

Donau (Iller bis Lech) – Verbesserung Hochwasserschutz - Datenmanagement und Modelle

Grundwasser– Modellaufbau und -anpassung

Bericht

Anlage 5.2

1	Aufgabenstellung	6
2	Modellaufbau.....	6
2.1	Modellcode und Unterteilung in finite Elemente.....	6
2.2	Schichtgrenzen	7
2.3	Randbedingungen.....	8
2.3.1	Grundwasserneubildung.....	8
2.3.2	Karstzuflüsse	11
2.3.3	Kopplung mit dem hydraulischen Modell.....	12
2.3.4	Qualmwasser-Randbedingung.....	14
2.3.5	Brunnenketten des Zweckverbands Landeswasserversorgung.....	15
3	Kalibrierung.....	16
3.1	Kalibrierungsmethode	16
3.1.1	Verfahren.....	16
3.1.2	Bewertungskriterien	16
3.2	Instationäre Kalibrierung mit PEST.....	17
3.2.1	Vorgehen.....	17
3.2.2	Zonierung für die Kalibrierung mit PEST	18
3.2.3	Resultate der automatischen Kalibrierung.....	20
3.2.4	Kovarianzanalyse	21
3.3	Manuelle Kalibrierung.....	24
3.3.1	Gütwerte der Kalibrierung	24
3.3.2	Vergleich mit den Messdaten des Grundwasserspiegels	26
3.3.3	Vergleich der Drainagemengen mit den Abflussmessungen	36
3.4	Resultierende Modellparameter	38

4	Validierung	41
4.1	Nachbildung des Hochwassers 1999	41
5	Charakterisierung der Grundwassersituation mit dem Modell.....	48
5.1	Grundwasserspiegel	48
5.2	Fließgeschwindigkeiten	49
5.3	Wasserbilanz	51
6	Sensitivitätsuntersuchungen.....	55
6.1	Sensitivitäten der automatischen Kalibrierung	55
6.2	Fallstudien.....	56
6.3	Resultate.....	56
7	Zusammenfassung.....	61

Anlagenverzeichnis

Anlage 5.2.1	Diskretisierung des Modellgebiets inkl. Modellrandbedingungen
Anlage 5.2.2	kf-Werte des Modells
Anlage 5.2.3	Leakagewerte für den Zufluss zum Modell
Anlage 5.2.4	Leakagewerte für den Abfluss aus dem Modell
Anlage 5.2.5	Grundwasserhöhengleichungen bei Hochwasserstand am 04.06.2013 und Modellabweichungen (Messwerte vom 03.06. – 05.06.2013)
Anlage 5.2.6	Grundwasserhöhengleichungen bei mittlerem Wasserstand am 21.03.2015 und Modellabweichungen
Anlage 5.2.7	Grundwasserhöhengleichungen bei Niederwasserstand am 04.10.2015 und Modellabweichungen
Anlage 5.2.8	Darcy-Geschwindigkeiten bei Hochwasser in der Donau
Anlage 5.2.9	Darcy-Geschwindigkeiten bei Niederwasserstand
Anlage 5.2.10	Leakagewerte für den Abfluss aus dem Modell in den Elementen mit Qualmwasser-Randbedingung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ausschnitt aus dem Finite-Elemente-Netz.....	7
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Situation bei einem Grundwasserpotenzial über Terrainhöhe (links) und bei Überflutung (rechts).....	8
Abbildung 3:	Flurabstand im Sommer (02.08.2015).....	9

Abbildung 4:	Resultierende mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1994 - 2015 unter Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs und der Nauwasserausleitungen.	10
Abbildung 5:	Mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1971 – 2000 gemäß der hydrogeologischen Karte 1:500.000 des LfU Bayern.....	11
Abbildung 6:	Randbedingungen für den Karstzufluss.....	12
Abbildung 7:	Dem Leakage-Knoten zugeordnete Elementfläche.....	14
Abbildung 8:	Trinkwasserbrunnen im Gebiet Langenau - Sontheim.....	15
Abbildung 9:	Durchlässigkeitszonen für die automatische Kalibrierung mit PEST ..	18
Abbildung 10:	Leakagezonen für die Kalibrierung mit PEST	19
Abbildung 11:	Korrelation zwischen den Durchlässigkeitszonen (rot: positive Korrelation, blau: negative Korrelation).....	21
Abbildung 12:	Korrelation zwischen Durchlässigkeits- und Leakagezonen (rot: positive Korrelation, blau: negative Korrelation).....	22
Abbildung 13:	Korrelation zwischen den Leakagezonen (rot: positive Korrelation, blau: negative Korrelation).....	23
Abbildung 14:	Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte im Jahr 2013	26
Abbildung 15:	Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte im Jahr 2015	27
Abbildung 16:	Lage der Messstellen mit dargestellten Zeitkurven.....	28
Abbildung 17:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Neu-Ulm, 2013.....	29
Abbildung 18:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Leipheim-Riedheim, 2013	30
Abbildung 19:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Bächingen - Offingen, 2013	30
Abbildung 20:	Ganglinien der Messstellen in der Niederung südlich der Donau auf Höhe von Lauingen, 2013	31
Abbildung 21:	Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Höchstädt, 2013	31
Abbildung 22:	Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Tapfheim, 2013	32
Abbildung 23:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Donauwörth, 2013.....	32
Abbildung 24:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Neu-Ulm, 2015.....	33
Abbildung 25:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Leipheim-Riedheim, 2015	33
Abbildung 26:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Bächingen - Offingen, 2015	34
Abbildung 27:	Ganglinien der Messstellen in der Niederung südlich der Donau auf Höhe von Lauingen, 2015	34
Abbildung 28:	Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Höchstädt, 2015	35

Abbildung 29:	Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Tapfheim, 2015	35
Abbildung 30:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Donauwörth, 2015.....	36
Abbildung 31:	Lage der Abflussmessstellen.....	37
Abbildung 32:	Aus der Kalibrierung resultierende Durchlässigkeitswerte	39
Abbildung 33:	Aus der Kalibrierung resultierende Leakagewerte für die Infiltration in den Grundwasserleiter (Zufluss zum Modell).....	40
Abbildung 34:	Aus der Kalibrierung resultierende Leakagewerte für die Exfiltration aus dem Grundwasserleiter (Abfluss aus dem Modell).....	40
Abbildung 35:	Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte im Jahr 1999	42
Abbildung 36:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Neu-Ulm, 1999.....	42
Abbildung 37:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Leipheim-Riedheim, 1999	43
Abbildung 38:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Bächingen - Offingen, 1999	43
Abbildung 39:	Ganglinien der Messstellen in der Niederung südlich der Donau auf Höhe von Lauingen, 1999	44
Abbildung 40:	Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Höchstädt, 1999	44
Abbildung 41:	Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Tapfheim, 1999	45
Abbildung 42:	Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Donauwörth, 1999.....	45
Abbildung 43:	Abweichungen der Nachbildung 1999 in der Nähe der Brunnenkette „Fassung 4“ der Landeswasserversorgung Stuttgart.	46
Abbildung 44:	Ganglinie der gemessenen und berechneten Grundwasserstände in Donauwörth.....	47
Abbildung 45:	Situation mit Dichtwänden und Sicherungsbrunnen in Donauwörth...	47
Abbildung 46:	Differenz zwischen den Grundwasserständen am 04.06.2013 (bei einem 10-20-jährlichen Hochwasser der Donau) und 04.10.2015 (Niedrigwasserstand)	48
Abbildung 47:	Flurabstand bei in etwa mittlerem Grundwasserstand am 21.03.2015	49
Abbildung 48:	Darcy-Geschwindigkeiten bei Hochwasser in der Donau.....	50
Abbildung 49:	Darcy-Geschwindigkeiten bei Niedrigwasserstand	50
Abbildung 50:	Darcy-Geschwindigkeiten bei Niedrigwasserstand in einem Modellausschnitt bei Leipheim.....	51
Abbildung 51:	Wasserbilanz des Jahres 2015.....	52
Abbildung 52:	Wasserbilanz des Jahres 2013.....	52
Abbildung 53:	Zeitlicher Verlauf der Infiltration / Exfiltration der Donau im Jahr 2015	53
Abbildung 54:	Zeitlicher Verlauf der Infiltration / Exfiltration der übrigen Gewässer im Jahr 2015	53
Abbildung 55:	Sensitivitätswerte der Durchlässigkeitszonen nach Doherty [3]	55

Abbildung 56: Sensitivitätswerte der Leakagezonen nach Doherty [3].....	56
Abbildung 57: Differenz der maximalen Grundwasserspiegel für den Fall mit und ohne teilgespannte Verhältnisse während des Hochwasserdurchgangs im Jahr 2013	57
Abbildung 58: Vergleich der Grundwasserganglinie bei gespanntem und freiem Grundwasserspiegel.....	58
Abbildung 59: Veränderung der Güte der Übereinstimmung der Hochwasserspitze bei Berücksichtigung von teilgespannten Verhältnissen	58
Abbildung 60: Differenz zwischen der Fallstudie ohne kapillaren Wiederaufstieg und Referenz mit kapillarem Wiederaufstieg am 15.08.2015.....	59
Abbildung 61: Differenz der maximalen Grundwasserspiegel zwischen dem Fall ohne Qualmwasser-Randbedingung und der Referenz mit Qualmwasser- Randbedingung während des Hochwasserdurchgangs im Jahr 2013	60
Abbildung 62: Differenz der maximalen Grundwasserspiegel zwischen dem Fall mit Deckschichtdurchlässigkeit 1×10^{-6} m/s und jenem mit 1×10^{-7} m/s während des Hochwasserdurchgangs im Jahr 2013	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zonen der automatischen Kalibrierung mit PEST.	20
Tabelle 2: Gütewerte der automatischen Kalibrierung.....	21
Tabelle 3: Gütewerte der Kalibrierung über das ganze Modellgebiet	25
Tabelle 4: Gütewerte der Kalibrierung innerhalb der geplanten Rückhalteräume und einem Puffer von 1000 m.....	25
Tabelle 5: Gütewerte der Kalibrierung nach DVGW W 107 (A) [5]	25
Tabelle 6: Vergleich der berechneten und gemessenen Abflüsse in den Gräben	38
Tabelle 7: Gütewerte der Validierung für das Jahr 1999	41
Tabelle 8: Vergleich der Wasserbilanz des numerischen Modells mit der Prognose aus dem hydrogeologischen Modell	54

1 Aufgabenstellung

Das Hochwasserschutz Aktionsprogramm Schwäbische Donau, welches das bayernweite Hochwasserschutzaktionsprogramm 2020 plus auf den Donauabschnitt zwischen Iller- und Lechmündung anwendet, enthält das Rückhalte-Projekt mit insgesamt sieben Rückhalteräumen.

Die Flutung von Rückhalteräumen wirkt sich auch auf den Grundwasserspiegel aus. Zur Prognose der Auswirkungen von Rückhalteräumen auf den Grundwasserspiegel wurde ein großräumiges hydrogeologisches Modell (Anlage 5.1) und auf dieser Grundlage ein numerisches Grundwassermodell des Donautals zwischen Iller und Lech aufgebaut.

Der vorliegende Bericht 2 beschreibt den Aufbau und die Anpassung des numerischen Modells.

2 Modellaufbau

2.1 Modellcode und Unterteilung in finite Elemente

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 als auch die Materialparameter zeitlich variabel vorgegeben werden.

Das gesamte Modellgebiet wurde in 92'650 Dreieckselemente mit 46'859 Knoten unterteilt. Bei einer Modellfläche von etwa 682 km² bedeutet dies eine durchschnittliche Elementfläche von 7'300 m² oder eine charakteristische Seitenlänge von etwa 130 m. Das Modellnetz wurde entlang der Entnahmestellen und der Oberflächengewässer feiner, im übrigen Gebiet gröber unterteilt. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Finite-Elemente-Netz. Anlage 5.2.1 zeigt das gesamte Modellnetz. Für die zeitliche Diskretisierung wurden Tagesschritte gewählt, während der Hochwasserereignisse wurde die Zeitschrittlänge auf drei Stunden reduziert.

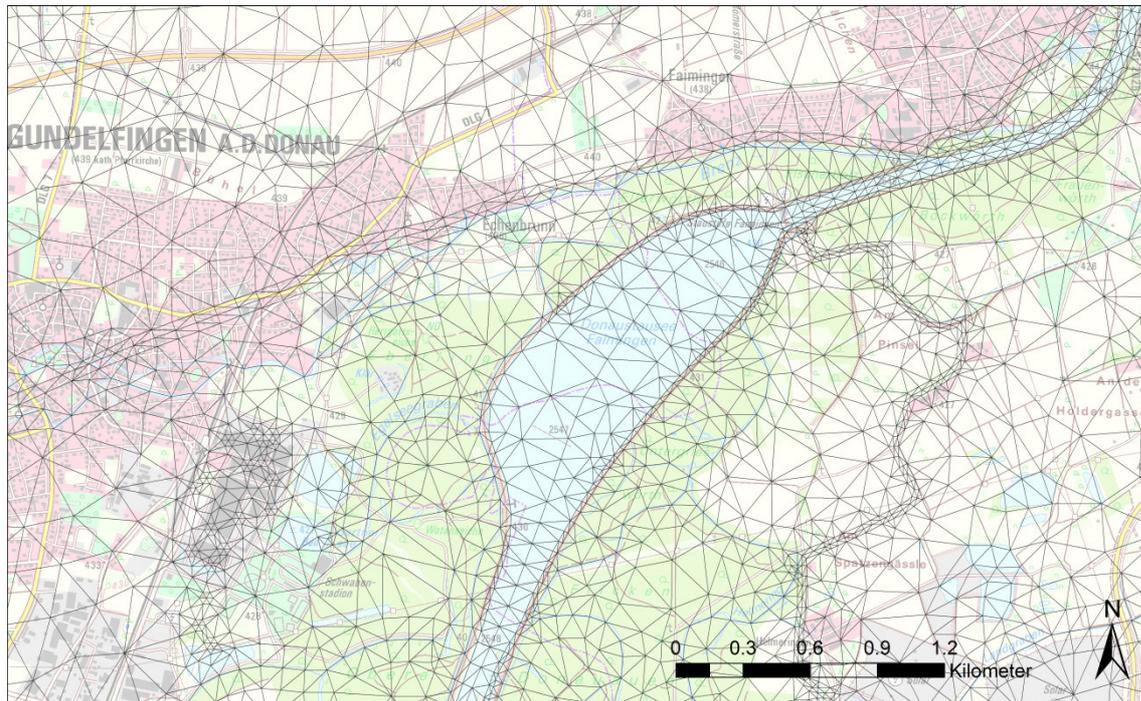


Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Finite-Elemente-Netz.

2.2 Schichtgrenzen

Die Schichtgrenzen des hydrogeologischen Modells wurden zum Aufbau des numerischen Modells eingesetzt. Die Unterkante des Quartärs dient als Modelluntergrenze.

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.

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 2). Das digitale Terrainmodell [1] wurde deshalb auf die Modellknoten interpoliert.

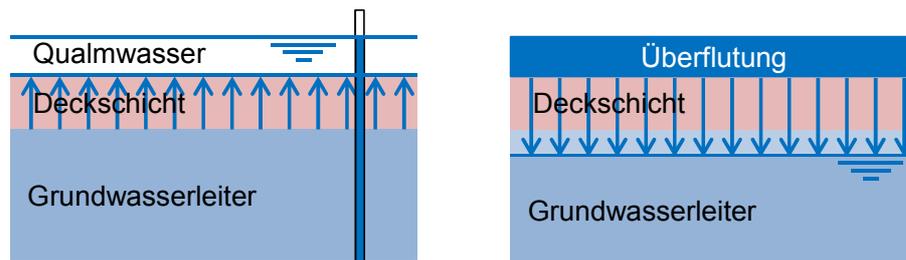


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Situation bei einem Grundwasserpotenzial über Terrainhöhe (links) und bei Überflutung (rechts)

2.3 Randbedingungen

Die Randbedingungen des Grundwassermodells wurden gemäß den in [6] beschriebenen Modellkonzepten für den Zeitraum von 1999 bis 2015 aus den Grundlagedaten berechnet. Daraus wurden für die einzelnen Berechnungszeiträume Dateien erzeugt, welche in FEFLOW [4] eingelesen werden können.

Beim Aufbau des numerischen Modells wurden die Modellkonzepte bezüglich einiger Randbedingungen weiter entwickelt. Diese Randbedingungen werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

2.3.1 Grundwasserneubildung

Kapillarer Wiederaufstieg

Der für das vorliegende Grundwassermodell verwendete Ansatz zur Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag unterscheidet sich von dem des LfU. Im Bericht 1 (Hydrogeologisches Modell) wurde festgestellt, dass sich die beiden Ansätze insbesondere in der Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs unterscheiden [6]. Der kapillare Aufstieg ist abhängig vom Flurabstand des Grundwassers und vom Bodentyp [8]. Im Verlauf der Kalibrierung wurde deshalb, nach Erreichen einer akzeptablen Übereinstimmung des Modells mit den Messungen, der Flurabstand bestimmt (Abbildung 3). Maßgebend ist dabei der Zustand im Sommer, da nur dann der kapillare Wiederaufstieg zu einer höheren Evapotranspiration führt. In den Gebieten mit kleinem Flurabstand wurde anschließend der kapillare Wiederaufstieg bei der Berechnung der Grundwasserneubildung berücksichtigt. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Das kapillar aufgestiegene Grundwasser wird dem Bodenspeicher zugefügt.
- Maximal können 2 mm Wasser pro Tag aufsteigen.
- Ein Aufstieg findet nur bis zu einer Bodenfeuchte von 50% statt.

In den Gebieten mit kapillarem Wiederaufstieg wird die Grundwasserneubildung im Sommer negativ, d.h. es steigt Grundwasser auf, wird durch die Pflanzen aufgenommen und verdunstet.

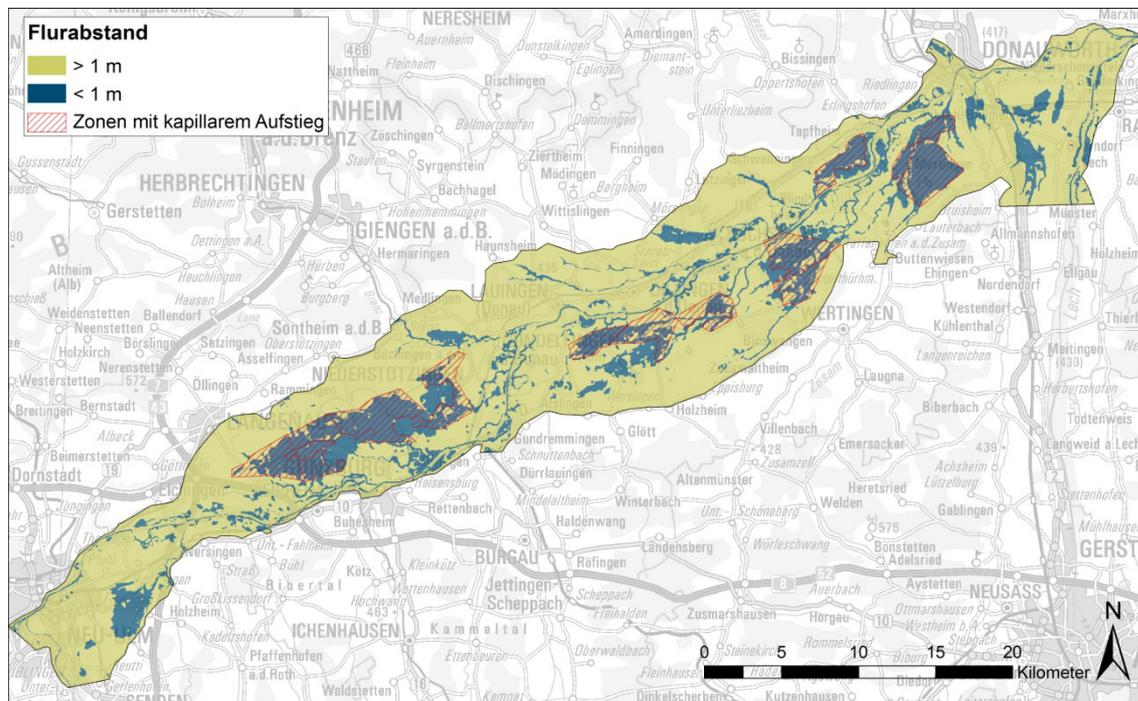


Abbildung 3: Flurabstand im Sommer (02.08.2015)

Nauausleitung

Das Leipheimer Moos wird durch Ausleitungen von Nauwasser gespeist. Die ausgeleiteten Wassermengen werden gemessen und dokumentiert. Das ausgeleitete Wasser speist nicht direkt den Grundwasserleiter, sondern die durch eine schlecht durchlässige Zwischenschicht davon abgetrennte Torfschicht. Im Grundwassermodell kann die Speisung deshalb bei der Berechnung der Grundwasserneubildung wie ein zusätzlicher Niederschlag berücksichtigt werden. Es wurden folgende Annahmen getroffen:

- Das ausgeleitete Wasser wird gleichmäßig auf die Fläche des Leipheimer Moos verteilt
- Das ausgeleitete Wasser wird als zusätzlicher Niederschlag betrachtet und steht damit den Pflanzen zur Verfügung

Die regelmäßige Speisung des Leipheimer Moos durch die Nauausleitung begann im Frühjahr 2011.

Die resultierende mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1994 bis 2015 ist in Abbildung 4 dargestellt. Abbildung 5 zeigt die in der hydrogeologischen Karte des LfU enthaltene mittlere Grundwasserneubildung von 1970 bis 2000 in den gleichen Farb-
abstufungen. Die Neubildungsraten unterscheiden sich nur geringfügig. Unterschiede können sich auch durch die unterschiedlichen Zeiträume ergeben.

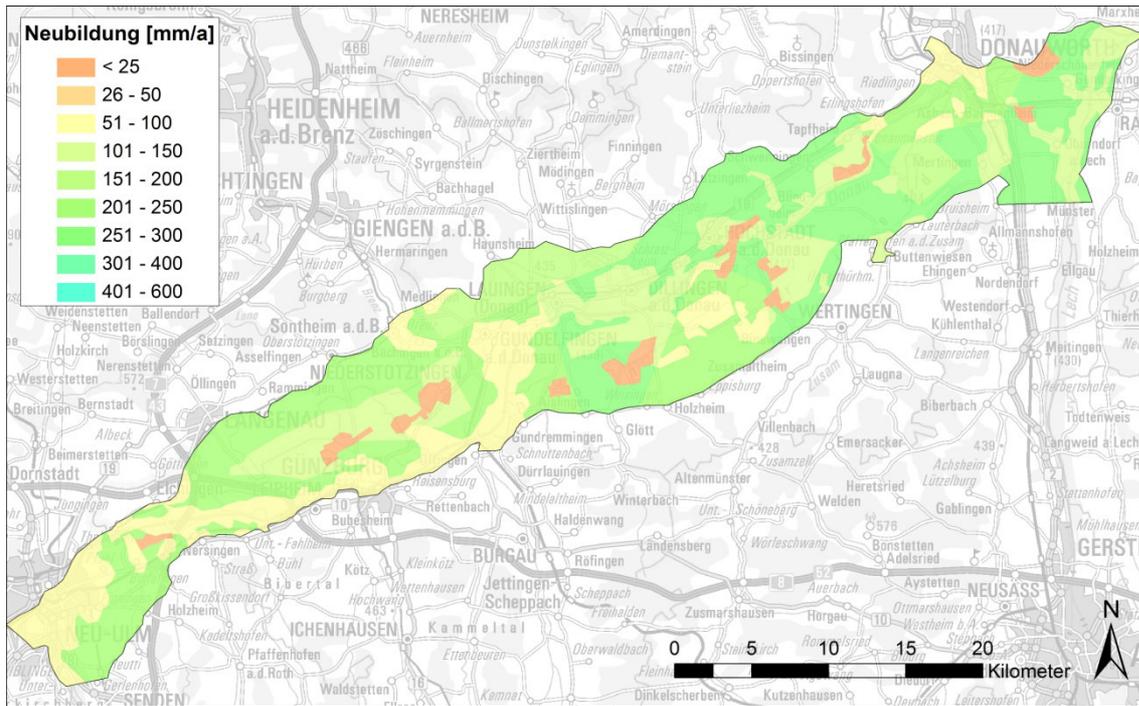


Abbildung 4: Resultierende mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1994 - 2015 unter Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs und der Nauwasser-
ausleitungen.

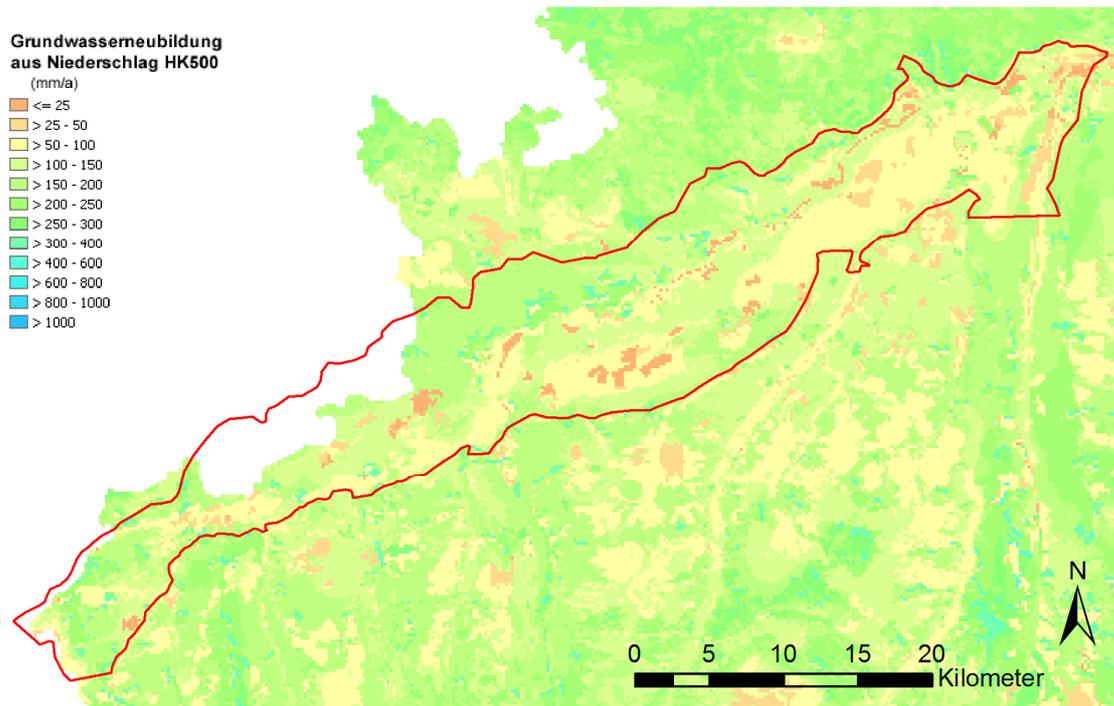


Abbildung 5: Mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1971 – 2000 gemäß der hydrogeologischen Karte 1:500.000 des LfU Bayern

2.3.2 Karstzuflüsse

Entlang des nördlichen Modellrandes sind die teilweise verkarsteten Gesteine des Oberjura in direktem Kontakt mit dem Schottergrundwasserleiter. Beide Formationen sind nur durch eine geringmächtige Tertiärschicht getrennt. Die zu erwartenden Karstwasserzuflüsse werden im Modell mit einer Cauchy-Randbedingung berücksichtigt. Dabei wurde der gemessene Karstwasserspiegel vorgegeben. Die Leakagewerte wurden in einem ersten Ansatz aus der Mächtigkeit und Durchlässigkeit der tertiären Schichten ermittelt. Bei der Kalibrierung wurden die Leakagewerte variiert.

Damit die Leakagewerte unabhängig von der Elementgröße kalibriert werden können, wurde die Cauchy-Randbedingung entlang von Linien vorgegeben (Abbildung 6). Die Randbedingung wurde auf den Bereich einer Tertiärmächtigkeit kleiner 10 m beschränkt.

Bei der Kalibrierung wurde festgestellt, dass auch in Gebieten mit Tertiärmächtigkeiten größer als 10 m Karstwasserzuflüsse benötigt werden, um die gemessenen Grundwasserpotentiale nachbilden zu können. In diesen Bereichen wurde der Seitenzufluss erhöht (Abbildung 6).

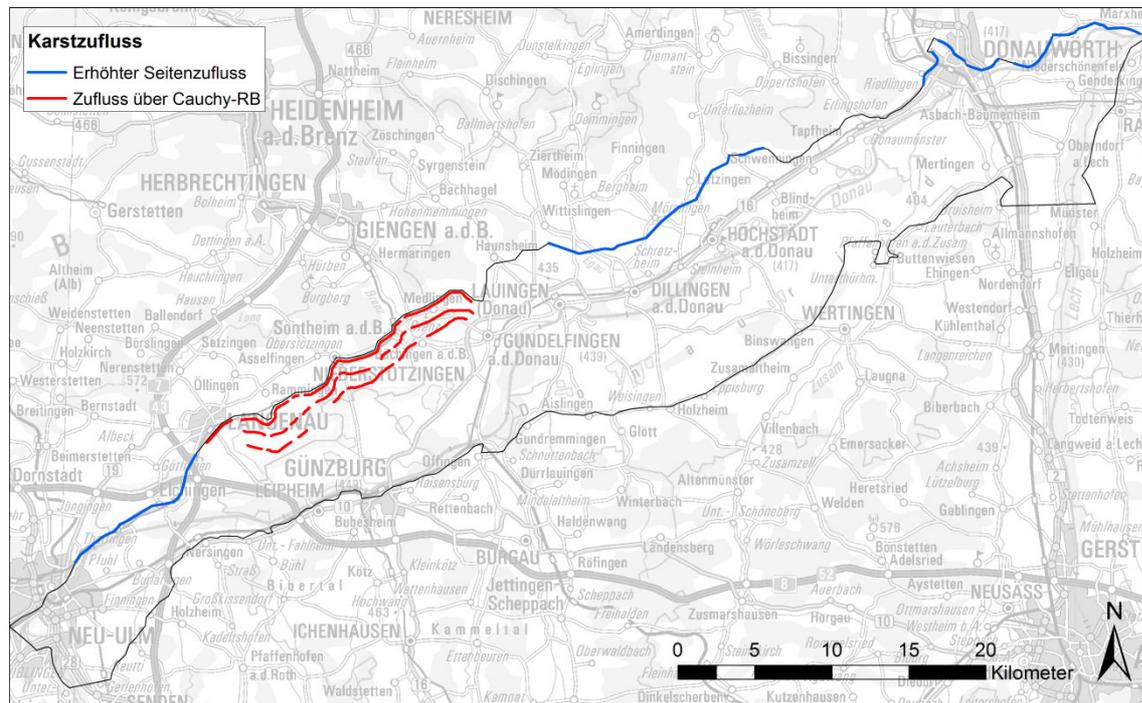


Abbildung 6: Randbedingungen für den Karstzufluss

2.3.3 Kopplung mit dem hydraulischen Modell

Überflutungsflächen

Das Grundwassermodell wird entlang der Gewässer und in den Überflutungsgebieten mit dem hydraulischen Modell gekoppelt [7].

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

In FEFLOW ist der Leakagewert eigentlich für die Anwendung von Gewässern in Form von Linien gedacht. Die zum Modell zu- resp. vom Modell abströmende Wassermenge errechnet sich aus der Differenz zwischen vorgegebenem Randpotential und berechneter Grundwasserspiegellage, dem Leakagewert und der Länge der an zwei benachbarte Leakage-Knoten angrenzenden Seiten.

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

Q: Zugegebene oder entnommene Wassermenge [m³/Tag].

H_P: Wasserspiegel [mNN].

H_{GW}: Grundwasserspiegel [mNN].

f_{LEAK}: Leakagewert [m/Tag].

L: Länge der zugeordneten Elementseiten [m].

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

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

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

A: Dreiecksfläche [m²]

s₁, s₂, s₃: Längen der Dreiecksseiten [m]

86400: Anzahl Sekunden pro Tag [s/Tag]

k_{f DEECK}: Durchlässigkeit der Deckschicht [m/s]

M_{DEECK}: Mächtigkeit der Deckschicht [m]

Da FEFLOW jeweils die Leakagewerte den angrenzenden Seiten, und diese wiederum den angrenzenden Knoten zuordnet, wird die Deckschichtdurchlässigkeit schlussendlich den Eckknoten zugeordnet. In jedem Knoten wird jeweils ein Drittel der Deckschichtdurchlässigkeit der angrenzenden Elemente erfasst (Abbildung 7).

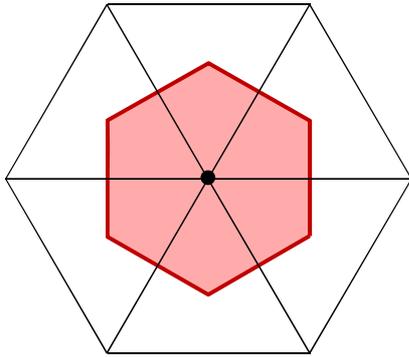


Abbildung 7: Dem Leakage-Knoten zugeordnete Elementfläche

Gewässer

Die Wasserspiegel der Gewässer werden während der Berechnungszeit des hydraulischen Modells ebenfalls aus dem hydraulischen Modell entnommen. Im Grundwassermodell werden die Gewässer als Linien betrachtet. Der zugeordnete Leakagewert bezieht sich deshalb auf eine Linie und nicht wie bei der Überschwemmungsfläche auf eine Fläche. Dies soll auch im Überschwemmungsfall so bleiben. Die Gewässerrandbedingungen müssen deshalb jeweils mit einem Knoten ohne Randbedingungen von den Überflutungsknoten getrennt werden.

Die Leakagewerte für Zufluss und Abfluss entlang der Gewässer werden während der Überflutungszeit als unverändert betrachtet. Bei reinen Drainagegewässern wird während der Überflutung ein Leakagewert für den Zufluss vorgegeben, welcher jenem für den Abfluss entspricht.

2.3.4 Qualmwasser-Randbedingung

In Situationen, bei denen der Grundwasserstand über die Topografie ansteigt, sind Qualmwasseraustritte möglich. Die Menge des austretenden Grundwassers und die Beeinflussung des Grundwasserstandes durch die Topografie sind abhängig von der Mächtigkeit und Durchlässigkeit der Deckschicht.

Im Modell werden mögliche Qualmwasseraustritte durch eine Cauchy-Randbedingung berücksichtigt. Dabei 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. Die Leakagewerte werden wie oben beschrieben elementweise aus der Mächtigkeit und Durchlässigkeit der Deckschicht ermittelt.

Die aus dem digitalen Höhenmodell übernommene Topografie enthält auch abflusslose Baggerseen. Für diese Seen wurde keine Qualmwasser-Randbedingung vorgegeben, da deren Wasserspiegel mit dem Grundwasser steigt und fällt.

2.3.5 Brunnenketten des Zweckverbands Landeswasserversorgung

Bei den Brunnen des Zweckverbands Landeswasserversorgung Stuttgart handelt es sich um Heberbrunnen. Dies bedeutet, dass die Fördermenge in den einzelnen Brunnen abhängig ist vom Grundwasserstand. Bei den Brunnenketten ist jedoch nur die Gesamtfördermenge bekannt. Eine Nachbildung der einzelnen Heberbedingungen wäre im Rahmen des großräumigen Modells nicht sinnvoll, weshalb die Gesamtfördermenge gleichmäßig auf die einzelnen Brunnen aufgeteilt wird. Insbesondere bei Brunnenketten, welche parallel zur generellen Strömungsrichtung angeordnet sind führt dies zu Verzerrungen des Potentialfeldes, welche wiederum mit physikalisch nicht begründbaren Durchlässigkeitswerten korrigiert werden müssen.

Die Aufgabenstellung des Modells liegt hier in der Ermittlung der Auswirkungen von Rückhalteräumen in der Donau-Niederung. Da die Brunnenketten in genügender Distanz zu den Rückhalteräumen liegen, ist die Vereinfachung mit einer gleichmäßigen Aufteilung der Fördermengen gerechtfertigt.

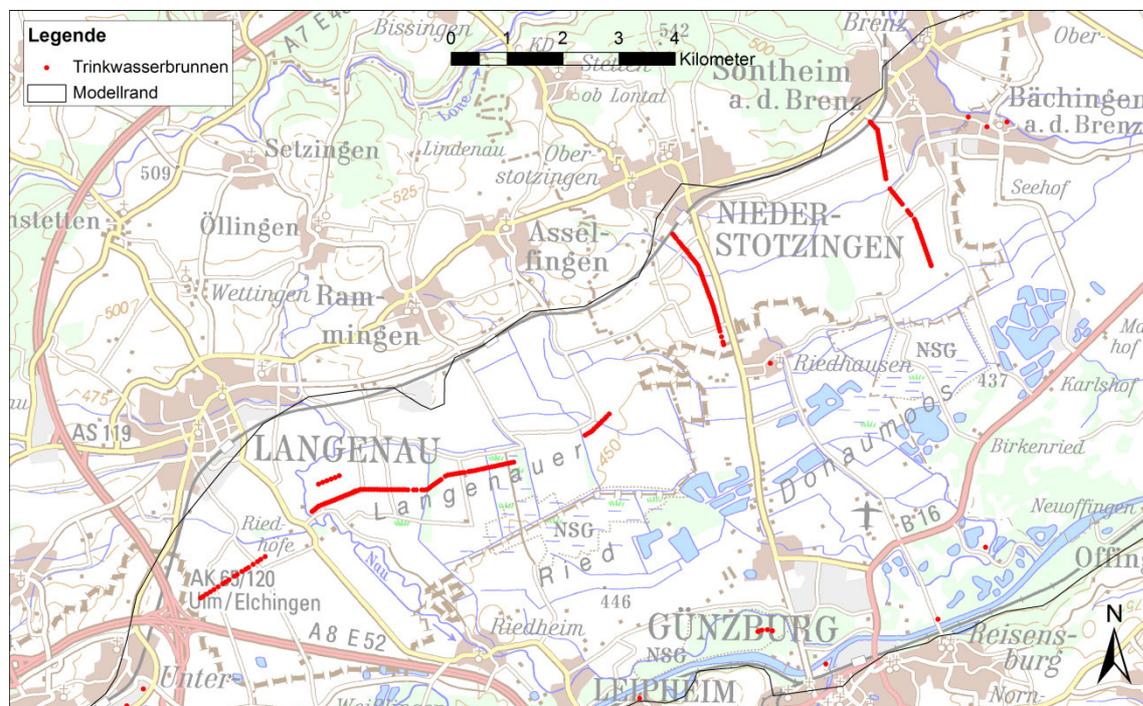


Abbildung 8: Trinkwasserbrunnen im Gebiet Langenau - Sontheim

3 Kalibrierung

3.1 Kalibrierungsmethode

3.1.1 Verfahren

Für die Kalibrierung des Grundwassermodells wurde ein dreistufiges Vorgehen gewählt:

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.
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.
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.

Die Stufen 1 und 2 wurden in einem iterativen Prozess mehrmals durchlaufen, bis ein für die Aufgabenstellung geeignetes Resultat vorlag.

3.1.2 Bewertungskriterien

Die Güte der Kalibrierung wurde über den Vergleich der berechneten mit den gemessenen Grundwasserpotentialen bewertet. Dabei kamen die folgenden summarischen Gütewerte zur Anwendung:

- RMSE: Root mean square error (Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung)
- Mittel: Mittelwert der Absolutwerte der Abweichungen
- Median: Median der absoluten Abweichungen

Als Kalibrierungsziel wurde der Aufgabenstellung und dem Einsatzzweck entsprechend ein RMSE von 40 cm, ein Mittelwert von 30 cm und ein Median von 20 cm angestrebt.

Bei der manuellen Kalibrierung wurden zusätzlich die gemessenen Abflüsse in den Gräben, die als Binnenentwässerungen der Stauhaltungen wirken, verwendet. Diese enthalten vorwiegend drainiertes Grundwasser und geben daher einen wichtigen Hinweis auf die Wasserbilanzgrößen. Bei der manuellen Kalibrierung wurde zudem ein großes Gewicht auf einen korrekten zeitlichen Verlauf der Grundwasserspiegelhöhen gelegt, da die Messungen oft mit einem konstanten Fehler behaftet sind. Der zeitliche Verlauf zeigt die Systemreaktion auf veränderte Randbedingungen. Eine gute Nachbildung ist deshalb besonders wichtig im Hinblick auf die Prognosefähigkeit des Modells.

3.2 Instationäre Kalibrierung mit PEST

3.2.1 Vorgehen

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.

Für die automatische Kalibrierung wurden folgende Zeiträume verwendet:

1.1.2013 – 31.12.2013

1.1.2015 – 31.12.2015

Im Juni des Jahres 2013 gab es ein Donau-Hochwasser (Größenordnung HQ10-HQ20), während dessen der sogenannte Riedstrom floss bzw. eine große Niederungsfläche südlich der Donau von Überflutungen betroffen war. Im Jahr 2015 waren die höchsten Abflüsse deutlich kleiner, im März herrschten über eine längere Zeit mittlere Bedingungen.

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. Bei der anschließenden manuellen Kalibrierung müssen diese Unterschiede bereinigt werden.

Bei der Kalibrierung wurde die Summe der quadratischen Abweichung der Modellwerte von den Messdaten minimiert. Im Anfangszustand können große Abweichungen vorhanden sein, welche durch die Kalibrierung nicht beeinflusst werden können. Es wurden deshalb nur Messdaten ab März der beiden Jahre verwendet.

Für den Zeitraum von Februar bis Dezember 2013 stehen 39.861, für den Zeitraum von Februar bis Dezember 2015 39.742 Messungen des Grundwasserspiegels zur Verfügung. Die Messungen stammen im Jahr 2013 aus 504, im Jahr 2015 aus 473 Messstellen. Da das Grundwassermodell für den Hochwasserfall eingesetzt werden soll, wurde den Messdaten während des Hochwasserereignisses Anfang Juni 2013 ein zehnfaches Gewicht zugeordnet.

3.2.2 Zonierung für die Kalibrierung mit PEST

Da im Modell Dichtwände mit fest vorgegebener Geometrie enthalten sind, eignet sich die Zonierungsmethode für die automatische Kalibrierung besser als die sogenannte „pilot point“ Methode. Die Zonenunterteilung erfolgt dabei einerseits anhand hydrogeologischer Grenzen wie zum Beispiel der Grenze zwischen Niederterrassen- und Hochterrassenschotter, andererseits wurde sie mit der ersten manuellen Kalibrierung bestimmt. Abbildung 9 zeigt die Durchlässigkeitszonen des Grundwasserleiters.

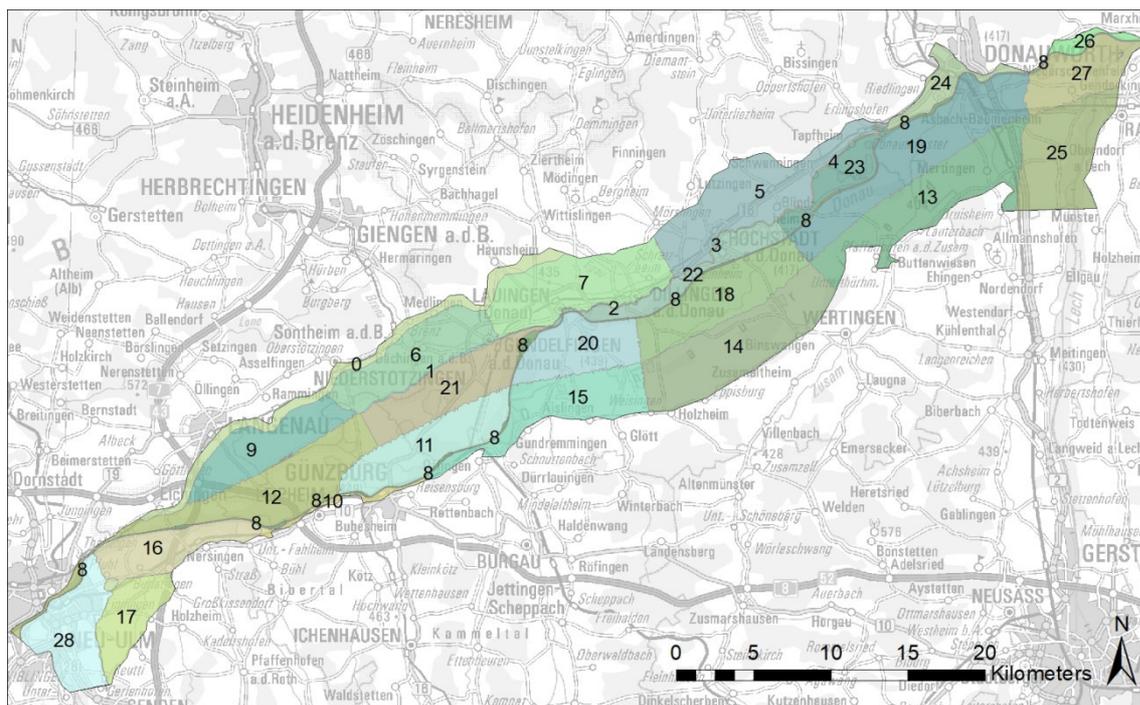


Abbildung 9: Durchlässigkeitszonen für die automatische Kalibrierung mit PEST

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

- Die Durchlässigkeiten der Dichtwände wurden auf 1×10^{-6} m/s festgehalten.

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

- Entlang der Nordgrenze wurde eine Zone mit einer reduzierten Durchlässigkeit (Zone 0) eingeführt, um ein Trockenfallen des Modells entlang des geringmächtigen Randes zu verhindern.
- Da die Horizontalfilterbrunnen mit einem einzelnen Modellknoten abgebildet werden, wurde die Durchlässigkeit jeweils in einem Bereich von ca. 30 m um den Brunnen herum erhöht, um die horizontalen Fassungsstränge zu modellieren. Dies verhindert ein Trockenfallen des Brunnenknotens.

Da das Modellgebiet sehr viele Gewässer enthält, mussten die Leakagewerte verschiedener Gewässer in gemeinsame Zonen gruppiert werden. Abbildung 10 zeigt die gewählte Zonierung. Die Leakagewerte für Infiltration und Exfiltration wurden gleichgesetzt. Bei reinen Drainagegewässern wurde der Leakagewert für die Infiltration zu Null gesetzt.

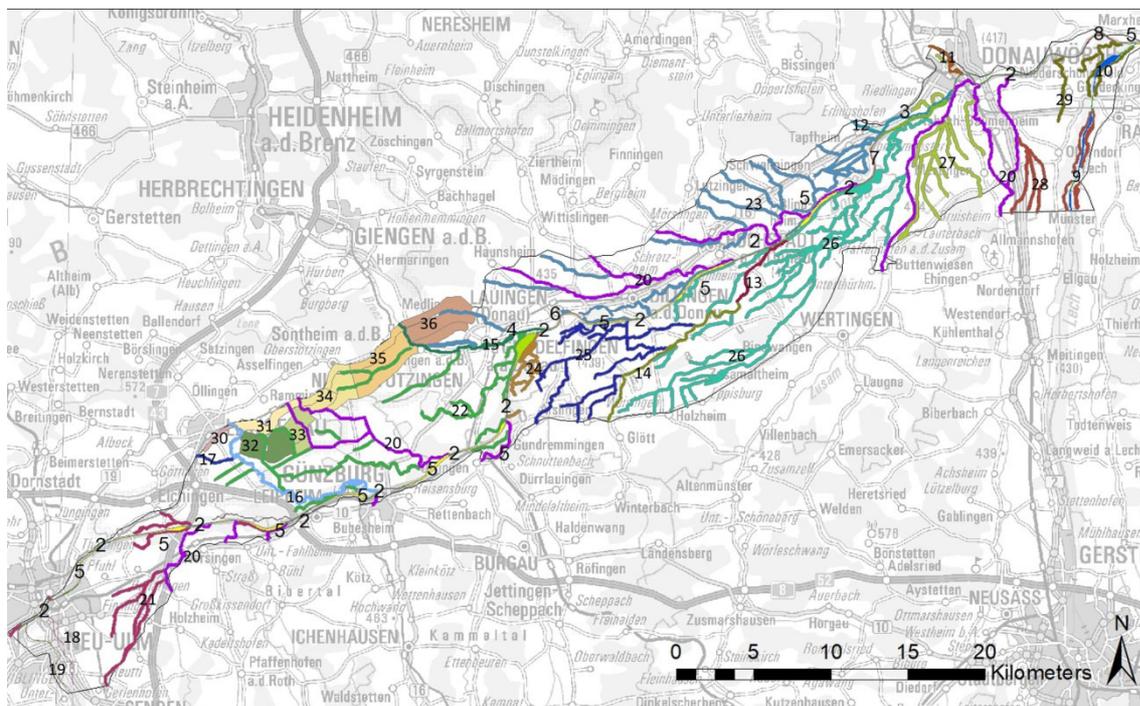


Abbildung 10: Leakagezonen für die Kalibrierung mit PEST

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der Zonen der Leakagewerte. Insgesamt wurden für die automatische Kalibrierung 65 Zonen gebildet. Da die Modellgröße 680 km² beträgt, umfassen die einzelnen Zonen teilweise recht große Gebiete. Im Vergleich zu den etwa 500 für die Kalibrierung zur Verfügung stehenden Messstellen ist die Anzahl der Zonen klein.

Überflutungsfläche	
Zone 1	Durchlässigkeit der Deckschicht
Donau	
Zone 2	Abschnitte unterhalb der Staustufen
Zone 3	Stauhaltungsraum Donauwörth
Zone 4	Stauhaltungsraum Faimingen
Zone 5	Übrige Stauhaltungsräume
Zone 6	Teilabschnitt bei Lauingen
Zone 7	Teilabschnitt bei Tapfheim
Zone 8	Teilabschnitt bei Genderkingen
Gewässer	
Zone 9	Lech, alle Stauräume
Zone 10	Lech, übrige Abschnitte
Zone 11	Woernitz
Zone 12	Kessel
Zone 13	Glött, unterer Teilabschnitt
Zone 14	Glött, oberer Teilabschnitt
Zone 15	Brenz
Zone 16	Nau
Zone 17	Schammenbach
Zone 18	Illerkanal
Zone 19	Iller
Zone 20	Übrige Gewässer
Drainagen	
Zonen 21 - 29	Drainagen, aufgeteilt in Teilgebiete
Karstzufluss	
Zonen 30 - 37	Leakagezonen für Karstzufluss

Tabelle 1: Zonen der automatischen Kalibrierung mit PEST.

3.2.3 Resultate der automatischen Kalibrierung

Für die Modellparameter wurden physikalisch plausible Grenzen vorgegeben. Zwei Durchlässigkeitszonen in den Bereichen des Iller- und des Lechschotters erreichten das vorgegebene Maximum von 1×10^{-2} m/s. Bei der automatischen Kalibrierung interessieren primär die Abhängigkeiten der Parameter untereinander (Kapitel 3.2.4). Die resultierenden Modellparameter werden erst nach der abschließenden manuellen Kalibrierung dokumentiert (Abbildung 32 bis Abbildung 35).

Die Kalibrierungsgüte ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Die erzielte Genauigkeit ist angesichts der relativ großen Durchlässigkeitszonen bereits gut. Zum Erreichen der eingangs geforderten Gütewerte musste eine zusätzliche manuelle Kalibrierung durchgeführt werden

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichung (RMSE) [cm]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Median der absoluten Abweichung [cm]
2013	40	30	23
2015	44	34	25

Tabelle 2: Güterwerte der automatischen Kalibrierung

3.2.4 Kovarianzanalyse

Abbildung 11 bis Abbildung 13 zeigen Teilbereiche der Korrelationsmatrix der Kalibrierung des Jahres 2013. Dunkelrote und dunkelblaue Kästchen 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.

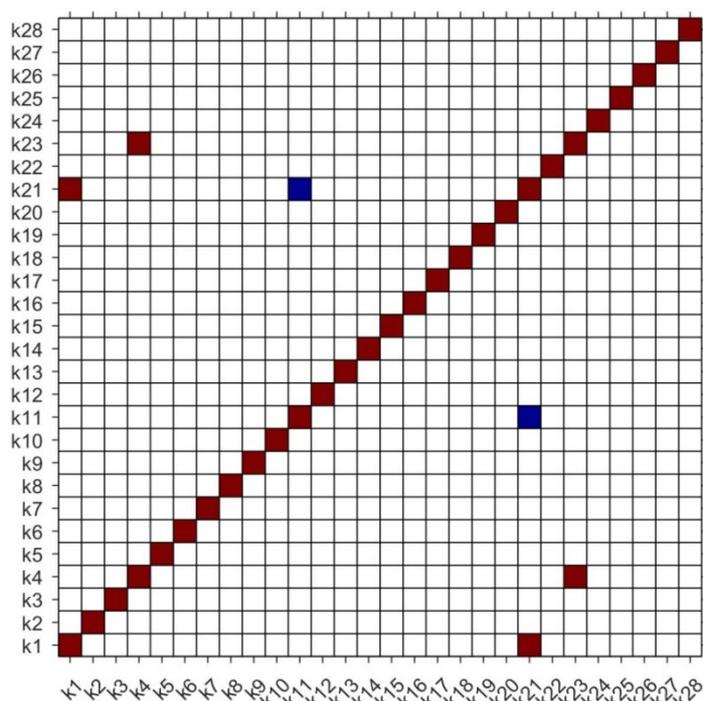


Abbildung 11: Korrelation zwischen den Durchlässigkeitszonen (rot: positive Korrelation, blau: negative Korrelation)

Die Durchlässigkeit der Terrassenkante korreliert in zwei Fällen (k1, k4) mit den benachbarten Durchlässigkeiten unterhalb der Terrassenkante (k21, k23). Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei höherer Durchlässigkeit der Terrassenkante eine größere

Wassermenge zur Donau geführt werden muss. Dies erfordert im Bereich zwischen Terrassenkante und Donau eine höhere Durchlässigkeit.

Die Durchlässigkeiten der in Serie durchflossenen Zonen 21 und 11 korrelieren negativ, die Gesamtdurchlässigkeit muss gleich bleiben.

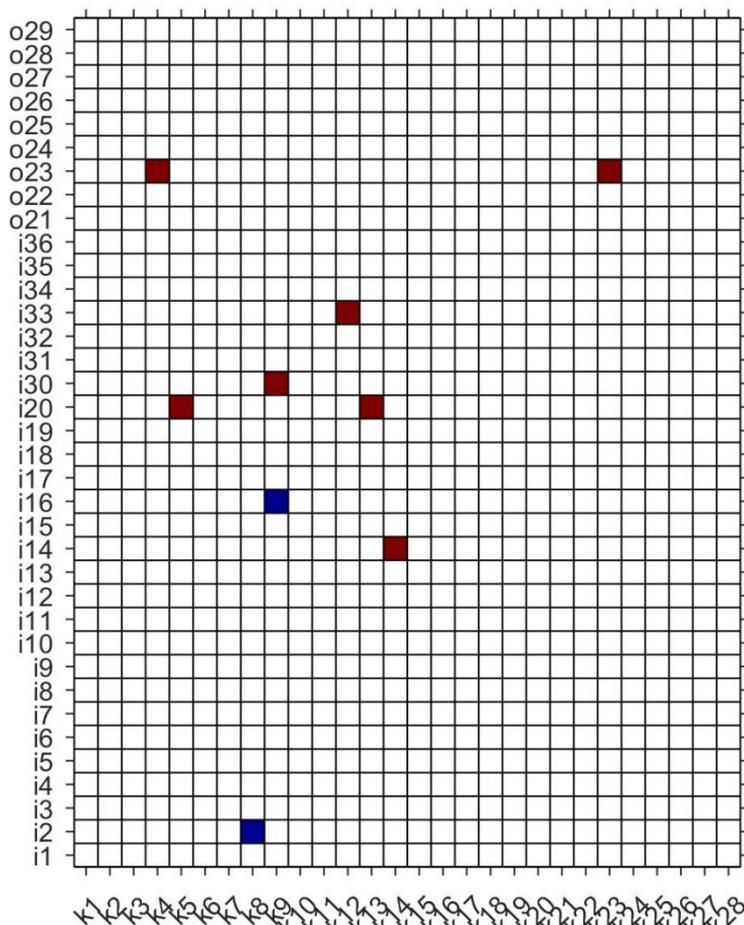


Abbildung 12: Korrelation zwischen Durchlässigkeits- und Leakagezonen (rot: positive Korrelation, blau: negative Korrelation)

Zwischen der Durchlässigkeit der Terrassenkante k4 und dem Leakagefaktor der Gräben der Umgebung besteht eine positive Korrelation. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei hoher Durchlässigkeit der Terrassenkante das Grundwasserpotential unterhalb der Terrassenkante durch die Gräben tief gehalten werden muss. Die Gräben der gleichen Zone oberhalb der Terrassenkante haben an dieser Stelle keinen Einfluss auf die Güte der Kalibrierung, da dort kaum Messstellen vorhanden sind.

Die direkt unter der Donau liegenden Schotter erhielten eine eigene Durchlässigkeitszone. Diese erleichtert die Zonierung bei der manuellen Kalibrierung. Es ist nahelie-

gend, dass diese Zone negativ mit dem Leakagefaktor im Unterwasser der Staustufen korreliert, da die Drainagewirkung der Donau durch die in Serie geschalteten Widerstände der beiden Zonen bestimmt wird.

Eine negative Korrelation weisen auch die Durchlässigkeitszone k9 und die Leakagezone i16 der in dieser Zone vorwiegend infiltrierenden Nau auf. Infiltrationswiderstand und Durchlässigkeit wirken an dieser Stelle in Serie und kontrollieren den Nauzufluss.

Die Durchlässigkeit in Zone 9 korreliert positiv mit i30 für den Karstzufluss. Bei einem höheren Karstzufluss am Modellrand muss also die Durchlässigkeit erhöht werden, um das zusätzliche Wasser mit gleichem Gefälle ableiten zu können.

Die Leakagezone 20 für die übrigen Gewässer korreliert positiv mit einigen Durchlässigkeitszonen, besonders stark im Bereich der Zusam.

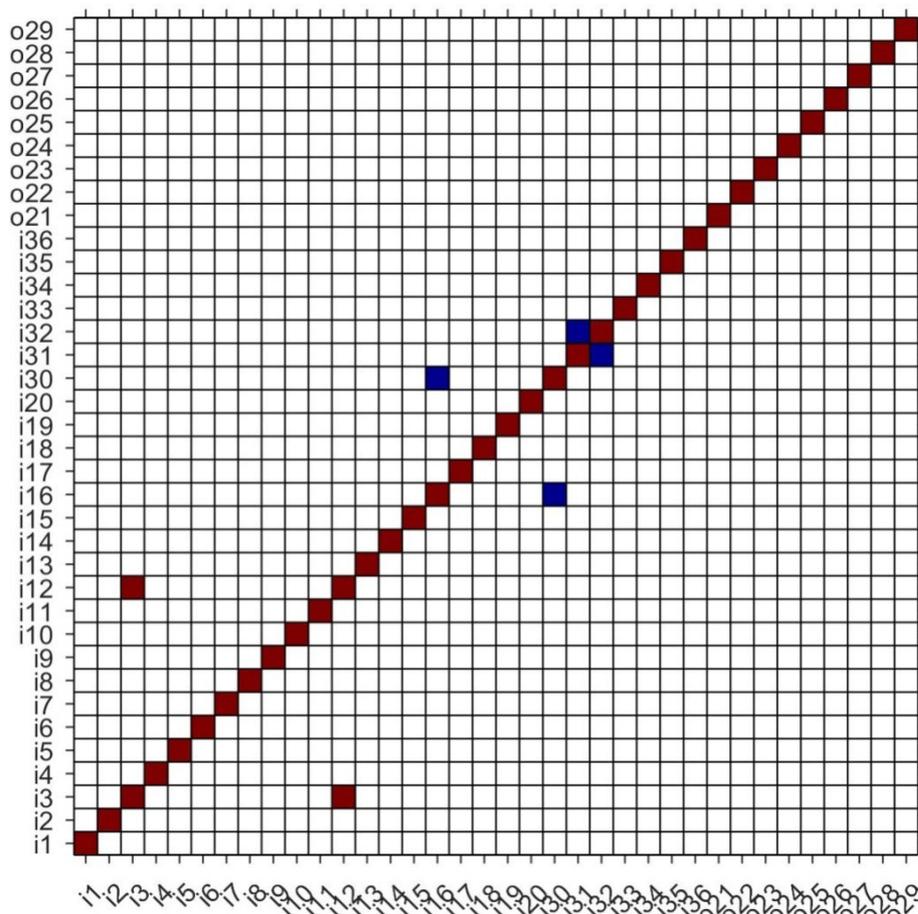


Abbildung 13: Korrelation zwischen den Leakagezonen (rot: positive Korrelation, blau: negative Korrelation)

Bei den Leakagewerten korrelieren die Zonen i12 und i3 besonders stark. Dies ist auf den parallelen Verlauf der Kessel mit der Donau unterhalb der Staustufe Tapfheim zurückzuführen.

Eine negative Korrelation weisen die Leakagezonen i30 für den Karstzufluss und die an dieser Stelle infiltrierende Nau auf. Ein höherer Karstzufluss wird also mit einer niedrigen Nau-Infiltration kompensiert.

Eine negative Korrelation besitzen auch die beiden nebeneinander liegenden Leakagezonen i31 und i32. Diese beiden Zonen kontrollieren an gleicher Stelle den Karstzufluss und hätten auch in einer Zone behandelt werden können.

Die Abhängigkeiten zwischen den Modellparametern wurden bei der manuellen Kalibrierung berücksichtigt. Insbesondere der Vergleich mit den gemessenen Abflüssen in den Gräben, die als Binnenentwässerungen der Stauhaltungen wirken, konnte zur Klärung einiger Abhängigkeiten genutzt werden. Bei den übrigen Abhängigkeiten wurde jeweils der physikalisch besser einzugrenzende Parameter zuerst festgelegt und der andere Parameter kalibriert.

Verbleibende Unsicherheiten zu einzelnen Parametern müssen im Rahmen der Modellanwendung durch Sensitivitätsuntersuchungen quantifiziert werden. Dabei wird, ausgehend vom kalibrierten Modell, bei der Berechnung von Planungszustand und Bezugszustand jeweils ein Parameter variiert. Durch den Vergleich mit dem kalibrierten Modell können die Auswirkungen der einzelnen Parameter auf das Berechnungsergebnis quantifiziert werden.

3.3 Manuelle Kalibrierung

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. Für die manuelle Kalibrierung wurden die gleichen Zeiträume verwendet wie für die Kalibrierung mit PEST. Für das Jahr 2013 stehen 46.859, für das Jahr 2015 47.724 Messungen des Grundwasserspiegels zur Verfügung

3.3.1 Gütewerte der Kalibrierung

Tabelle 3 zeigt die Gütewerte nach der manuellen Kalibrierung. Für die Bewertung wurden, um die Ungenauigkeit des Anfangszustandes nicht überzubewerten, nur die Messungen von März bis Dezember verwendet. Für beide Kalibrierungszeiträume ist die Übereinstimmung mit den Messwerten des Grundwasserspiegels besser als in der

automatischen Kalibrierung. Die zuvor festgelegten Kalibrierungsziele wurden erreicht. Werden nur die Messstellen im Nahbereich der Rückhalteräume (= Messstellen mit einer Distanz zum Rückhalteraum kleiner 1 km) betrachtet, so ist die mittlere quadratische Abweichung geringfügig kleiner (Tabelle 4).

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 2013 und 2015 sind die resultierenden Gütewerte in Tabelle 5 zusammengestellt. Das Gütekriterium des DVGW zeigt an, dass die großräumige Strömung sehr gut nachgebildet wird. Werden die Verhältnisse in der Umgebung der Rückhalteräume einzeln betrachtet, so reduziert sich die maximale Differenz der Standrohrspiegelhöhen jeweils auf etwa 20 m. Mit einer Abweichung von 1 – 2 % ist die Modellgüte gemäß DVGW als gut einzustufen.

Zeitraum	Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichung (RMSE) [cm]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Median der Absoluten Abweichung [cm]
2013	33	25	19
2015	34	26	20

Tabelle 3: Gütewerte der Kalibrierung über das ganze Modellgebiet

Zeitraum	RMSE [cm]	Mittelwert [cm]	Median [cm]
2013	32	25	19
2015	33	26	20

Tabelle 4: Gütewerte der Kalibrierung innerhalb der geplanten Rückhalteräume und einem Puffer von 1000 m.

Zeitraum	Maximale Differenz der Standrohrspiegelhöhen [m]	Mittelwert der absoluten Abweichung [cm]	Verhältnis nach DVGW W 107 (A) [%]
2013	85.0	25	0.29
2015	87.5	26	0.30

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

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 Rückhalteraum. Die Prognosegenauigkeit soll deshalb bei der Modellanwendung mit Hilfe von Sensitivitätsbetrachtungen quantifiziert werden.

3.3.2 Vergleich mit den Messdaten des Grundwasserspiegels

Eine Übersicht über die Abweichung des Modells kann summarisch durch einen Scatterplot der berechneten zu den gemessenen Potentialen gewonnen werden. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die Scatterplots für die Jahre 2013 und 2015.

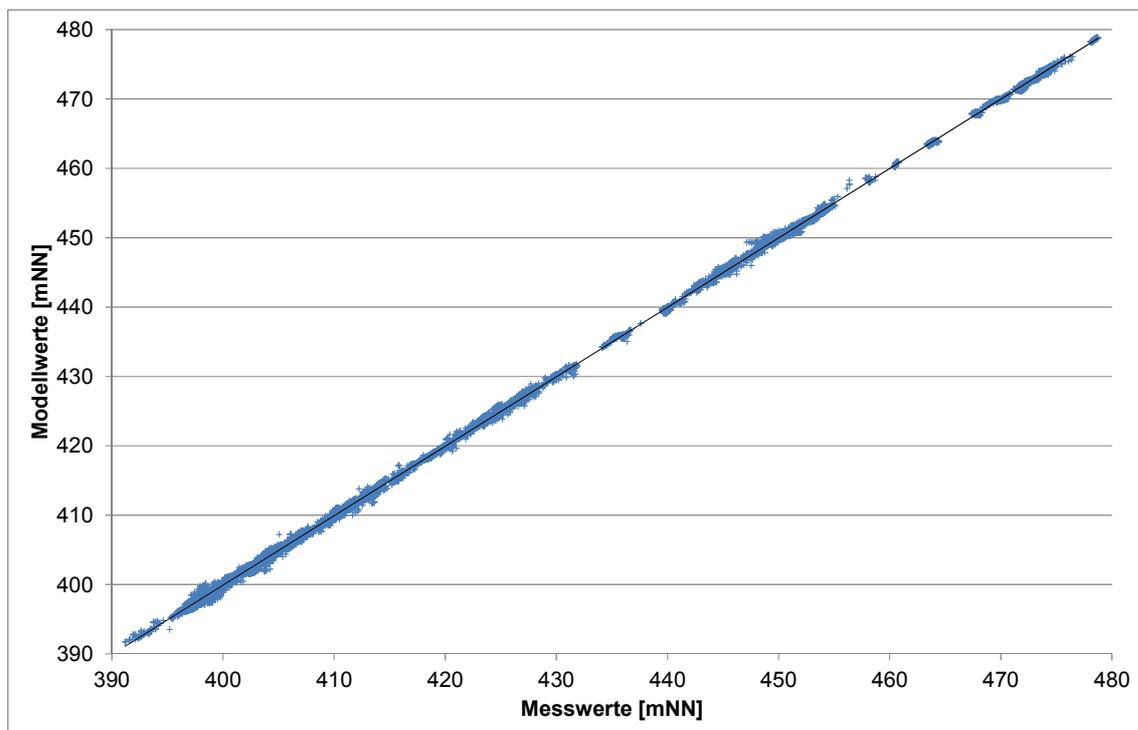


Abbildung 14: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte im Jahr 2013

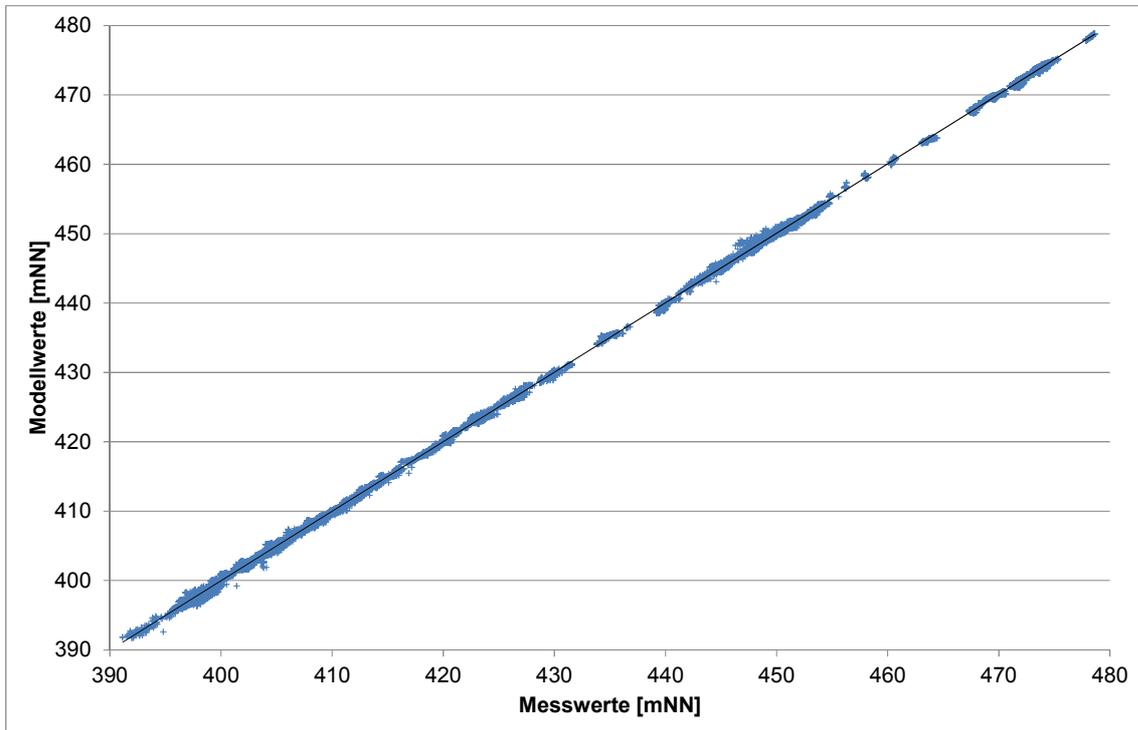


Abbildung 15: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte im Jahr 2015

Der räumliche Vergleich zwischen Modell und Messung wird an drei Zeitpunkten aus den Kalibrierungszeiträumen (Jahre 2013 und 2015) dargestellt (Anlagen 5.2.5 – 5.2.7). Im Jahr 2013 wird der Hochwasserstand am 04.06.2013 dargestellt. Aus dem Jahr 2015 werden ein Mittelwasser- und ein Niedrigwasserstand dargestellt. Die Darstellungen zeigen, dass die Übereinstimmung von Modell und Messung für alle Zustände gut ist. Zwar gibt es einige Messstellen, bei denen die Abweichung zwischen Modell und Messung grösser als 0.5 m beträgt. Diese befinden sich in den meisten Fällen jedoch in unmittelbarer Nähe zu anderen Messstellen mit einer kleineren Abweichung.

Im Gebiet der Stadt Donauwörth fällt auf, dass das Modell bei Mittelwasser etwas zu tief ist. Die Abweichungen können dort teilweise auch auf kleinräumig angeordnete Dichtwände im Untergrund zurückgeführt werden, die im Modell nicht berücksichtigt sind. Die Vereinfachungen lassen sich rechtfertigen, da sich die Stadt Donauwörth nicht im Umfeld der Rückhalteräume befindet.

Bei Hochwasser sind die Abweichungen tendenziell etwas größer. Lokale Unterschiede des Speicherkoeffizienten und der Mächtigkeit der Deckschicht besitzen bei Hochwasser einen großen Einfluss, dieser Tatsache wird über die Durchführung von Sensitivitätsuntersuchungen mit dem Modell Rechnung getragen.

Für die Dokumentation der Übereinstimmung des zeitlichen Verhaltens wurden einige, über das Modellgebiet verteilte Messstellen ausgewählt (Abbildung 16). Um ein repräsentatives Bild zu erhalten, wurden Messstellen ausgewählt, welche das gesamte Talprofil umfassen. Es wurden 6 Profile gesucht, in welchen sich Messstellen mit vorzugsweise täglichen bis 2-wöchentlichen Ablesungen finden ließen. Drei der Profile befinden sich in der Nähe der Rückhalteräume Leipheim, Helmeringen und Neugeschüttwörth. Zusätzlich wurden noch vier Messstellen in der Umgebung von Donauwörth ausgewählt.

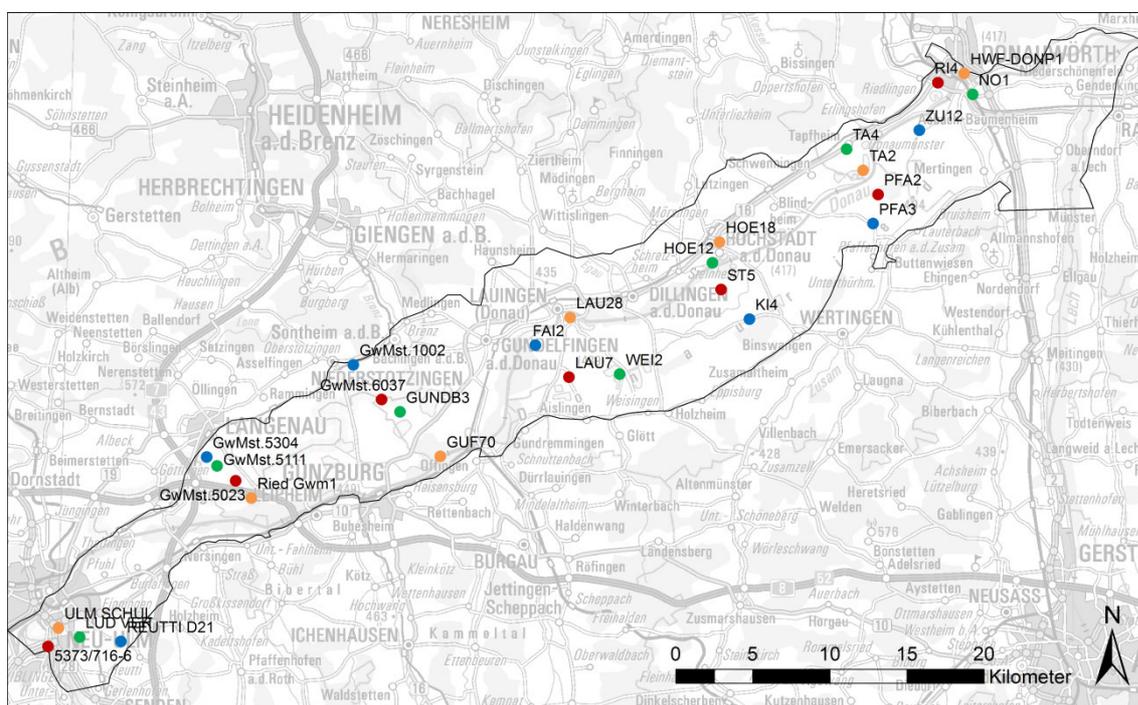


Abbildung 16: Lage der Messstellen mit dargestellten Zeitkurven.

Die Zeitkurven sind in Abbildung 17 bis Abbildung 30 dargestellt. Die Übereinstimmung ist mit folgenden Ausnahmen sehr gut:

- Bei den meisten Ganglinien ist die Übereinstimmung im Anfangszustand nicht sehr gut. Dies hängt damit zusammen, dass die Anfangszustände der Modelle nicht nachgebildet, sondern von einem anderen Zeitpunkt übernommen wurden. Nach etwa 2 Monaten nähern sich Modell und Messung an.
- Die kurzzeitigen Schwankungen des Grundwasserstandes in der Messstelle Reuti D21 können mit dem Modell nicht nachgebildet werden. Diese Messstelle befindet sich in der Nähe des Landgrabens. Dieser Graben führt auch Niederschlagswasser aus dem seitlichen Einzugsgebiet. Deshalb ist zu erwarten, dass der Wasserspiegel im Graben zeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Im Grundwassermodell ist der

Landgraben mit einem konstanten Wasserspiegel berücksichtigt, da er sich nicht im Einflussbereich der geplanten Rückhalteräume befindet.

- Bei der Messstelle LAU 7 ist das Modell generell etwas zu hoch, nach dem Hochwasser sinkt es zu wenig schnell ab. Die Messstelle liegt nahe am Landgraben. Im Modell ist dieser an der betreffenden Stelle mit einer, aus dem DGM abgegriffenen Höhe von 426.25 mNN enthalten. Der Grundwasserstand wird durch den Graben also nur bei sehr hohem Stand drainiert. Denkbar wäre eine Drainagewirkung durch den östlich gelegenen Schackenlachgraben (424.95 mNN) oder den nördlich gelegenen tieferliegenden Landgraben (425.25 mNN). Dazu müsste jedoch im Modell eine wesentlich höhere Durchlässigkeit vorgegeben werden. Da die Abweichung im Mittel lediglich 25 cm beträgt, ist eine Anpassung nicht notwendig.
- Bei der Messstelle KI 4 ist der berechnete Grundwasserspiegel generell tiefer als der gemessene. Die Abweichung beträgt im Mittel 33 cm. Bei der benachbarten Messstelle KI 2 sind Messung und Modell praktisch identisch (Abweichung 9 cm). Die Unterschiede können auf kleinräumige Durchlässigkeitsunterschiede zurückgeführt werden, welche im Modell nicht nachgebildet wurden.

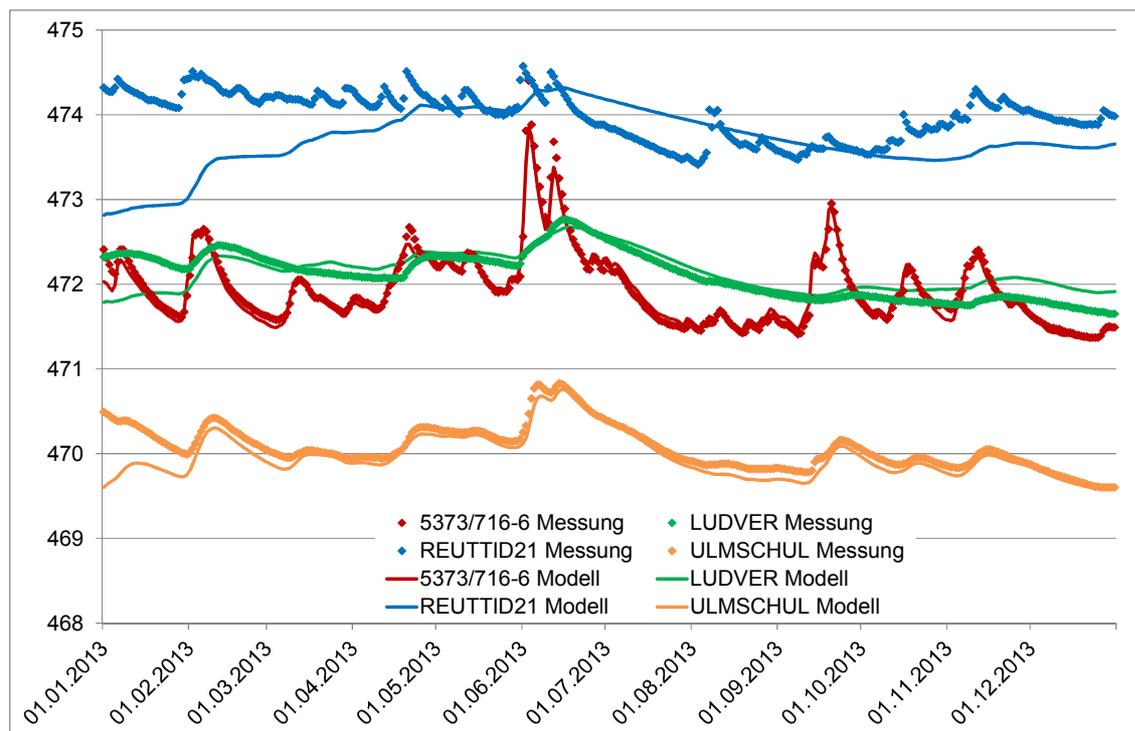


Abbildung 17: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Neu-Ulm, 2013

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

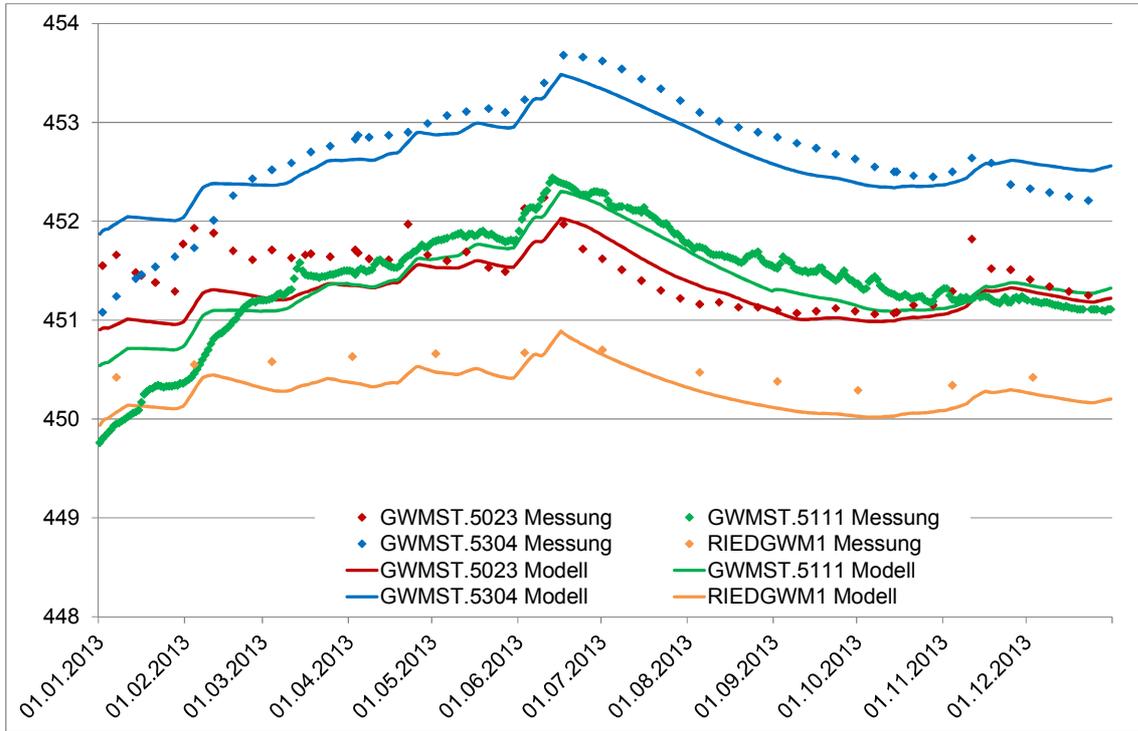


Abbildung 18: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Leipheim-Riedheim, 2013

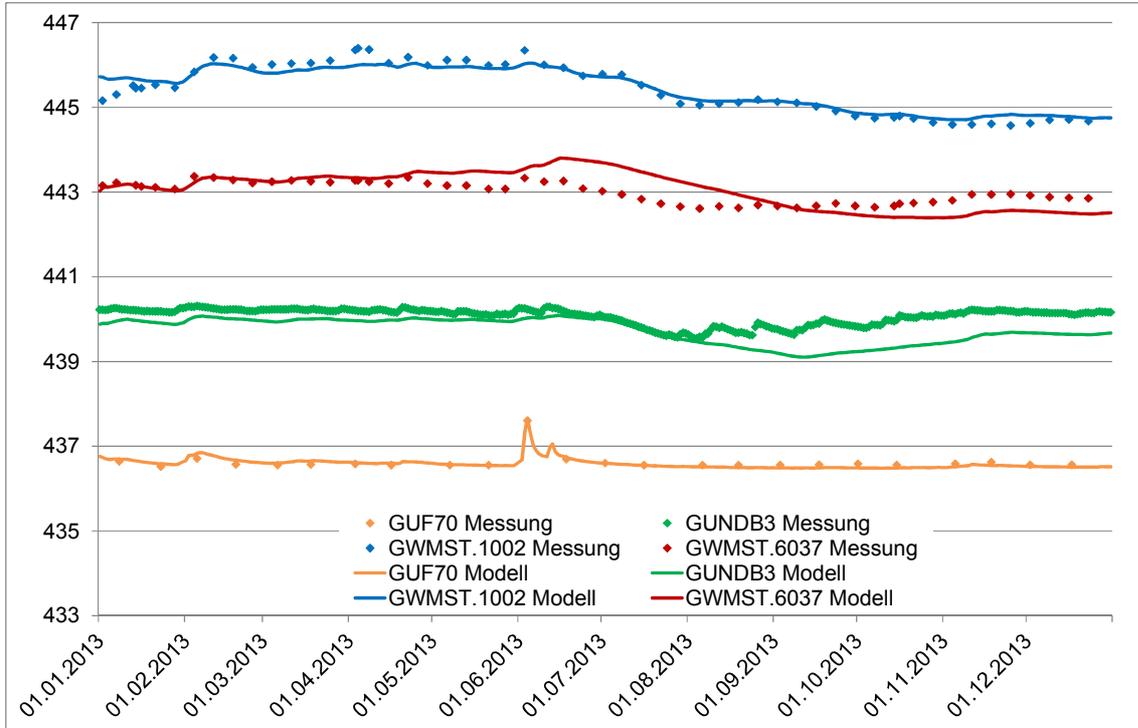


Abbildung 19: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Bächingen - Offingen, 2013

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

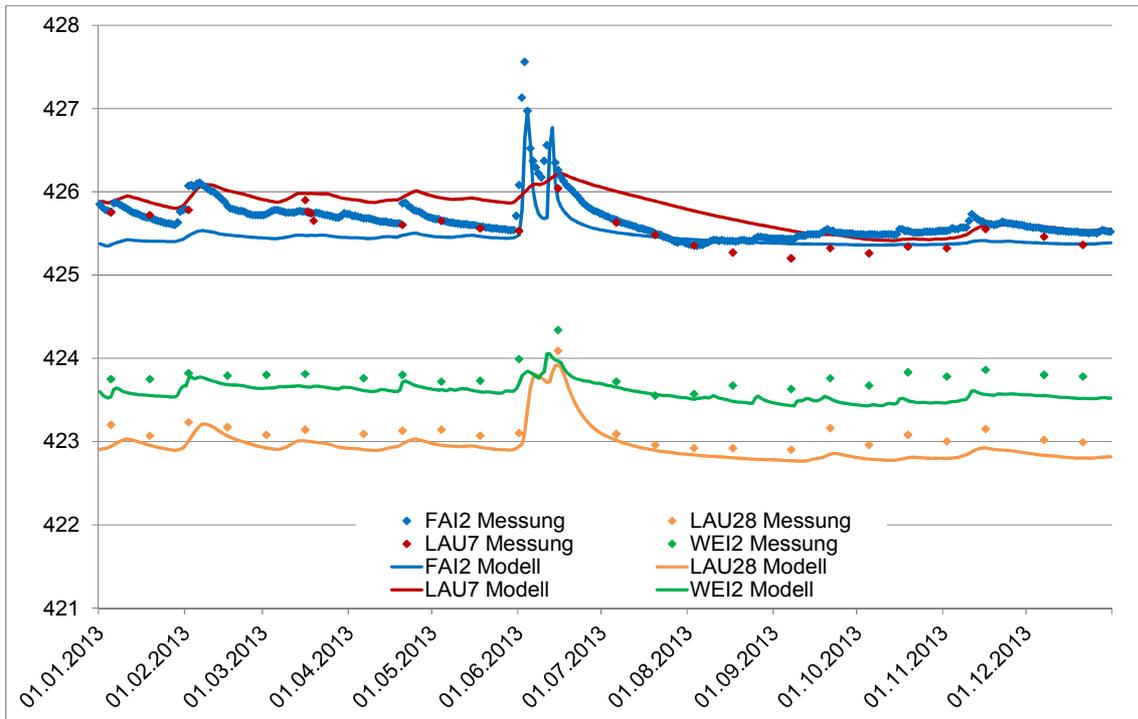


Abbildung 20: Ganglinien der Messstellen in der Niederung südlich der Donau auf Höhe von Lauingen, 2013

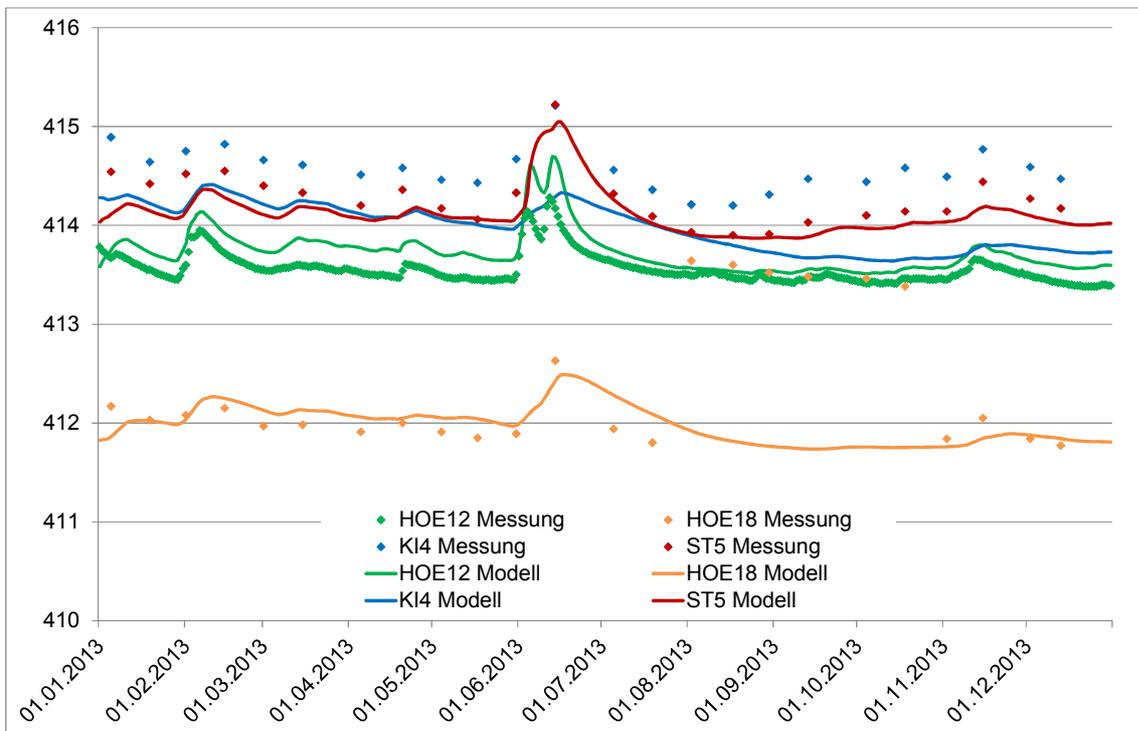


Abbildung 21: Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Höchstädt, 2013

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

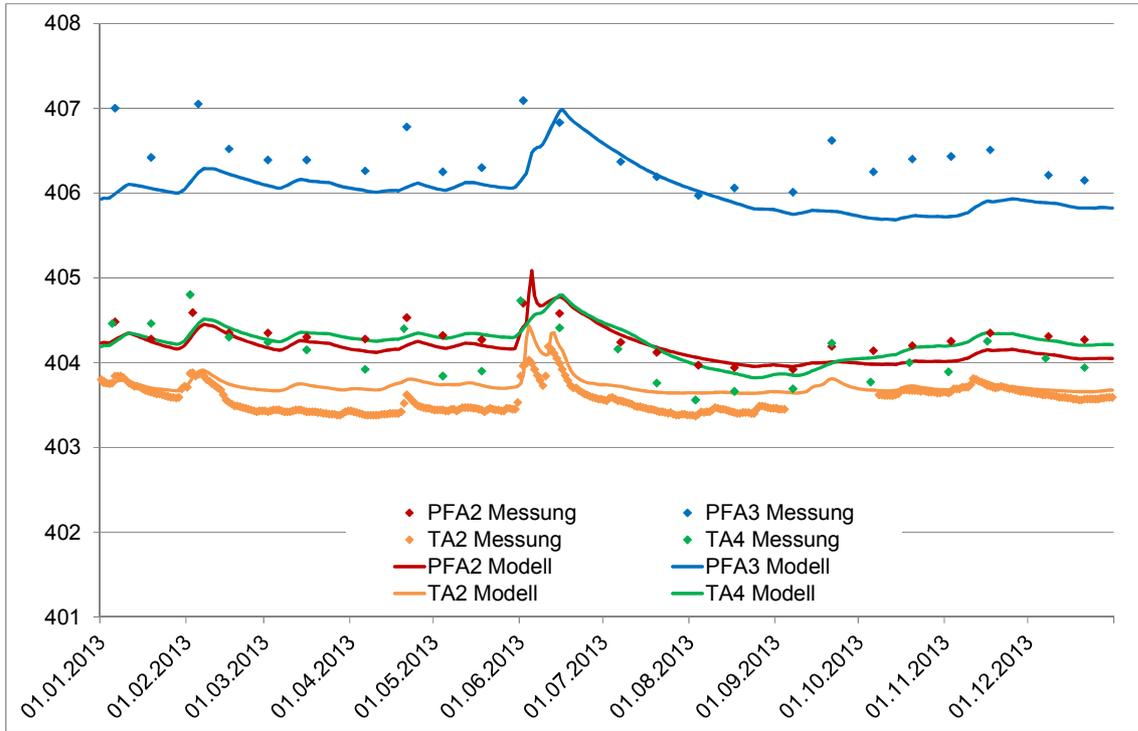


Abbildung 22: Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Tapfheim, 2013

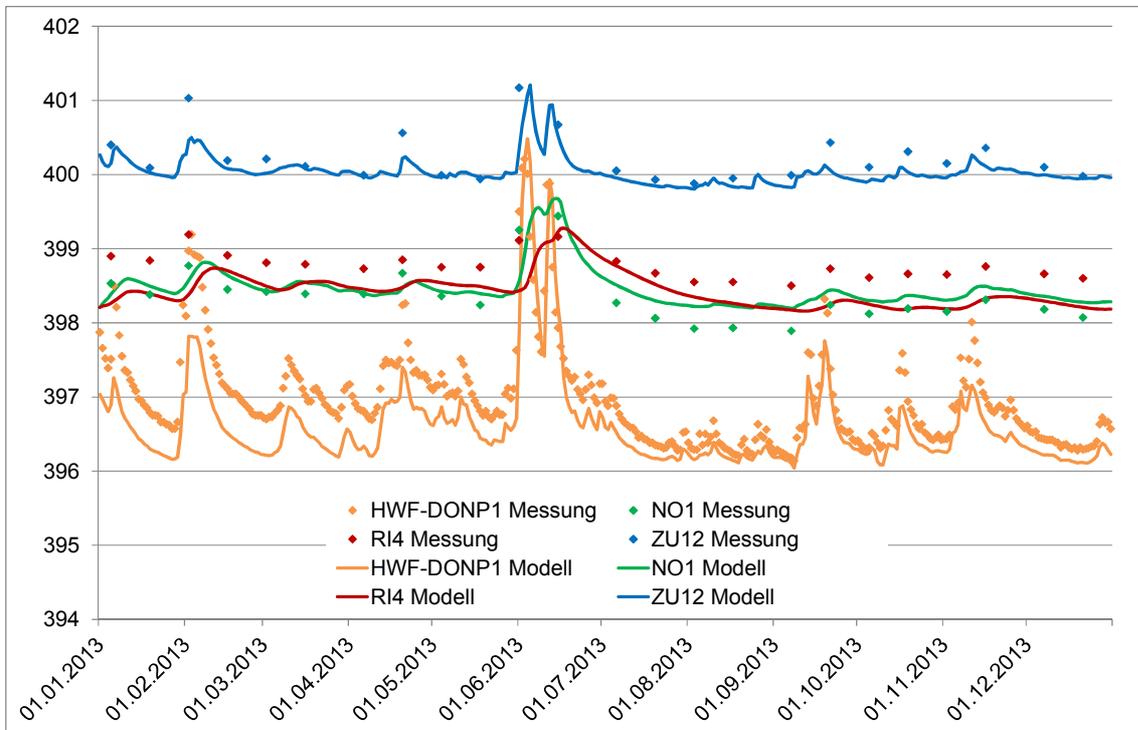


Abbildung 23: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Donauwörth, 2013

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

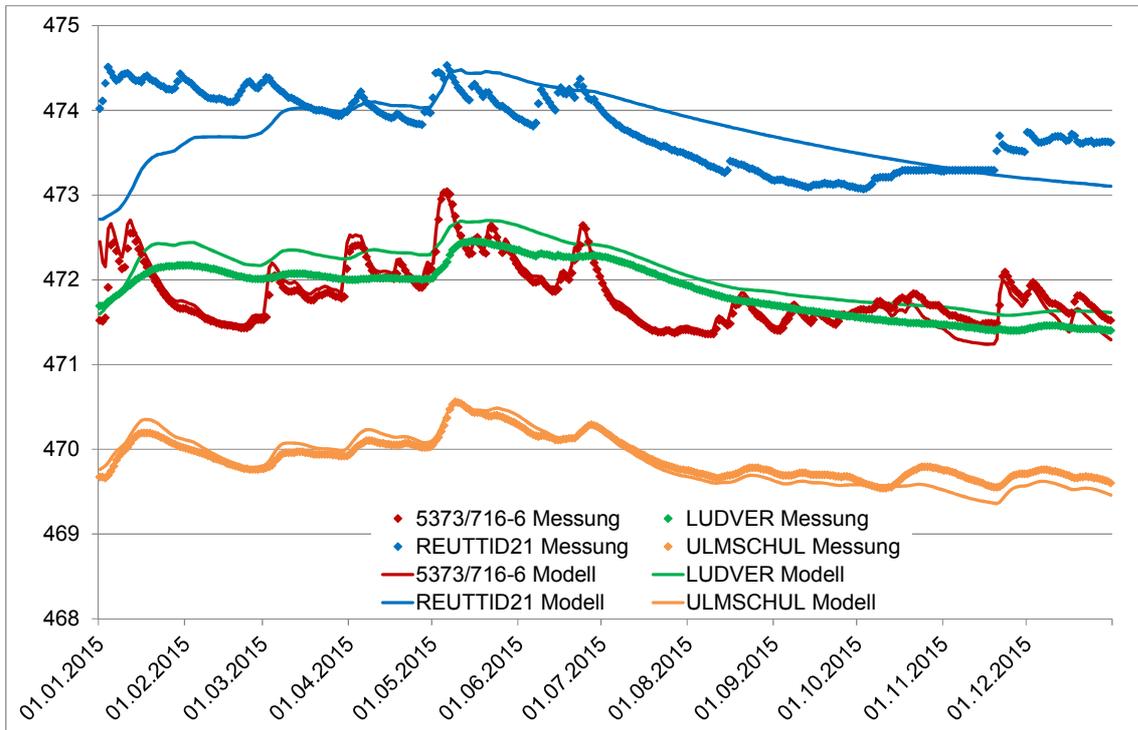


Abbildung 24: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Neu-Ulm, 2015

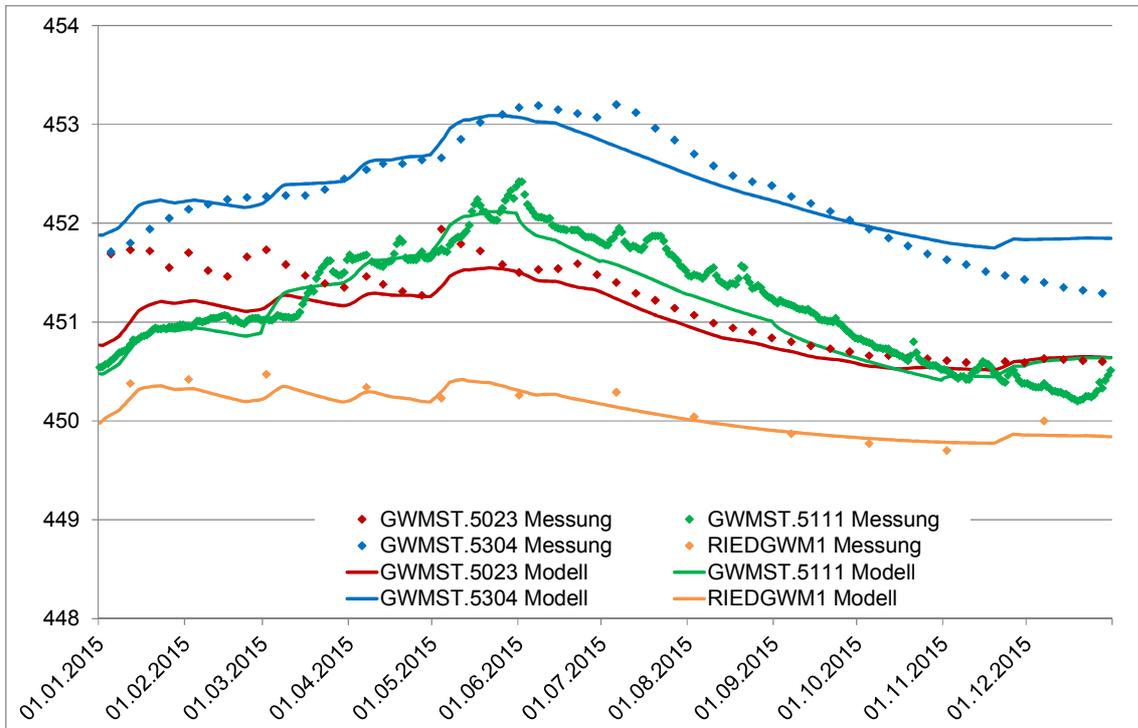


Abbildung 25: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Leipheim-Riedheim, 2015

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

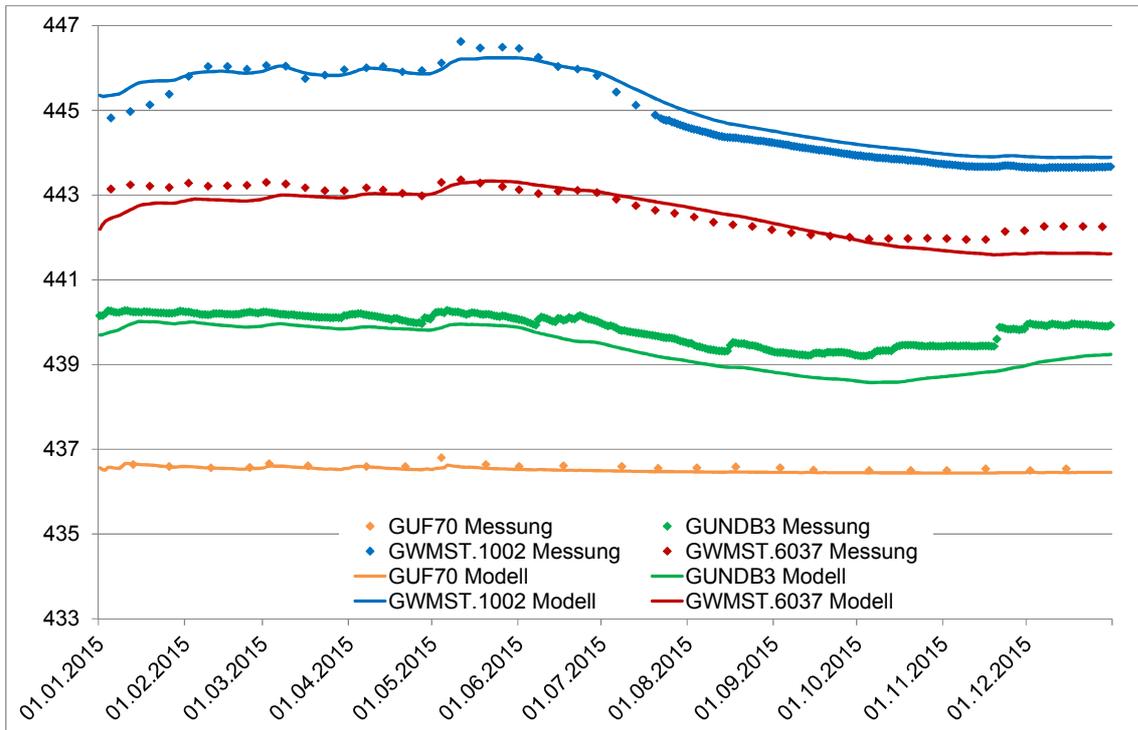


Abbildung 26: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Bächingen - Offingen, 2015

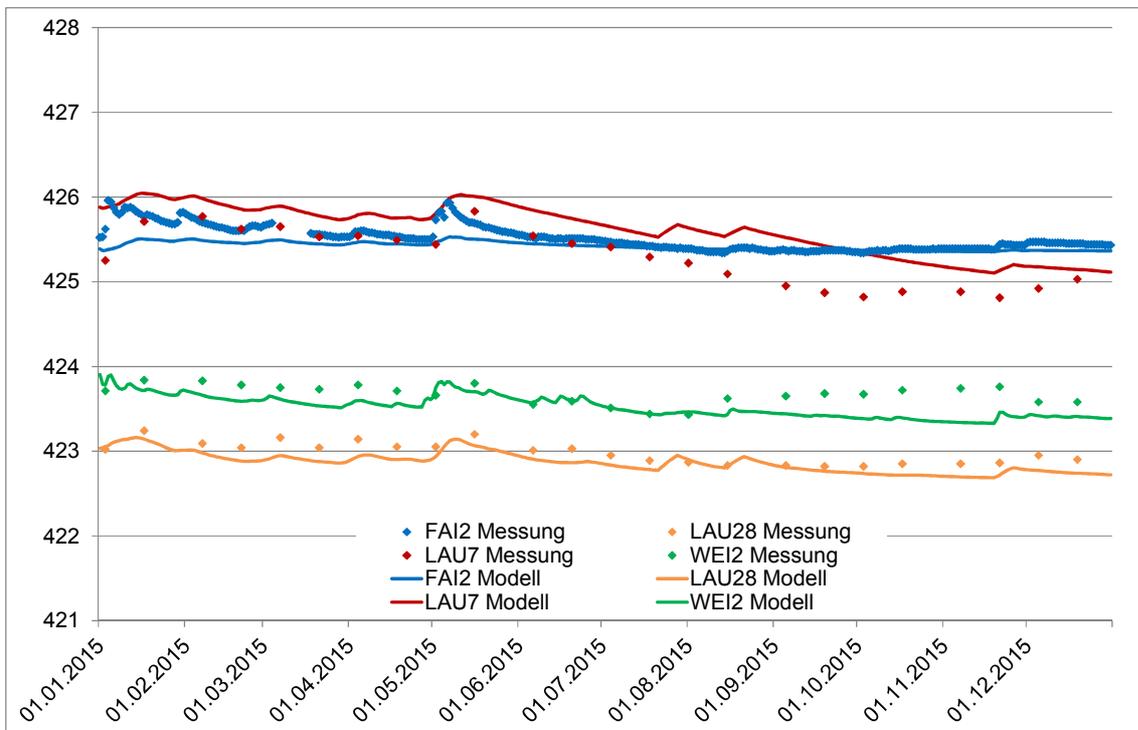


Abbildung 27: Ganglinien der Messstellen in der Niederung südlich der Donau auf Höhe von Lauingen, 2015

Grundwasser – Modellierung und -anpassung

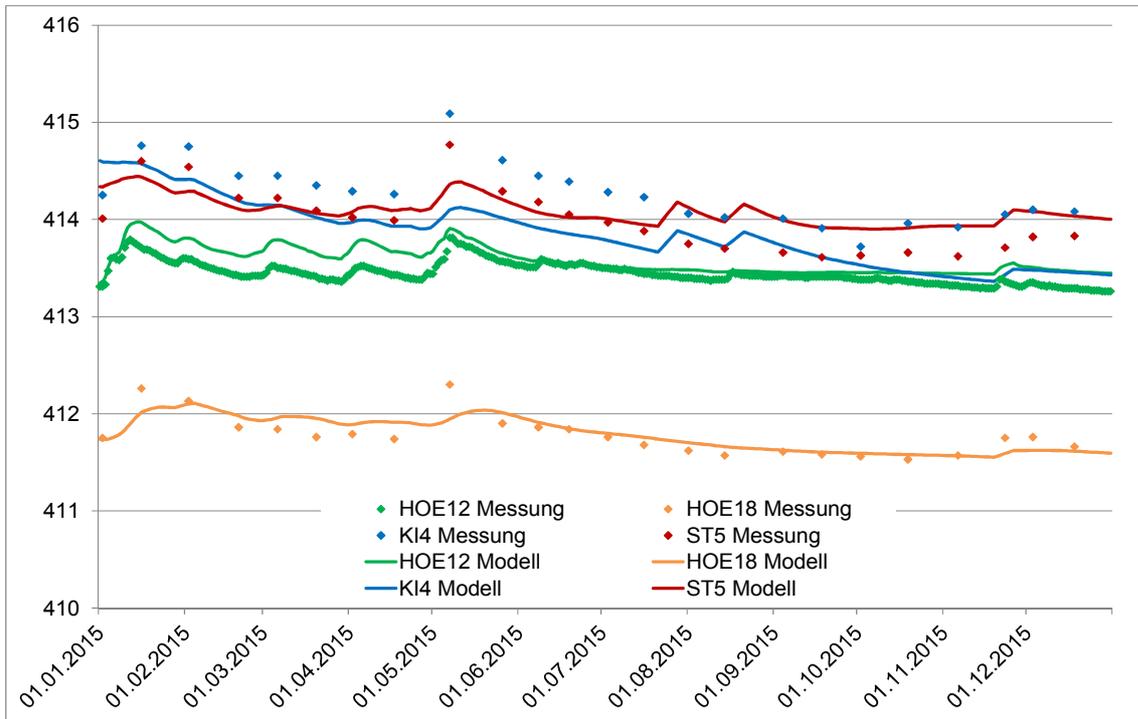


Abbildung 28: Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Höchstädt, 2015

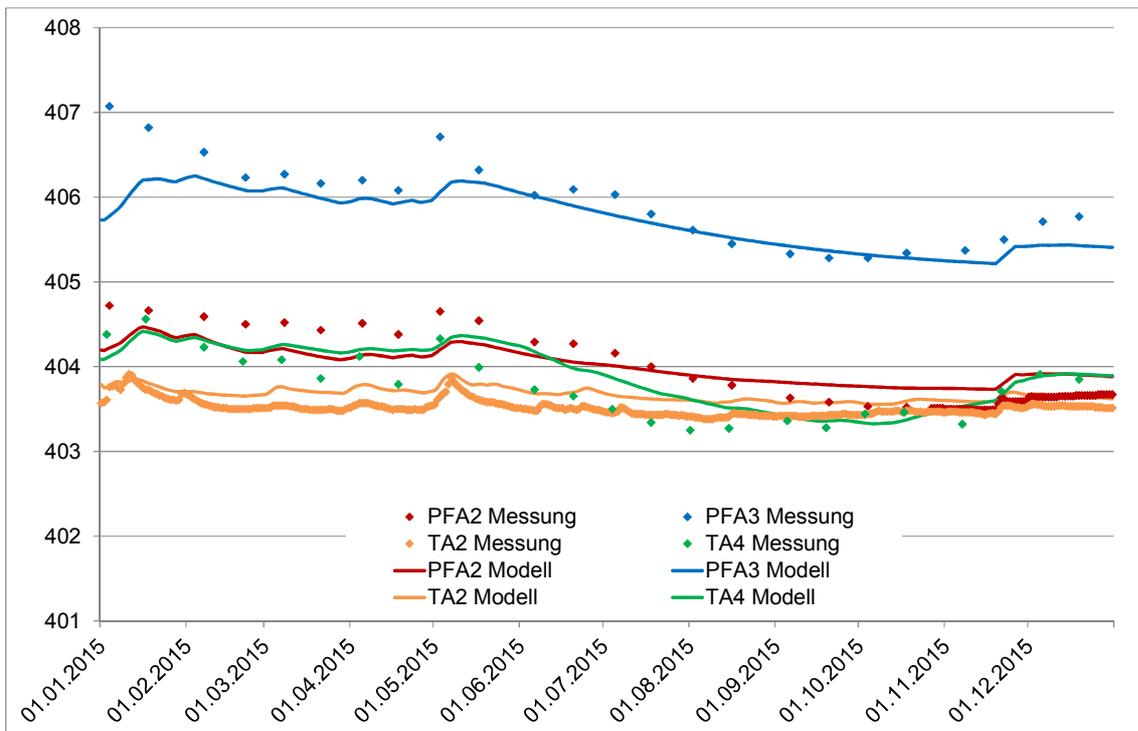


Abbildung 29: Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Tapfheim, 2015

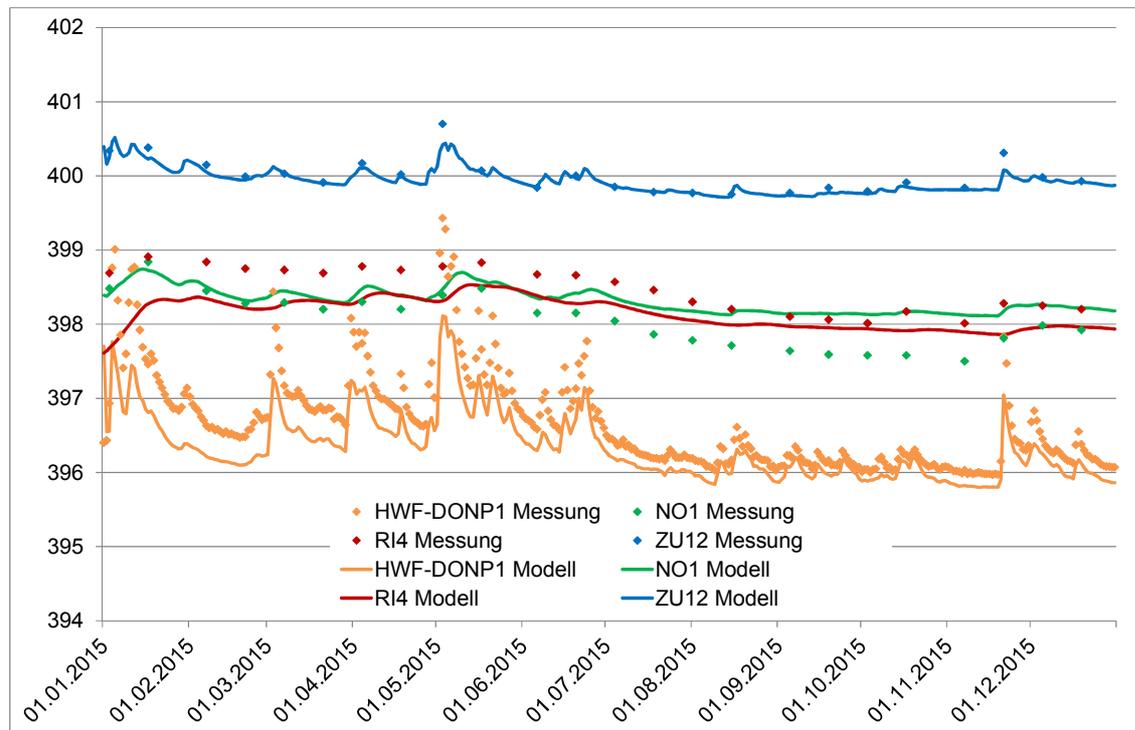


Abbildung 30: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Donauwörth, 2015

3.3.3 Vergleich der Drainagemengen mit den Abflussmessungen

Die im Modell entlang der Gräben anfallenden Abflüsse wurden mit den an den Stich-
tagen vom 14.03.2017 und 26.06.2018 gemessenen Abflüssen verglichen (Tabelle 6).
Als Modellwert wurde der Mittelwert der im Modell in die Gräben drainierten Wasser-
menge der Monate Februar bis Mai 2015 verwendet. Da die Modellrechnung die Mess-
zeitpunkte nicht enthält, handelt es sich nur um einen qualitativen Vergleich.

Bei starken Niederschlägen führen die Gräben zwar auch oberflächlich abgeleitetes
Wasser, im Normalfall entspricht die Abflussmenge jedoch dem drainierten Grundwas-
ser. In Abbildung 31 ist die Lage der Abflussmessstellen dargestellt. Tabelle 6 zeigt die
gemessene Abflussmenge zusammen mit der berechneten Drainagemenge der Grä-
ben.

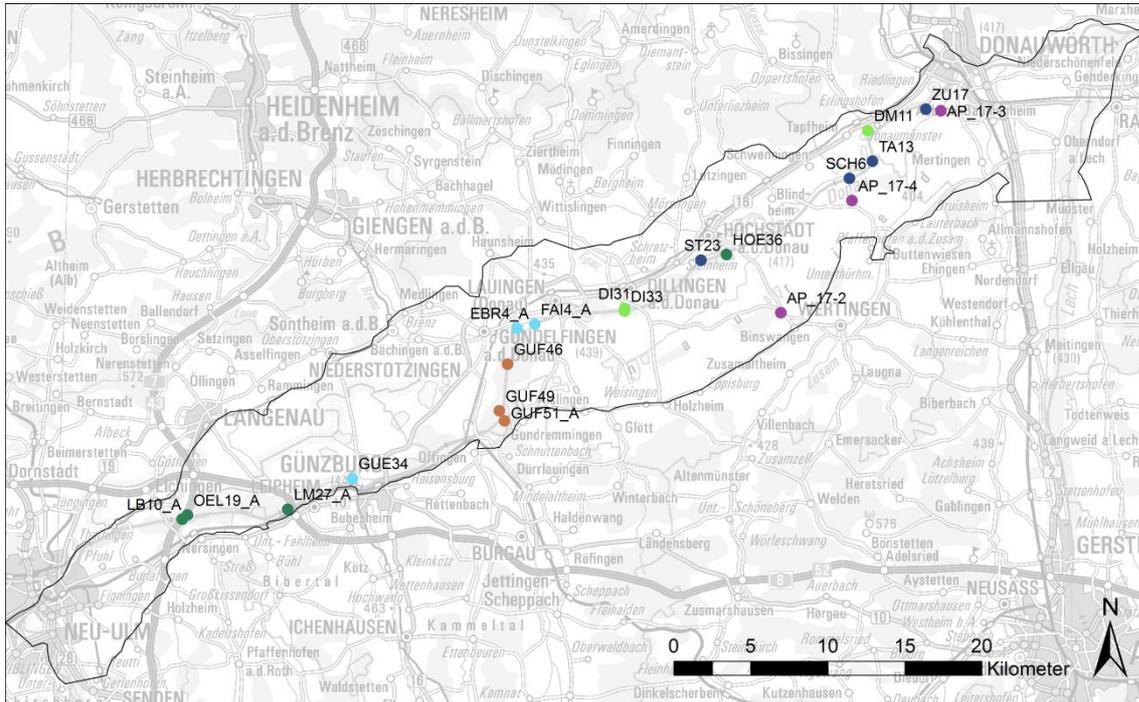


Abbildung 31: Lage der Abflussmessstellen

Einzelne größere Abweichungen werden im Folgenden kommentiert:

- Die Messstelle AP_17-2 enthält auch Oberflächenwasserzufluss aus dem Talrandbereich. Der Modellwert, welcher nur drainiertes Wasser umfasst, muss deshalb deutlich kleiner als die Messung sein.
- Bei der Messstelle AP_17-4 wurden an den Stichtagen in den Jahren 2017 und 2018 sehr unterschiedliche Werte gemessen. Im Jahr 2018 war das Gerinne stark verkrautet. Die Messung ergab trotz höherem Pegelstand einen kleineren Abflusswert.
- Bei den Messstellen EBR4_A und GUF 49 sind die berechneten Drainagemengen kleiner als die gemessenen Abflussmengen. Eine Erhöhung der Abflussmenge wäre nur über eine Erhöhung der Donau-Leakage und eine höhere Durchlässigkeit der nahe gelegenen Dichtwände möglich. Höhere Werte als die im Modell verwendeten wären jedoch physikalisch nicht plausibel.
- Die Messstelle GUF 51 enthält auch Oberflächenwasserzufluss vom Talrand.
- Bei der Messstelle GUE 34 ist im Modell nur der Graben nördlich der Donau enthalten. Südlich der Donau befindet sich ebenfalls ein Graben, bei welchem ein Abfluss von $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen wurde. Die Abflussmenge im Modell entspricht der Infiltra-

tionsmenge aus der Donau im entsprechenden Abschnitt und umfasst damit beide Gräben.

Messstelle	Modell, Mittel Feb. - Mai 2015 [m ³ /s]	Messung 14.03.2017 [m ³ /s]	Messung 26.06.2018 [m ³ /s]
AP_17-2	0.020	0.154	0.002
AP_17-3	0.205	keine Messung	0.1
AP_17-4	0.377	0.456	0.04
DI_31	0.274	0.224	0.278
DI_33	0.240	0.236	0.16
DM_11	0.310	0.333	0.18
EBRA_4	0.203	0.465	0.754
FAI_4	0.211	0.216	0.384
GUE_34	0.281	0.185	0.188
GUF_46	0.131	0.132	0.272
GUF_49	0.059	0.187	0.256
GUF_51	0.113	0.202	0.165
HOE_36	0.408	0.353	0.324
LB_10	0.220	0.217	0.289
LM_27	0.148	0.271	0.37
OEL_19	0.215	0.207	0.304
SCH_6	0.342	0.373	0.4
ST_23	0.255	0.45	0.576
TA_13	0.460	0.455	keine Messung
ZU_17	0.419	0.676	0.668

Tabelle 6: Vergleich der berechneten und gemessenen Abflüsse in den Gräben

3.4 Resultierende Modellparameter

Die resultierenden Modellparameter sind in Abbildung 32 bis Abbildung 34, sowie den Anlagen 5.2.2 bis 5.2.4 dargestellt. Die Durchlässigkeitswerte des Grundwasserleiters bewegen sich mit Werten zwischen 5×10^{-4} bis 1×10^{-2} m/s im Rahmen der erwarteten Spannweite. Die Durchlässigkeiten in den Seitentälern von Iller und Lech sind etwas höher als jene des Donautals. Zwischen würmzeitlichen Niederterrassenschottern, postglazialen Terrassenschottern und in der am nördlichen Talrand sedimentierten Hochterrasse gibt es keine eindeutigen Unterschiede. Die Baggerseen wurden generell mit einer Durchlässigkeit von 1×10^{-2} m/s nachgebildet.

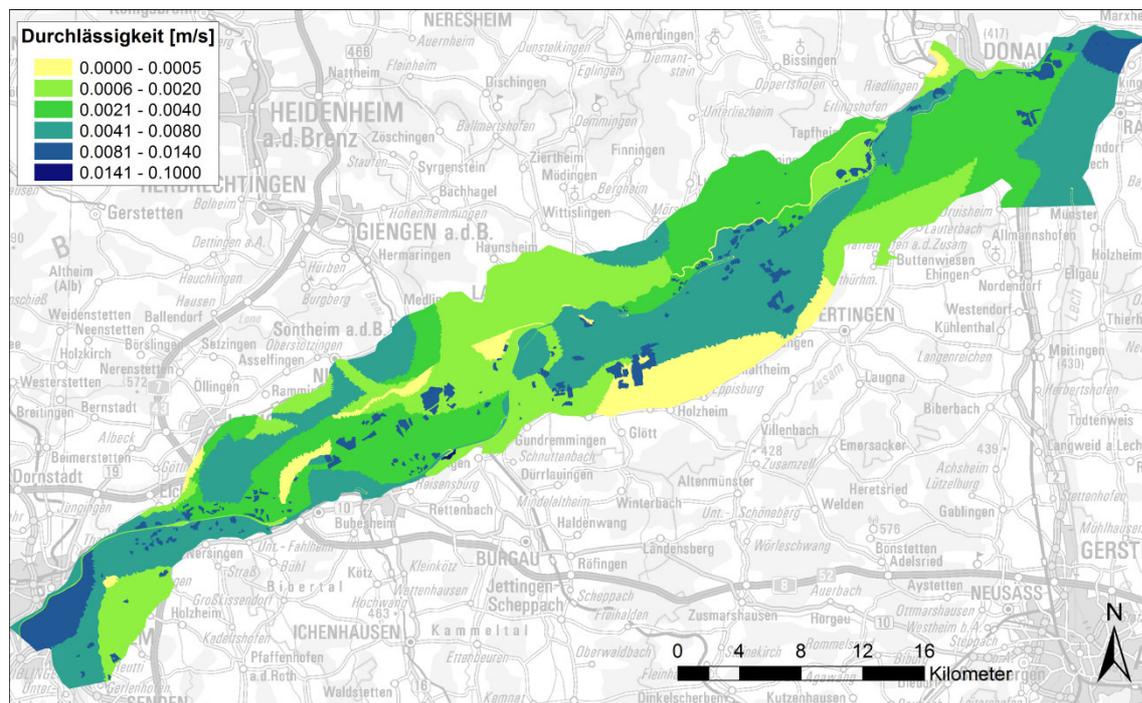


Abbildung 32: Aus der Kalibrierung resultierende Durchlässigkeitswerte

Die Speicherkoeffizienten wurden bei der Kalibrierung räumlich nicht variiert. Mit einem Speicherkoeffizienten von 0.1 konnten die Grundwasserspiegelschwankungen im gesamten Gebiet befriedigend nachgebildet werden. Dieser Wert gilt für freie Grundwasserverhältnisse. Der Einfluss von gespannten Verhältnissen wird bei den Sensitivitätsuntersuchungen im Kapitel 6 behandelt.

Die aus der Kalibrierung resultierenden Leakagewerte sind in der Abbildung 34 dargestellt. Auffällig ist, dass die Leakagewerte der Donau in den Stauräumen deutlich tiefer sind als direkt im Unterwasser der Staustufen, was den Verlandungstendenzen entspricht. Die Leakagewerte der zur Binnenentwässerung angelegten Gräben sind teilweise recht hoch. Die hohen Werte werden jedoch durch die gemessenen Abflussmengen in diesen Gewässern bestätigt.

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

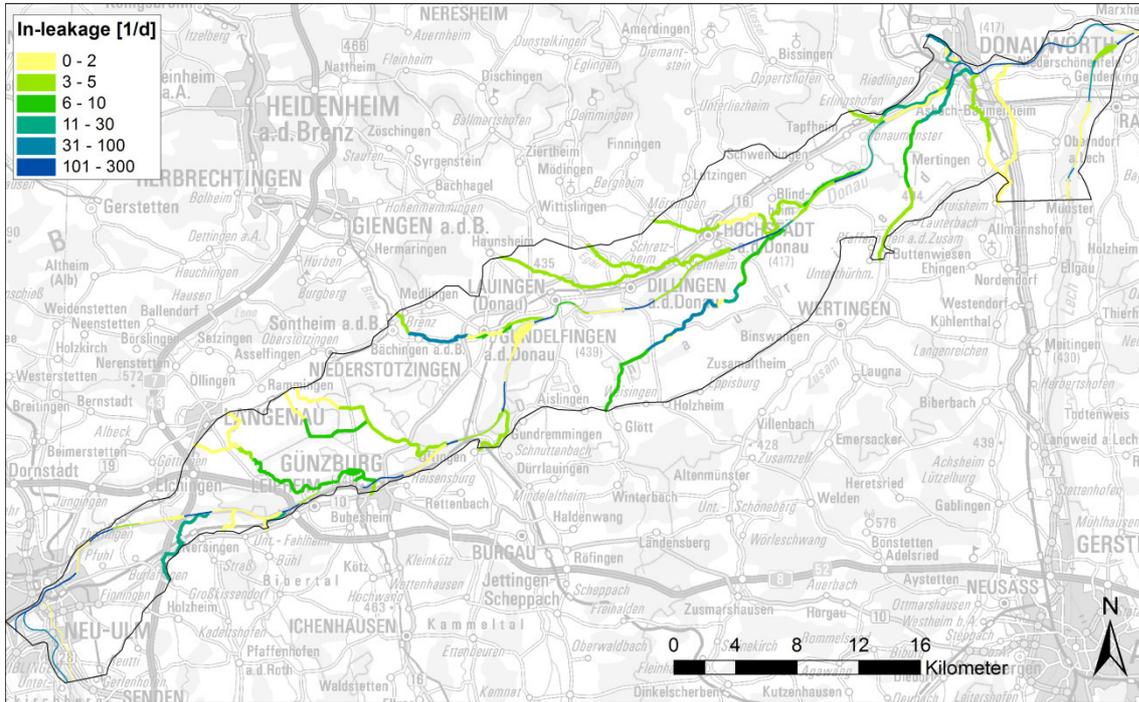


Abbildung 33: Aus der Kalibrierung resultierende Leakagewerte für die Infiltration in den Grundwasserleiter (Zufluss zum Modell)

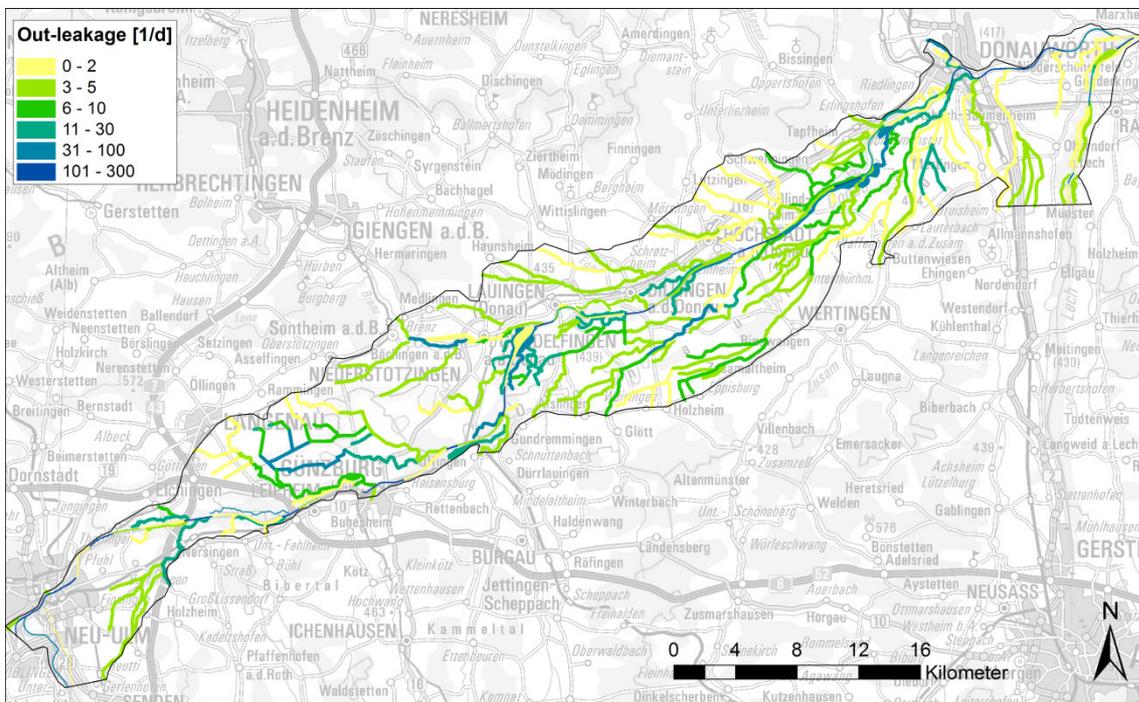


Abbildung 34: Aus der Kalibrierung resultierende Leakagewerte für die Exfiltration aus dem Grundwasserleiter (Abfluss aus dem Modell)

4 Validierung

4.1 Nachbildung des Hochwassers 1999

Zur Validierung der Kalibrierung wurden die Grundwasserstände des Jahres 1999 ausgewählt. Im Mai 1999 gab es ein Hochwasser, bei welchem Donauwasser den Riedstrom südlich der Donau durchfloss. Von März bis Dezember 1999 stehen im Modellgebiet 22.011 Messdaten des Grundwasserspiegels zur Verfügung. Auf die Verwendung der Messdaten des Januar und Februar wurde verzichtet, da das Modell in diesen Monaten noch durch den Anfangszustand beeinflusst wird.

Tabelle 7 zeigt die Gütewerte der Validierung. Die Übereinstimmung der Modellwerte mit den Messungen ist etwas schlechter als bei der Kalibrierung. Dies ist insbesondere auf eine schlechte Übereinstimmung in den Messstellen GwMst 4157, GwMst 4133, HWF-Don P1 bis HWF-Don P4, RIED B2 und RIED B4 zurückzuführen. Werden nur die Messstellen im Nahbereich der Rückhalteräume betrachtet, so entspricht die Güte der Validierung derjenigen der Kalibrierung. Damit wird gezeigt, dass das Modell bzw. der kalibrierte Parametersatz auch zur Abbildung weiterer Zeiträume geeignet ist.

Betrachtungsgebiet	RMSE [cm]	Mittelwert [cm]	Median [cm]
Gesamtmodell	45	33	26
Umgebung Rückhalteräume	33	25	21

Tabelle 7: Gütewerte der Validierung für das Jahr 1999

Abbildung 35 zeigt den Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Grundwasserstände. In Abbildung 36 bis Abbildung 42 wird die zeitliche Übereinstimmung der Nachbildung des Jahres 1999 mit den Messungen in ausgewählten Messstellen gezeigt. Es werden die gleichen Messstellen gewählt wie bei der Kalibrierung. Da bei einigen Messstellen keine Messungen verfügbar waren, wurden sie durch nahe gelegene ersetzt (SCHOF 12 anstelle LUDVER, PFUHL 22A anstelle ULM SCHUL, RIED anstelle RIED GWM1, OFI 18 anstelle GUF 70).

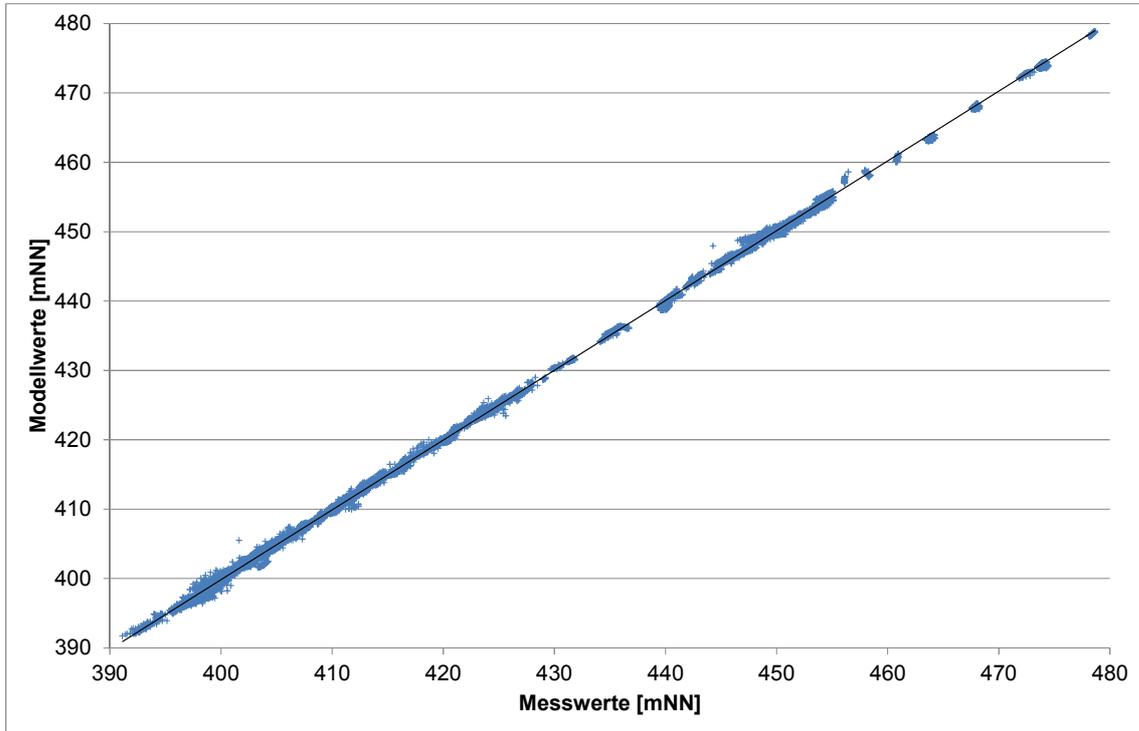


Abbildung 35: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte im Jahr 1999

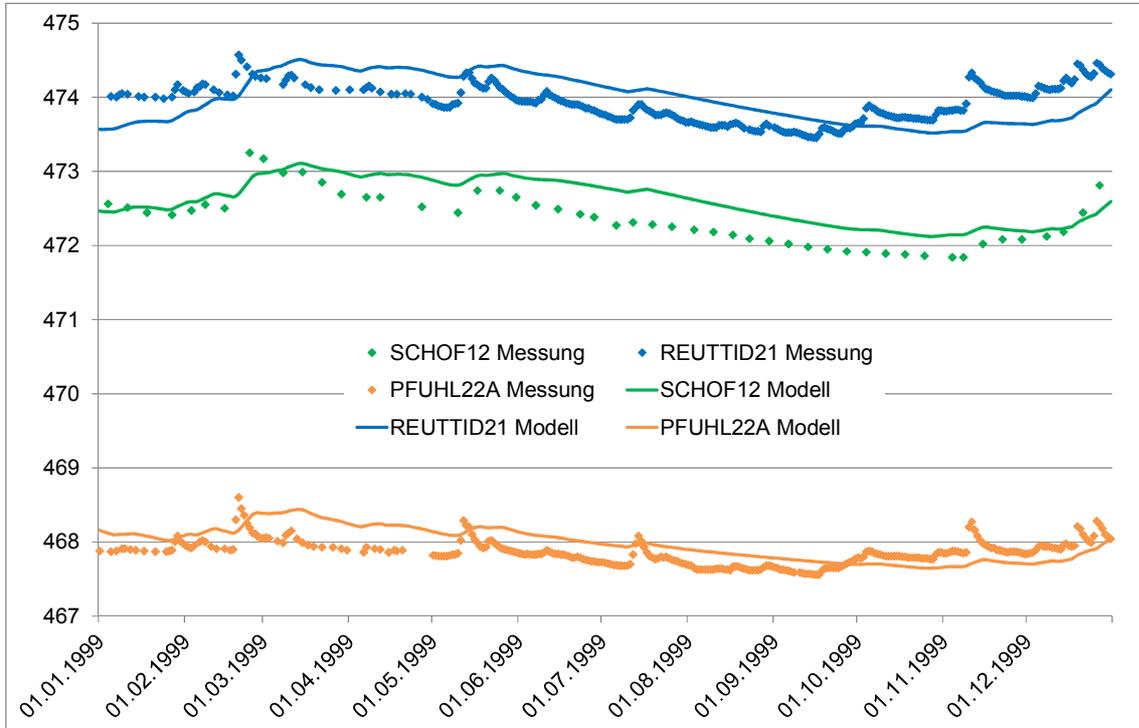


Abbildung 36: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Neu-Ulm, 1999

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

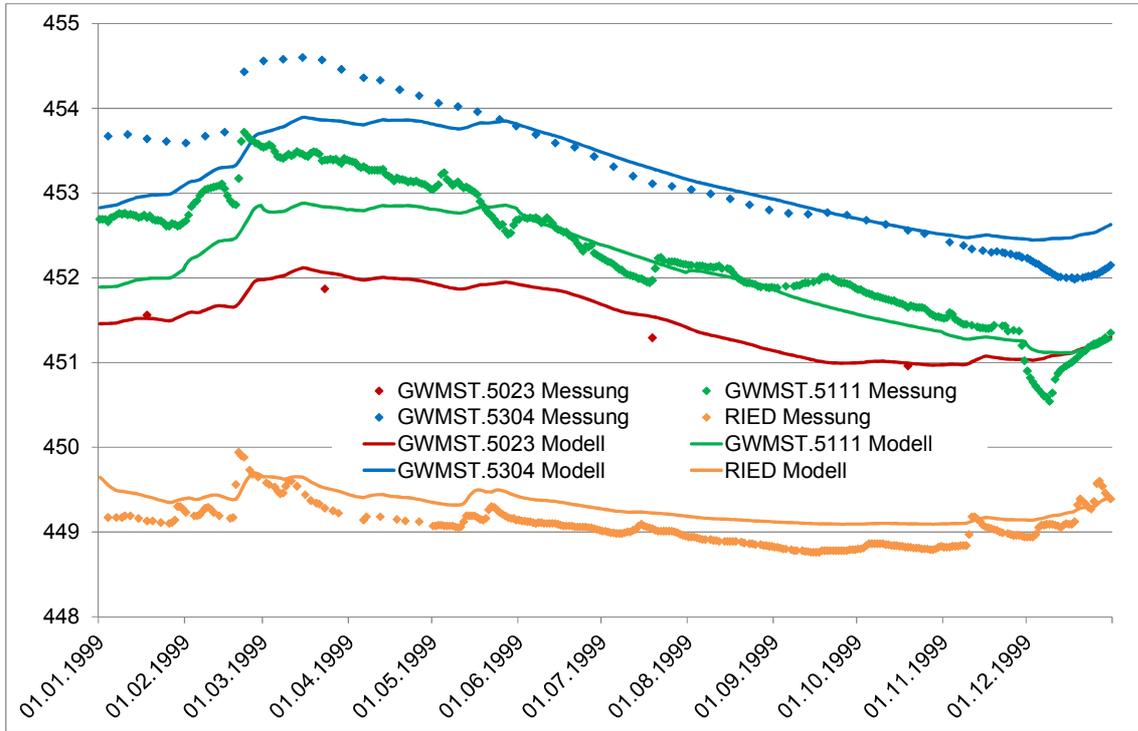


Abbildung 37: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Leipheim-Riedheim, 1999

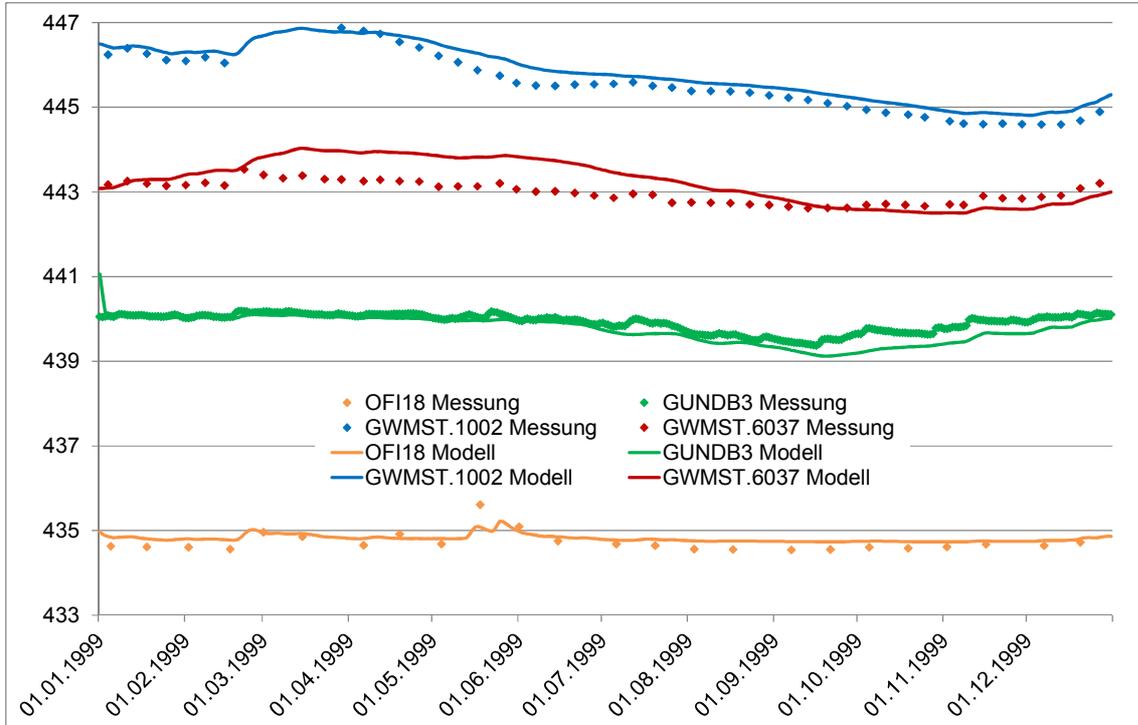


Abbildung 38: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Bächingen - Offingen, 1999

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

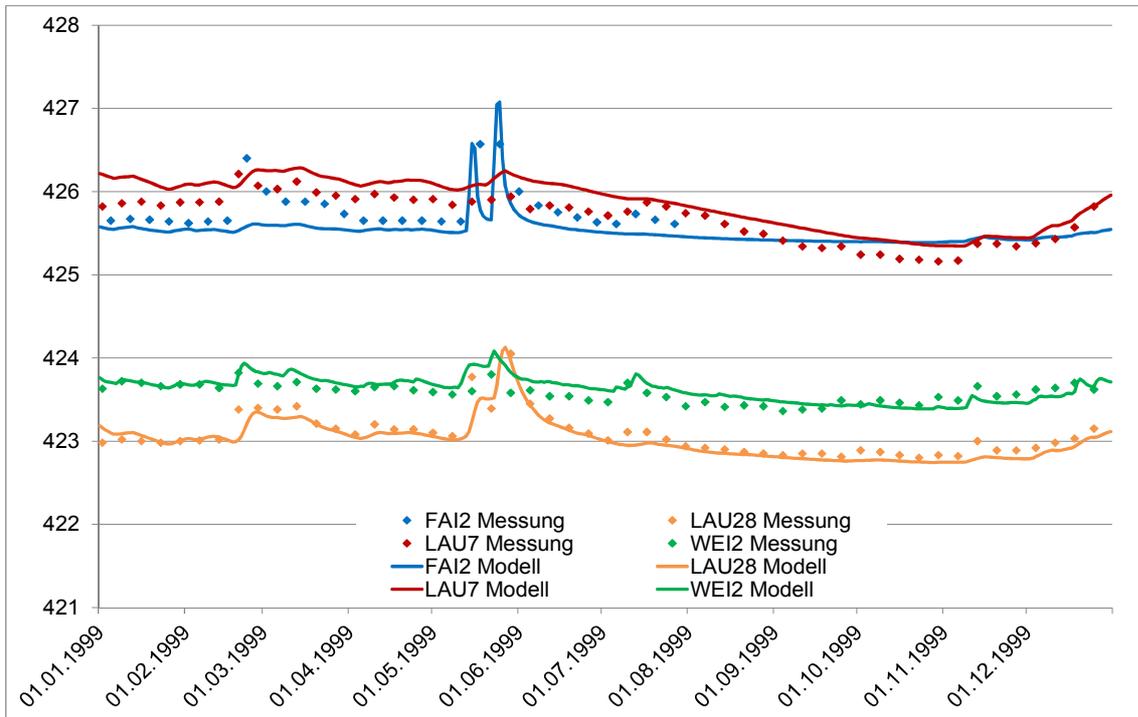


Abbildung 39: Ganglinien der Messstellen in der Niederung südlich der Donau auf Höhe von Lauingen, 1999

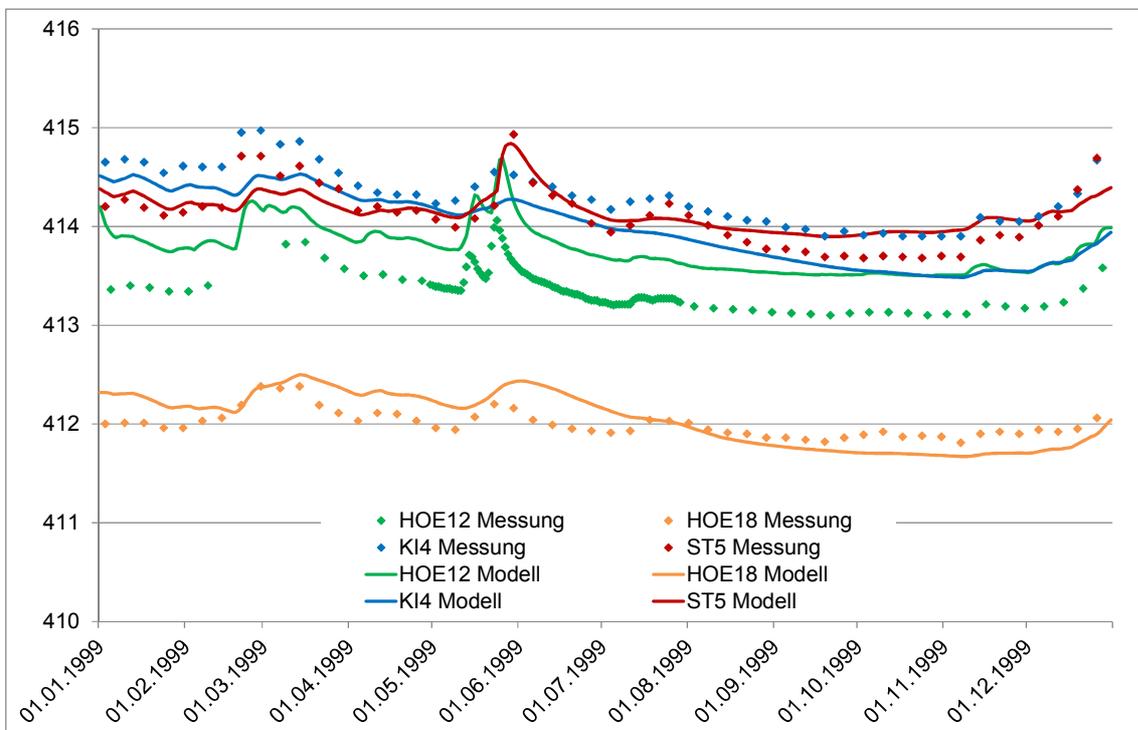


Abbildung 40: Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Höchstädt, 1999

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

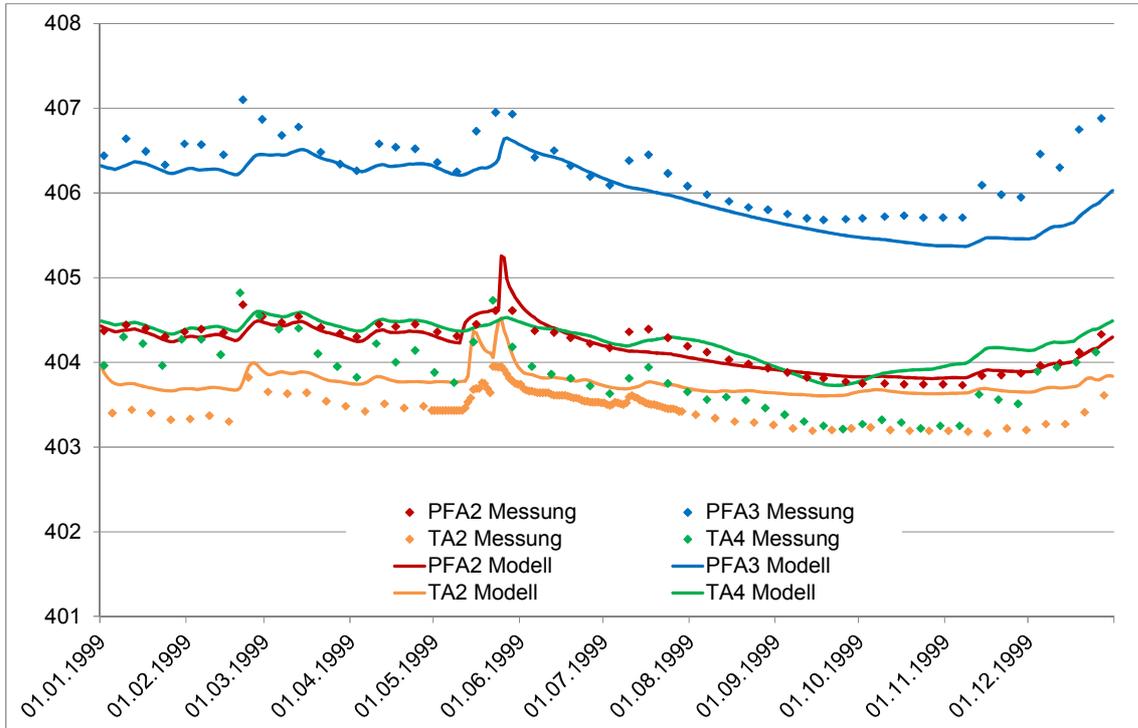


Abbildung 41: Ganglinien der Messstellen in der Donau-Niederung auf Höhe von Tapfheim, 1999

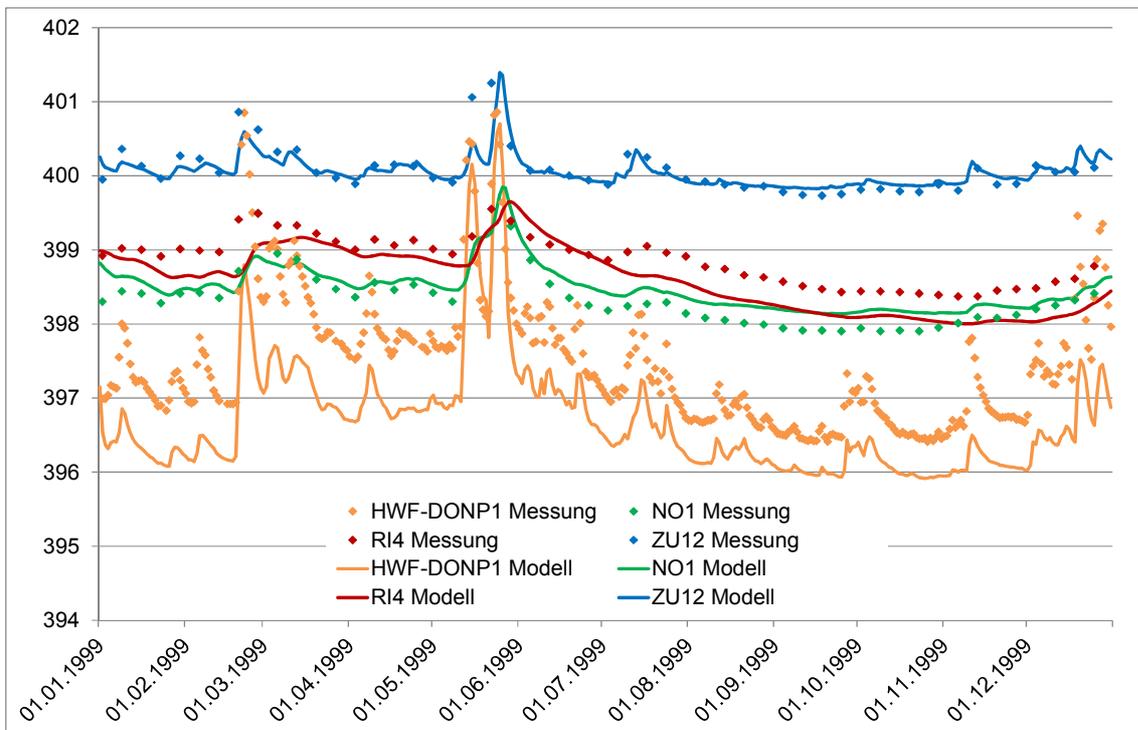


Abbildung 42: Ganglinien der Messstellen im Gebiet von Donauwörth, 1999

Im Folgenden werden die Gründe für einige größere Abweichungen analysiert:

GwMst 4157 und 4133

Die Messstellen GwMst 4157 und 4133 liegen unmittelbar neben einer Brunnenkette (Fassung 4) der LW Stuttgart. Da im Jahr 1999 an dieser Stelle viermal mehr Wasser gefördert wurde als im Jahr 2015 ist, sind die Abweichungen (Abbildung 43) ein Anzeichen für eine zu hohe lokale Durchlässigkeit. Bereits in einer Entfernung von etwa 500 m stimmen die Modellresultate wieder gut mit den Messungen überein. Im Einflussbereich der Rückhalteräume ist die Abweichung daher nicht relevant.

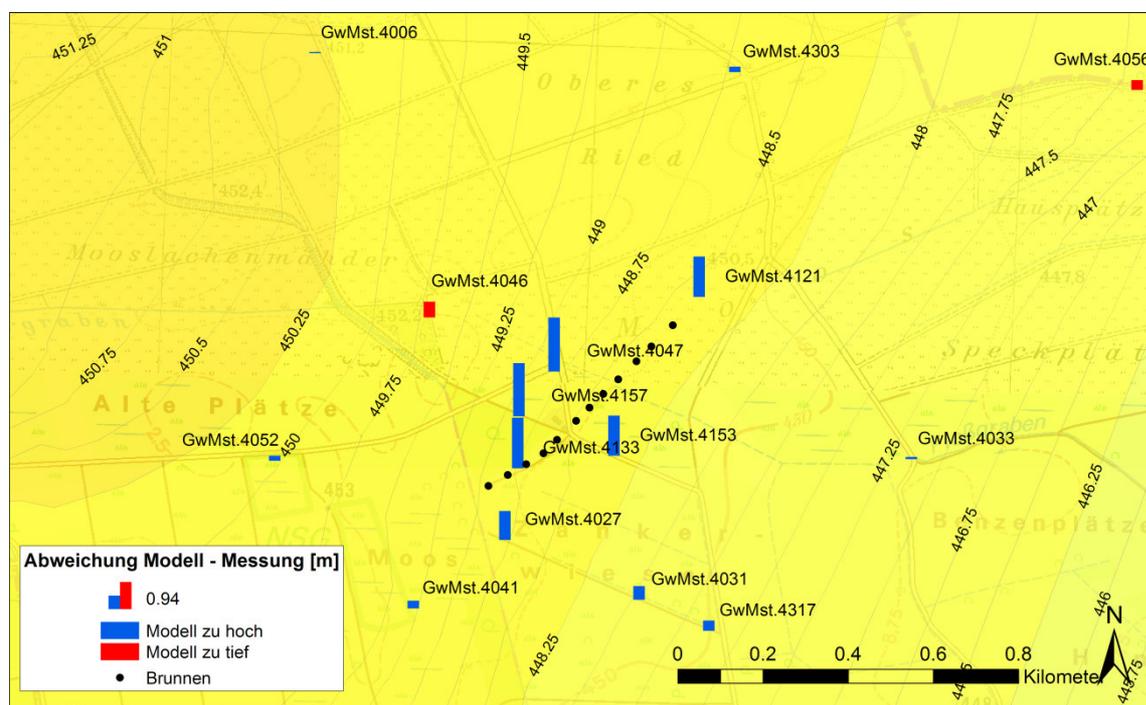


Abbildung 43: Abweichungen der Nachbildung 1999 in der Nähe der Brunnenkette „Fassung 4“ der Landeswasserversorgung Stuttgart.

HWF-Don P1 bis HWF-Don P4

Die größeren Abweichungen im Stadtgebiet Donauwörth lassen sich dadurch erklären, dass die Donau im Jahr 1999 bereits im Februar einen Abfluss über $900 \text{ m}^3/\text{s}$ aufwies, was insbesondere im Gebiet von Donauwörth zu Ausuferungen und Überflutungen der Vorländer führte. Für das Februar-Hochwasser liegen keine hydraulischen Berechnungen oder gemessene Oberflächenwasserspiegel vor, weshalb die Überflutungsgebiete im Grundwassermodell nicht berücksichtigt sind (keine Infiltration aus den Vorländern). Dies zeigt sich bei der Messstelle HWF-Don P2 in Abbildung 44: Während das Mai-Hochwasser gut nachgebildet wird, wird das Februar-Hochwasser im Modell nicht richtig abgebildet.

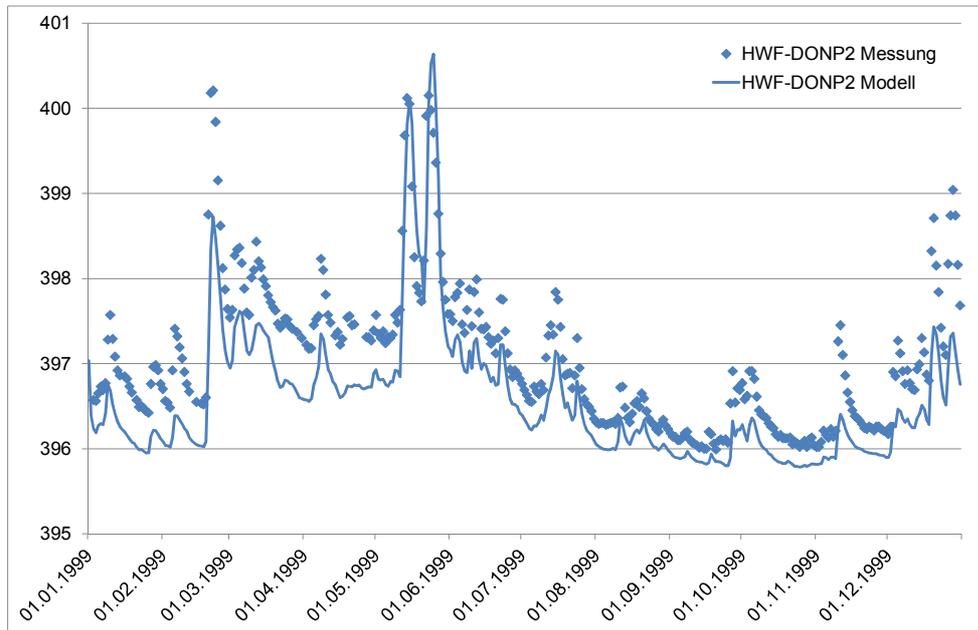


Abbildung 44: Ganglinie der gemessenen und berechneten Grundwasserstände in Donauwörth.

RIED B2, RIED B4

In den 1980er Jahren wurden in Donauwörth für den Hochwasserschutz beidseitig der Donau Dichtwände gebaut (siehe Abbildung 45). Die beiden Messstellen RIED B2 und RIED B4 befinden sich südlich der rechtsseitigen Dichtwand. Die Dichtwände sind im regionalen Modell nicht enthalten. Abweichungen zwischen Modell und Messung sind daher möglich. Donauwörth liegt jedoch nicht im Einflussbereich der Rückhalteräume.

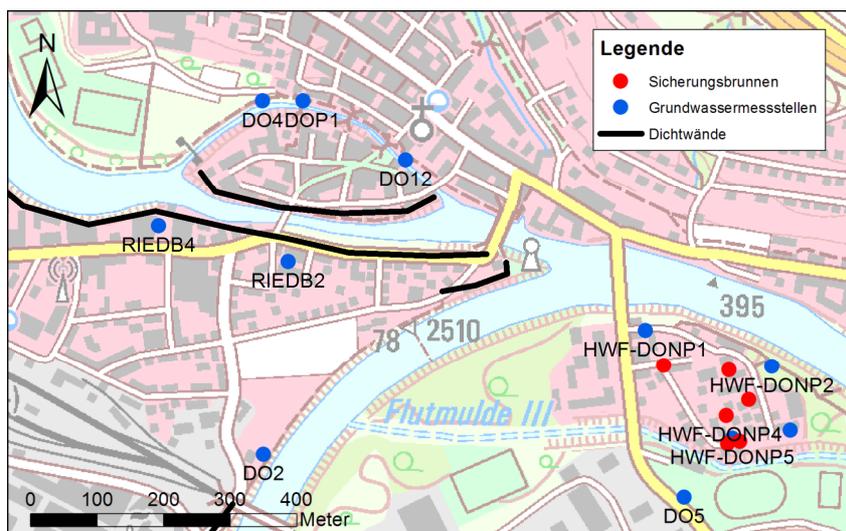


Abbildung 45: Situation mit Dichtwänden und Sicherungsbrunnen in Donauwörth

5 Charakterisierung der Grundwassersituation mit dem Modell

5.1 Grundwasserspiegel

Ein Grundwasserspiegel bei Niedrigwasserstand, Mittelwasserstand und Hochwasserstand ist in den Anlagen 5.2.5 bis 5.2.7 dargestellt. Die Abbildung 46 zeigt die Differenz zwischen Hochwasserstand und Niederwasserstand. Die größten Differenzen treten entlang der Donau, der Wörnitz und der Iller auf. Im Gebiet von Langenau verursachen Karstzuflüsse große zeitliche Schwankungen des Grundwasserspiegels.

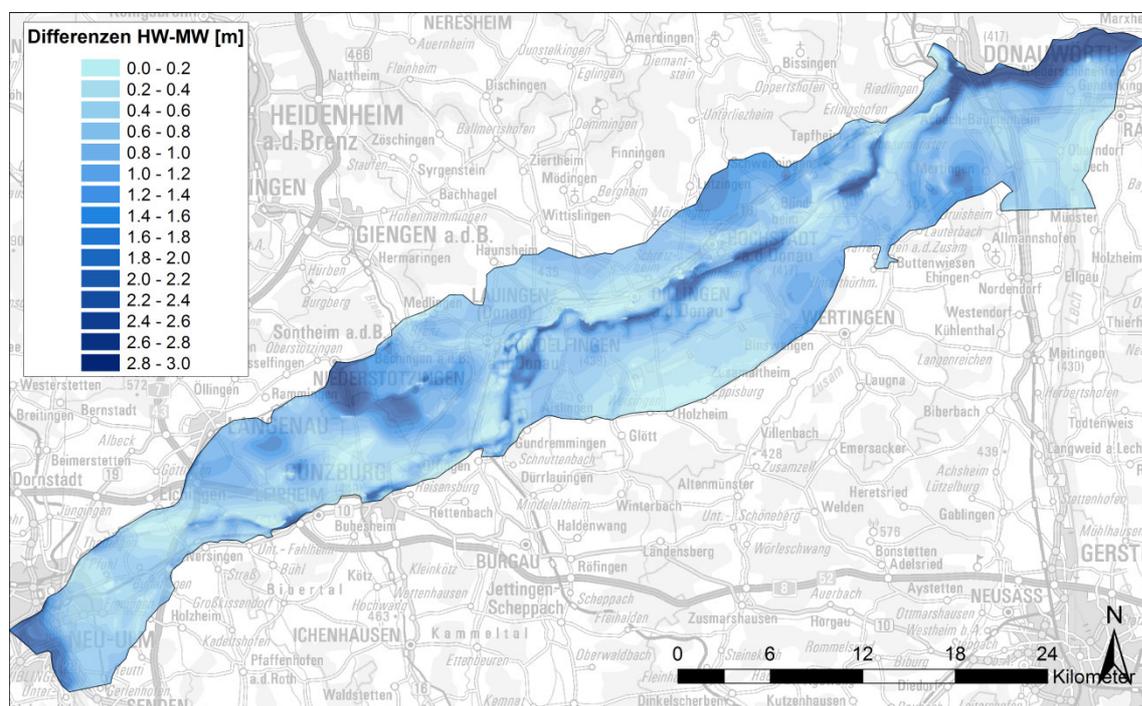


Abbildung 46: Differenz zwischen den Grundwasserständen am 04.06.2013 (bei einem 10-20-jährlichen Hochwasser der Donau) und 04.10.2015 (Niedrigwasserstand)

Der Flurabstand bei mittlerem Grundwasserstand ist in Abbildung 47 dargestellt. Der Flurabstand ist praktisch im gesamten Gebiet des Niederterrassenschotter sehr klein. Auffällig sind besonders die kleinen Flurabstände im Leipheimer Moos.

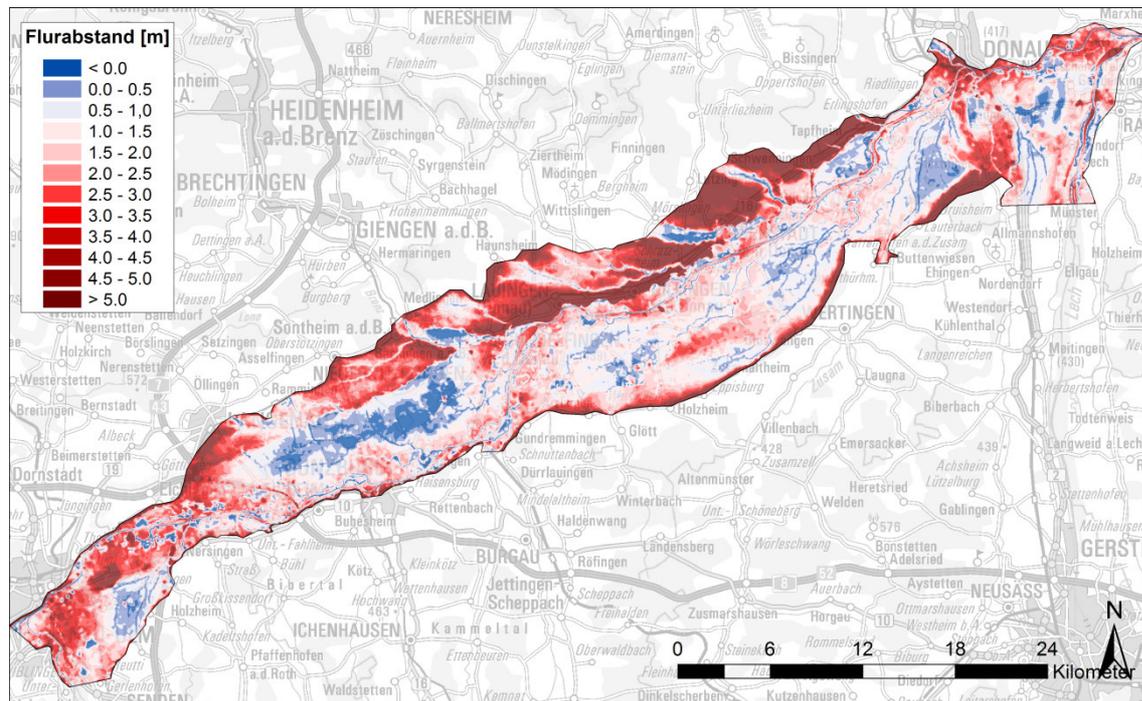


Abbildung 47: Flurabstand bei in etwa mittlerem Grundwasserstand am 21.03.2015

5.2 Fließgeschwindigkeiten

Zur Visualisierung der Strömungsverhältnisse werden die Darcy-Geschwindigkeiten als Pfeile in Strömungsrichtung dargestellt. Daraus sind sowohl die Fließrichtung, als auch die Strömungsmenge ersichtlich. Abbildung 48 zeigt den Zustand beim Hochwasser 2013, Abbildung 49 bei Niedrigwasser im Herbst 2015 (siehe auch Anlagen 5.2.8 und 5.2.9).

Aus den Darstellungen wird ersichtlich, dass die Strömung großräumig vom Talrand zur Donau, resp. zu den hinter den Dämmen angeordneten Gräben gerichtet ist. Im Bereich des Donaurieds ist die Strömung fast parallel zur Donau gerichtet. In Donau-nähe ist das Strömungsbild differenzierter. Aus den Stauhaltungen infiltriert Wasser ins Grundwasser. Dort wird es teilweise durch die Gräben drainiert, teilweise umströmt es die Staustufen und exfiltriert zurück in die Donau. Bei Hochwasser findet entlang der Donau eine Strömungsumkehr statt. Auch aus dem Unterwasser der Staustufen infiltriert kurzfristig Wasser ins Grundwasser. Die meisten Nebengewässer der Donau werden im Hochwasserzustand zu Infiltranten.

Da aus den Übersichtsdarstellungen die kleinräumige Strömung nicht ersichtlich ist, wird in Abbildung 50 ein Ausschnitt in größerer Auflösung dargestellt. Auffällig sind die großen Wassermengen, welche nach der Staustufe von der Donau drainiert werden.

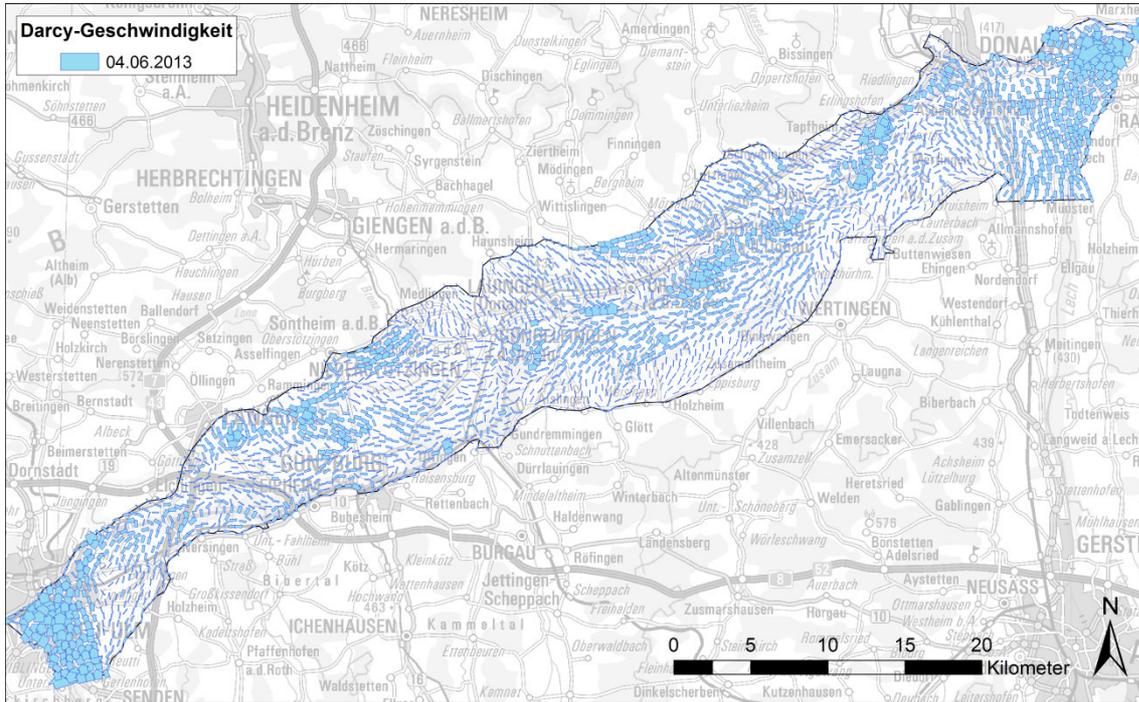


Abbildung 48: Darcy-Geschwindigkeiten bei Hochwasser in der Donau

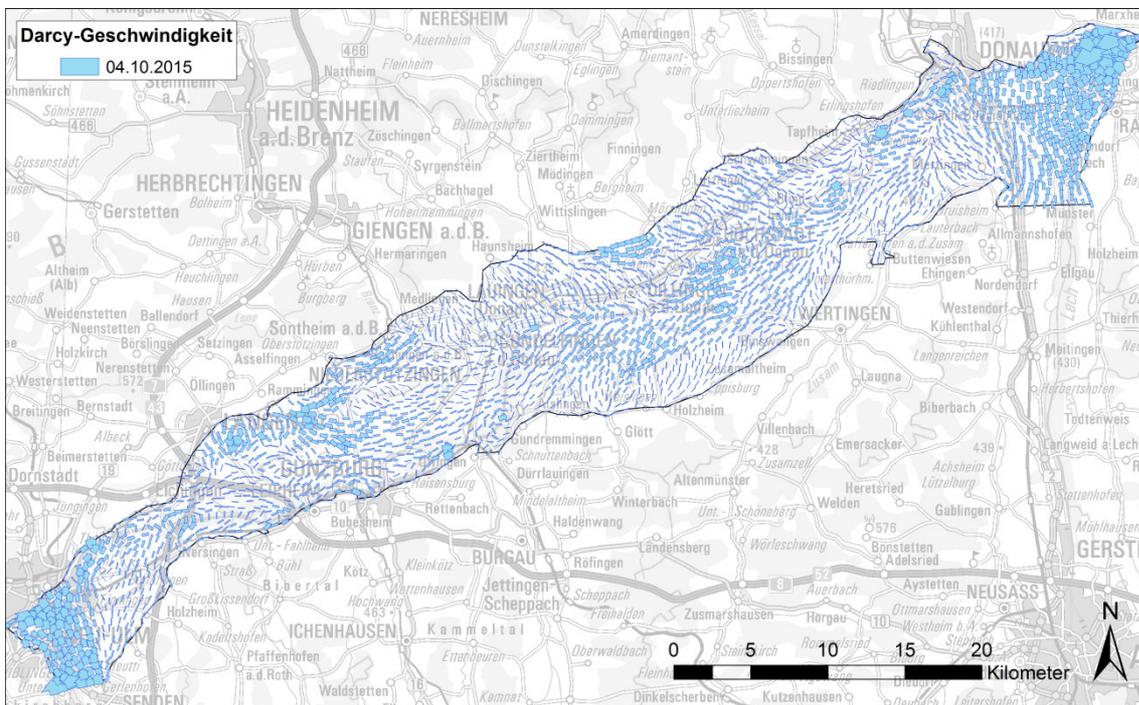


Abbildung 49: Darcy-Geschwindigkeiten bei Niedrigwasserstand

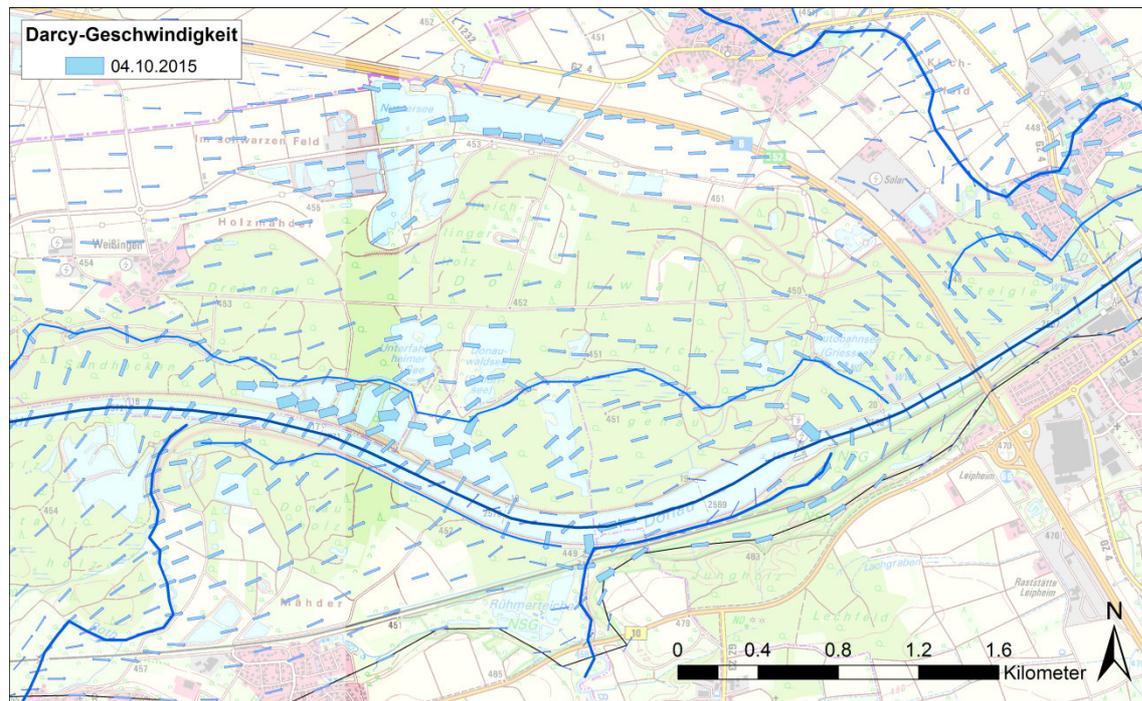


Abbildung 50: Darcy-Geschwindigkeiten bei Niedrigwasserstand in einem Modellausschnitt bei Leipheim

5.3 Wasserbilanz

Abbildung 51 zeigt die Wasserbilanz über das Jahr 2015. Am meisten Grundwasser wird durch Infiltration aus den Gewässern neu gebildet. Dabei beträgt der Anteil der Donau 40%, der der übrigen Gewässer (Nebengewässer der Donau und Gräben) 60%. Seitenzufluss, Karstzufluss und Neubildung aus Niederschlag tragen zusammen etwa gleich viel bei wie die Infiltration aus den übrigen Gewässern. Bei den Abflüssen liegt die Exfiltration in Gewässer deutlich vor den Entnahmen über Brunnen. Die in Brunnen entnommene Wassermenge wird, über das gesamte Modellgebiet betrachtet, in etwa durch Neubildung aus Niederschlag ausgewogen.

Abbildung 52 zeigt die Wasserbilanz des Jahres 2013. Die Überflutung beim Hochwasser Anfang Juni erhöht die Infiltrationen der übrigen Gewässer und die Grundwasserneubildung. Gegenüber 2015 ist insbesondere die Exfiltration in den übrigen Gewässern erhöht. Diese Gewässer drainieren das aus der Überflutung stammende Grundwasser. In Abbildung 53 und Abbildung 54 sind die zeitlichen Verläufe der Infiltration und Exfiltration für die Donau und die übrigen Gewässer dargestellt. Aufgrund der Staustufen ist die In- und Exfiltration aus dem Flussschlauch der Donau über das Jahr fast konstant.

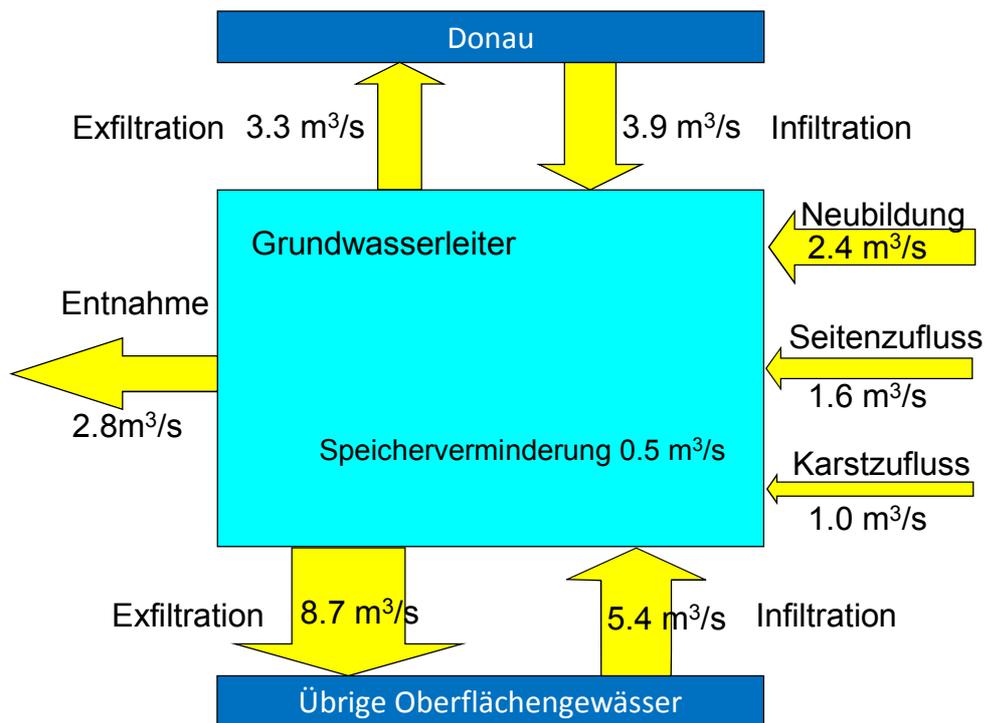


Abbildung 51: Wasserbilanz des Jahres 2015

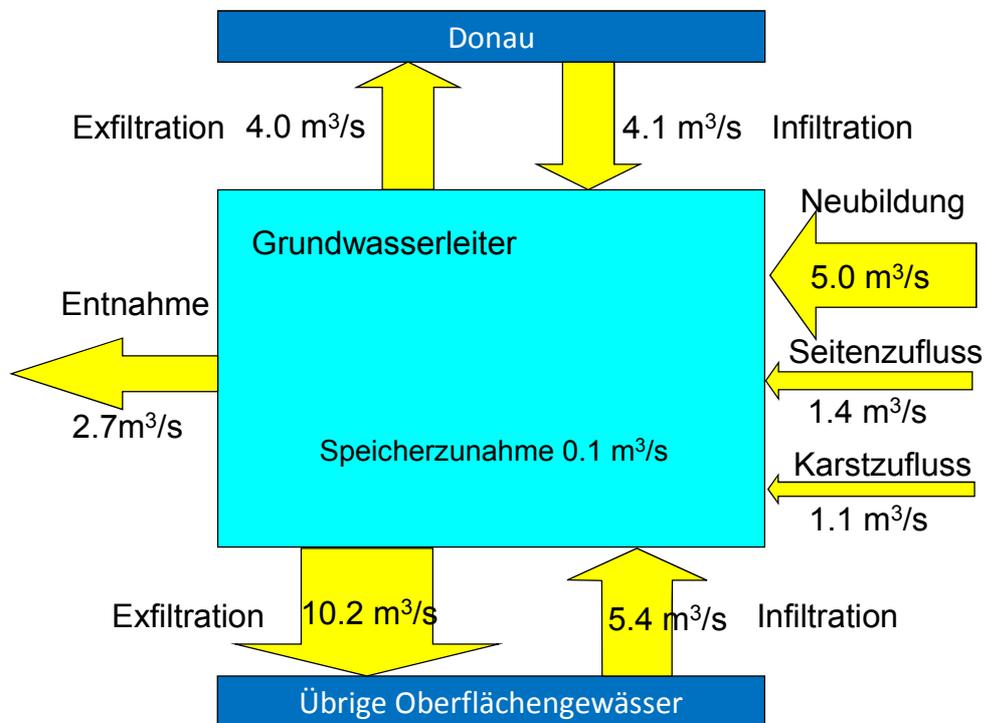


Abbildung 52: Wasserbilanz des Jahres 2013

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

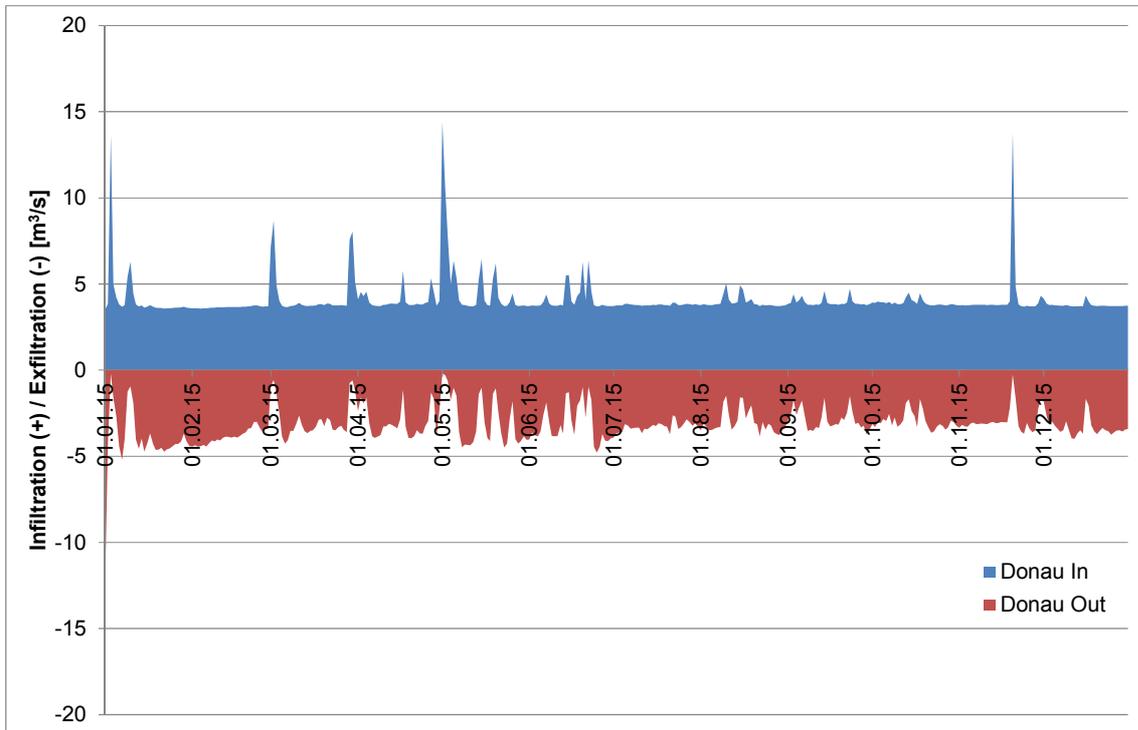


Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf der Infiltration / Exfiltration der Donau im Jahr 2015

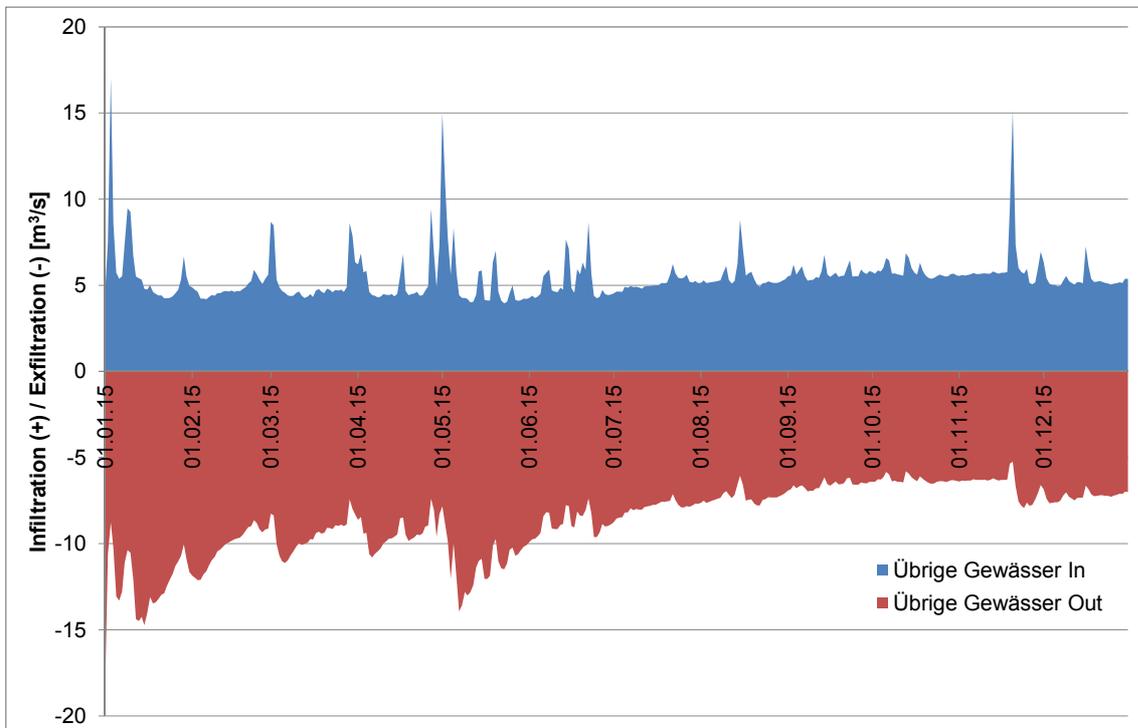


Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der Infiltration / Exfiltration der übrigen Gewässer im Jahr 2015

[Mio. m ³]	Numerisches Modell (2015)		HGM, Modellkonzepte	
	Zustrom	Abstrom	Zustrom	Abstrom
Neubildung	77		115	
Seitenzufluss	50		36	
Fördermengen		85		85
Summe Karstzufluss	32		92	
Exfiltration in Gewässer		90		168
Speicherverminderung	16			
Summe	175	175	243	253

Tabelle 8: Vergleich der Wasserbilanz des numerischen Modells mit der Prognose aus dem hydrogeologischen Modell

In Tabelle 8 wird die Wasserbilanz des numerischen Modells mit der Prognose aus dem Bericht zum hydrogeologischen Modell (Anlage 5.1) verglichen. Beim Vergleich fällt die geringere Neubildung aus Niederschlag auf. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass der kapillare Wiederaufstieg im numerischen Modell berücksichtigt wurde. Es ist jedoch zu beachten, dass das numerische Modell auch nur das eher trockene Jahr 2015 umfasst, während die Prognose ein langjähriges Mittel darstellt.

Für den Karstzufluss konnte im hydrogeologischen Modell lediglich eine sehr grobe Schätzung vorgenommen werden. Das kalibrierte Modell liefert deutlich tiefere Werte. Der im numerischen Modell höhere Seitenzufluss ist auf einen höheren Zufluss im Illertal zurückzuführen. Da der Illerschotter eine hohe Durchlässigkeit aufweist, strömt dem Grundwassermodell viel Grundwasser zu.

6 Sensitivitätsuntersuchungen

6.1 Sensitivitäten der automatischen Kalibrierung

Das Programm PEST gibt für jede Durchlässigkeits- und Leakagezone einen normalisierten Wert für die Sensitivität des Kalibrierungsziels (Minimierung der Quadrate der Abweichungen von den Messungen) auf eine Veränderung des Zonenparameters aus. Diese Werte sind in Abbildung 55 und Abbildung 56 dargestellt. Eine große Sensitivität bedeutet, dass der Parameter der jeweiligen Zone aufgrund der vorhandenen Messungen gut bestimmbar ist.

Aus den Darstellungen wird ersichtlich, dass das Kalibrierungsziel besonders stark durch die Durchlässigkeit im Bereich der Trinkwasserförderung der LW Stuttgart im Gebiet von Langenau beeinflusst wird. Sensitiv reagiert das Kalibrierungsziel auch auf die Leakagewerte der Gewässer in diesem Gebiet sowie auf die Donau und deren Nebengewässer.

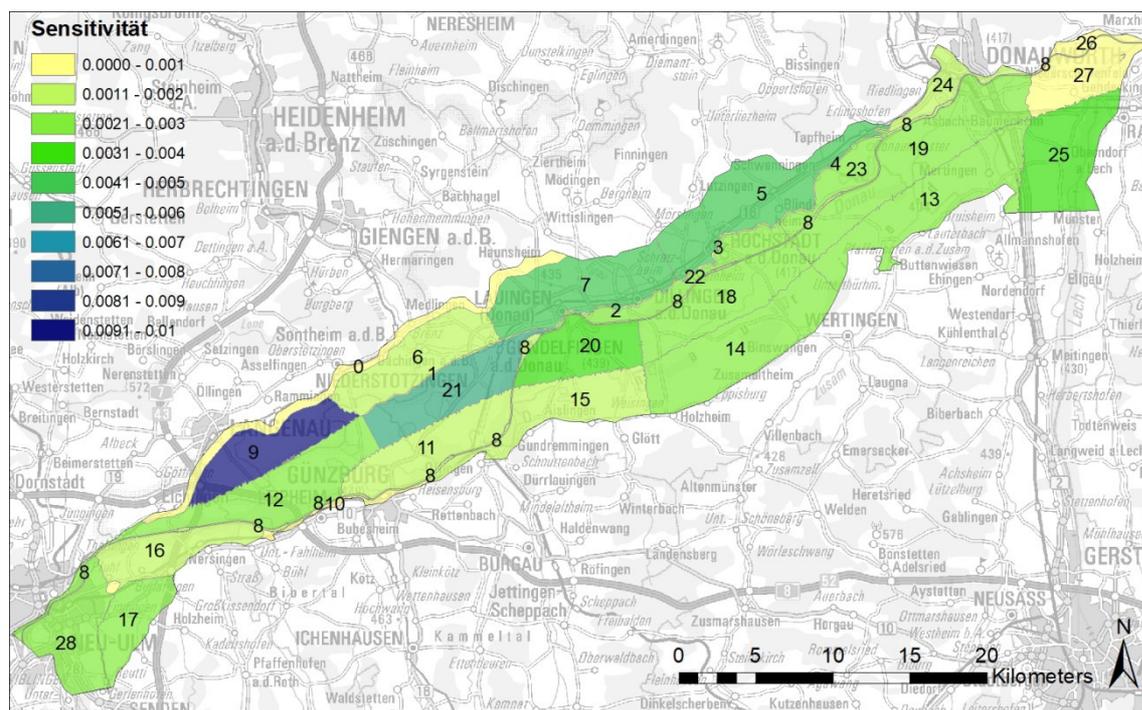


Abbildung 55: Sensitivitätswerte der Durchlässigkeitszonen nach Doherty [3]

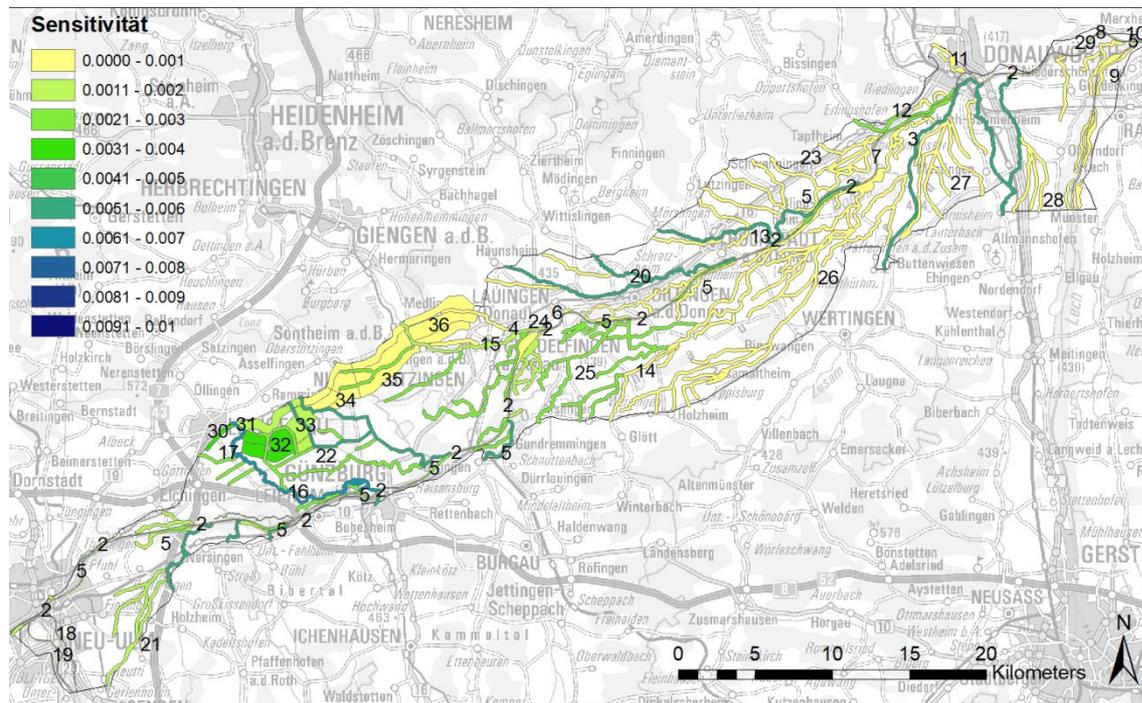


Abbildung 56: Sensitivitätswerte der Leakagezonen nach Doherty [3]

6.2 Fallstudien

Durch Sensitivitätsuntersuchungen wurde die Empfindlichkeit des Modells auf einige Modellannahmen untersucht. Es wurden folgende Fallstudien durchgeführt:

- Es wurde angenommen, dass sich der Grundwasserspiegel bei Erreichen der Deckschichtunterkante gespannt verhält. Dies wird im Modell realisiert, indem der Speicherkoeffizient bei einer Grundwasserspiegellage innerhalb der Deckschicht von 10% auf 1% reduziert wird.
- Der kapillare Wiederaufstieg wird aus dem Modell entfernt.
- Die Qualmwasser-Randbedingungen werden aus dem Modell entfernt.
- Die Deckschichtdurchlässigkeit wird um einen Faktor von 10 vergrößert.

6.3 Resultate

Teilgespannte Verhältnisse

Abbildung 57 zeigt den Vergleich zwischen den Modellresultaten mit und ohne Reduktion des Speicherkoeffizienten bei Erreichen der Deckschicht. Größere Differenzen ergeben sich im Bereich des Riedstroms, an einigen Stellen entlang des Modellrandes, sowie in Donauwörth und entlang der Zusam.

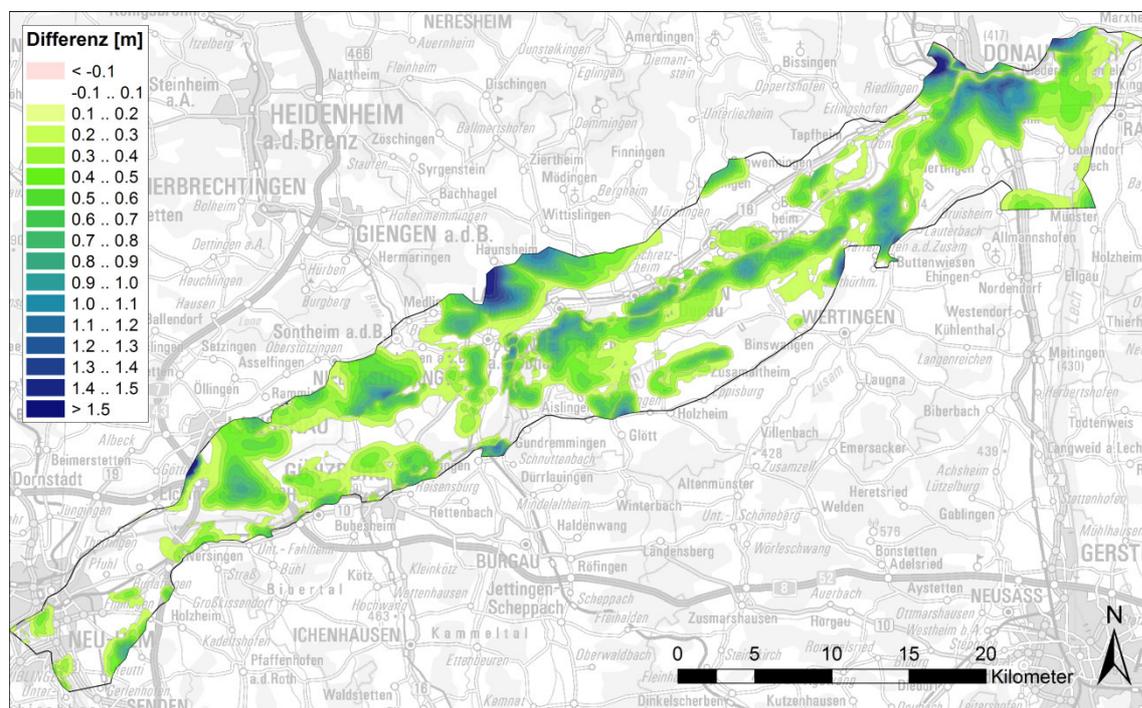


Abbildung 57: Differenz der maximalen Grundwasserspiegel für den Fall mit und ohne teilgespannte Verhältnisse während des Hochwasserdurchgangs im Jahr 2013

Zur Visualisierung der Auswirkung wurden zwei Messstellen im Gebiet des Rückhalte-raums Helmeringen ausgewählt. Das Modell, welches teilgespannte Verhältnisse simuliert, zeigt viel größere Grundwasserspiegelschwankungen als jenes mit freiem Grundwasserspiegel. An der dargestellten Stelle stimmt das Modell mit freiem Grundwasserspiegel besser mit den Messdaten überein als das teilgespannte.

Die Auswirkungen auf die räumliche Verteilung der Übereinstimmung von Modell und Messung werden in Abbildung 59 dargestellt. Zur Beurteilung wird nur die Übereinstimmung des maximalen Wasserstandes während des Hochwasserdurchgangs im Jahr 2013 betrachtet. An vielen Stellen (gelbe Punkte) bleibt die Übereinstimmung bei Annahme teilgespannter Verhältnisse gleich gut. An einigen Stellen wird sie besser, an einigen schlechter. Es ergibt sich kein klares räumliches Bild. Dieser Parameter muss deshalb beim Modelleinsatz für die Rückhalteräume in einer Sensitivitätsanalyse variiert werden.

Grundwasser – Modellaufbau und -anpassung

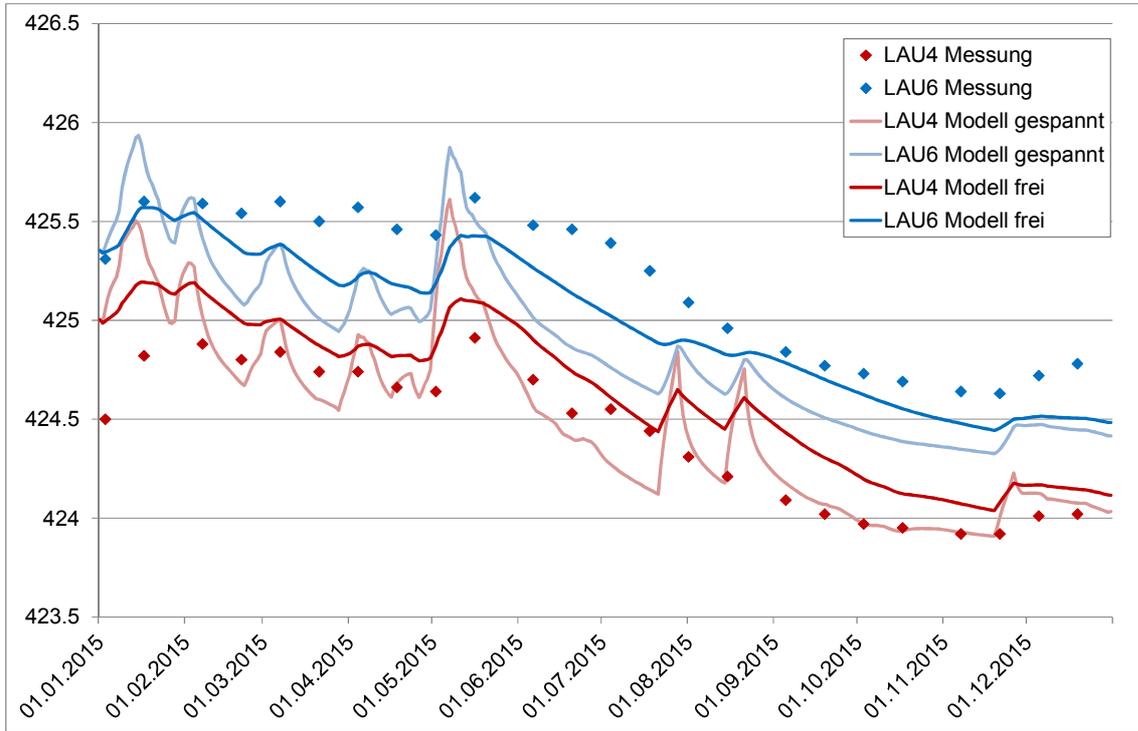


Abbildung 58: Vergleich der Grundwasserganglinie bei gespanntem und freiem Grundwasserspiegel

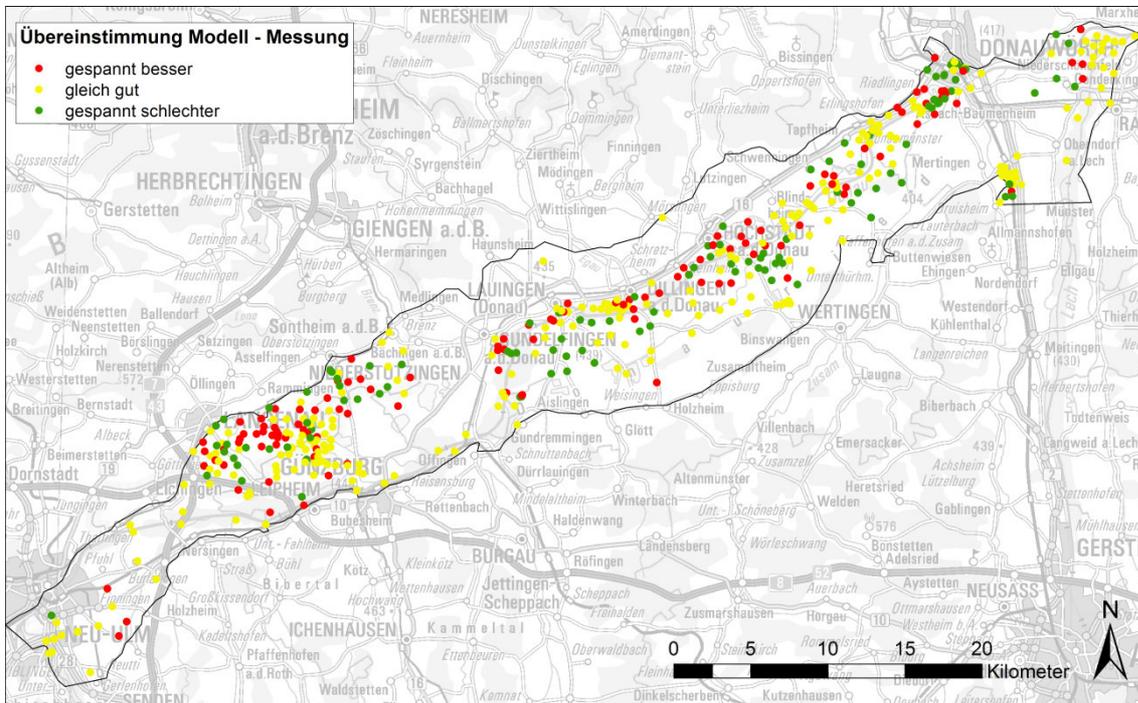


Abbildung 59: Veränderung der Güte der Übereinstimmung der Hochwasserspitze bei Berücksichtigung von teilgespannten Verhältnissen

Kapillarer Wiederaufstieg

Die Auswirkungen eines kapillaren Wiederaufstiegs sind am Ende des Sommers am deutlichsten sichtbar. In Abbildung 60 sind die Auswirkungen für den 05.10.2015, bei einem Niedrigwasserzustand, visualisiert. Der kapillare Wiederaufstieg bewirkt in den betroffenen Gebieten eine Absenkung des Grundwasserspiegels. Da in diesen Gebieten das Modell ohne kapillaren Wiederaufstieg eher zu hohe Wasserspiegel aufweist, wird die Annahme eines kapillaren Wiederaufstiegs bestätigt.

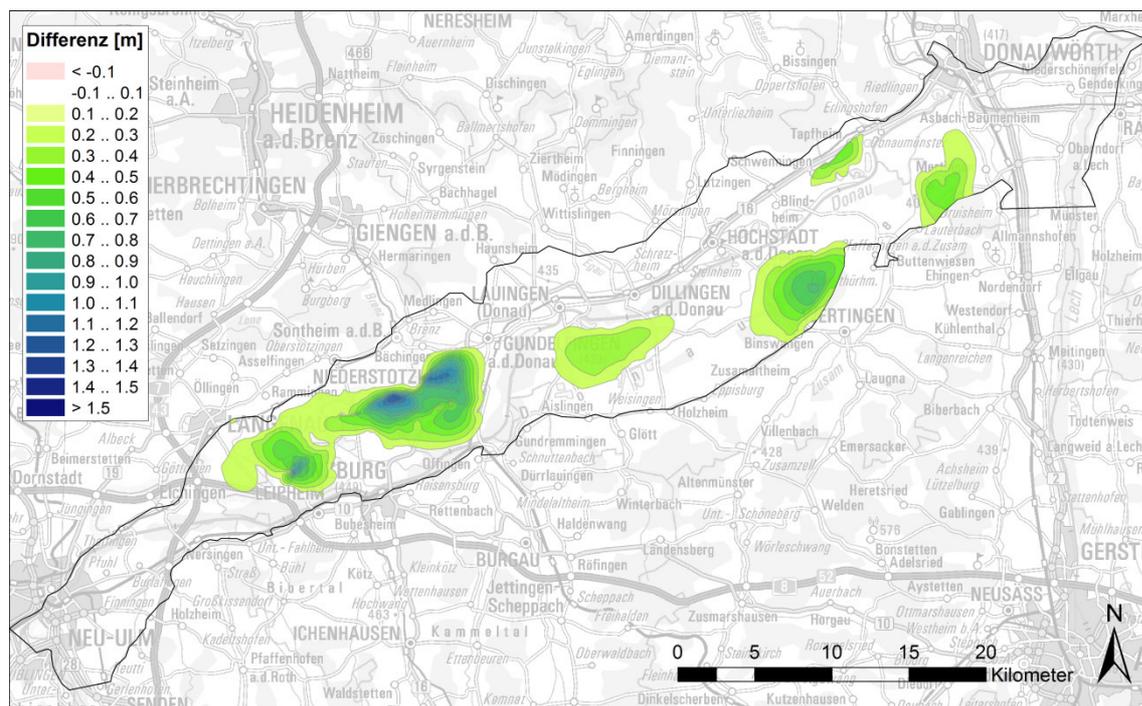


Abbildung 60: Differenz zwischen der Fallstudie ohne kapillaren Wiederaufstieg und Referenz mit kapillarem Wiederaufstieg am 15.08.2015

Qualmwasser-Randbedingungen

Abbildung 61 zeigt die Differenz der maximalen Grundwasserstände zwischen der Fallstudie ohne Qualmwasser-Randbedingung und der Referenz mit Qualmwasser-Randbedingung für den Hochwasserdurchgang 2013. Die Qualmwasser-Randbedingung führt zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels im Bereich westlich der Staustufe Faimingen. Die Güterwerte der Kalibrierung werden durch die Annahmen zur Qualmwasser-Randbedingung nicht beeinflusst, da im betroffenen Gebiet keine Messstellen vorhanden sind. Beim Modelleinsatz sollte die Qualmwasser-Randbedingung berücksichtigt werden, da sie physikalisch begründet ist.

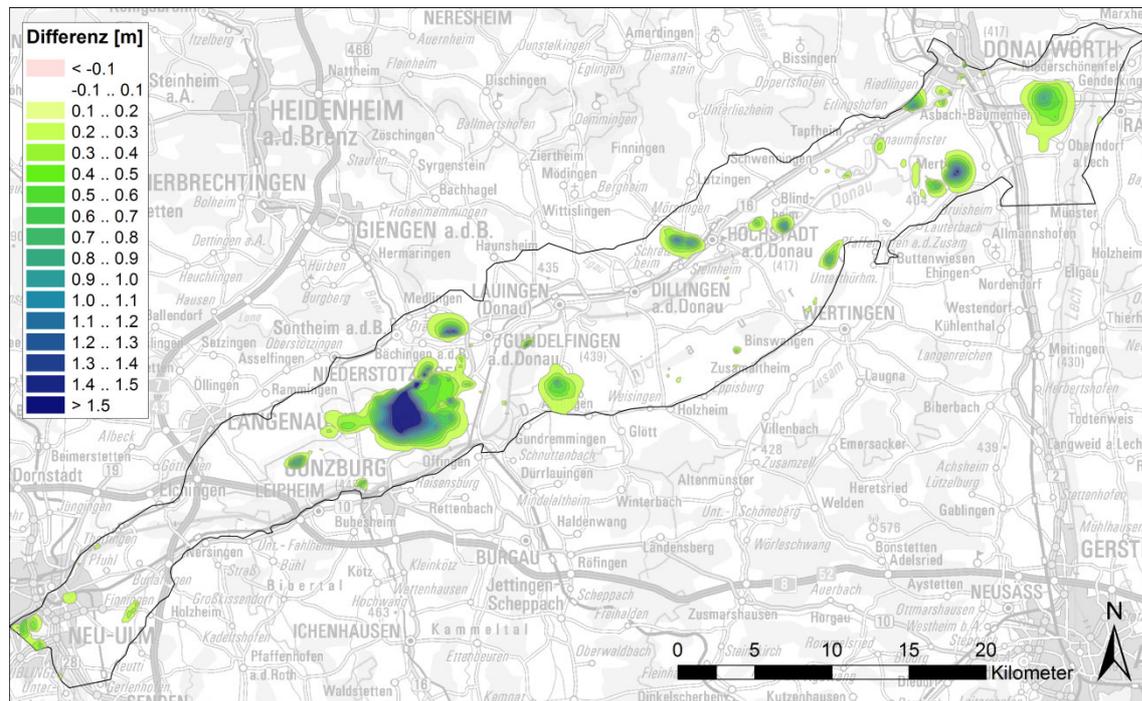


Abbildung 61: Differenz der maximalen Grundwasserspiegel zwischen dem Fall ohne
Qualmwasser-Randbedingung und der Referenz mit Qualmwasser-
Randbedingung während des Hochwasserdurchgangs im Jahr 2013

Deckschichtdurchlässigkeit

In den überfluteten Gebieten des Riedstroms bewirkt die Deckschicht einen Widerstand gegen die Einsickerung des Wassers in den Untergrund. Der aus der Kalibrierung resultierende Wert für die Deckschichtdurchlässigkeit beträgt 1×10^{-7} m/s. Für die Sensitivitätsuntersuchung wurde der Wert auf 1×10^{-6} m/s erhöht. Abbildung 62 zeigt die dadurch verursachten Unterschiede der maximalen Grundwasserspiegel während des Hochwasserdurchgangs im Jahr 2013. Die Grundwasserstände sind in beiden Fällen praktisch gleich hoch. Dies ist darauf zurückzuführen dass die Gräben in die Deckschicht einschneiden, oder diese durchtrennen, und damit eine höhere Durchlässigkeit aufweisen als die übrigen Deckschichtbereiche. Die Gräben bestimmen deshalb die resultierenden Grundwasserstände maßgebend.

Da die Auswirkungen der Deckschichtdurchlässigkeit im Kalibrierungsfall klein sind, kann aufgrund der Gütwerte der Kalibrierung keine eindeutige Aussage dazu getroffen werden. Deshalb sollte beim Modelleinsatz der höhere und damit ungünstigere Wert verwendet werden. Zudem sollte die Deckschichtdurchlässigkeit beim Modelleinsatz in einer Sensitivitätsstudie variiert werden.

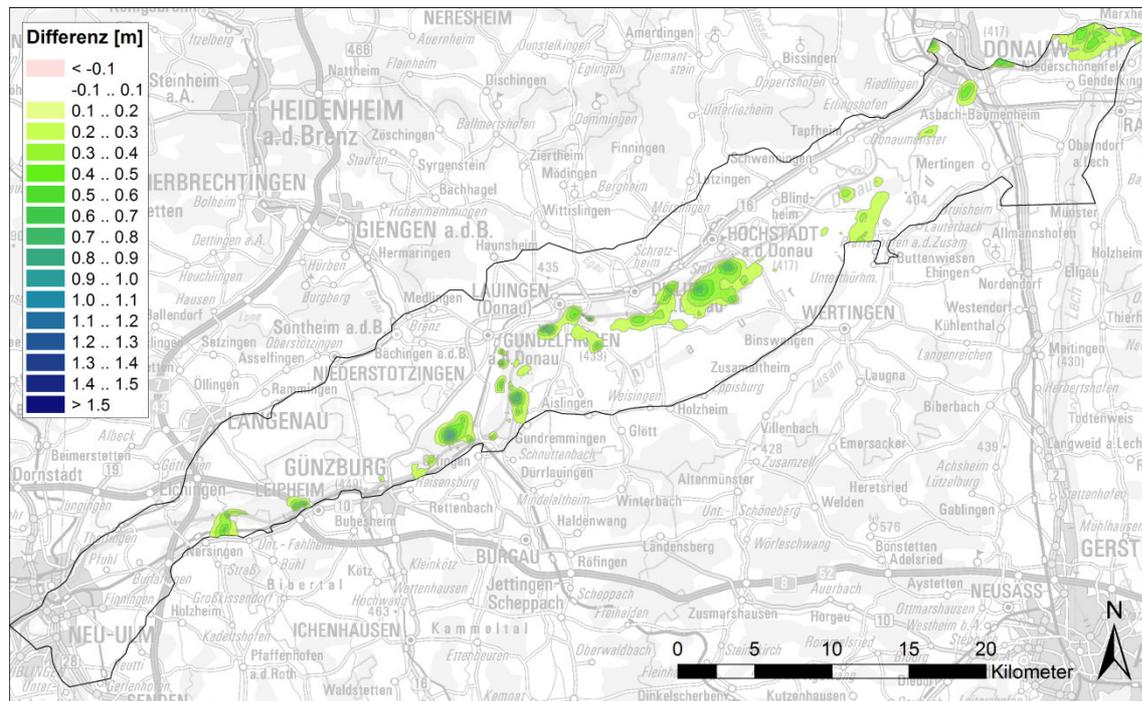


Abbildung 62: Differenz der maximalen Grundwasserspiegel zwischen dem Fall mit Deckschichtdurchlässigkeit 1×10^{-6} m/s und jenem mit 1×10^{-7} m/s während des Hochwasserdurchgangs im Jahr 2013

7 Zusammenfassung

Vom Schottergrundwasserleiter des Donautals zwischen der Iller und dem Lech wurde ein zweidimensionales numerisches Grundwassermodell aufgebaut. Das Grundwassermodell besitzt zeitabhängige Randbedingungen, der Grundwasserspiegel wird als frei betrachtet. Die Schichtflächen und Randbedingungen wurden aus dem hydrogeologischen Modell übernommen. Mit dem Modell sollen die Auswirkungen der geplanten Rückhalteräume quantifiziert werden.

Für die Anpassung des numerischen Modells lagen umfangreiche Daten bzw. vieljährige Messungen für unterschiedliche Gebietsbedingungen vor. Diese umfassen trockene wie nasse Zeiträume und Donau-Niedrigwasser bis hin zu kleineren Donau-Hochwasserereignissen.

Das Grundwassermodell wurde an den gemessenen Grundwasserständen der Jahre 2013 und 2015 kalibriert. Die Zeiträume umfassen unterschiedliche Systemzustände, da sich im Jahr 2013 ein Hochwasser ereignete, welches zur Aktivierung des Riedstroms führte. Bei der Kalibrierung wurden die Durchlässigkeiten des Untergrunds und

die Sohlendurchlässigkeiten der Gewässer variiert. Dabei wurde ein kombiniertes Verfahren aus manueller und automatischer Kalibrierung eingesetzt.

Mit der Kalibrierung konnte erreicht werden, dass die berechneten Grundwasserstände im Mittel nur etwa 26 cm von den gemessenen Grundwasserständen abweichen. Der Median der Abweichungen liegt bei etwa 20 cm. Nach DVGW W 107 entspricht dies einem mittleren relativen Fehler von 0.3 %.

Das kalibrierte Modell wurde an Messdaten des Jahres 1999 validiert, in welchem sich ebenfalls ein Hochwasser ereignete. Es zeigte sich, dass das Modell in diesem Zeitraum beinahe die gleiche Genauigkeit erreicht wie in den Kalibrierungszeiträumen. Zur Validierung wurden ebenfalls die Abflussmessungen der Stichtage 2017 und 2018 herangezogen, da die untersuchten Gewässer vorwiegend aus dem Grundwasser drainiertes Wasser führen.

Die Abhängigkeit des Modells von verschiedenen Parametern wurde untersucht. Es wurden insbesondere Parameter variiert, welche von Bedeutung für die Anwendungsgebiete des Modells sind. Bei den Fallstudien zu den Rückhalteräumen sollten insbesondere die Deckschichtdurchlässigkeit und das gespannte Verhalten bei Einstau der Deckschicht in die Sensitivitätsanalyse aufgenommen werden.

Aus der Kalibrierung und Validierung des Modells ergaben sich keine Erfordernisse nach einer Anpassung des hydrogeologischen Modells und der Modellkonzepte.

Im Ergebnis liegt mit dem entwickelten, großräumigen numerischen Grundwassermodell ein geeignetes Prognosewerkzeug für die Beurteilung der Auswirkungen der neun Rückhalteräumen in der Donau-Niederung für die landesplanerische Beurteilung dieser Rückhalteräume (Raumordnungsverfahren) vor.

Literatur

- [1] Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (2016), Geländemodell DGM 1 <http://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/gelaende.html>
- [2] Bayrisches Landesamt für Umwelt (2009), Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500'000
- [3] John Doherty (2007): PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual 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] ARGE SKI - Simultec (2017): Donau (Iller bis Lech) – Verbesserung Hochwasserschutz - Datenmanagement und Modelle, Grundwasser – Hydrogeologisches Modell. Im Auftrag des Wasserwirtschaftsamts Donauwörth.
- [7] ARGE SKI - Simultec (2017): Donau (Iller bis Lech) – Verbesserung Hochwasserschutz - Datenmanagement und Modelle, Hydraulik - Modelleinsatz. Im Auftrag des Wasserwirtschaftsamts Donauwörth.
- [8] Wessolek G., Kaupenjohann M, Renger M, Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Rote Reihe, Heft 40, Berlin 2009