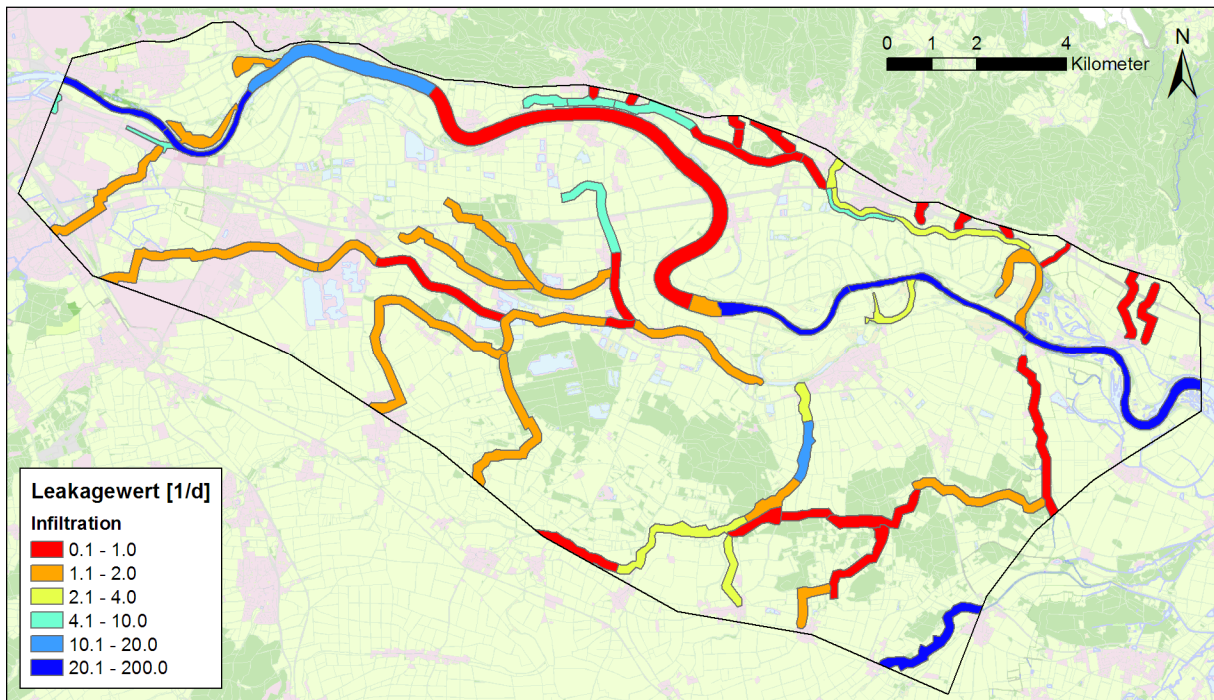


Abbildung 96: Leakagewerte der Infiltration

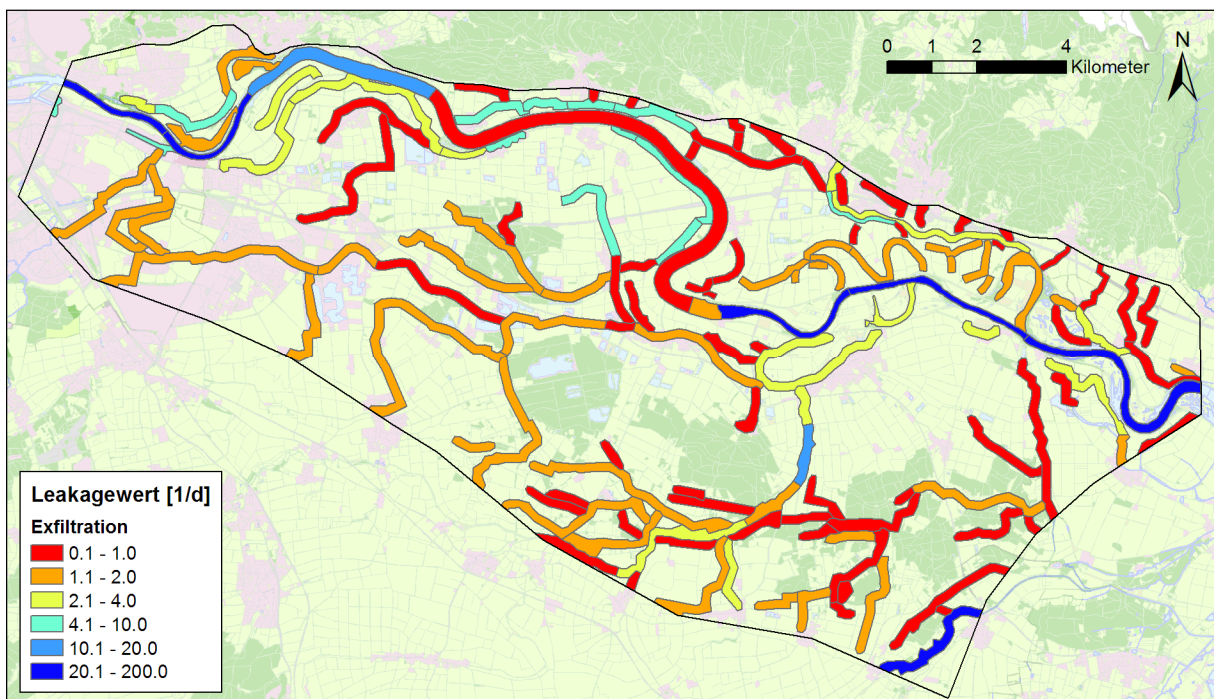


Abbildung 97: Leakagewerte der Exfiltration

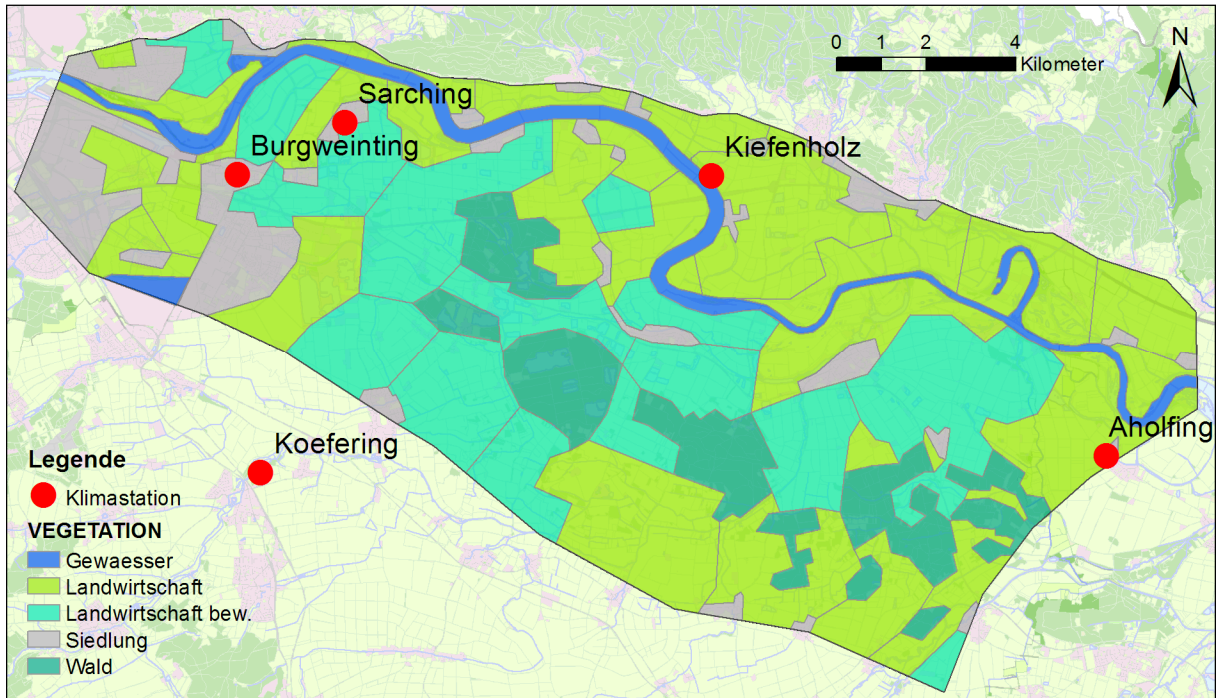


Abbildung 98: Lage der Klimastationen und Einteilung in Vegetationszonen

8.3.2 Kalibrierungsgenauigkeit

Scatterplot

Die Genauigkeit der Kalibrierung wird über die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserständen quantifiziert. Eine Übersicht gibt der Scatterplot in Abbildung 99.

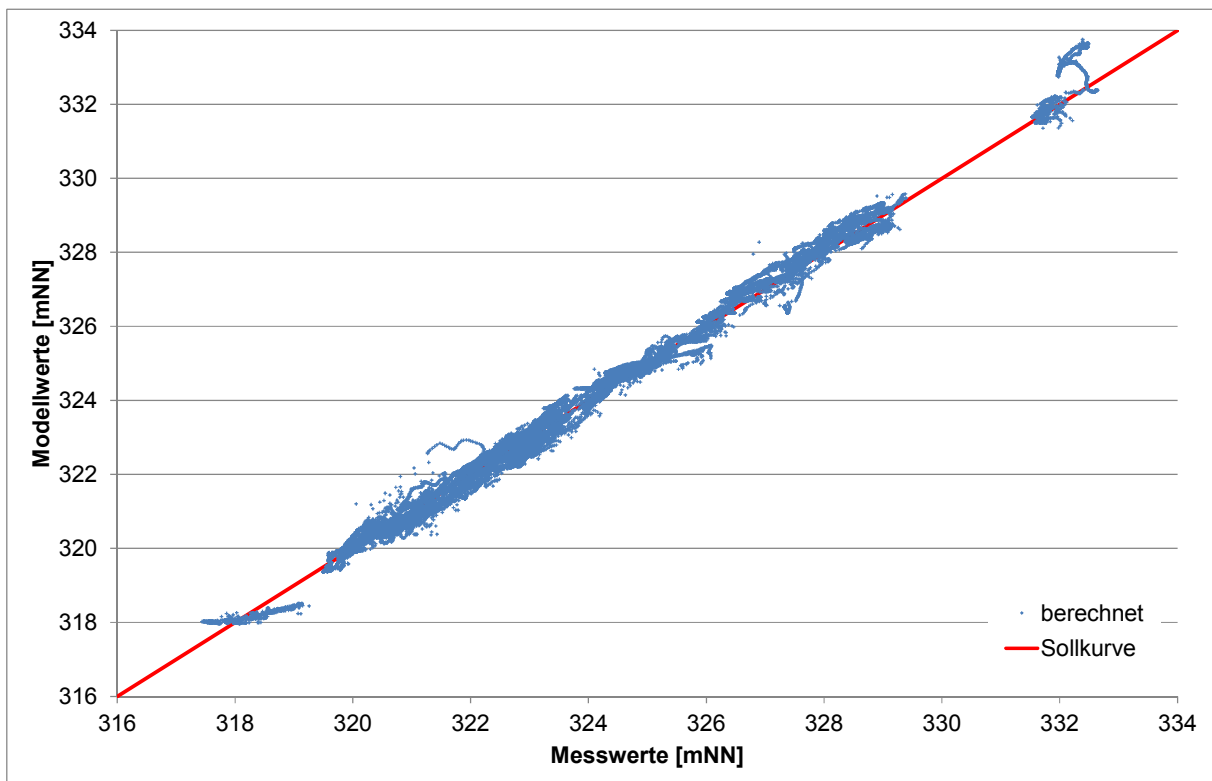


Abbildung 99: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Grundwasserstände der Jahre 2018 – 2019

Örtliche Auswertung Abbildung 100 gibt eine Übersicht über die örtliche Verteilung der Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserständen. Im Gebiet der geplanten Flutpolder liegen die mittleren Abweichungen im Bereich von 6 bis 30 cm.

Zeitkurven Die zeitliche Übereinstimmung der Modellresultate mit den Messungen ist in Abbildung 102 und Abbildung 103 für ausgewählte Messstellen im Gebiet der geplanten Flutpolder dargestellt.

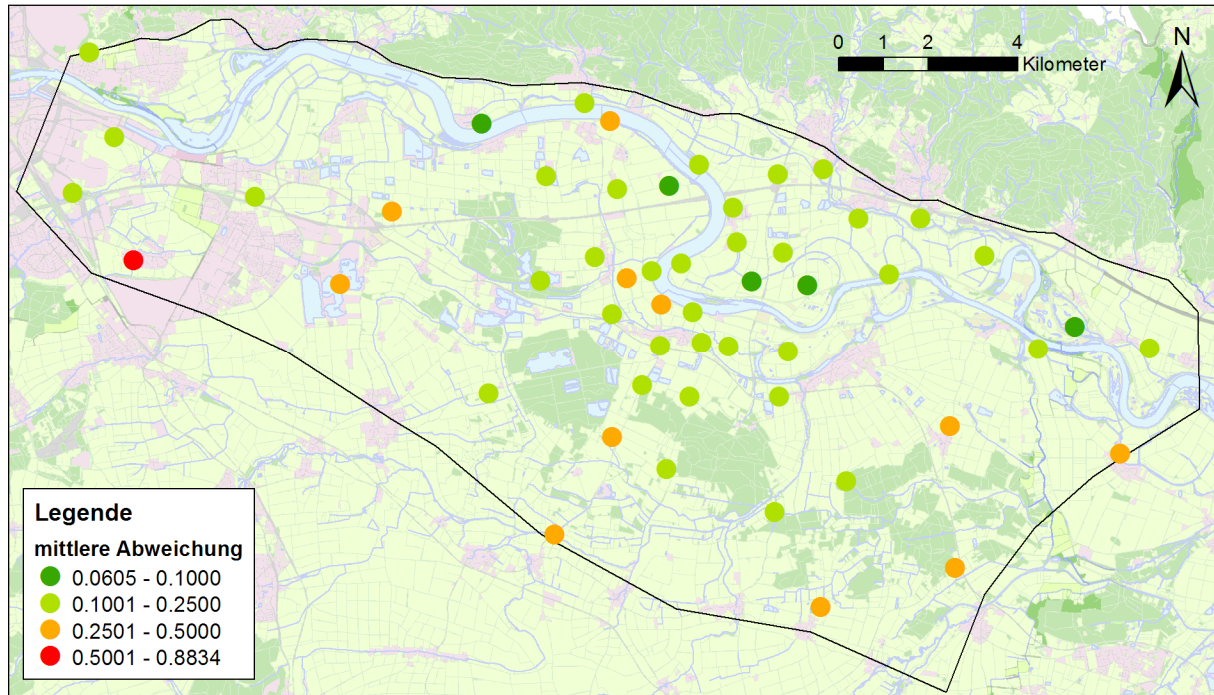


Abbildung 100: Mittlere Abweichung des Modells von den Messungen

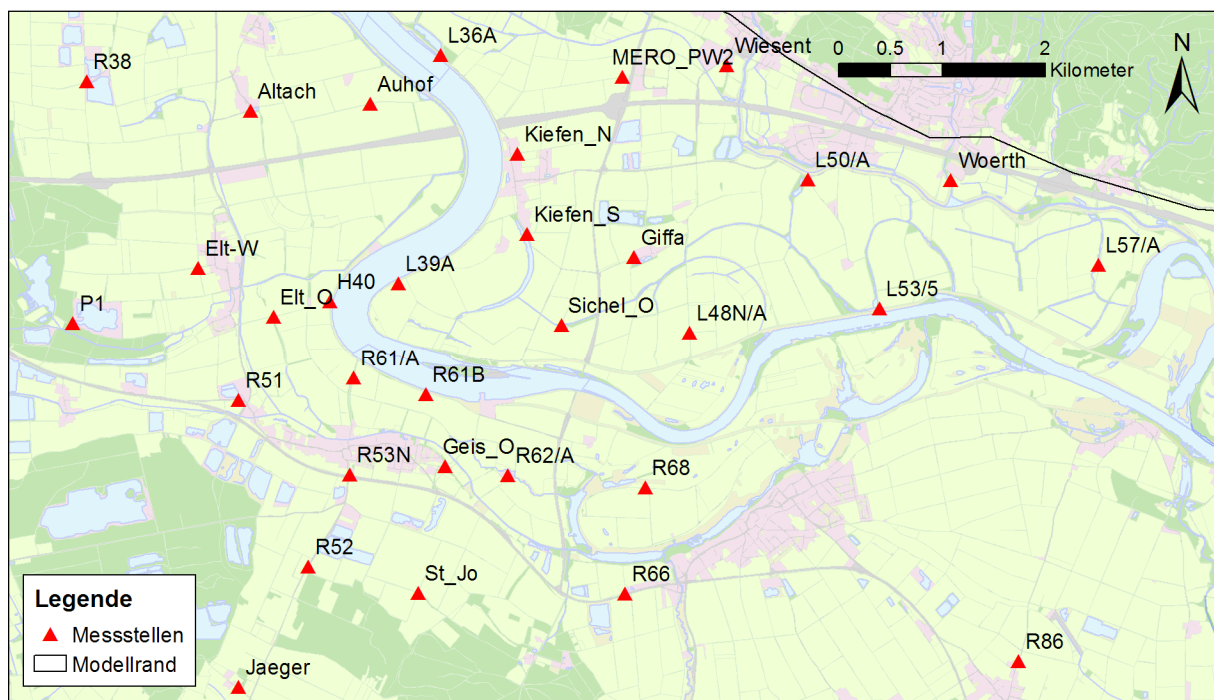


Abbildung 101: Lage der Messstellen im Gebiet der geplanten Polder

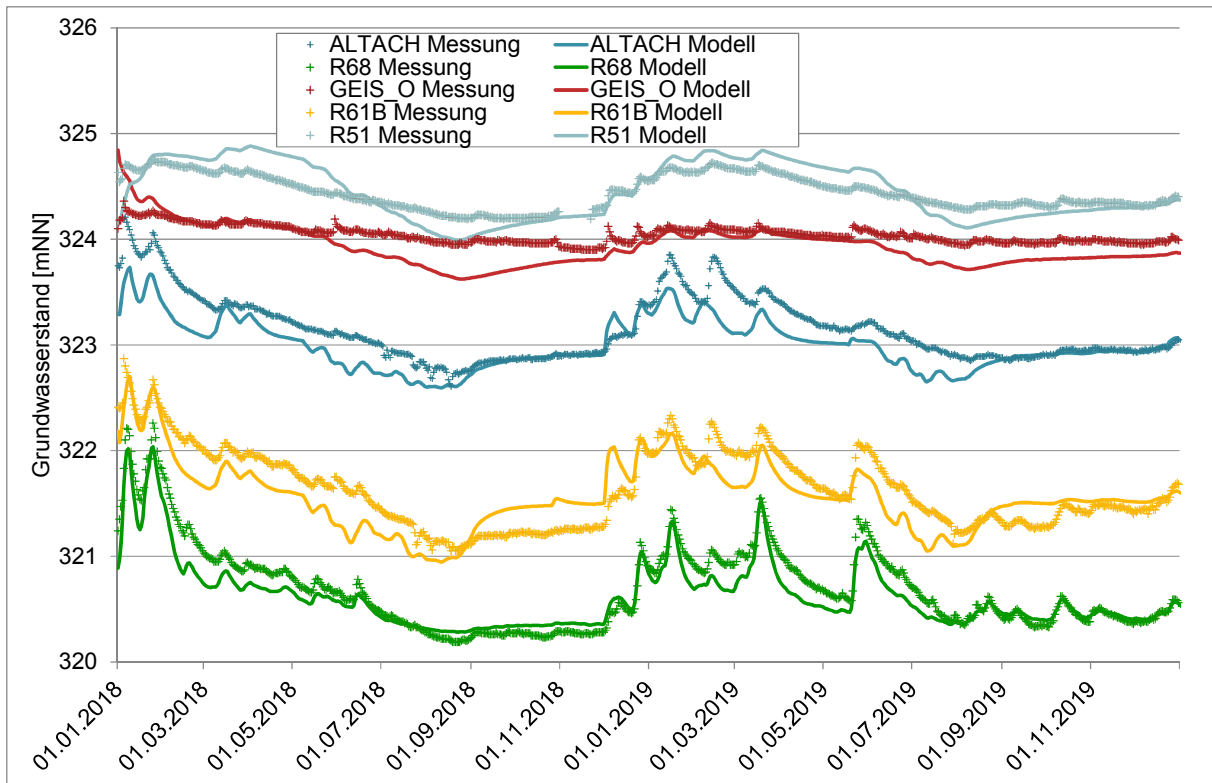


Abbildung 102: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des geplanten Polders Elthem im Zeitraum 2018 – 2019.

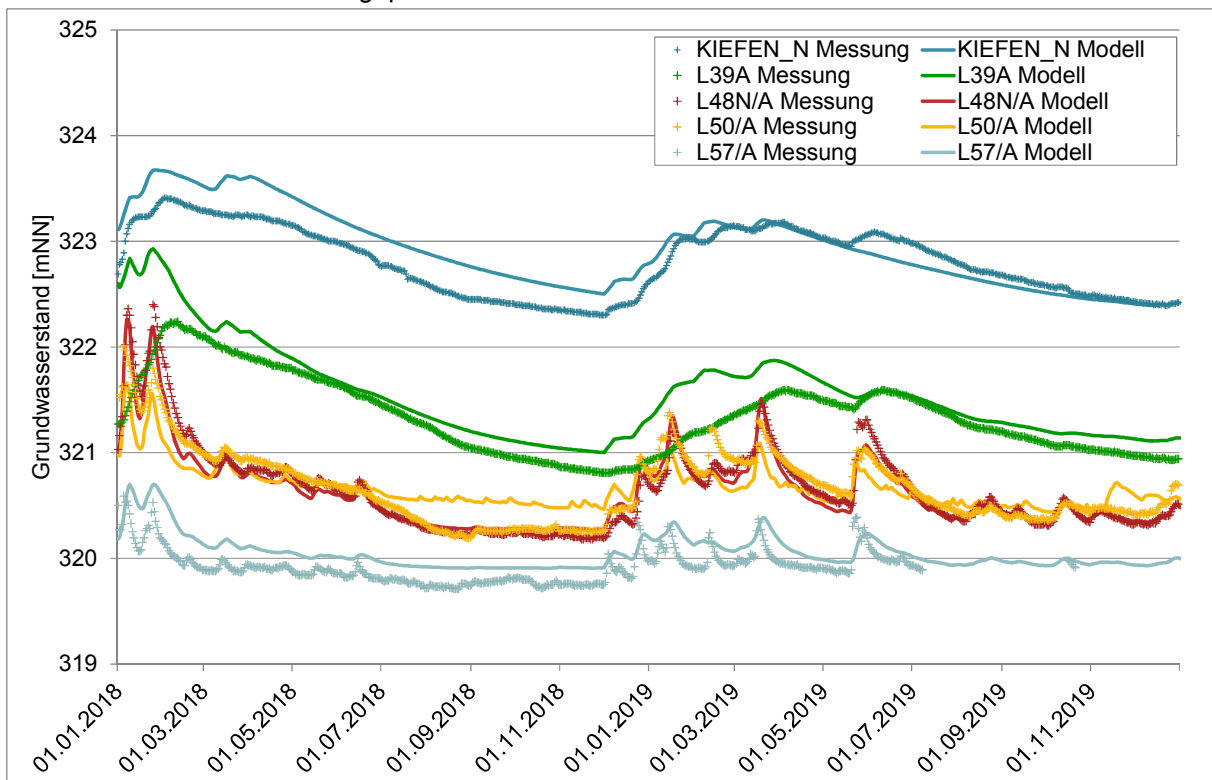


Abbildung 103: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des geplanten Polders Würthhof im Zeitraum 2018 – 2019.

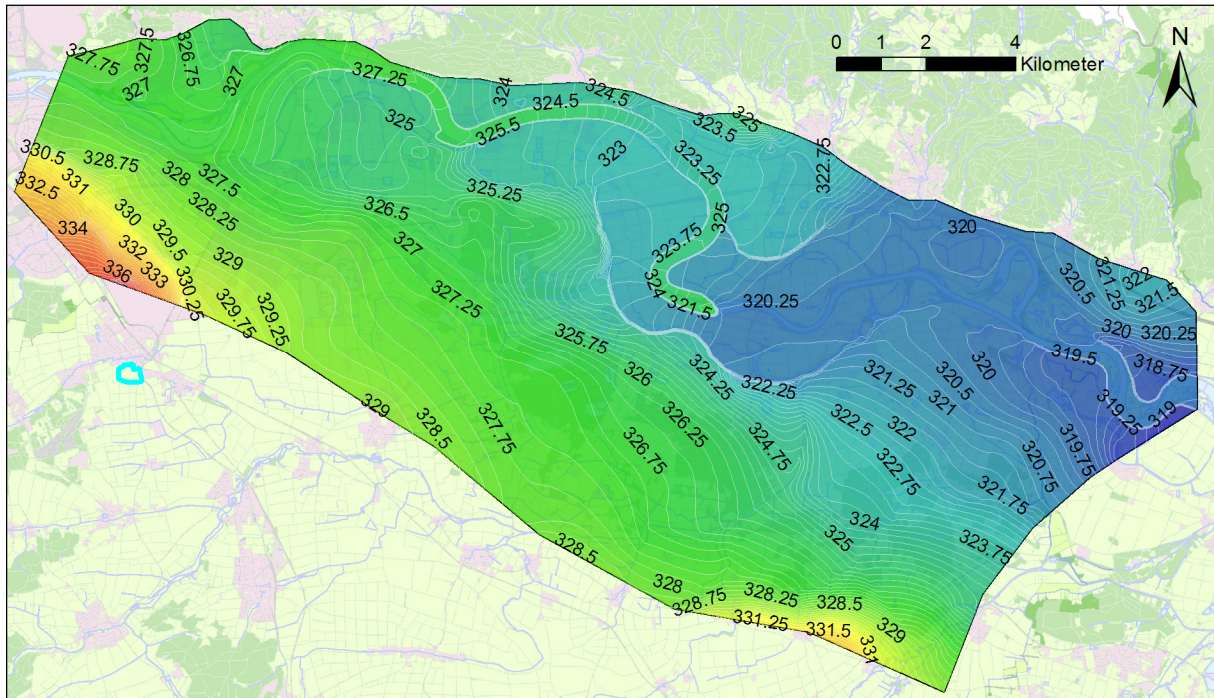


Abbildung 104: Berechnete Grundwasserstände bei Niedrigstand am 15.08.2018

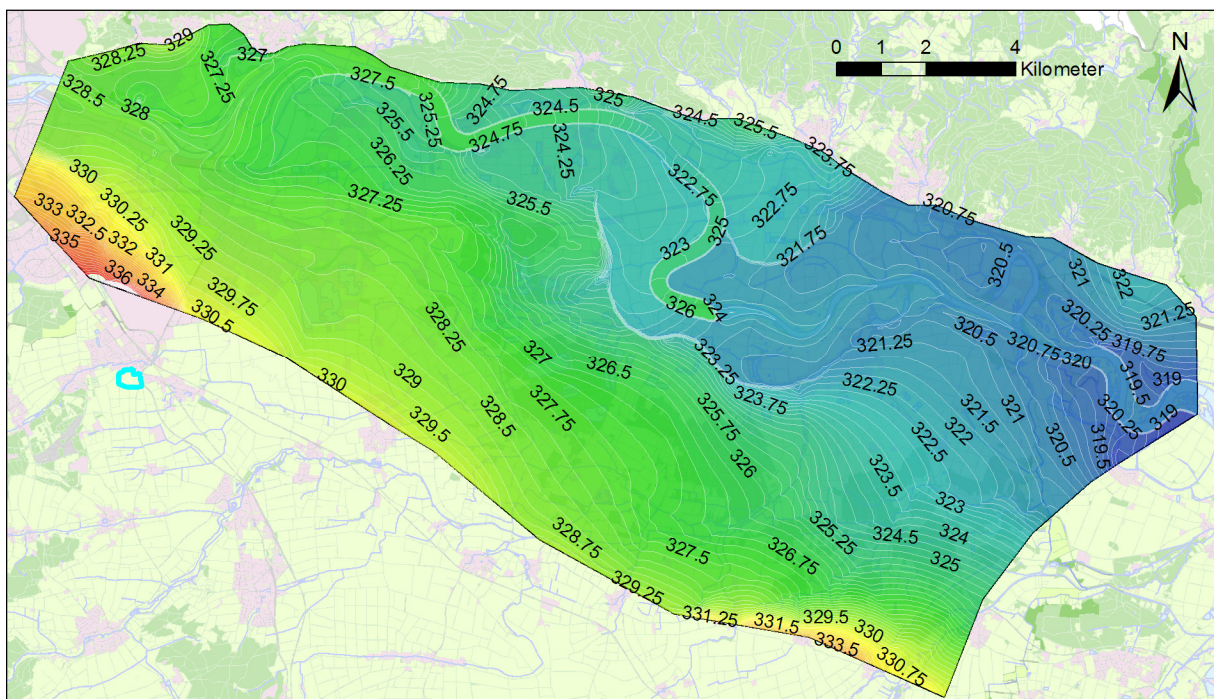


Abbildung 105: Berechnete Grundwasserstände bei Hochstand am 15.01.2019

Grundwasserstand

Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen die berechneten Grundwasserstände für einen Niedrig- und einen Hochstand. Beim Hochstand ist deutlich zu erkennen, dass unterhalb der Staustufe Geisling die höchsten Grundwasserstände entlang der Donau und ein Potentialgefälle in Richtung Landesinnere auftreten.

8.4 Validierung 2019 – 2021

Validierung

Für die Validierung des Modells wurden die Grundwasserstandsdaten der Jahre 2020 und 2021 verwendet. In der Tabelle 9 sind die Güte- werte der Kalibrierung und Validierung zusammengestellt. Gegenüber früheren Kalibrierungen sind die Güte- werte deutlich besser. Dies ist vor allem auf die grössere Zuverlässigkeit der aktuellen Messungen zurückzuführen. Abbildung 106 bis Abbildung 108 zeigen die gute Übereinstimmung des Modells mit den Messungen.

Schöpfwerke

Abbildung 109 bis Abbildung 112 zeigen die gute Übereinstimmung zwischen den berechneten Drainagemengen im Zufluss der Schöpf- werke mit den gemessenen Fördermengen. Letztere enthalten neben dem Grundwasserzufluss auch Niederschlagsanteile. Die Spitzen der gemessenen Fördermengen sind deshalb höher als die Drainage.

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quad- ratischen Abwei- chung (RMSE) [cm]	Mittelwert der abso- luten Abweichung [cm]	Median der Absolu- ten Abweichung [cm]
2018 - 2019	27	20	16
2020 - 2021	26	18	13

Tabelle 9: Güte- werte der Kalibrierung über das ganze Modellgebiet

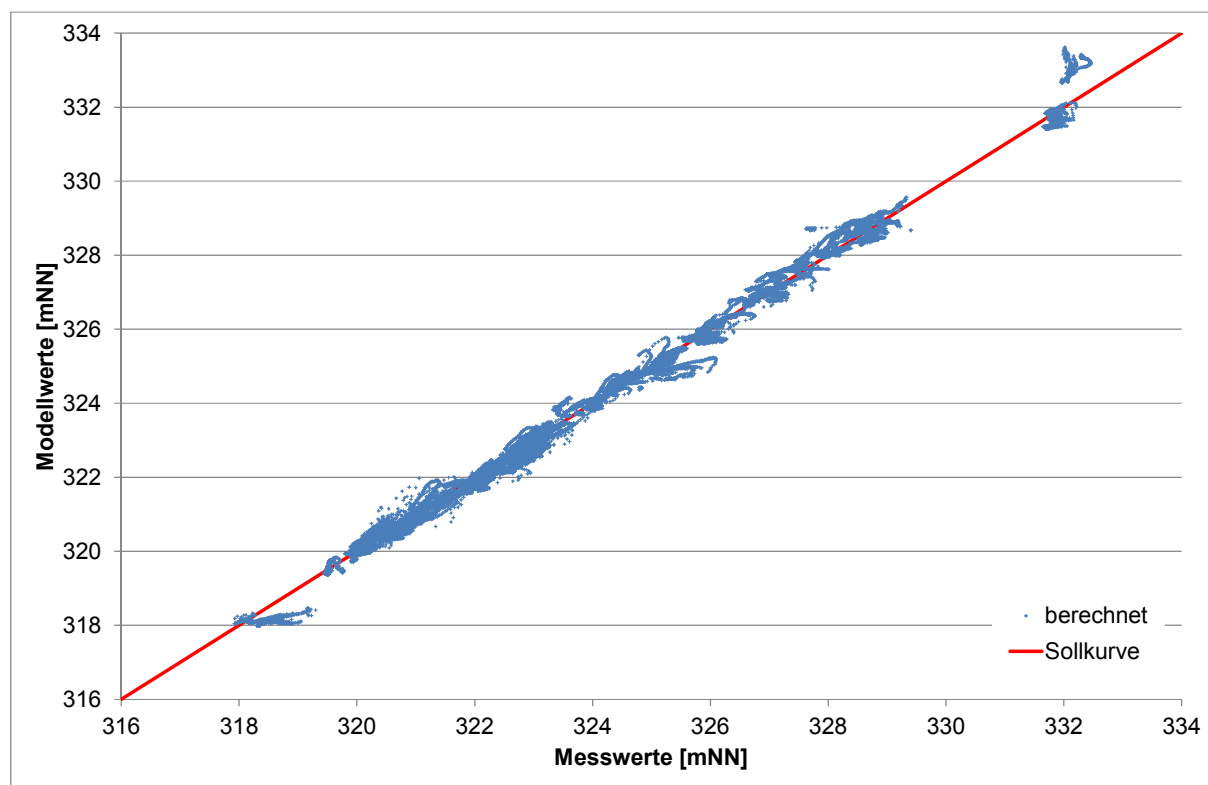


Abbildung 106: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Grundwasserstände der Jahre 2020 - 2021

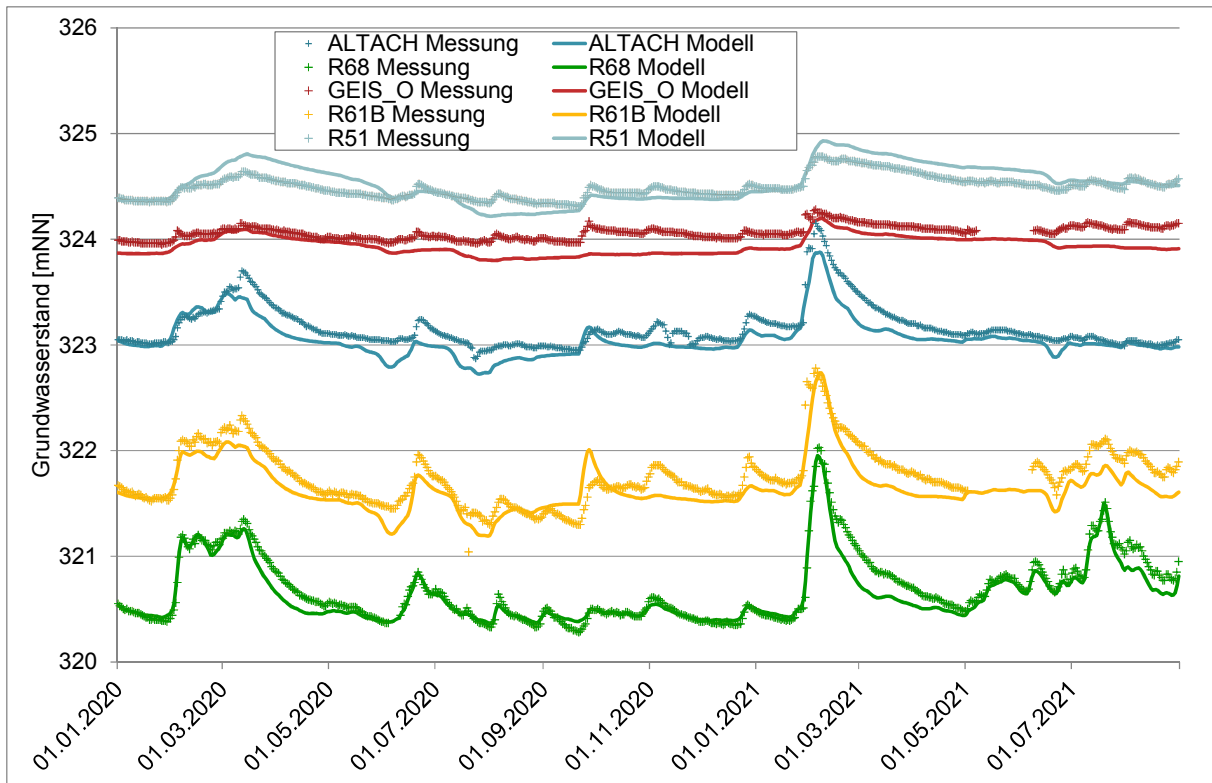


Abbildung 107: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des geplanten Polders Elthem im Zeitraum 2020 – 2021.

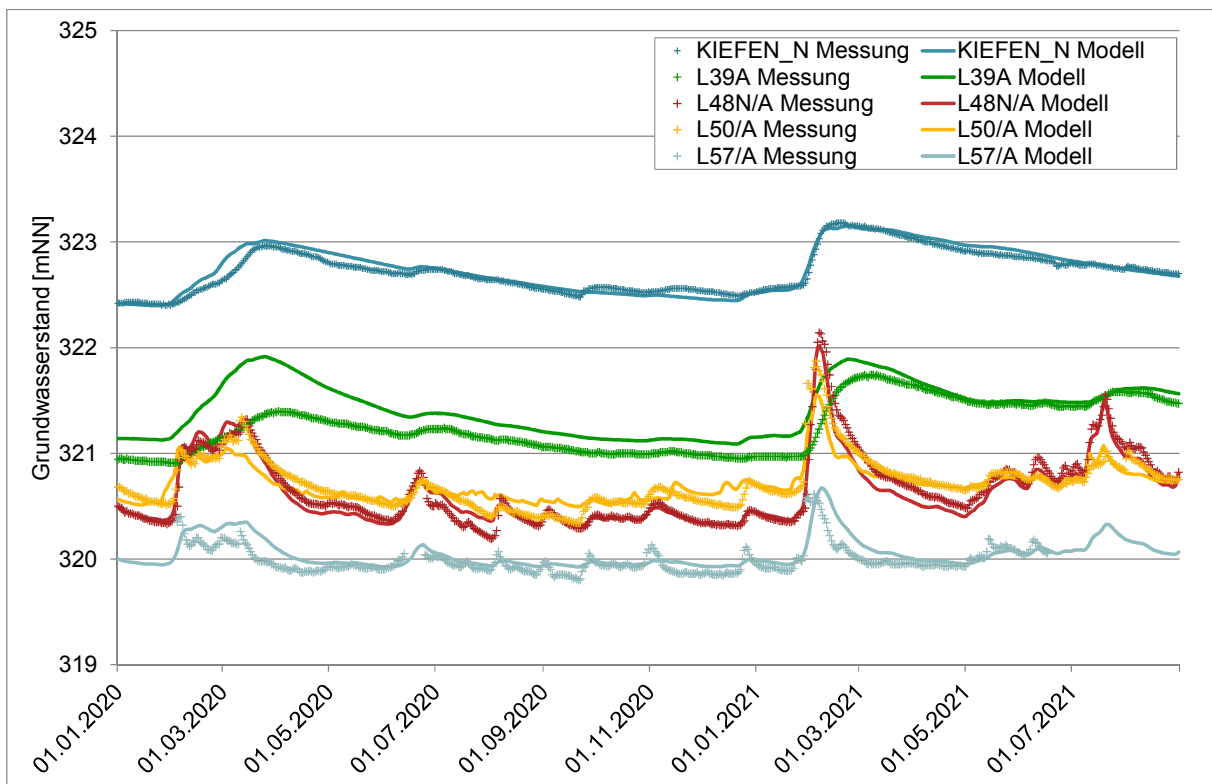


Abbildung 108: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des geplanten Polders Würthhof im Zeitraum 2020 – 2021

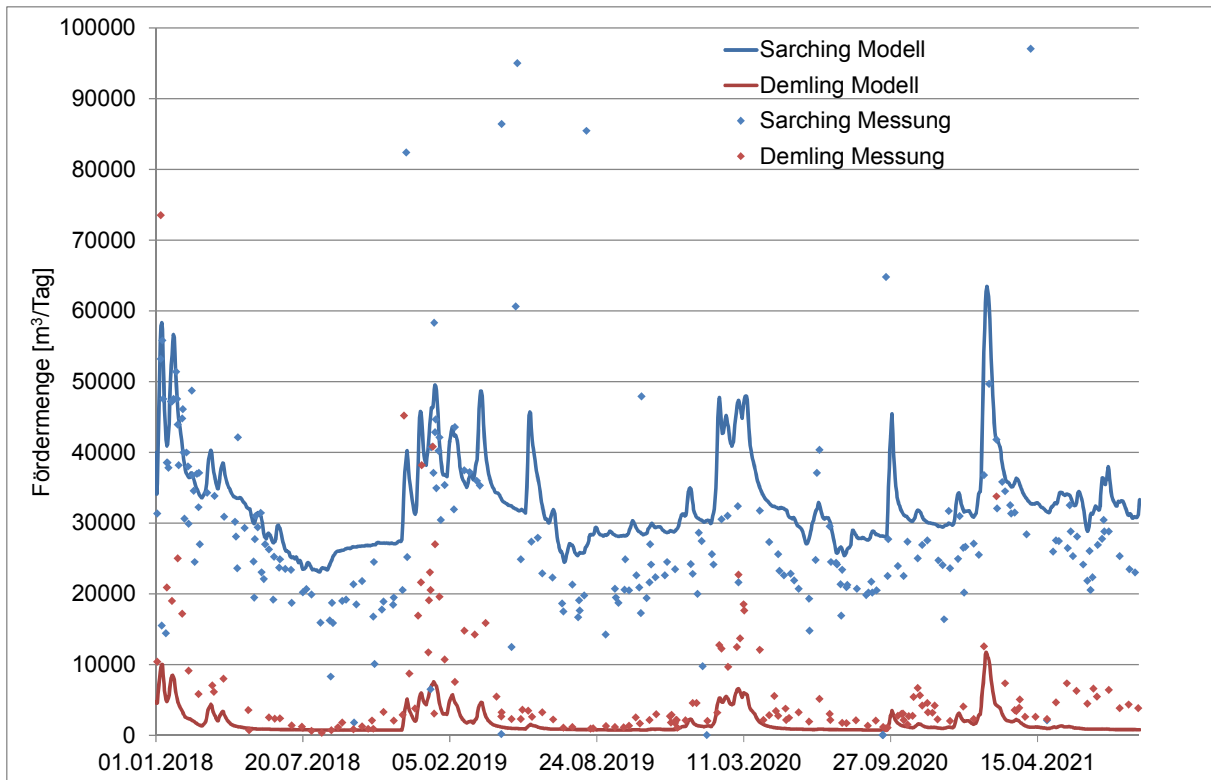


Abbildung 109: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 2018-2021.

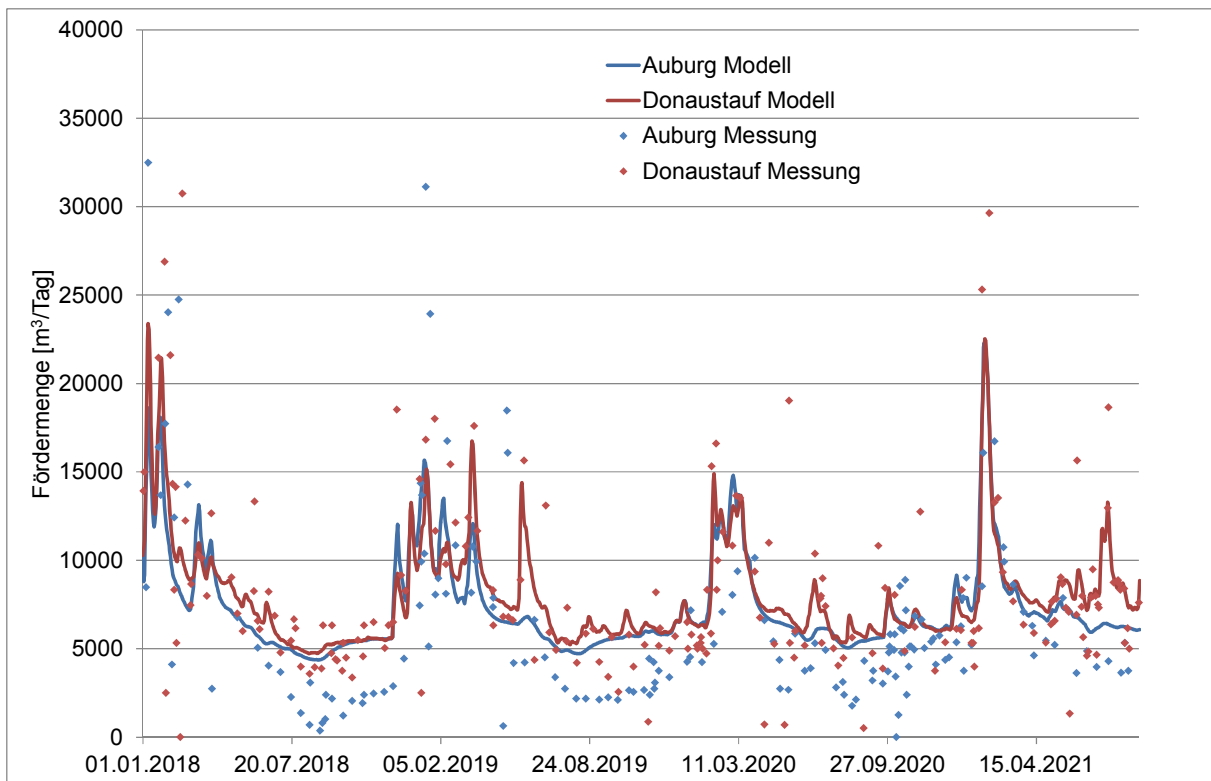


Abbildung 110: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 2018-2021.

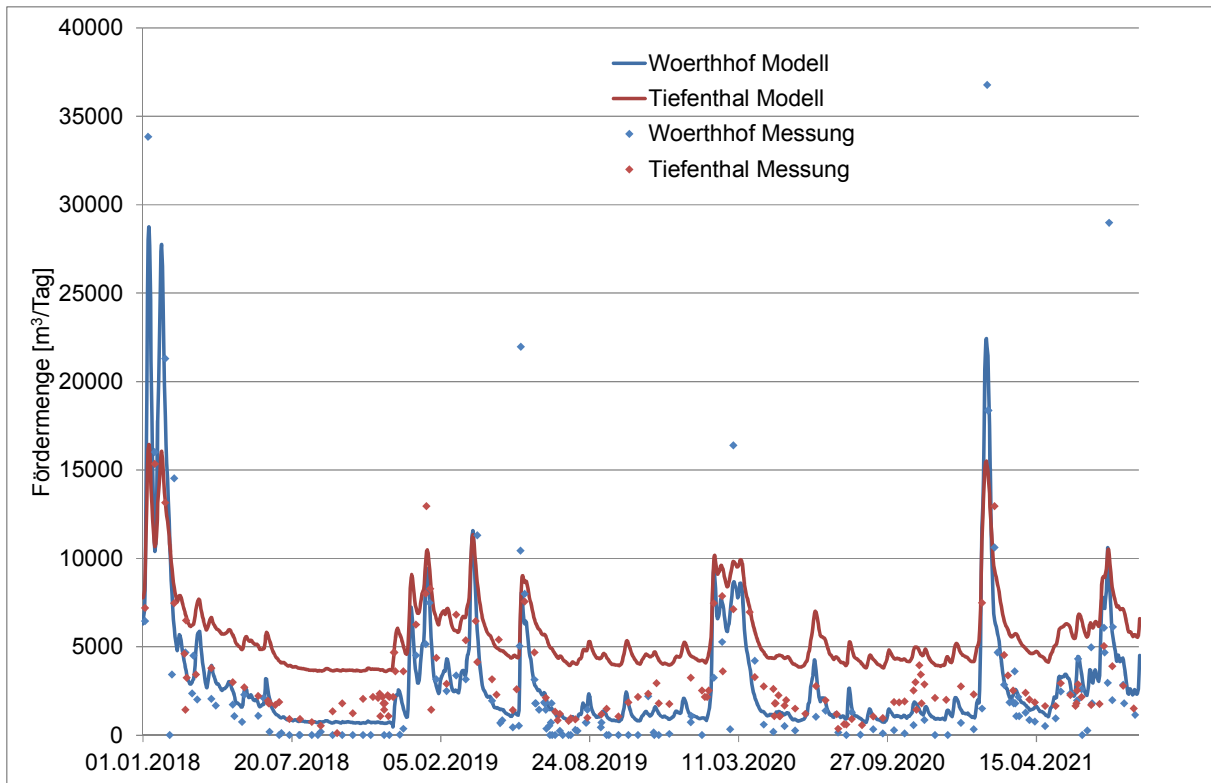


Abbildung 111: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 2018-2021.

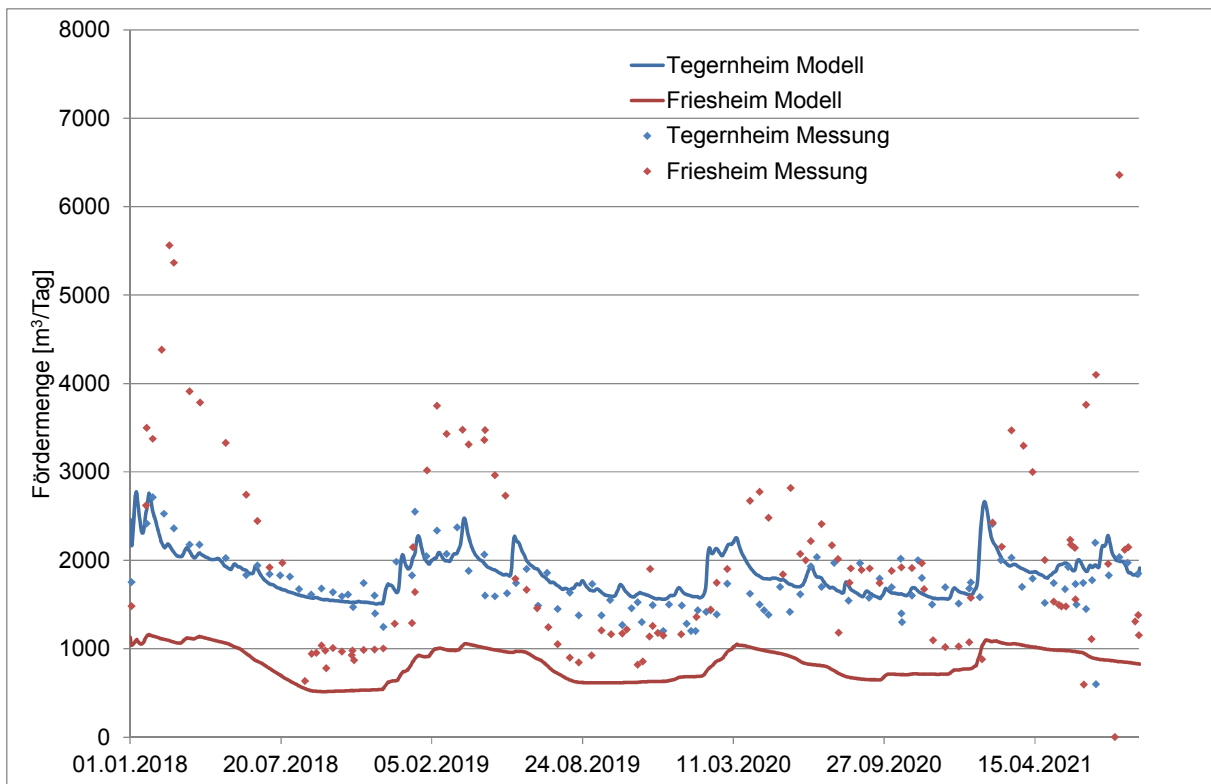
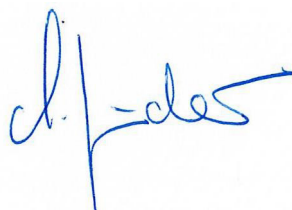


Abbildung 112: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 2018-2021.

9 Literatur

- [1] Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (2016), Geländemodell DGM 1
<http://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/gelaende.html>
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2009), Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500'000
- [3] John Doherty (2007): PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual 5th 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] Müller (1988): Sanierung der Binnenentwässerung nach Inbetriebnahme der Donaustauhaltung Geisling. *Wasserwirtschaft 78 (1988) 10*
- [7] Simultec - tewag (2017): Grundwassermodell Flutpolder Eltheim und Wörthhof: Modellaufbau, Hydrogeologisches Modell und Modellkonzepte. *Im Auftrag des WWA Regensburg*
- [8] Simultec - tewag (2017): Grundwassermodell Flutpolder Eltheim und Wörthhof: Auswirkungen der Staustufe Geisling auf die Grundwasserspiegel. *Im Auftrag des WWA Regensburg*
- [9] Dr. Blasy – Dr. Øverland (2002): Die Hochwassersituation südlich der Gemeinde Pfatter, Winter 2002/2003. *Im Auftrag der Gemeinde Pfatter*.
- [10] Solum (2003): Geologisch-bodenkundliche Standorterkundung als Planungsgrundlage für Drainagemassnahmen im Raum Griesau. *Im Auftrag der Gemeinde Pfatter*.

Simultec AG, Zürich, 16.05.2022



Christian Gmünder