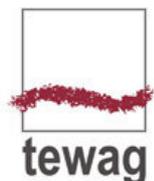




Grundwassermodell Flutpolder Eltheim und Wörthhof

Modellaufbau
Kalibrierung und Validierung

November 2017



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	Grundwasserspiegeldaten des Jahres 2017	45
4.3	Einbezug von Abflussmessungen der Stichtage	47
5	Sensitivitäten	49
5.1	Zielsetzung	49
5.2	Randbedingungen in der Auestufe	49
5.3	Donausohle und Dichtwand	52
6	Zusammenfassung	55
7	Literatur	56

1 Einleitung, Ziel

Situation	An der bayerischen Donau sind gesteuerte Flutpolder zur Verzögerung und Abflachung von Hochwasserspitzen vorgesehen. Im Bereich östlich von Regensburg wurden die Standorte Eltheim und Wörthhof als mögliche Flutpolderstandorte identifiziert. Die Eignung der beiden Standorte soll nun genauer untersucht werden.
Auftrag	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.
Ziele	Mit dem Grundwassermodell sollen folgende Ziele verfolgt werden: <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	Die Arbeiten werden mit drei Teilberichten dokumentiert: <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>

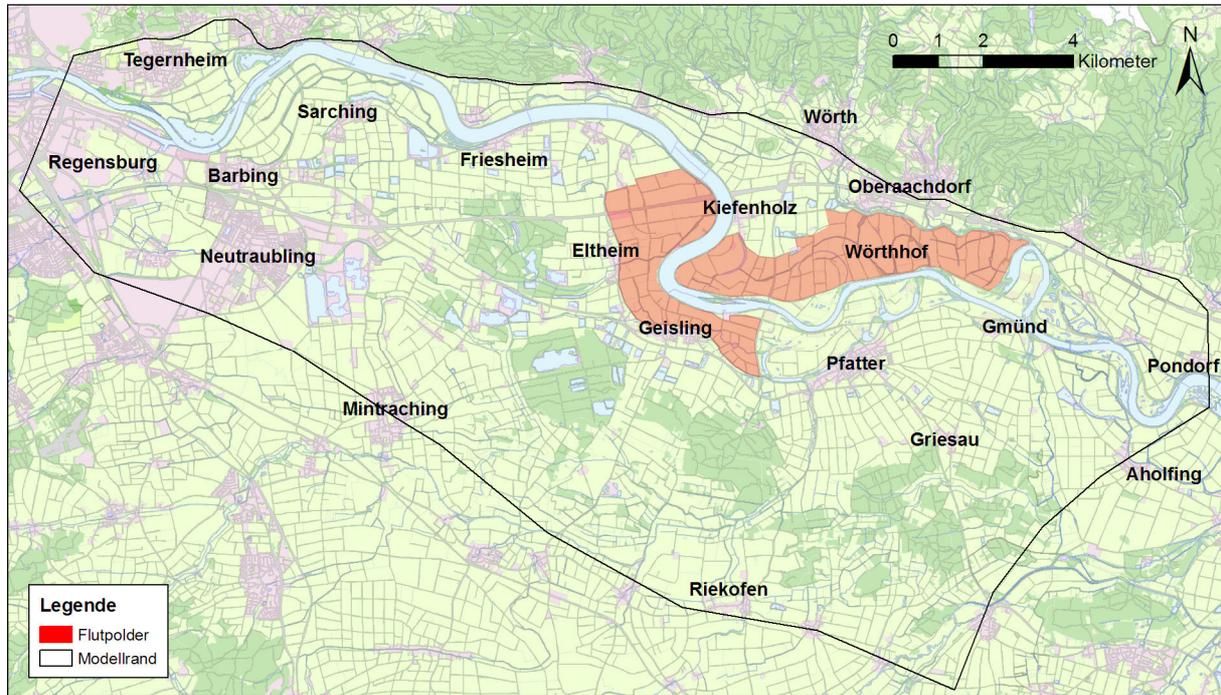


Abbildung 1: Situation mit Modellumriss und Planungsbereiche der Flutpolder.

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.

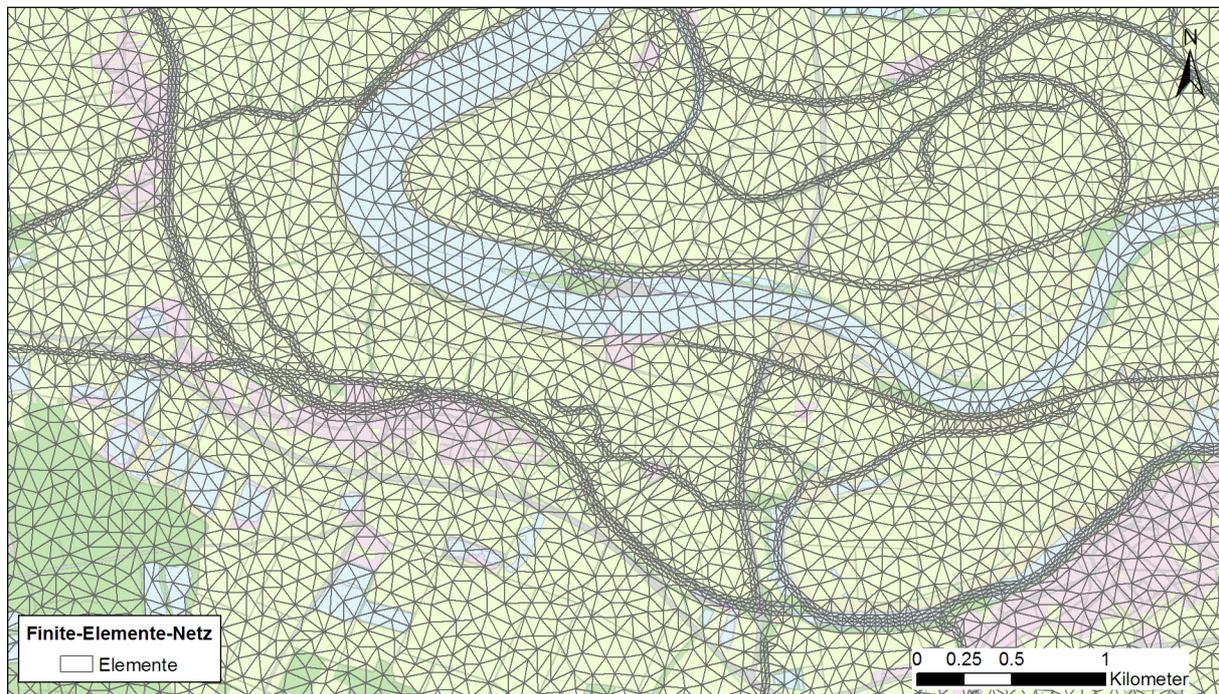


Abbildung 2: Einteilung in finite Elemente in einem Ausschnitt des Modells

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.

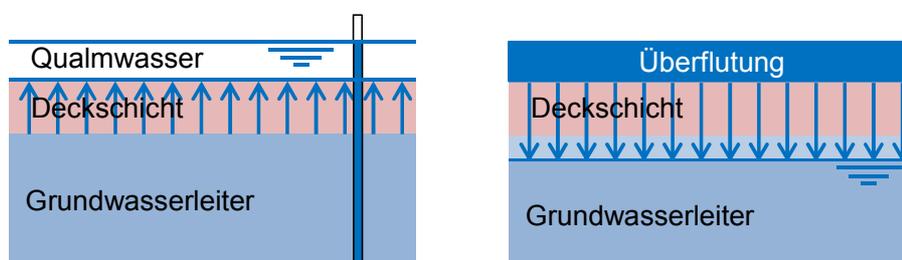


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Situation bei einem Grundwasserpotenzial über der Terrainhöhe (links) und bei Überflutung der Auebereiche.

2.2.2 Randbedingungen

Umsetzung Modell-konzept	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.

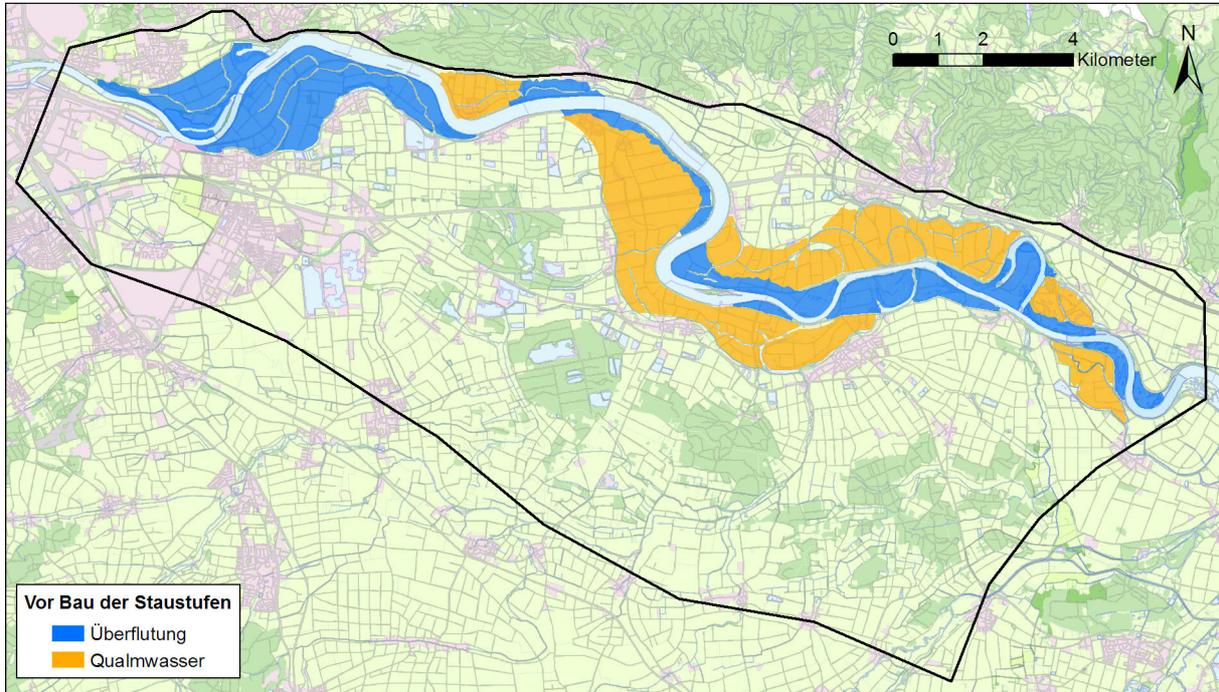


Abbildung 4: Bereiche mit Cauchy-Randbedingung zur Berücksichtigung von Überflutungen und Qualmwasser im Zustand vor dem Bau der Staustufen

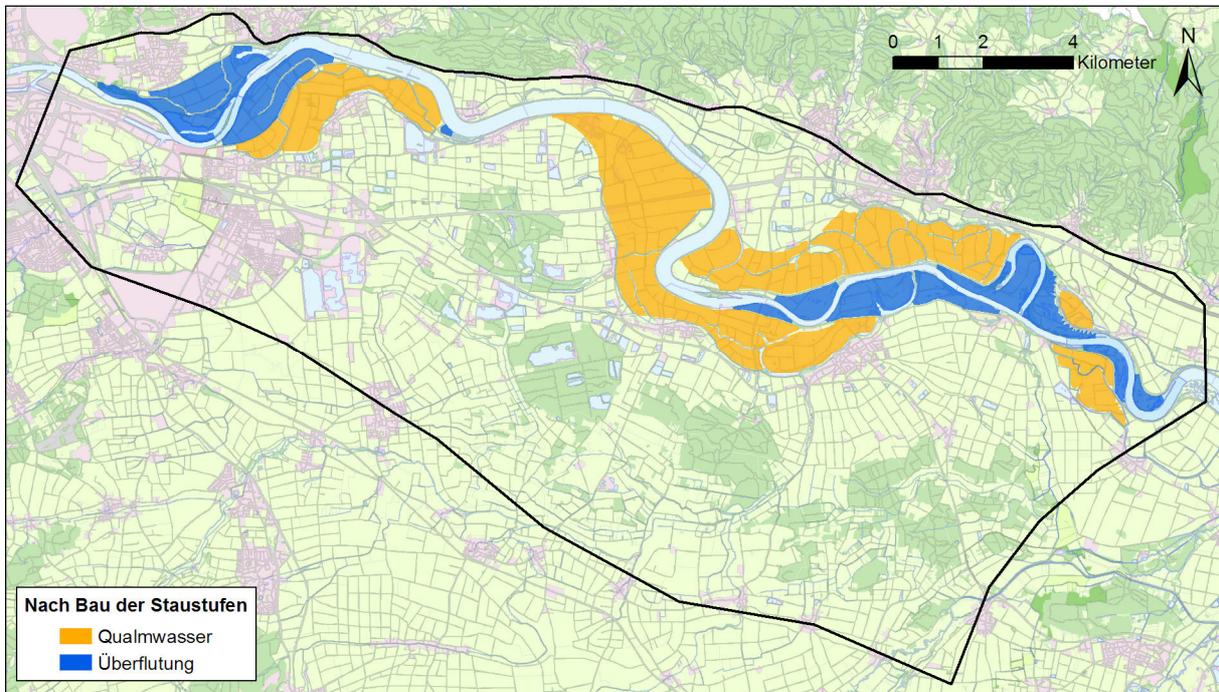


Abbildung 5: Bereiche mit Cauchy-Randbedingung zur Berücksichtigung von Überflutungen und Qualmwasser im Zustand nach dem Bau der Staustufen

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.

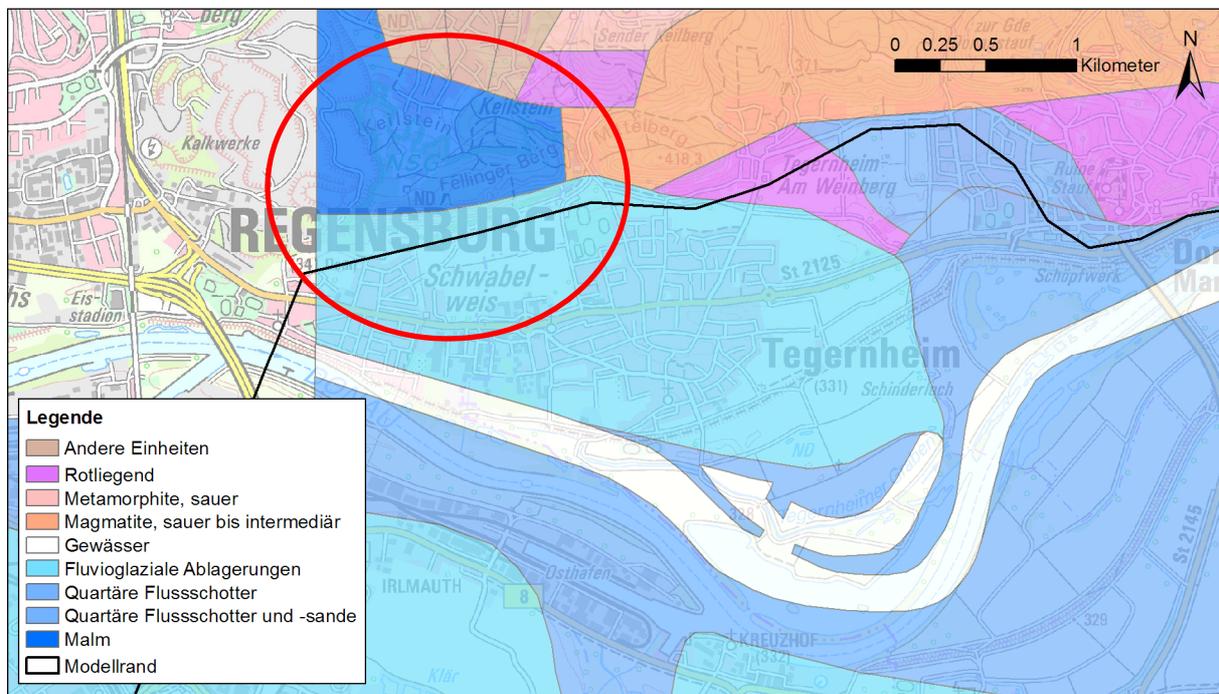


Abbildung 6:

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	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. 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.
-------------	---

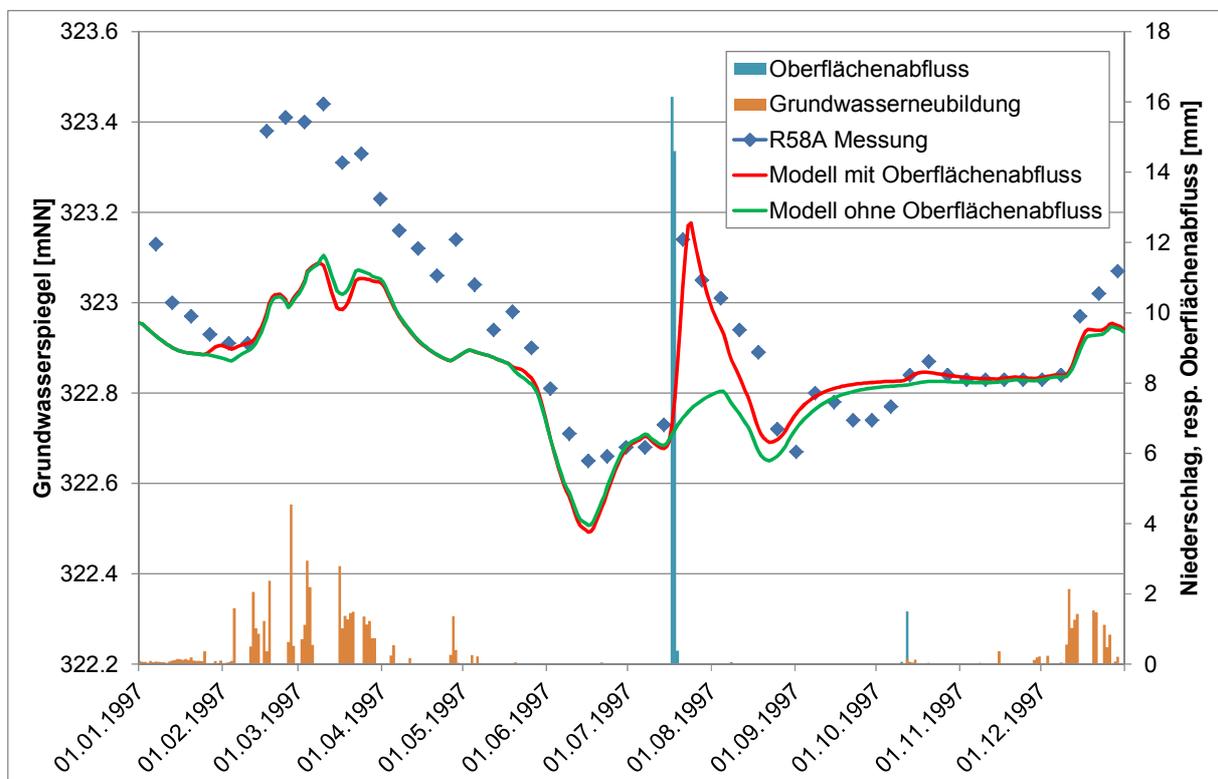


Abbildung 7: Reaktion des Grundwasserspiegels in der Messstelle R58A auf das Niederschlagsereignis im Juli 1997

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.

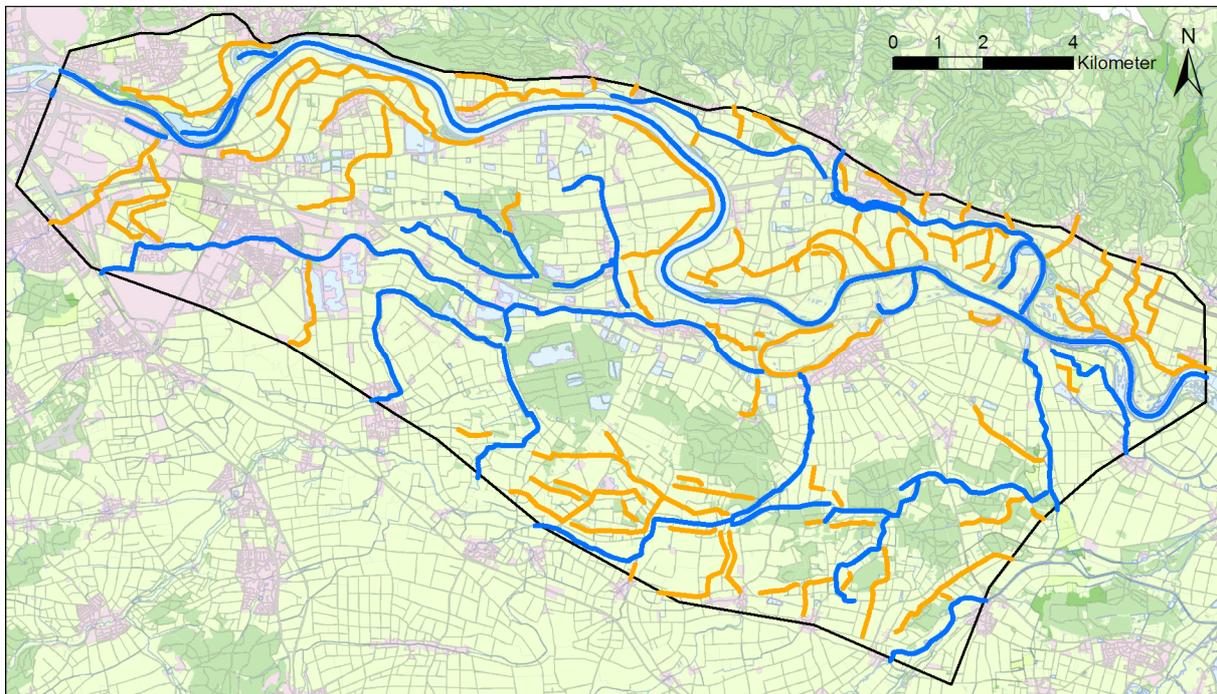


Abbildung 8: Im Modell mit konstantem und zeitabhängigem Wasserspiegel berücksichtigte Gewässer.

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 5 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.

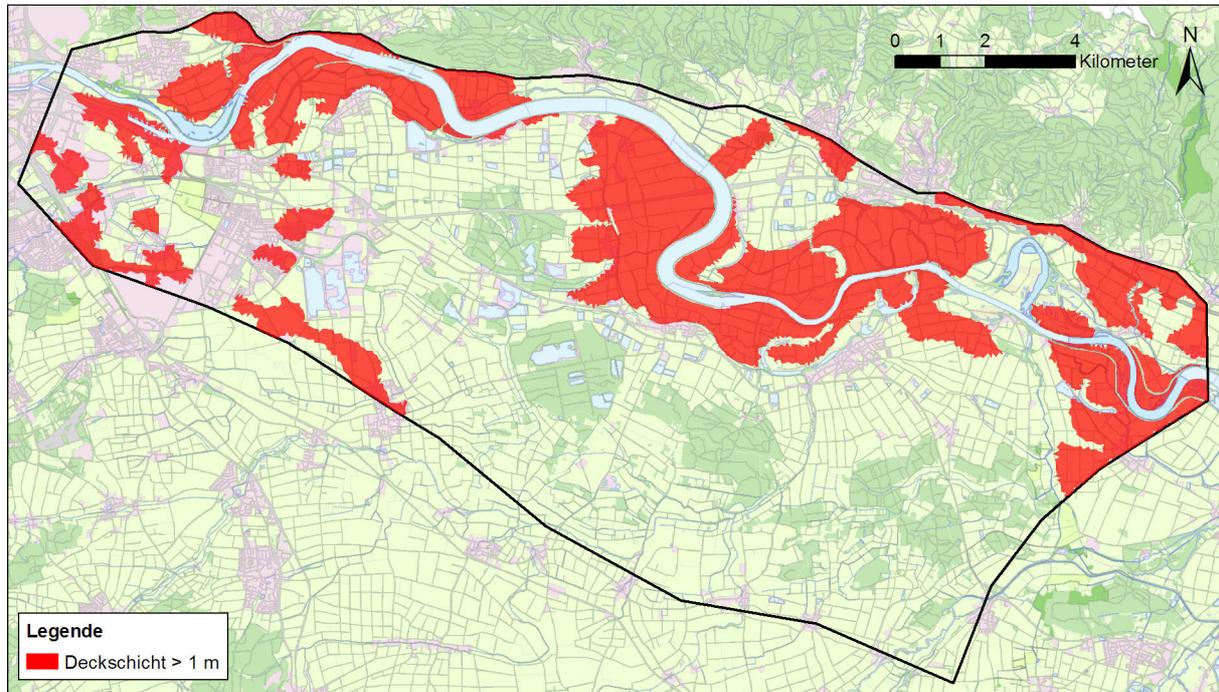


Abbildung 9: Bereiche, in denen die Deckschicht eine Mächtigkeit grösser als 1 m aufweist.

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 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.

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.

Zeiträume Für die automatische Kalibrierung wurden folgende Zeiträume verwendet:

1.1.1976 – 31.12.1976

1.1.1988 – 31.12.1988

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.

Messdaten 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.

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-

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	<p>Einige Durchlässigkeitswerte wurden während der automatischen Kalibrierung auf einem konstanten Wert gehalten. Es handelt sich um folgende Zonen:</p> <ul style="list-style-type: none">- 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	<p>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.</p> <p>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.</p>

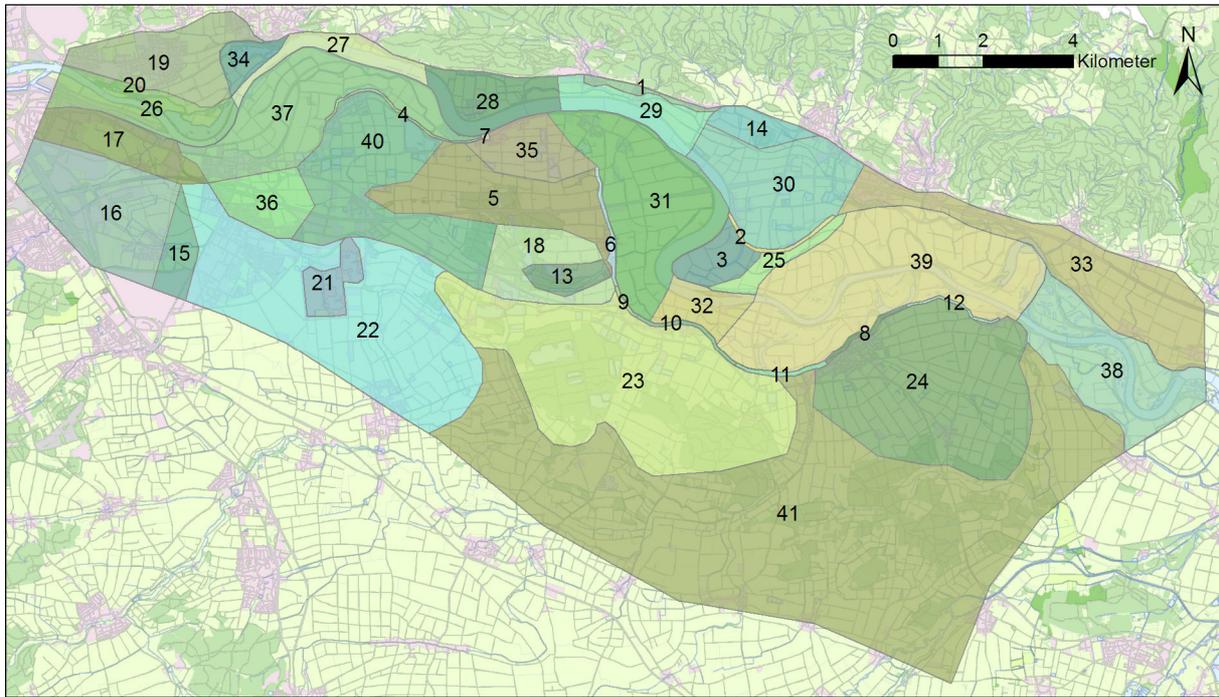


Abbildung 10: Durchlässigkeitszonen der automatischen Kalibrierung.

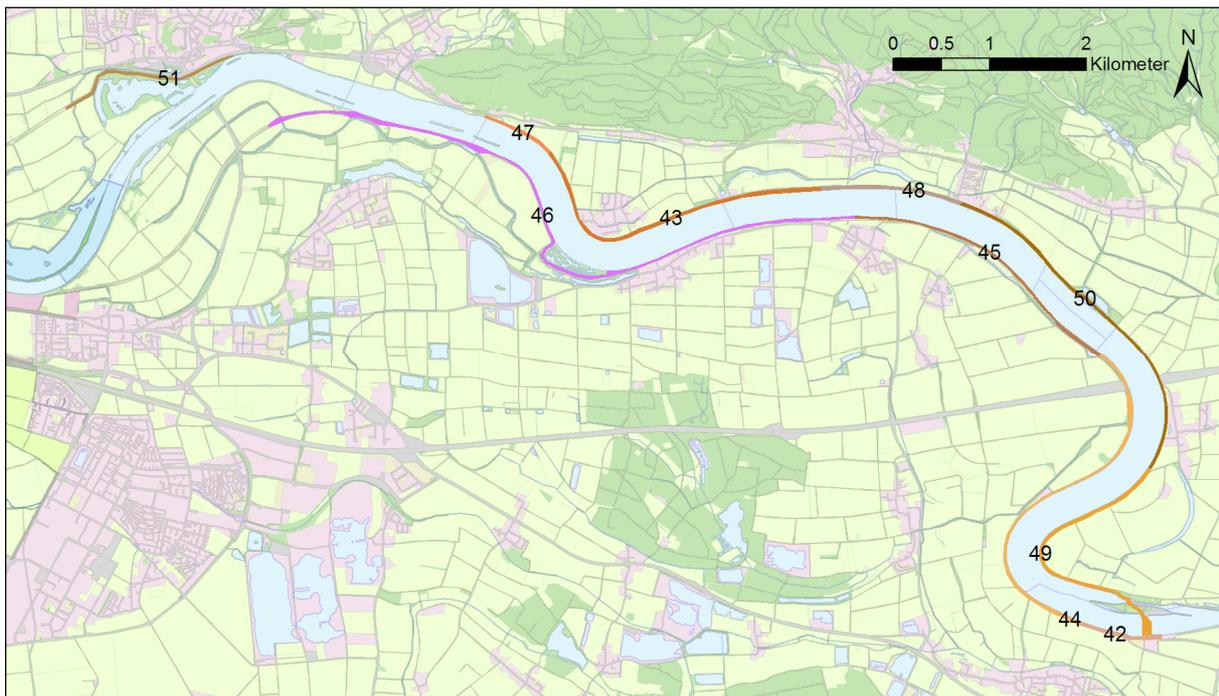


Abbildung 11: Durchlässigkeitszonen für die Dichtwand bei der Kalibrierung des Jahres 1988

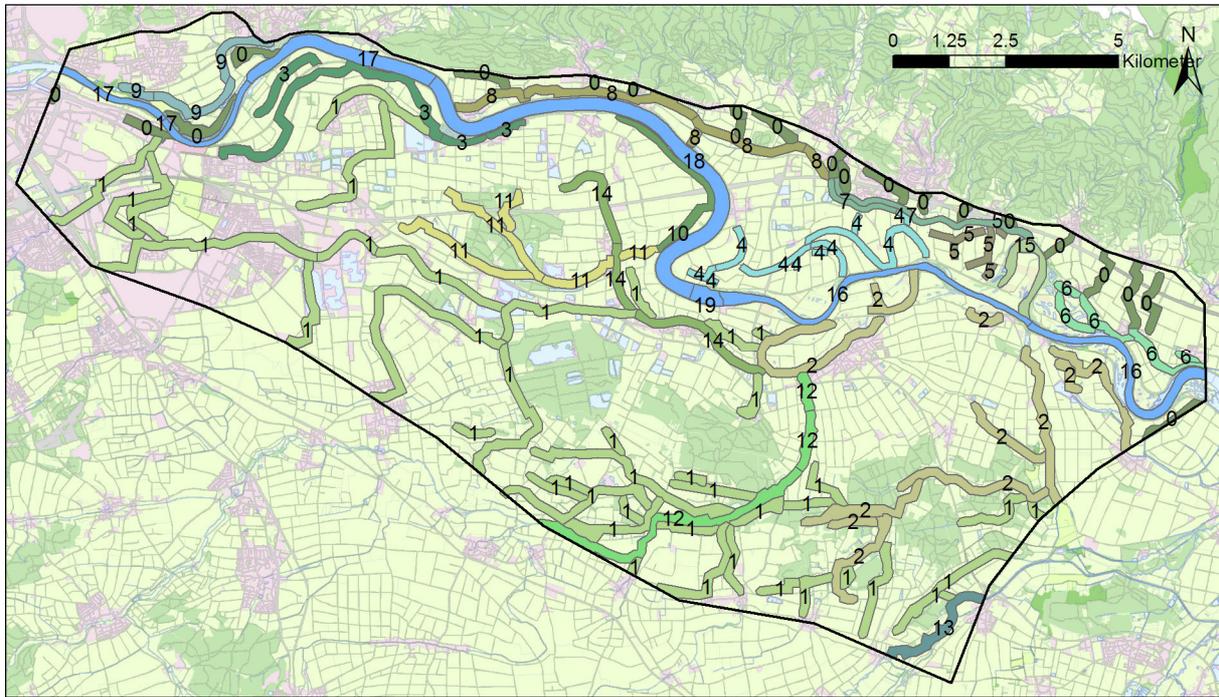


Abbildung 12: Leakagezonen der Gewässer.

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: Gütwerte 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.

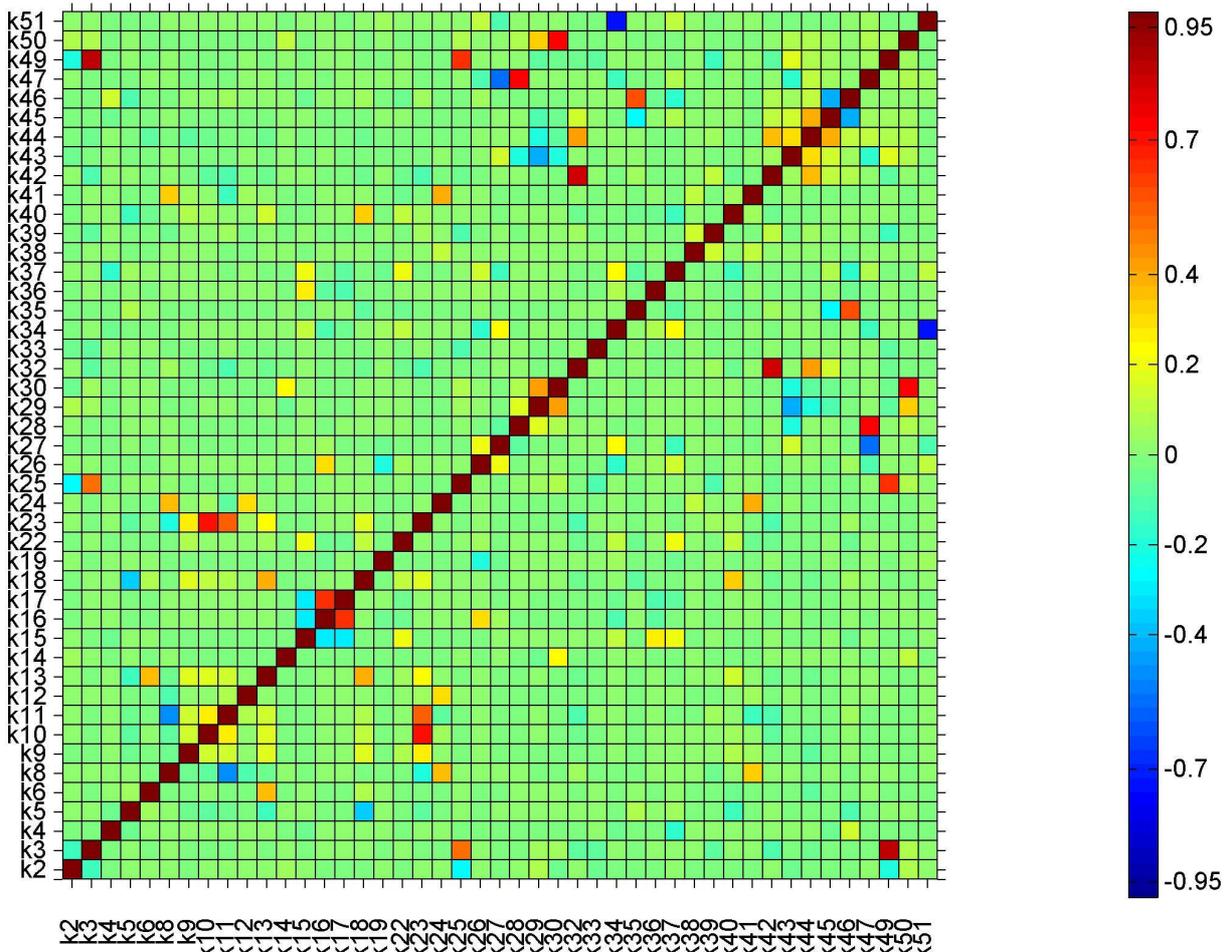


Abbildung 13: Korrelation zwischen den Durchlässigkeitszonen

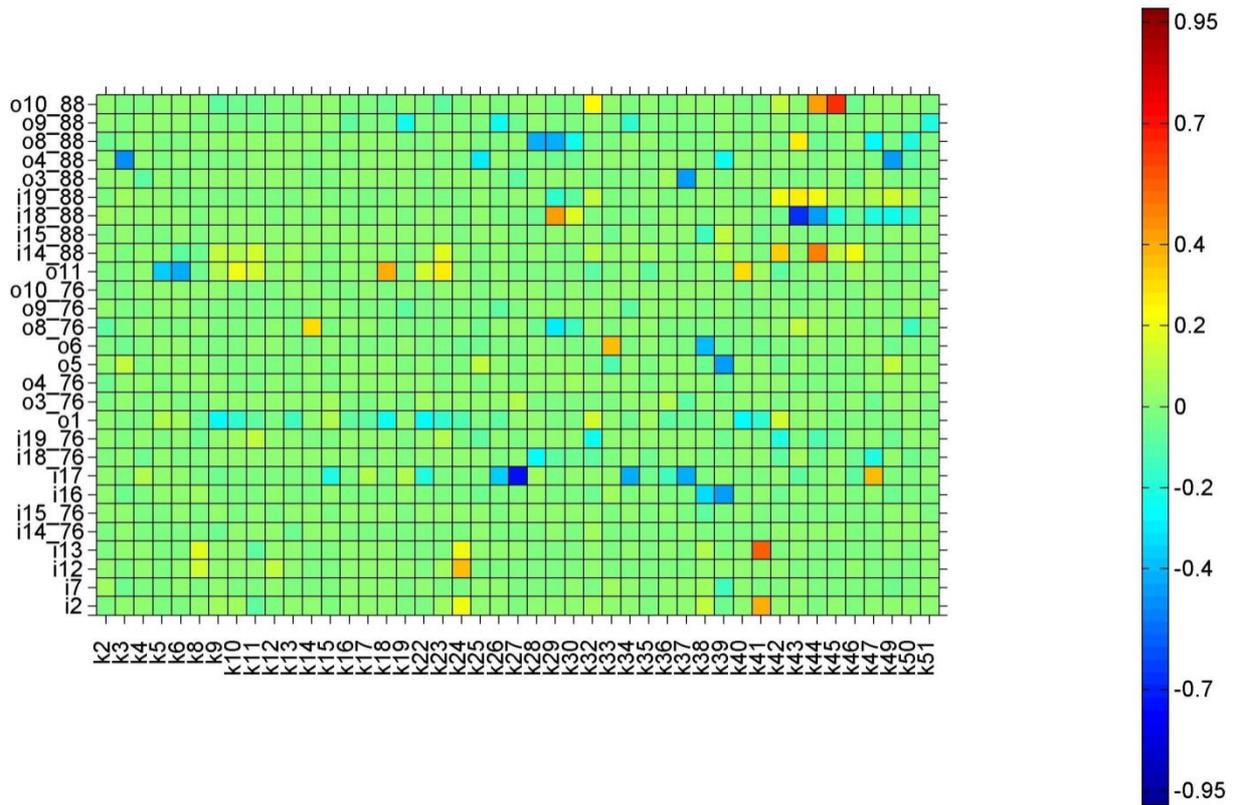


Abbildung 14: Korrelation zwischen Leakagewerten und Durchlässigkeitszonen (Leakagezonen mit i sind solche, welche sowohl Infiltration wie Exfiltration erlauben, bei unabhängigen Werten ist das Jahr angegeben)

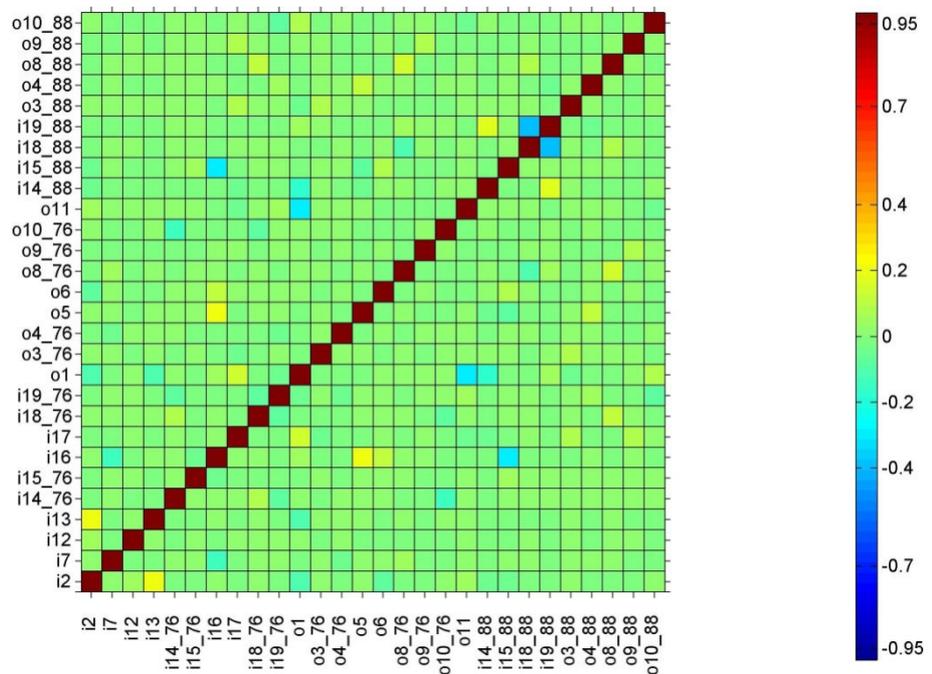


Abbildung 15: Korrelation zwischen den Leakagewerten

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 Gütwerte 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 Gütwerte 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: Gütwerte 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: Gütwerte 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.

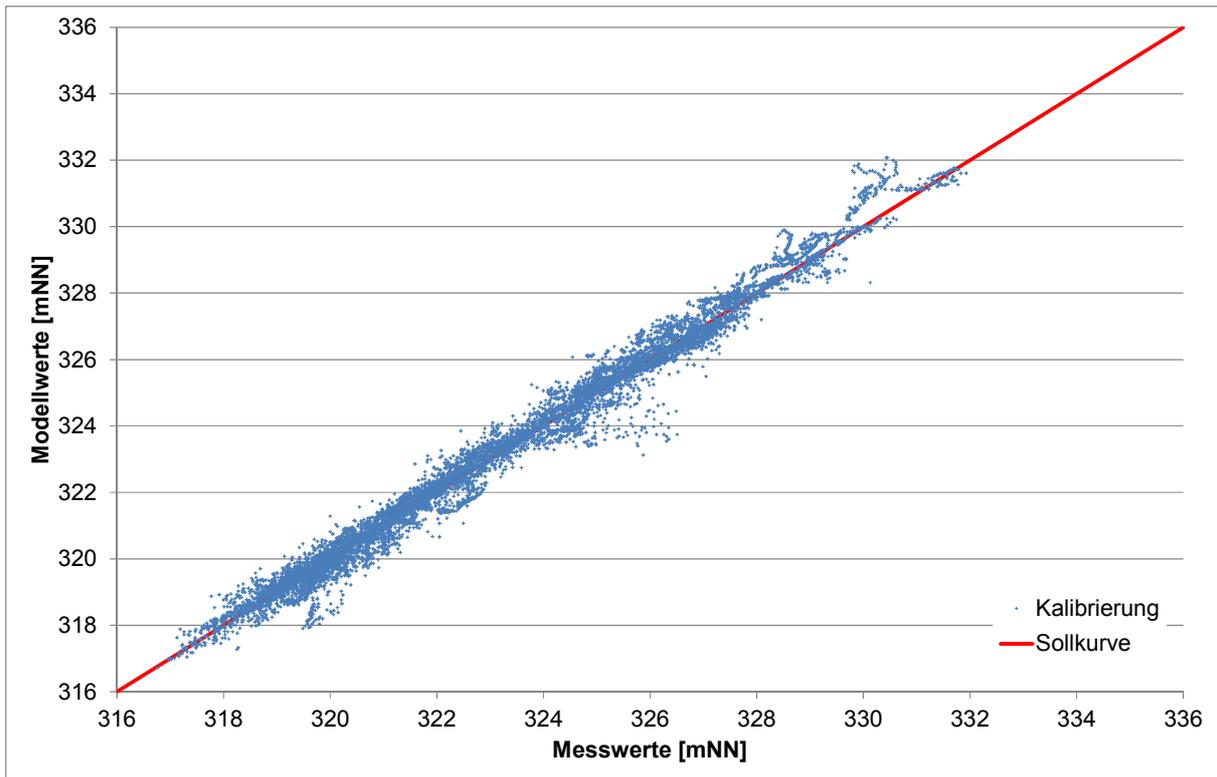


Abbildung 16: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte der Jahre 1976-1977

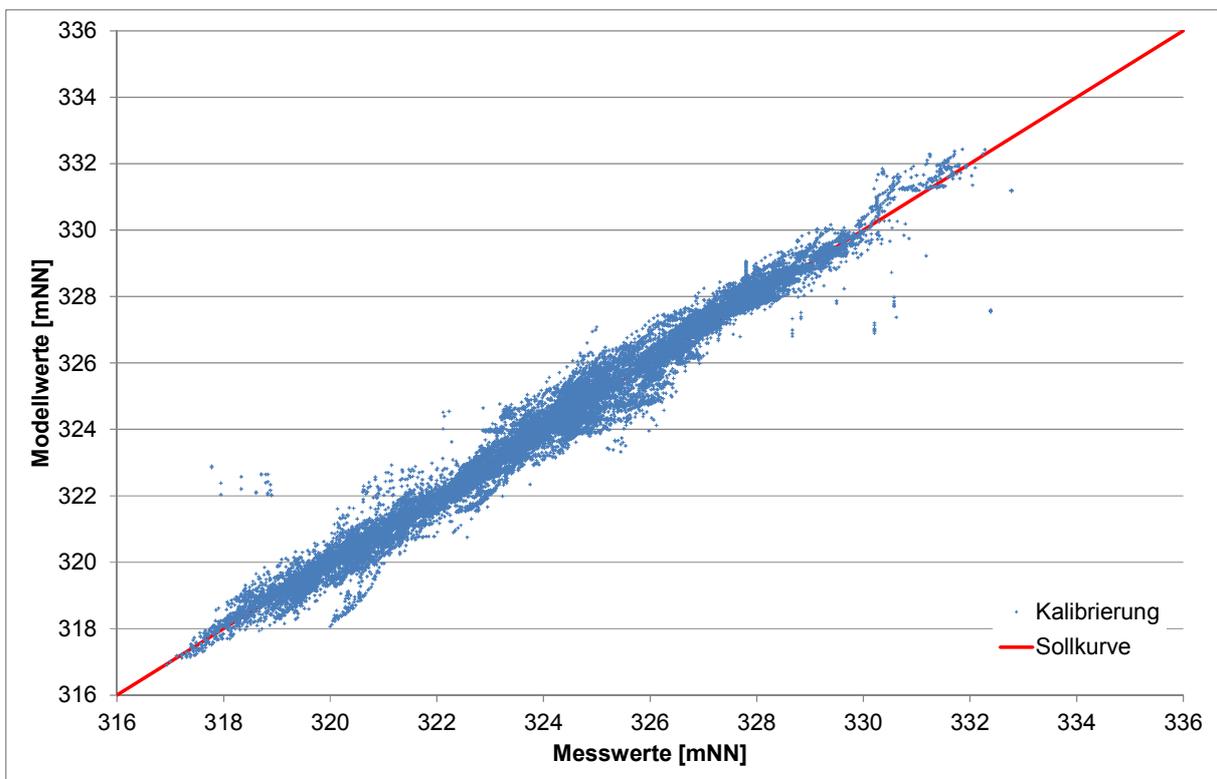


Abbildung 17: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte der Jahre 1988-1989

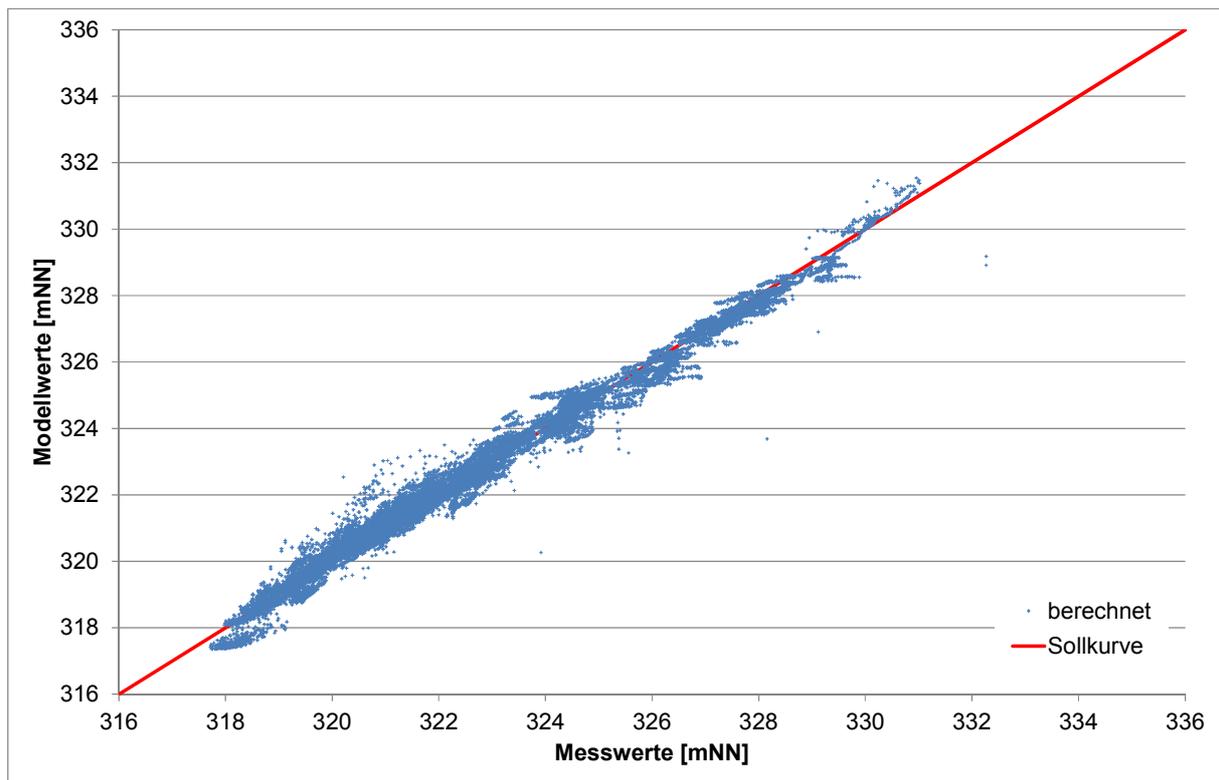


Abbildung 18: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte der Jahre 1997-1999

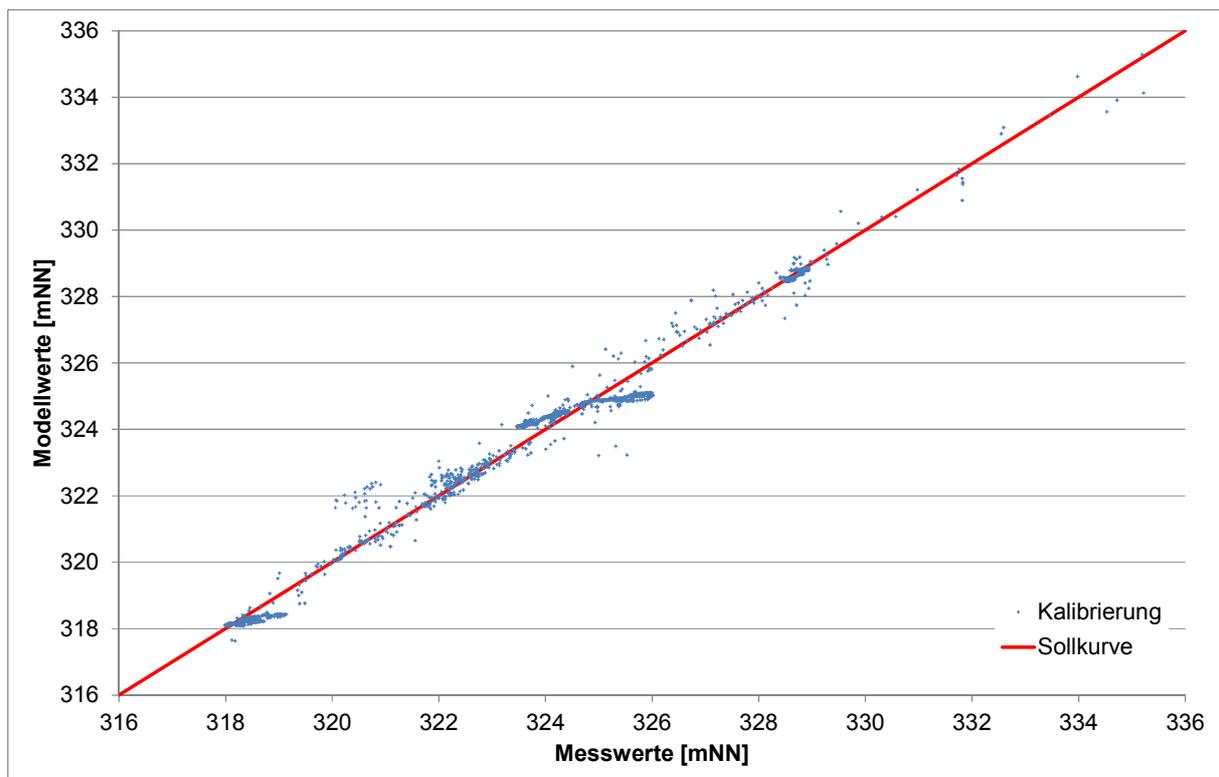


Abbildung 19: Scatterplot der berechneten gegen die gemessenen Werte des Jahres 2009

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.

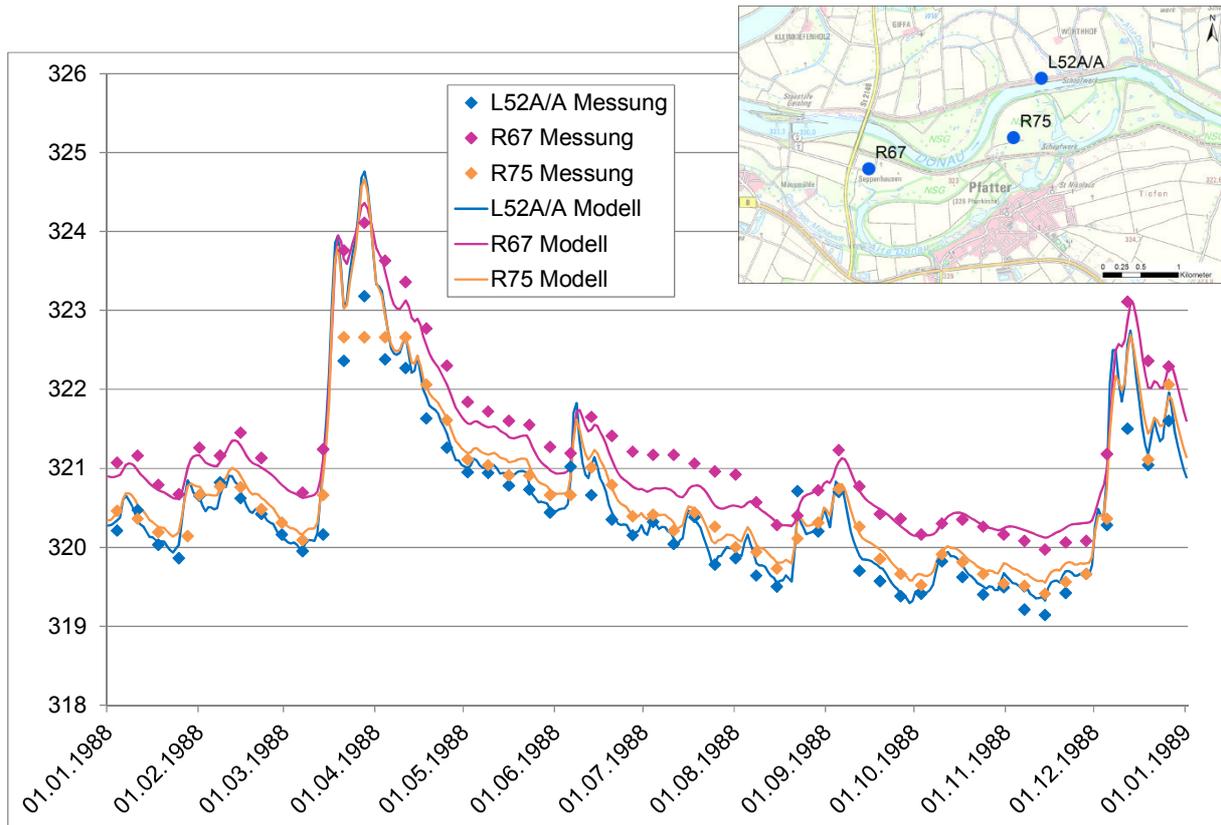


Abbildung 20: Ganglinien ausgewählter Messstellen während des Hochwassers 1988.

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..

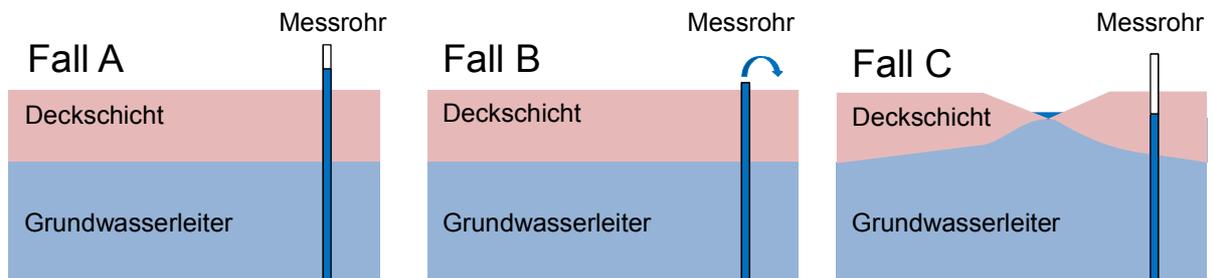


Abbildung 21: Mögliche Situationen in der Auestufe

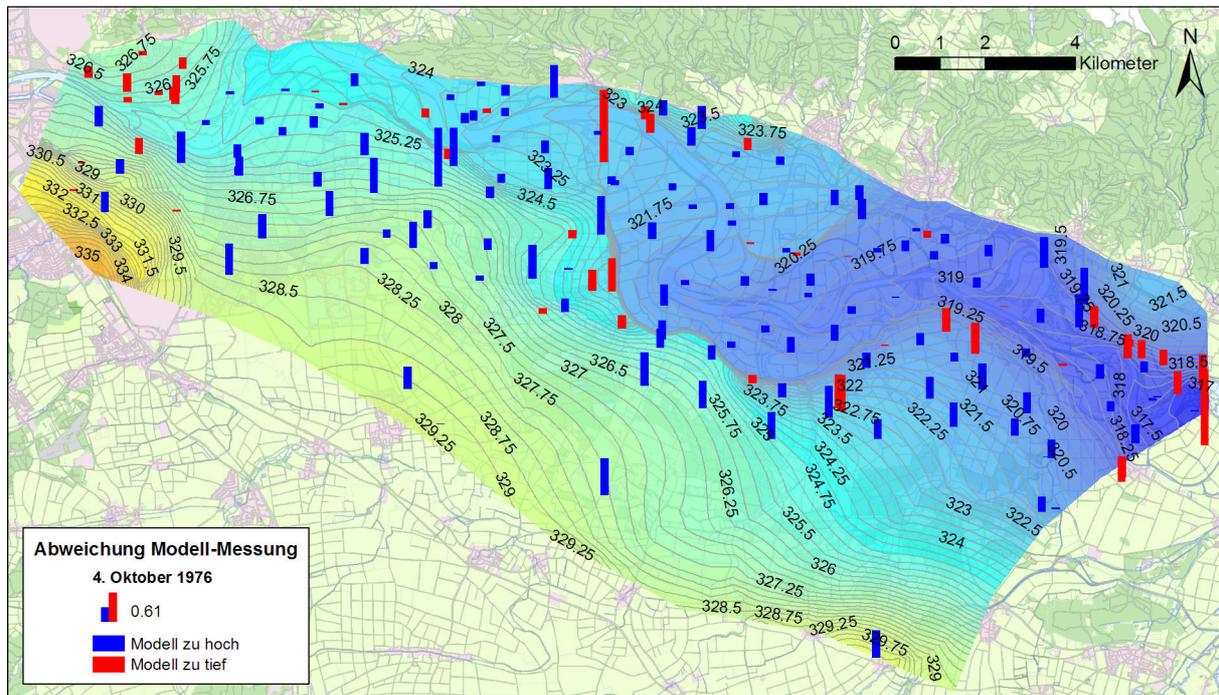


Abbildung 22: Grundwasserhöhengleichen bei Niederwasserstand am 4.10.1976. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten des 3.10. und 4.10.1976 sind mit Balken dargestellt.

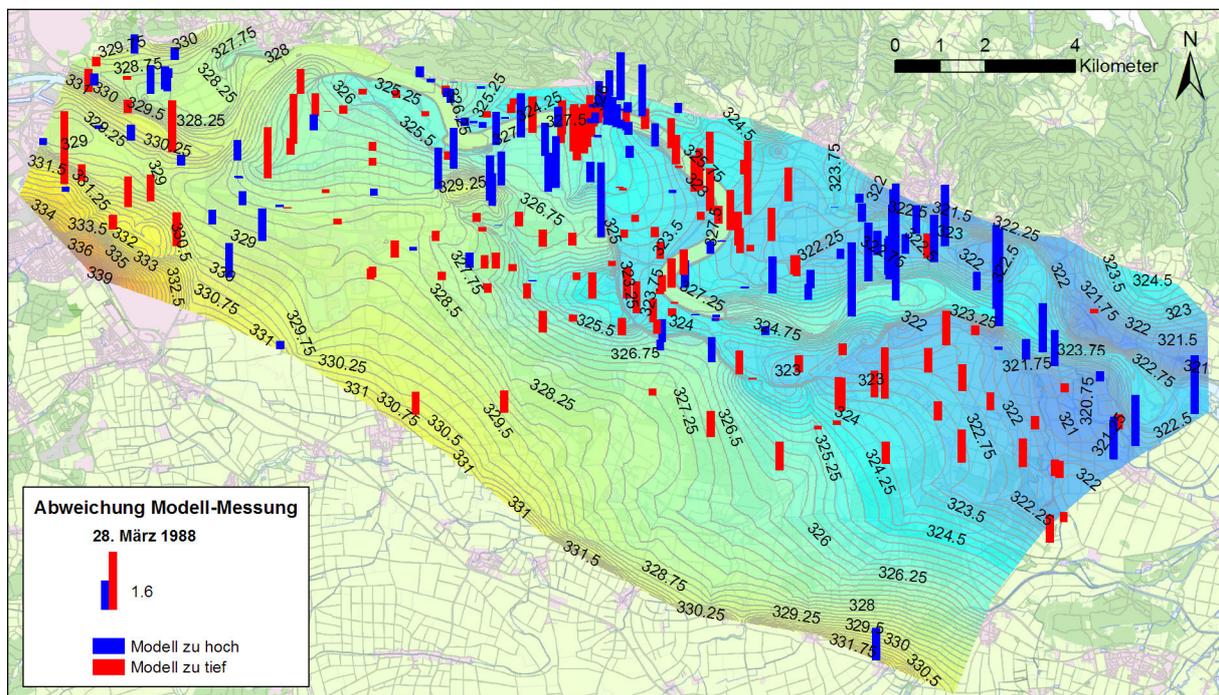


Abbildung 23: Grundwasserhöhengleichen bei Hochwasserstand am 28.03.1988. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten des 27.3. und 28.3.1988 sind mit Balken dargestellt.

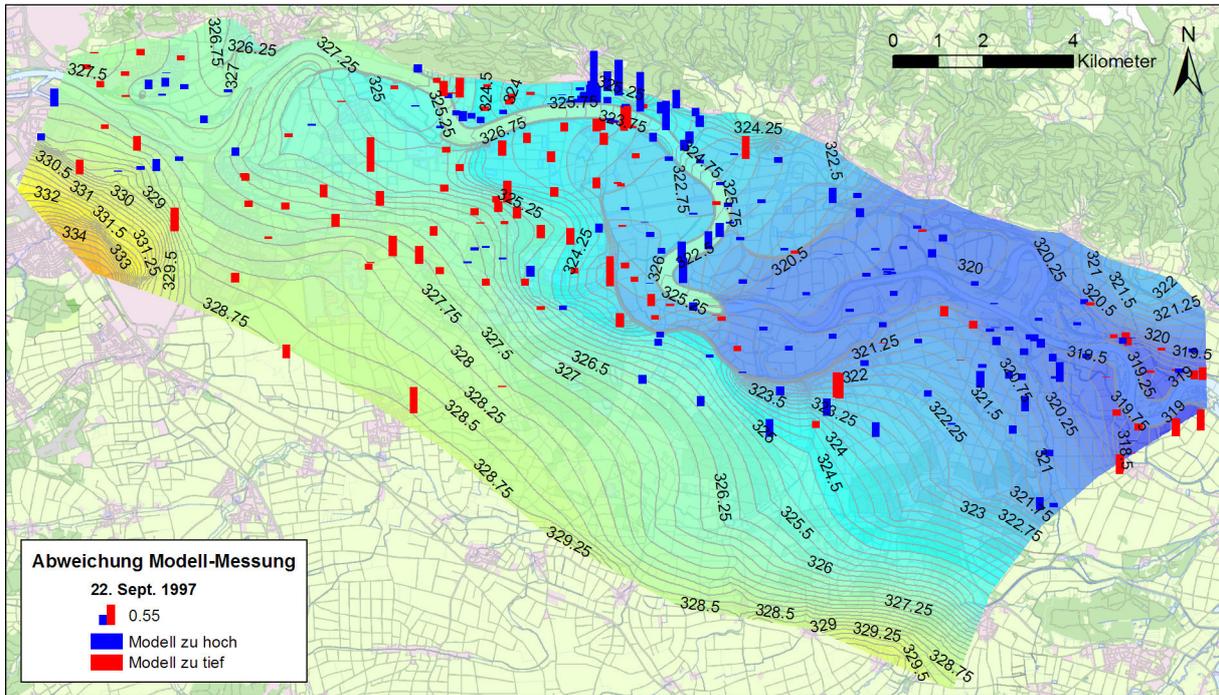


Abbildung 24: Grundwasserhöhengleichen bei Niederwasserstand am 22.9.1997. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten des 21.9. und 22.9.1997 sind mit Balken dargestellt.

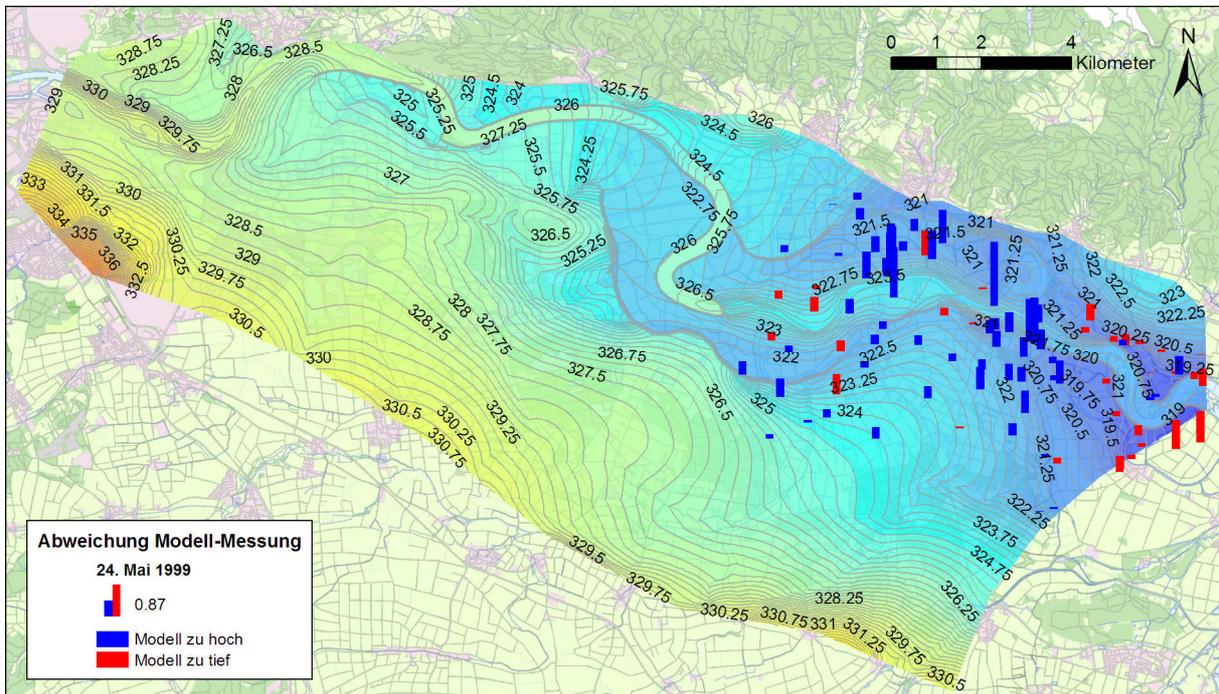


Abbildung 25: Grundwasserhöhengleichen bei Hochwasserstand am 24.5.1999. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten des 24.5.1999 sind mit Balken dargestellt.

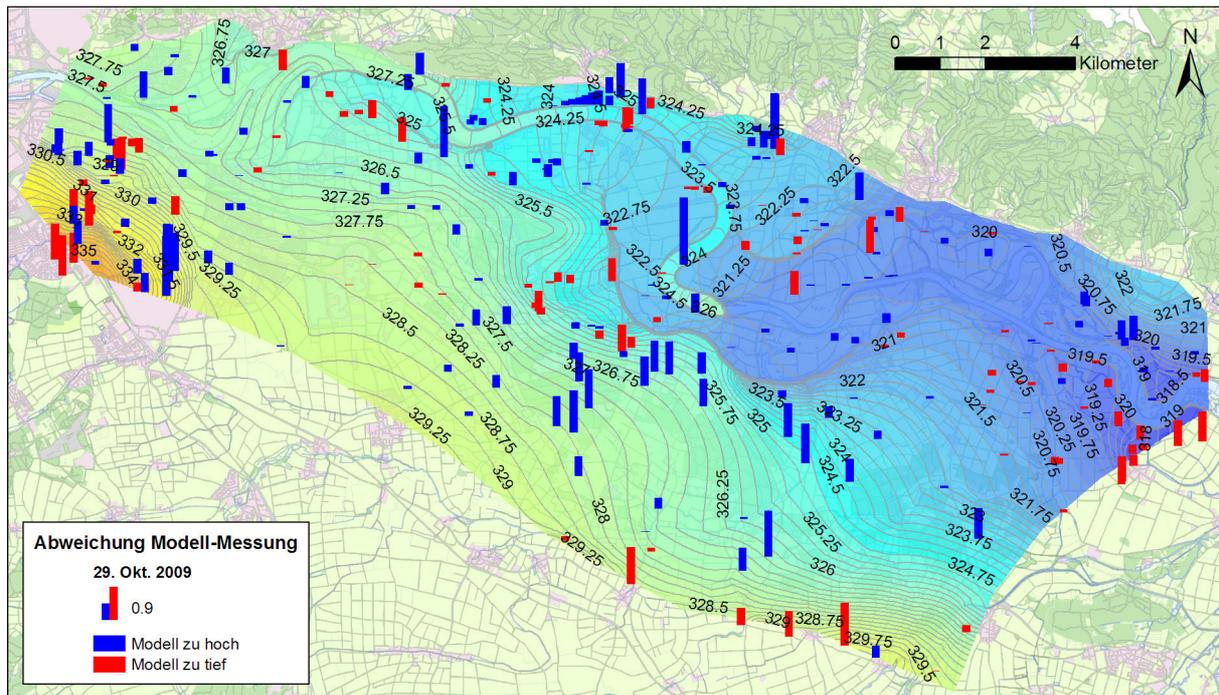


Abbildung 26: Grundwasserhöhengleichen bei Niederwasserstand am 29.10.2009. Die Abweichungen des Modells von den Messwerten der Ende Oktober 2009 durchgeführten Stichtagsmessungen des LfU sind mit Balken dargestellt.

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.

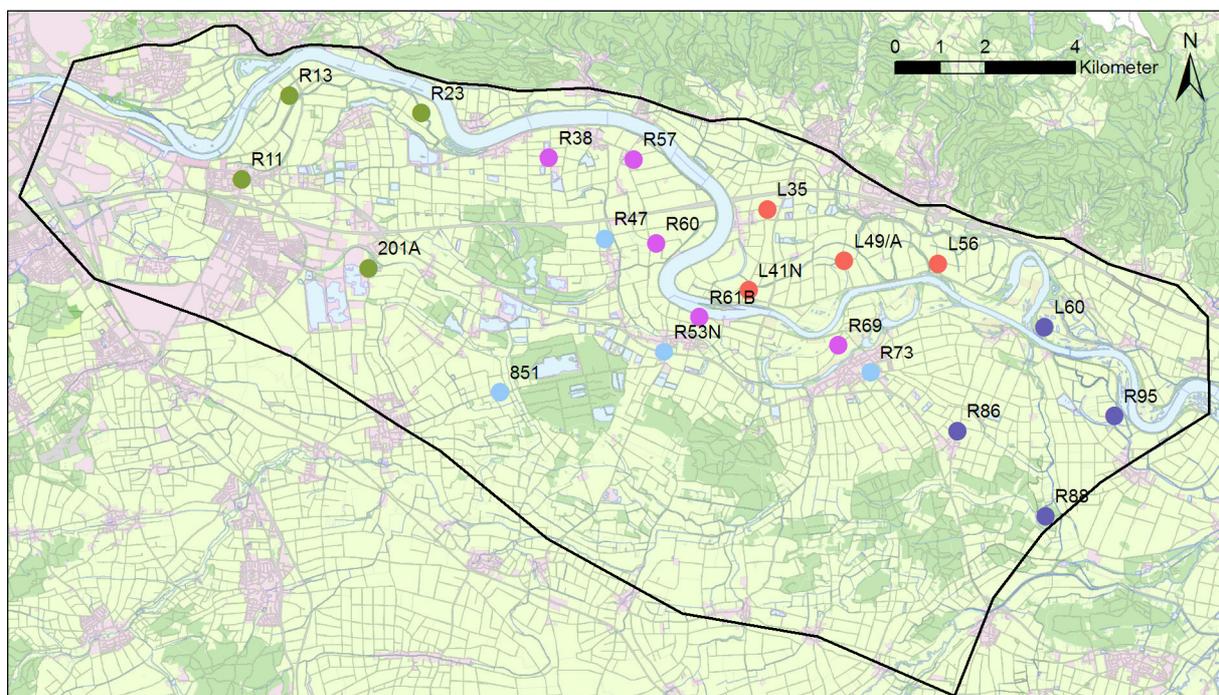


Abbildung 27: Ausgewählte Messstellen für den Vergleich des zeitlichen Verhaltens.

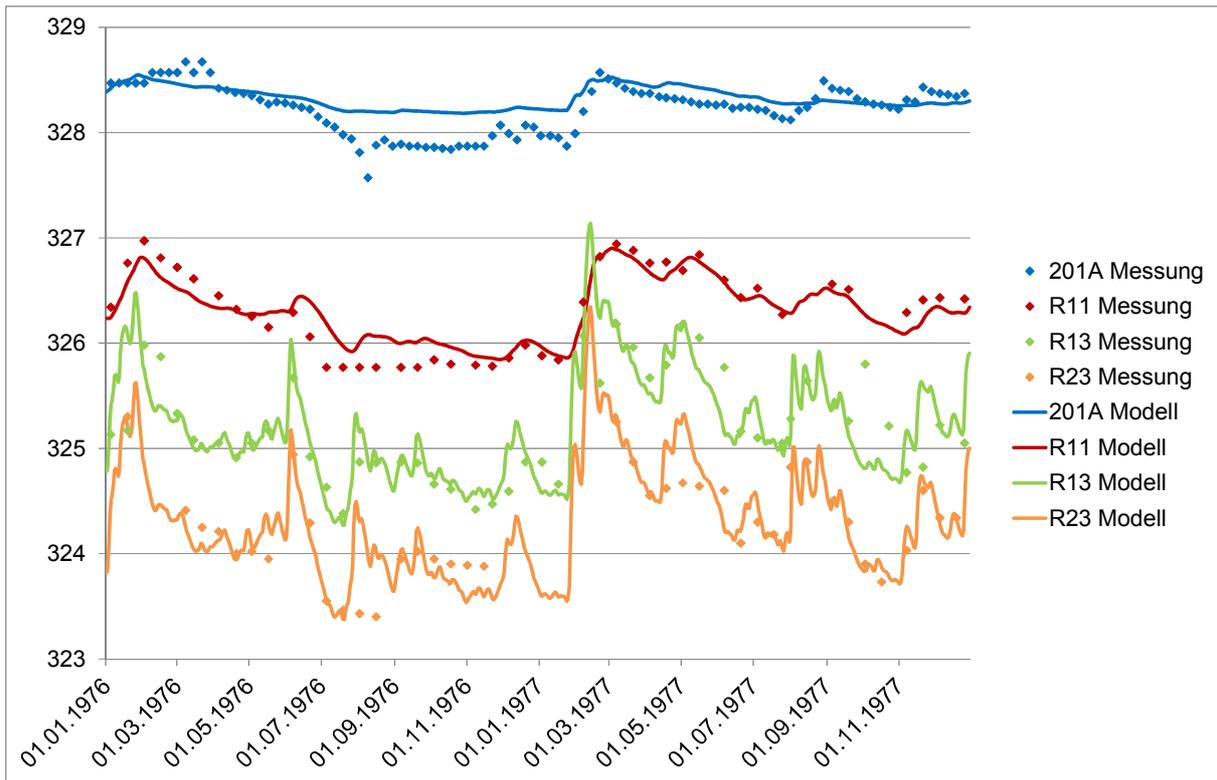


Abbildung 28: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Neutraubling – Sarching im Zeitraum 1976 – 1977.

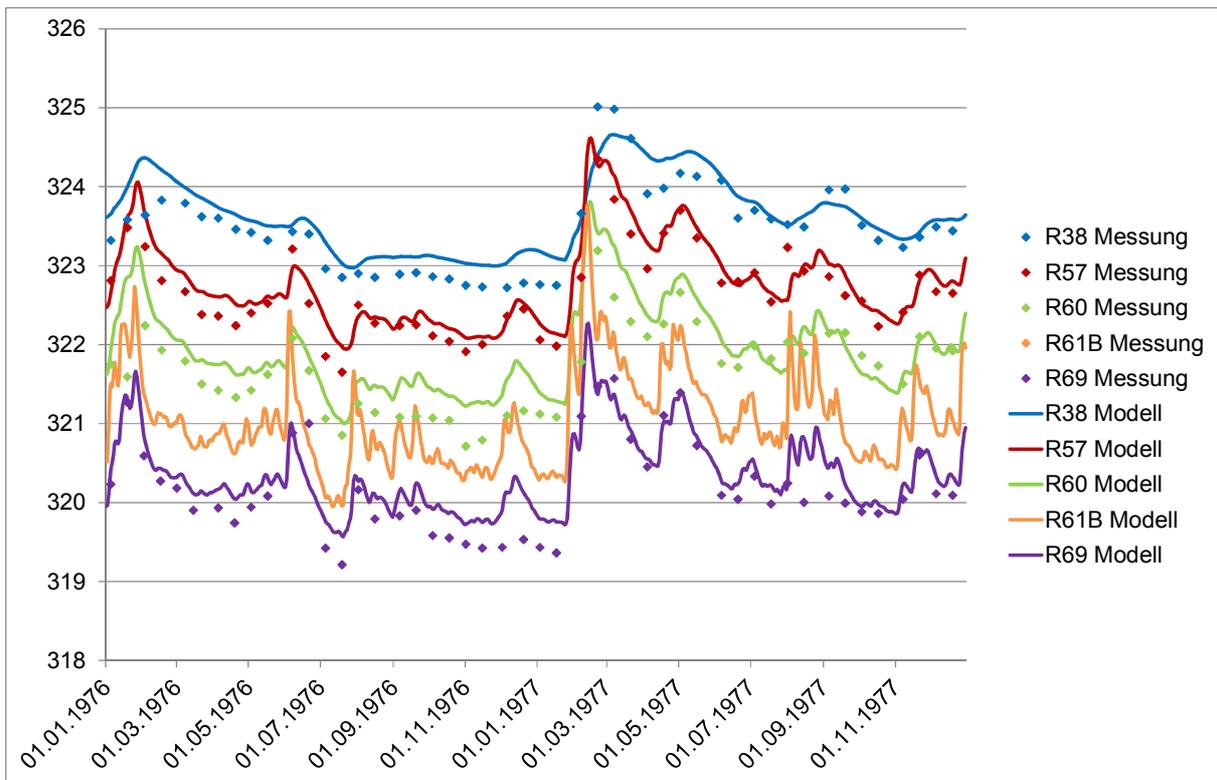
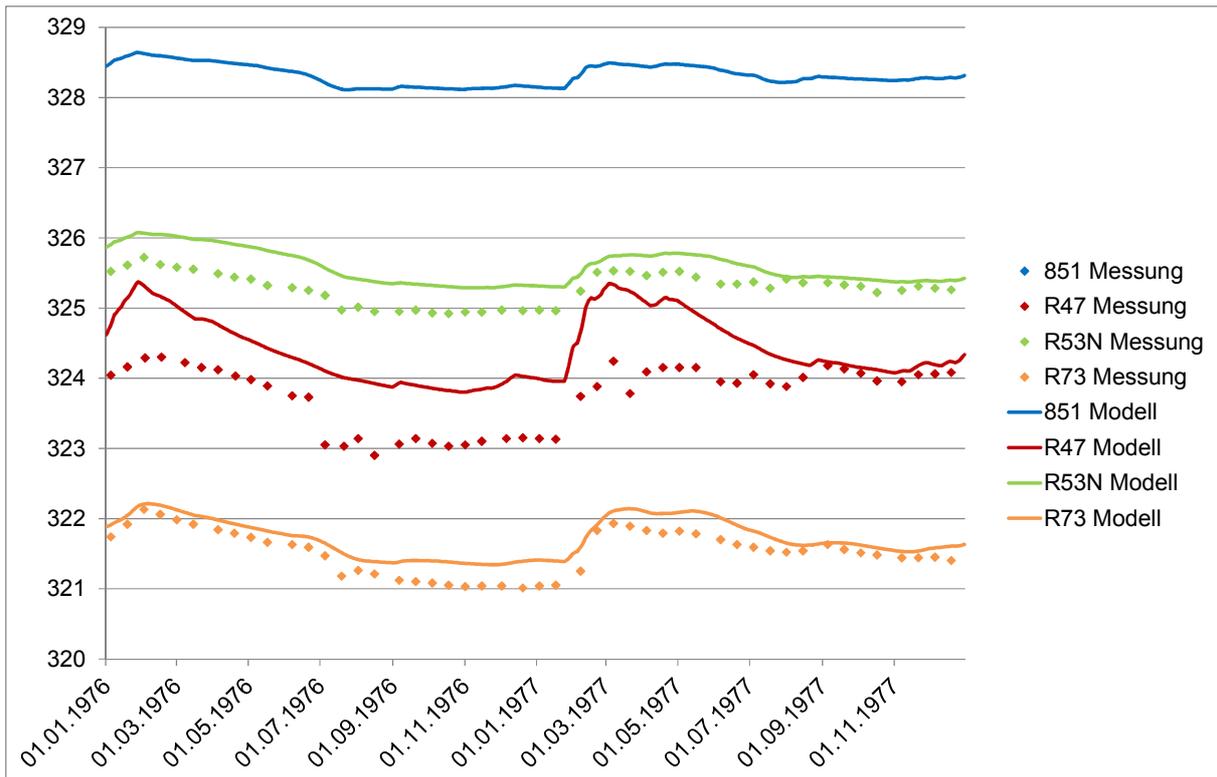
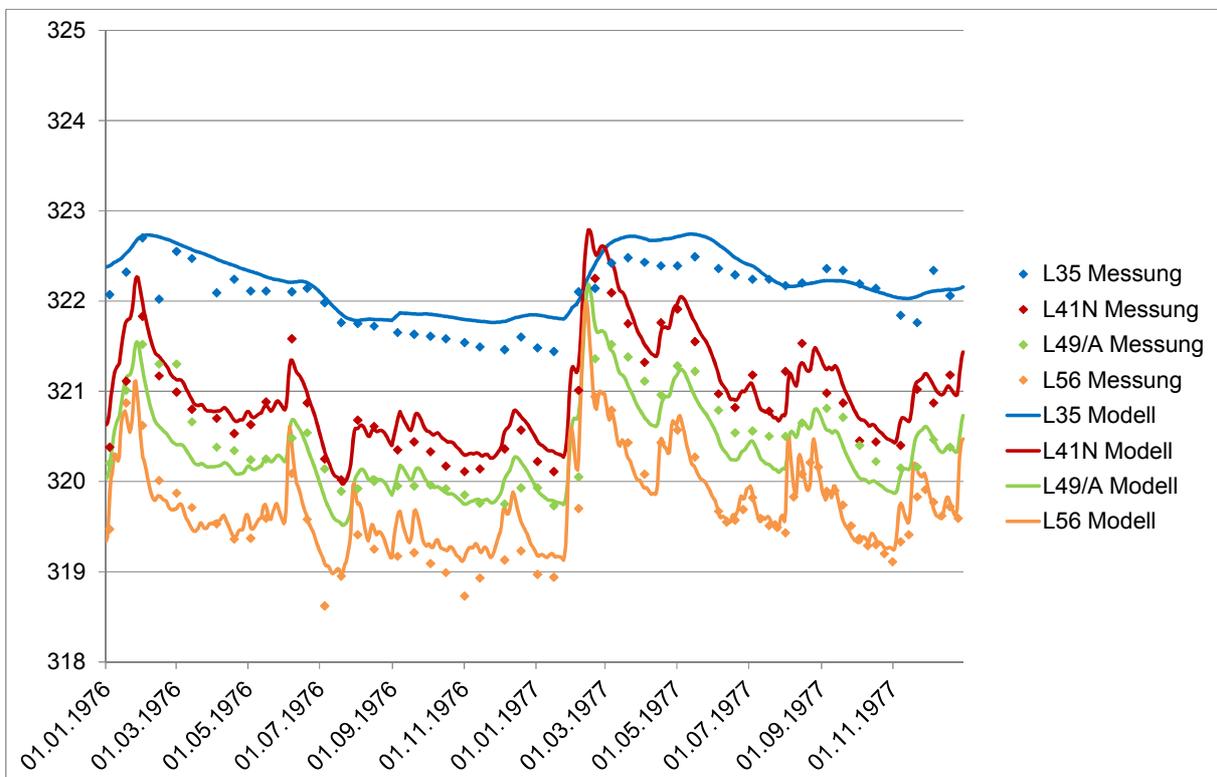


Abbildung 29: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Auestufe zwischen Friesheim und Pfatter im Zeitraum 1976 – 1977.



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



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

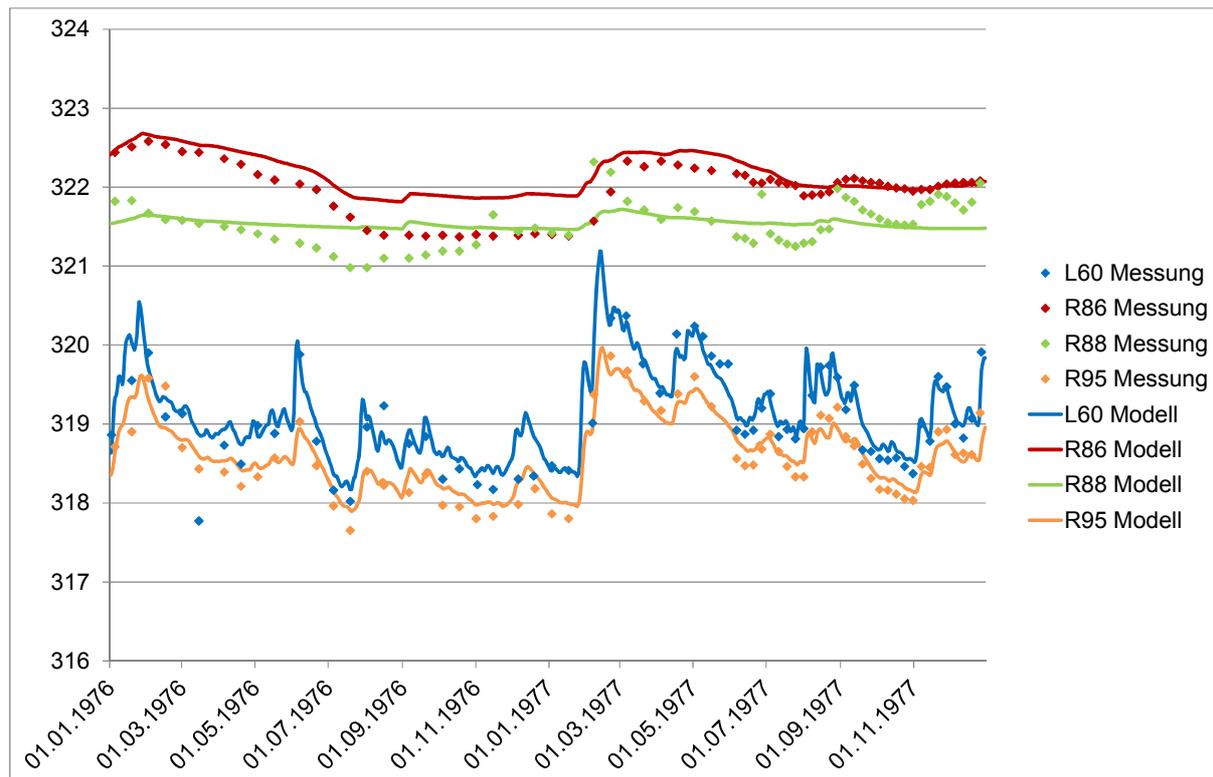


Abbildung 32: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des östlichen Modellrandes im Zeitraum 1976 – 1977.

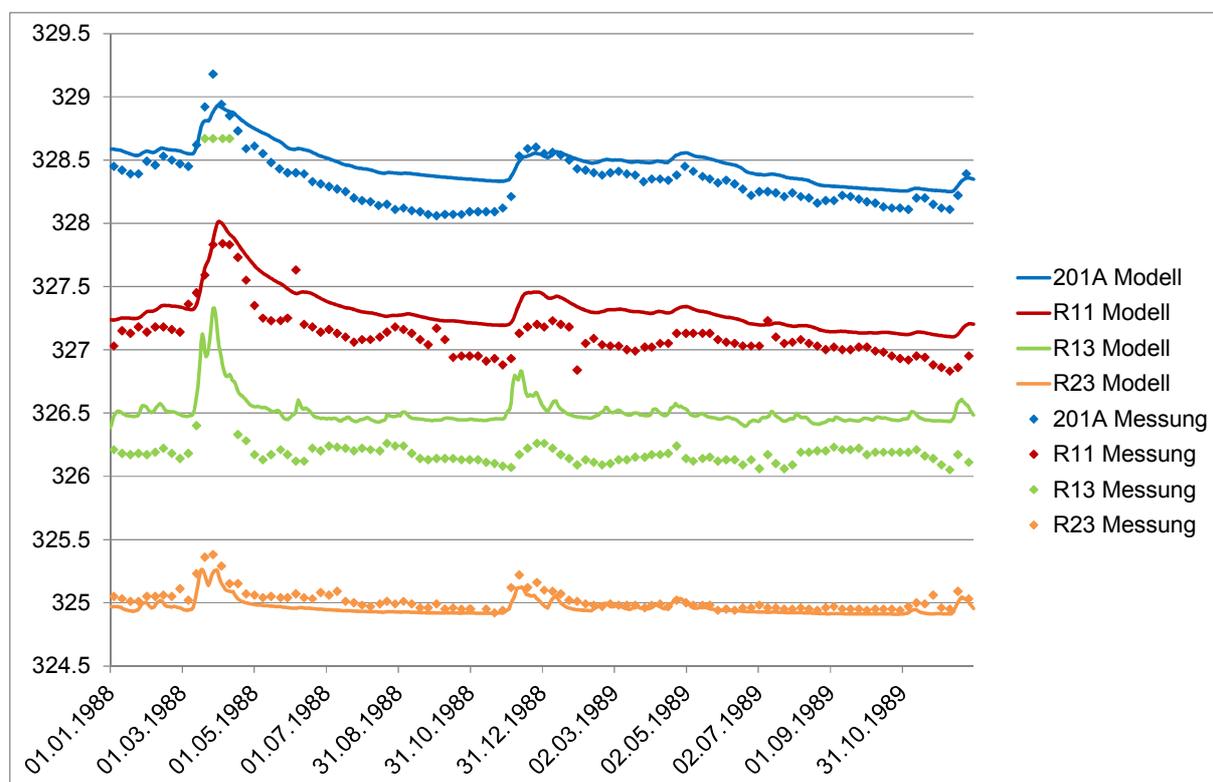


Abbildung 33: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Neutraubling – Sarching im Zeitraum 1988 – 1989.

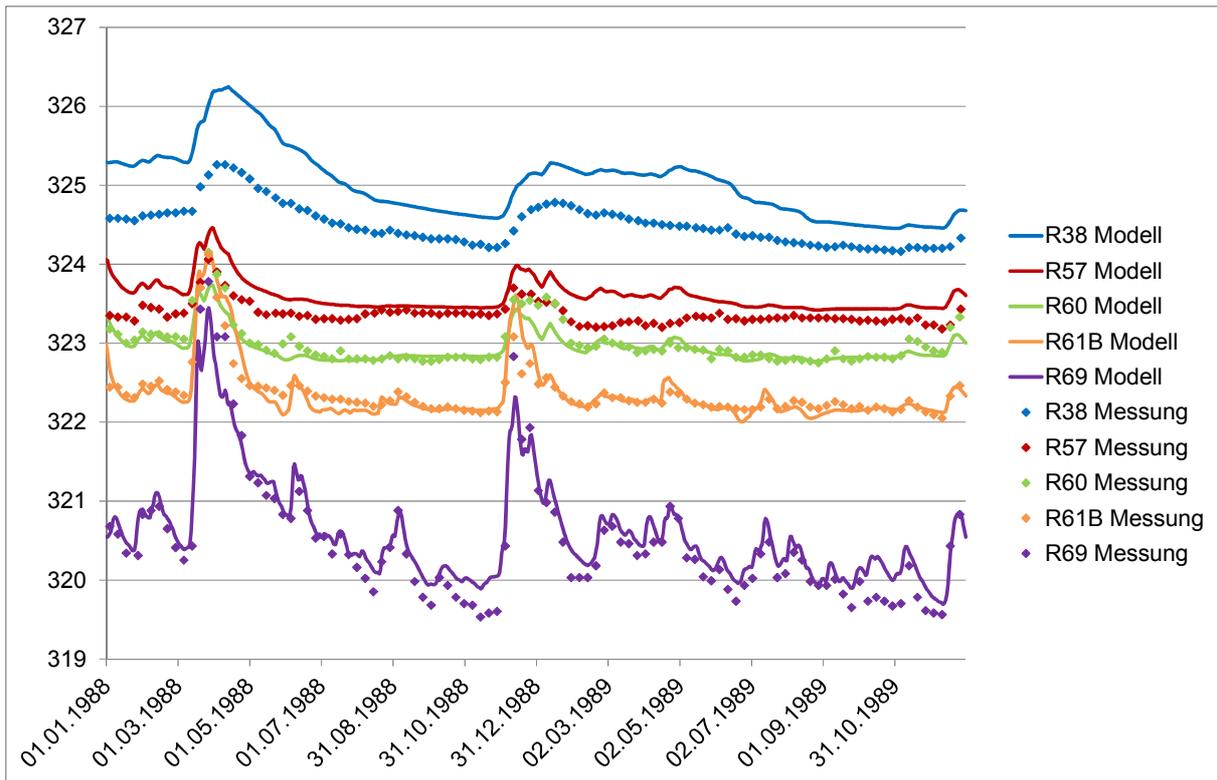


Abbildung 34: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Auestufe zwischen Friesheim und Pfatter im Zeitraum 1988 – 1989.

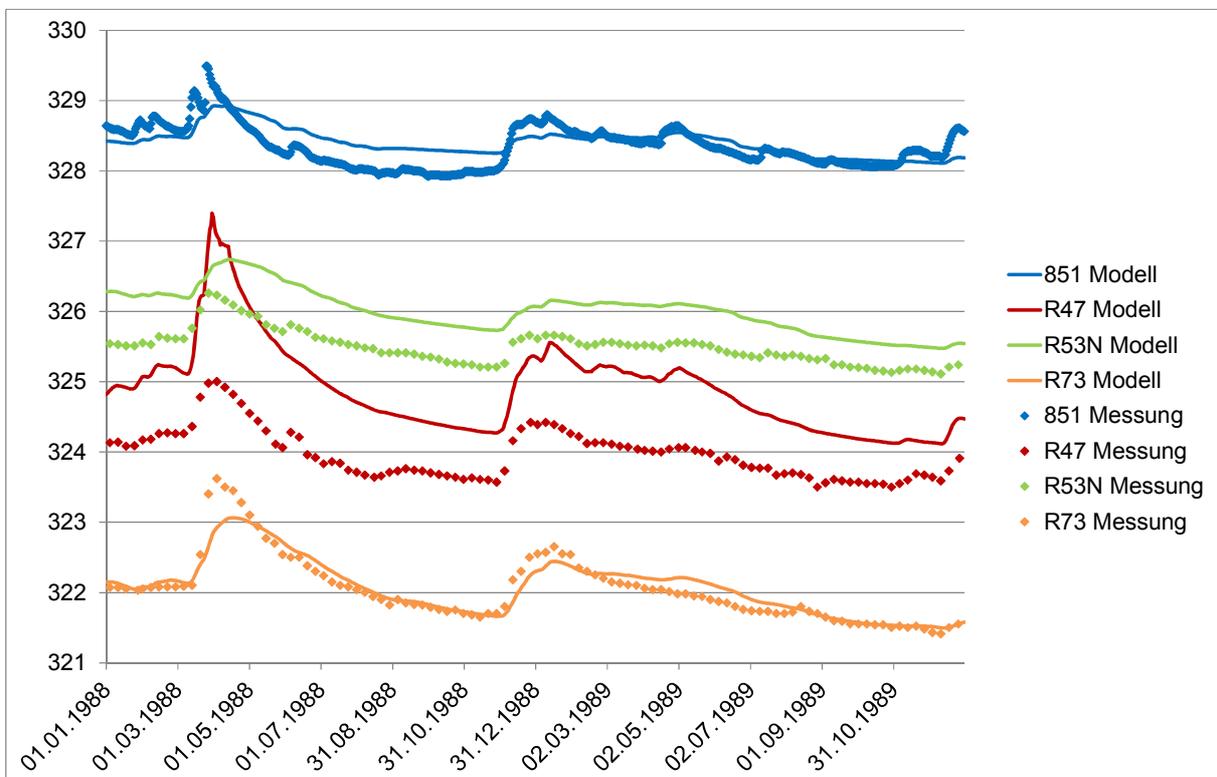


Abbildung 35: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Terrassenstufe zwischen Eltheim und Pfatter im Zeitraum 1988 – 1989.

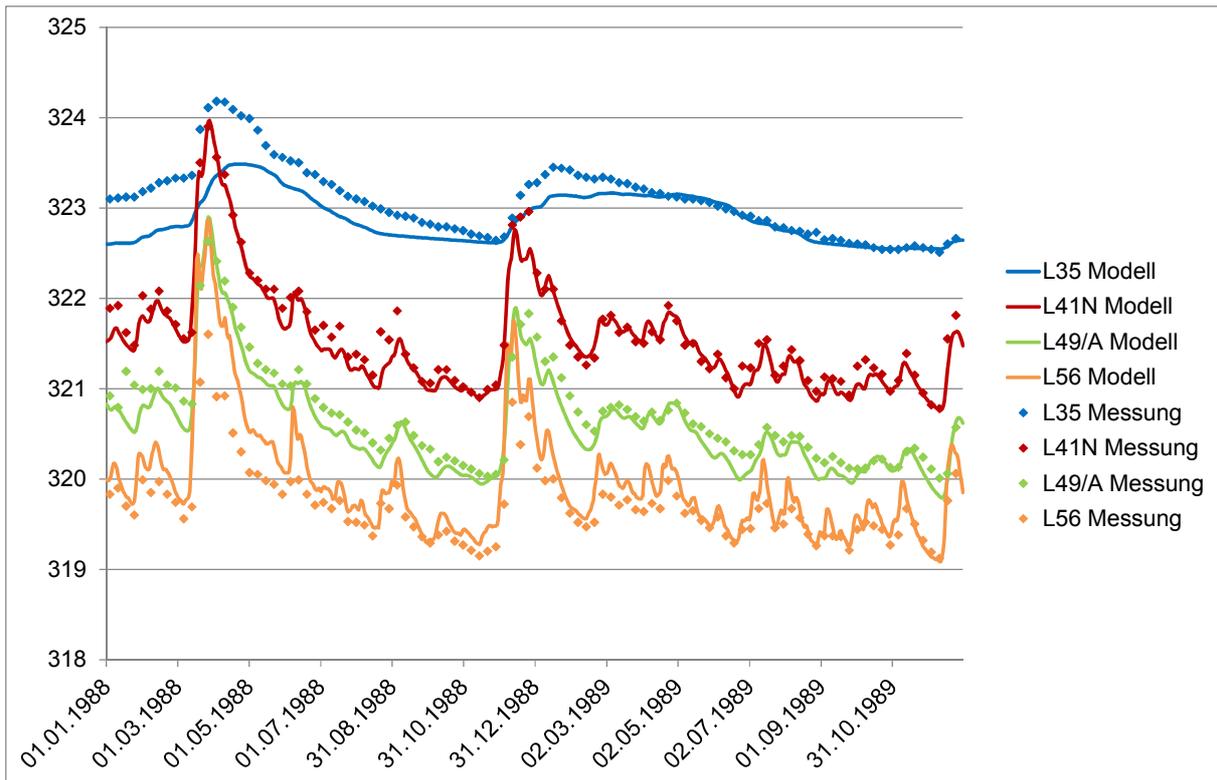


Abbildung 36: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der linksseitigen Auestufe zwischen Kiefenholz und Gmünder Au im Zeitraum 1988 – 1989.

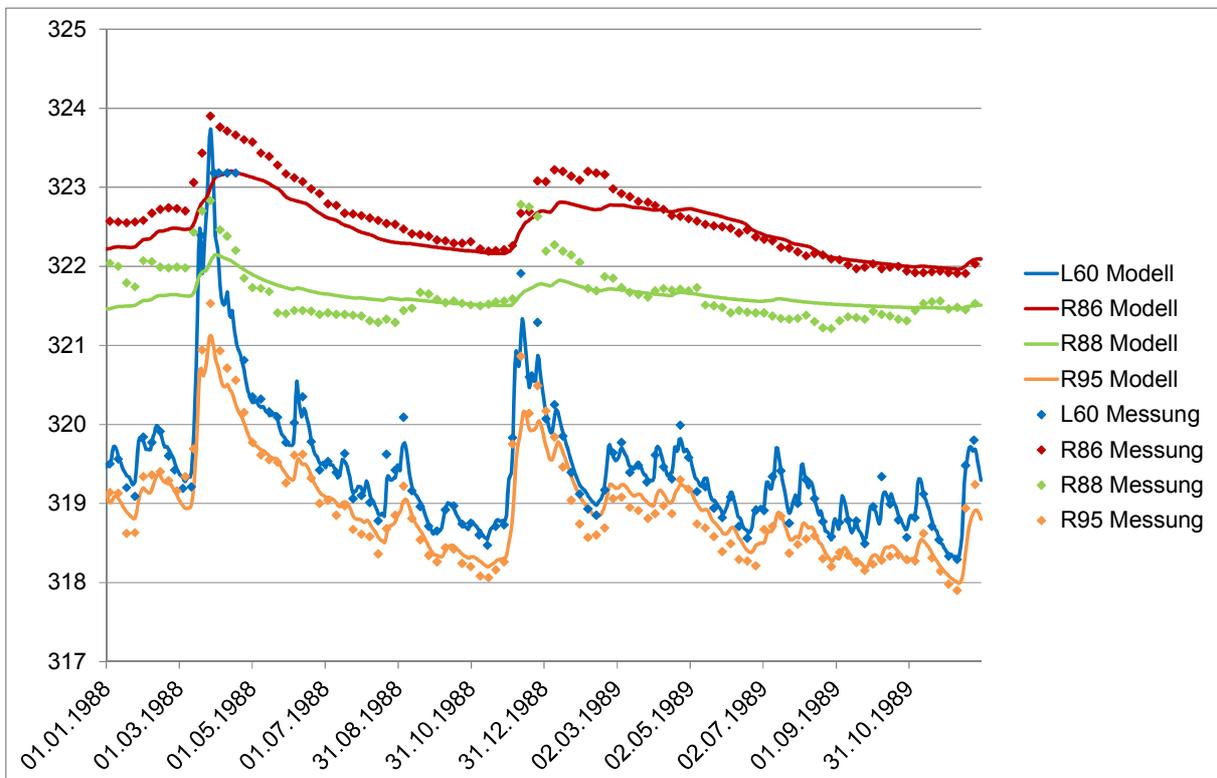


Abbildung 37: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des östlichen Modellrandes im Zeitraum 1988 – 1989.

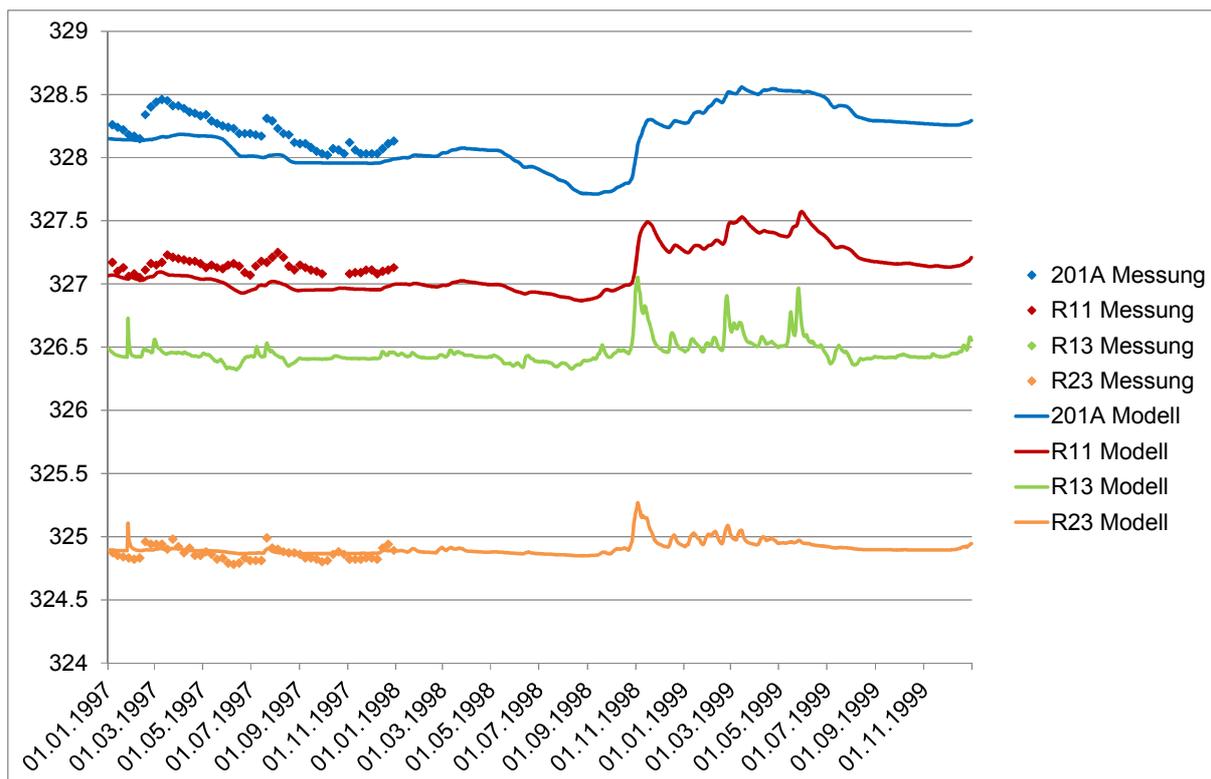


Abbildung 38: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet von Neutraubling – Sarching im Zeitraum 1997 – 1999

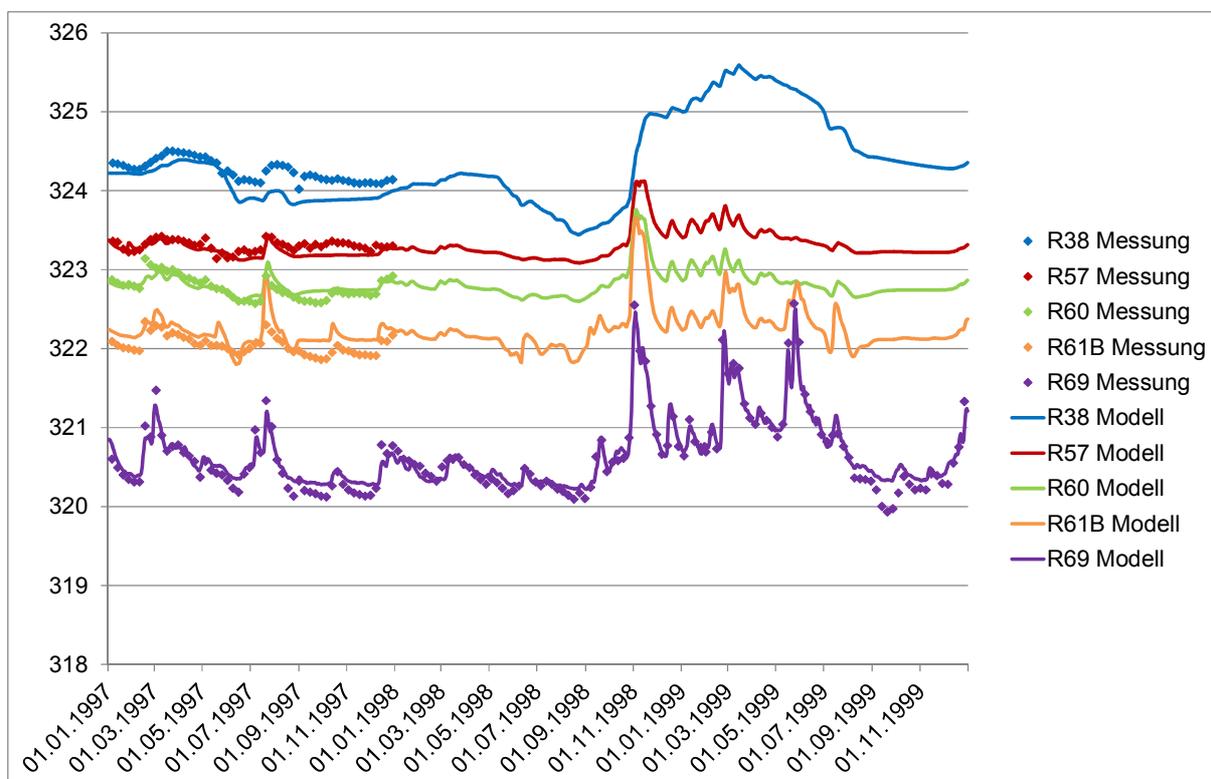


Abbildung 39: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Auestufe zwischen Friesheim und Pfatter im Zeitraum 1997 – 1999.

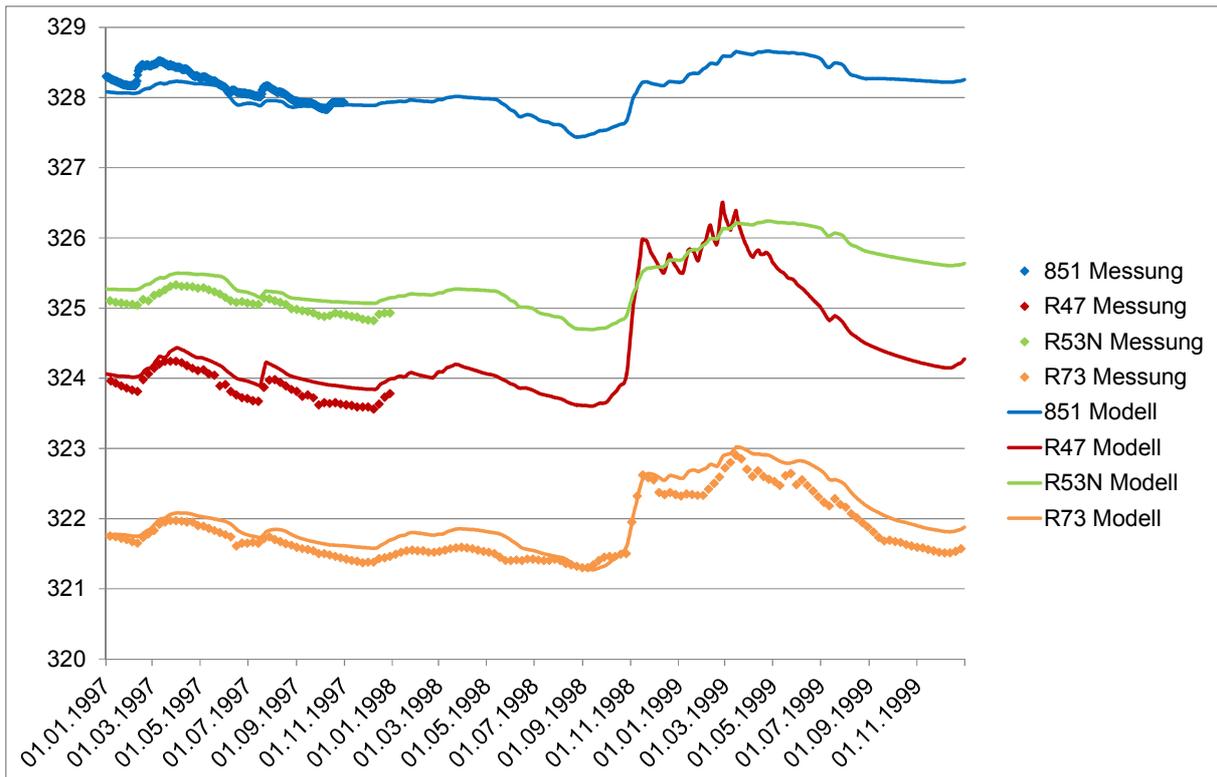


Abbildung 40: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der rechtsseitigen Terrassenstufe zwischen Eltheim und Pfatter im Zeitraum 1997 – 1999.

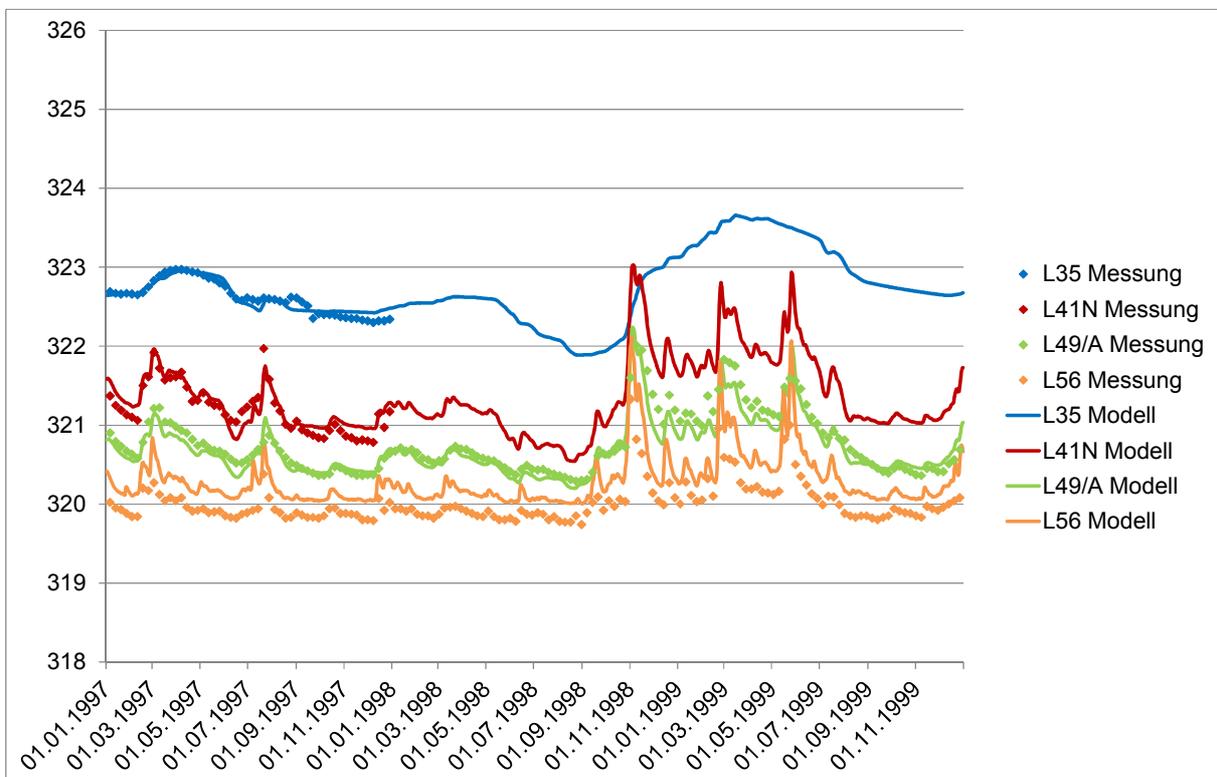


Abbildung 41: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet der linksseitigen Auestufe zwischen Kiefenholz und Gmünder Au im Zeitraum 1997 – 1999.

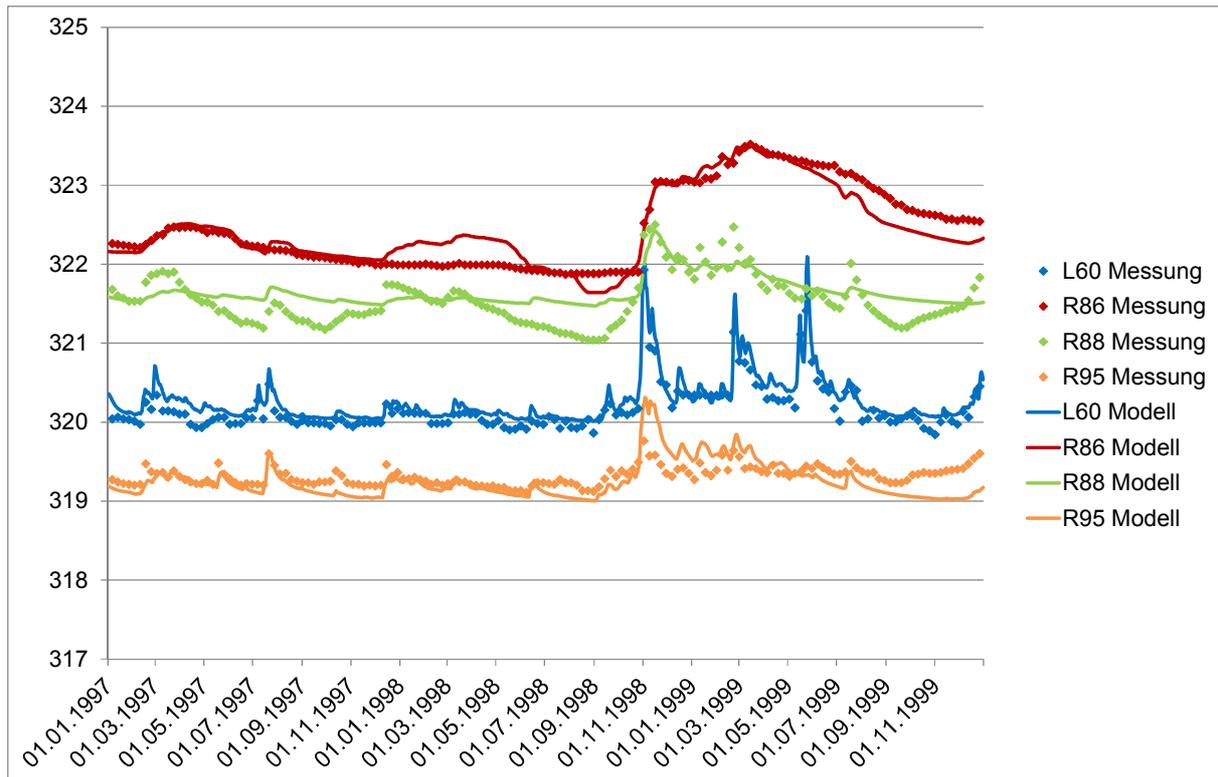


Abbildung 42: Zeitkurven der berechneten und gemessenen Grundwasserstände im Gebiet des östlichen Modellrandes im Zeitraum 1997 – 1999.

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.

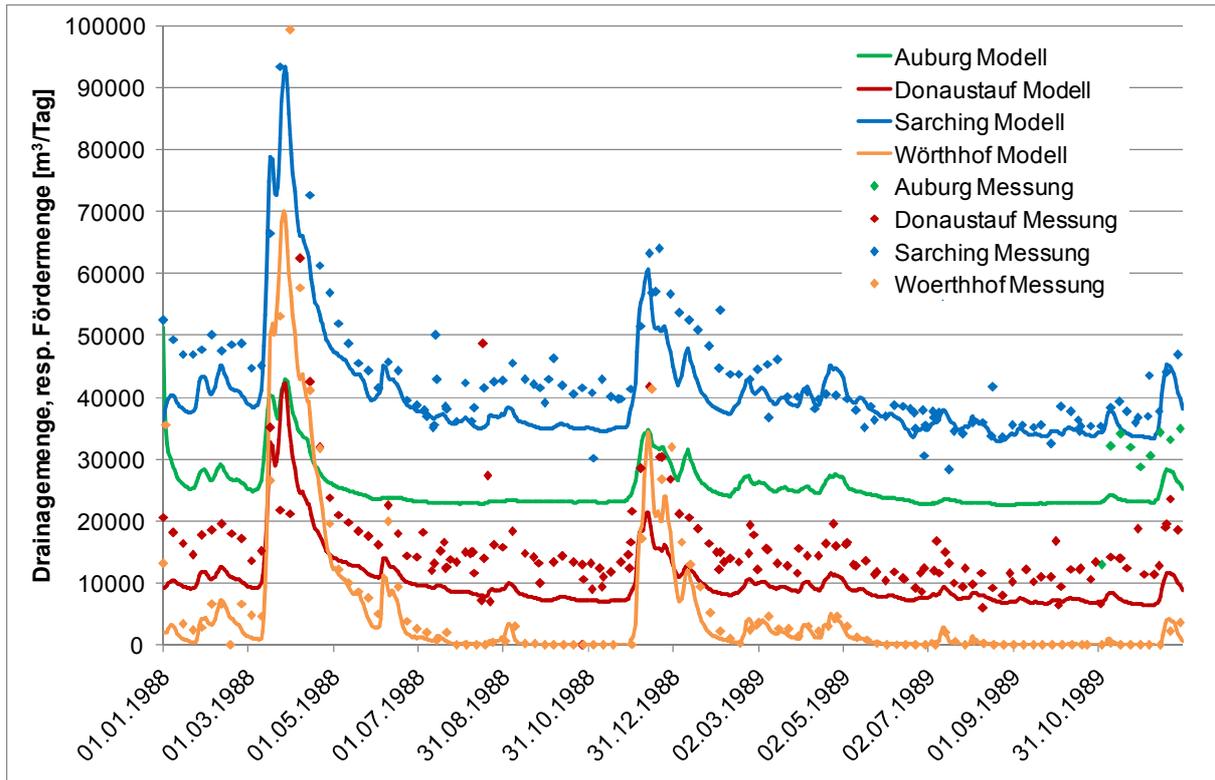


Abbildung 43: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 1988 – 1989.

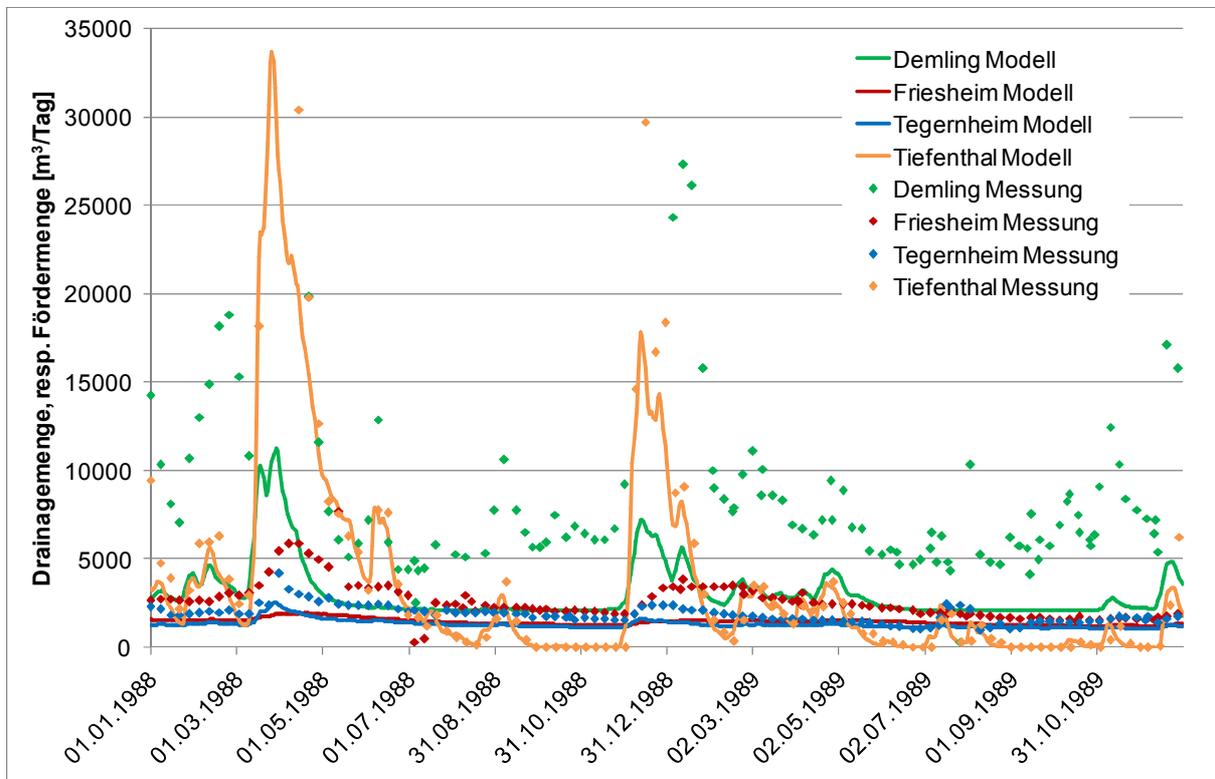


Abbildung 44: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 1988 – 1989.

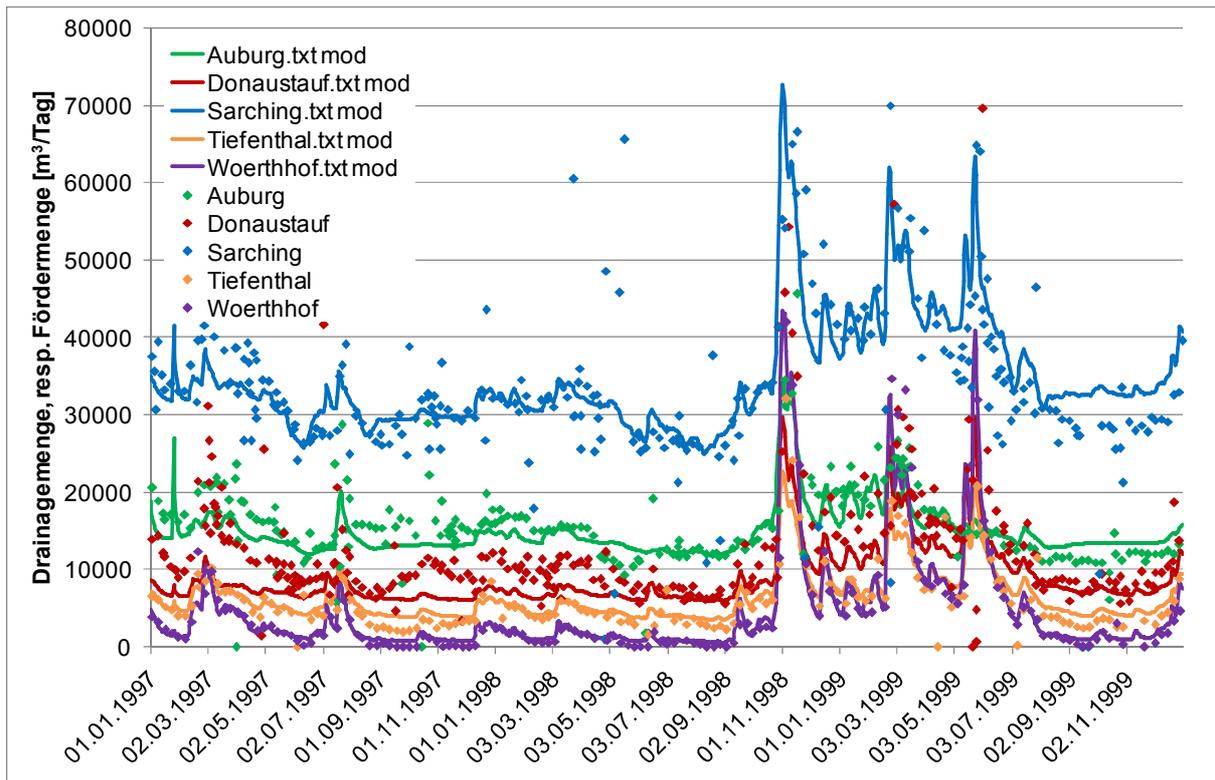


Abbildung 45: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 1997 - 1999

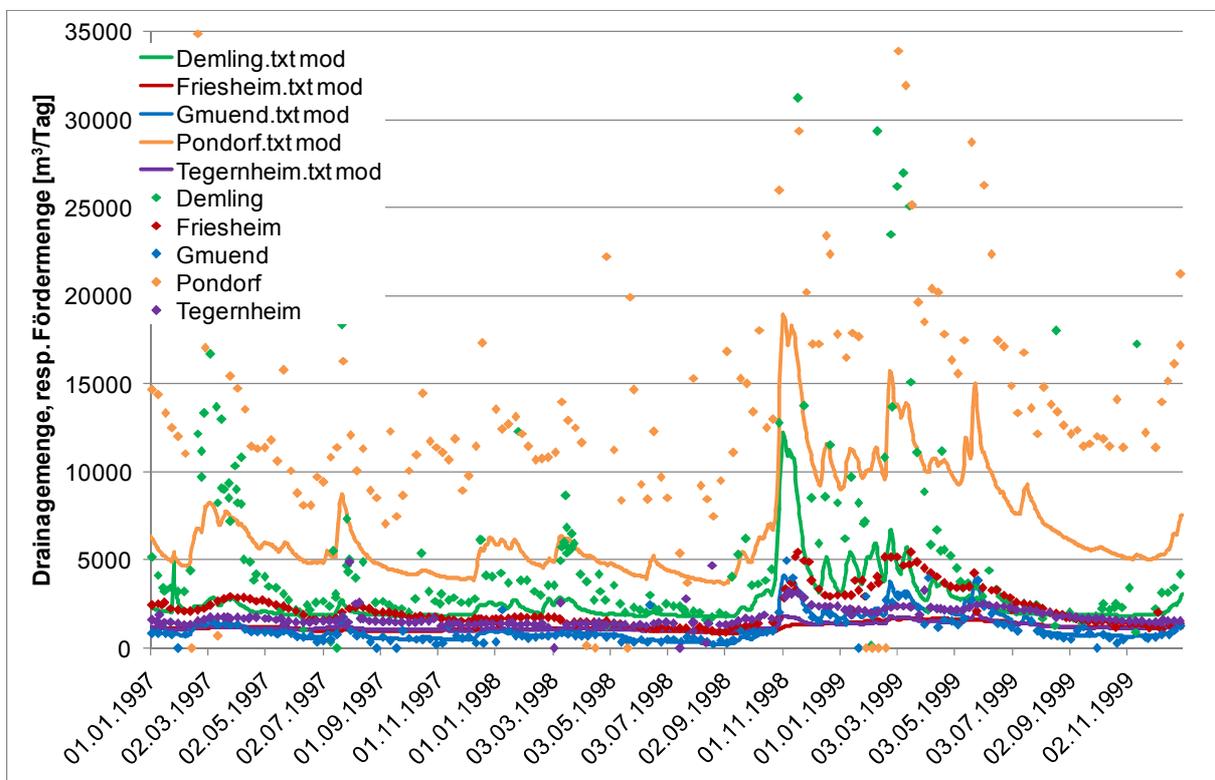


Abbildung 46: Vergleich der berechneten Drainagemengen im Zufluss zu den Schöpfwerken mit den gemessenen Fördermengen im Zeitraum 1997 - 1999

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.

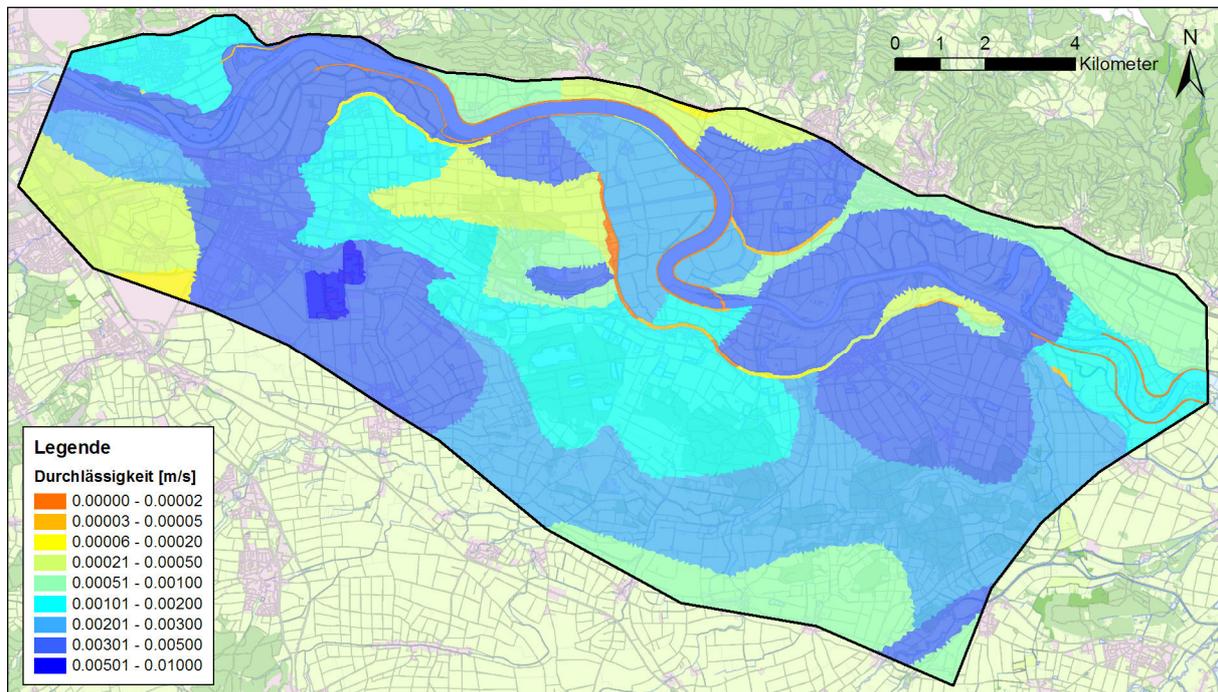


Abbildung 47:

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.

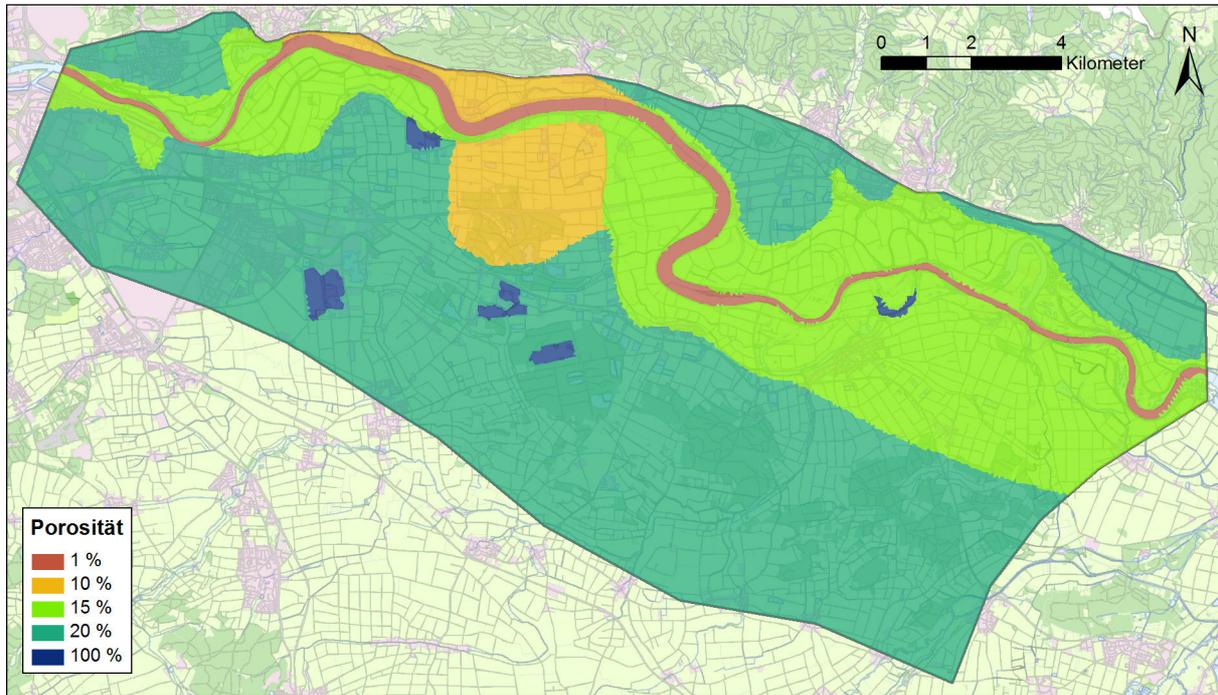


Abbildung 48: Im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels wirksame Porosität.

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

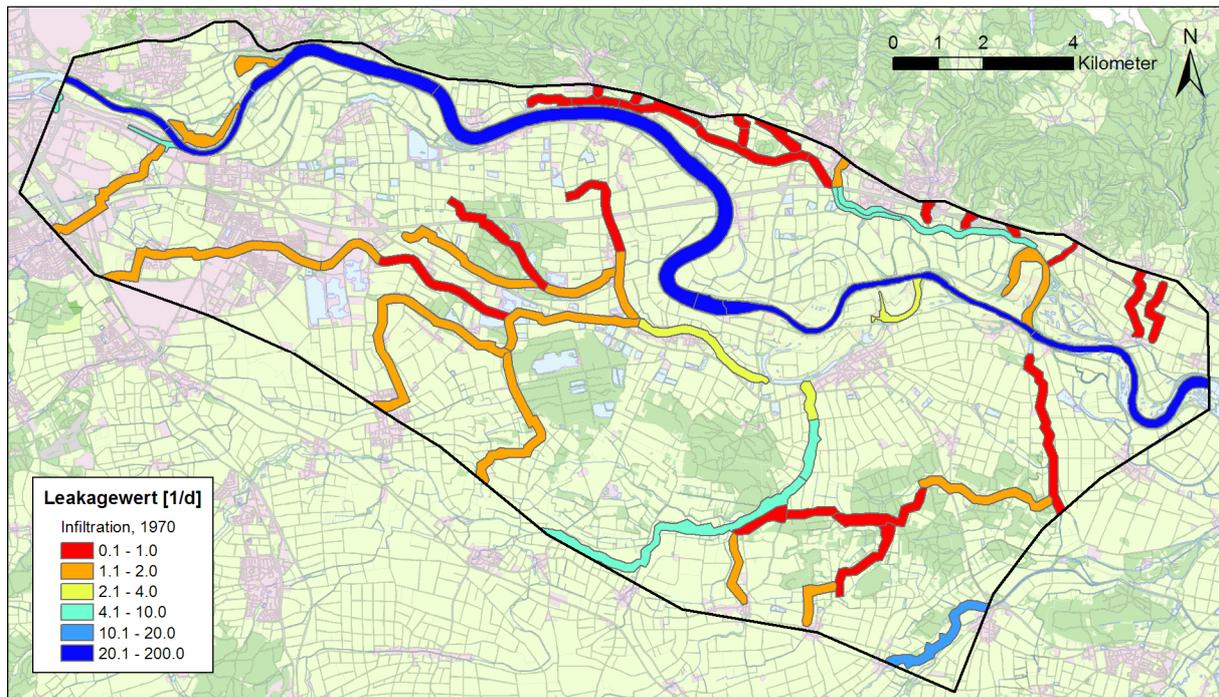


Abbildung 49: In-Leakage (Infiltration) im Zustand vor Bau der Staustufen (1976)

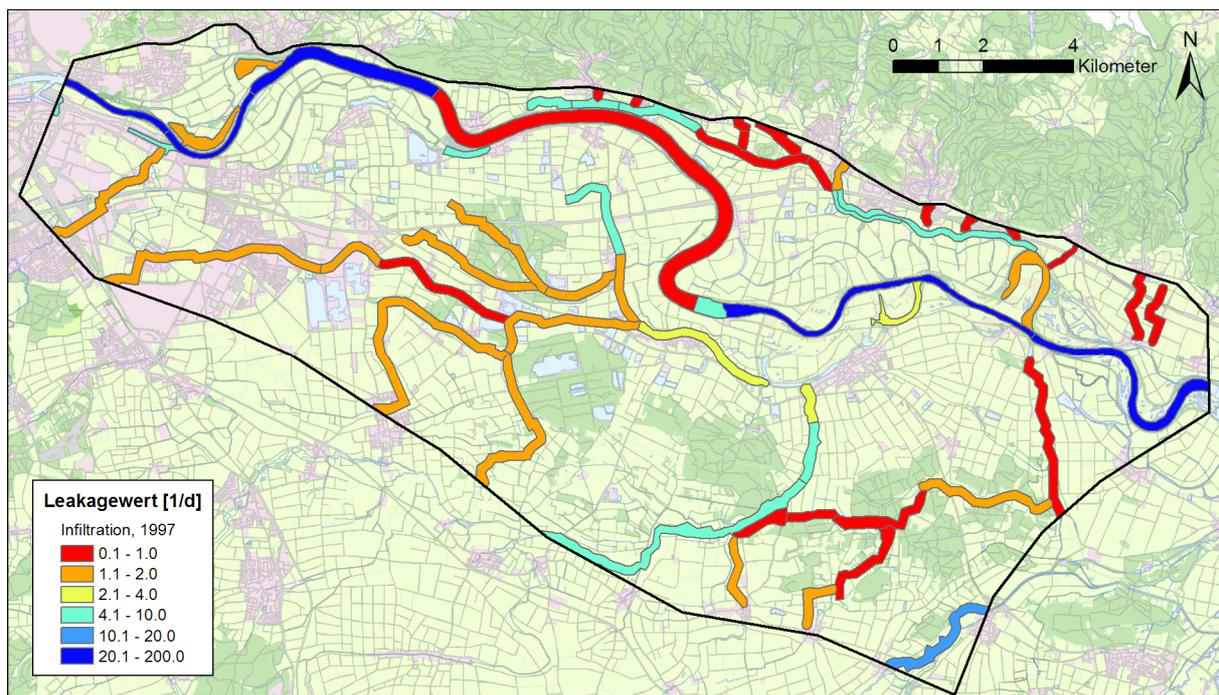


Abbildung 50: In-Leakage (Infiltration) im Zustand nach Bau der Staustufen (1997)

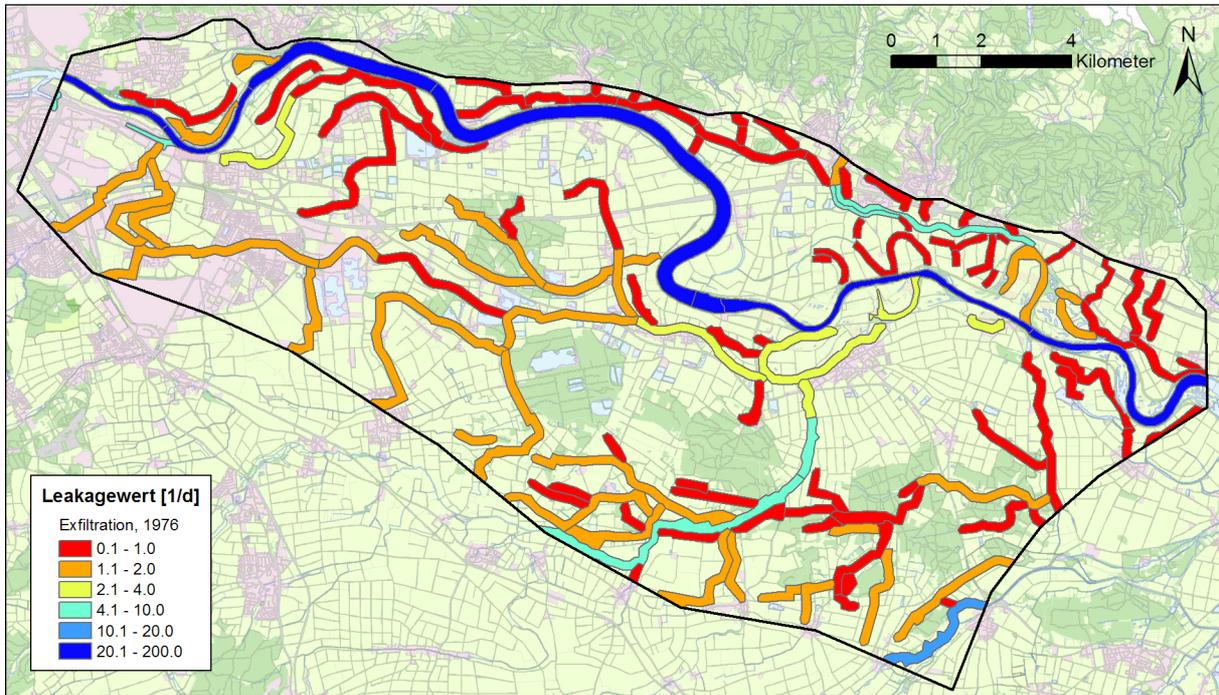


Abbildung 51: Out-Leakage (Exfiltration) im Zustand vor Bau der Staustufen (1976)

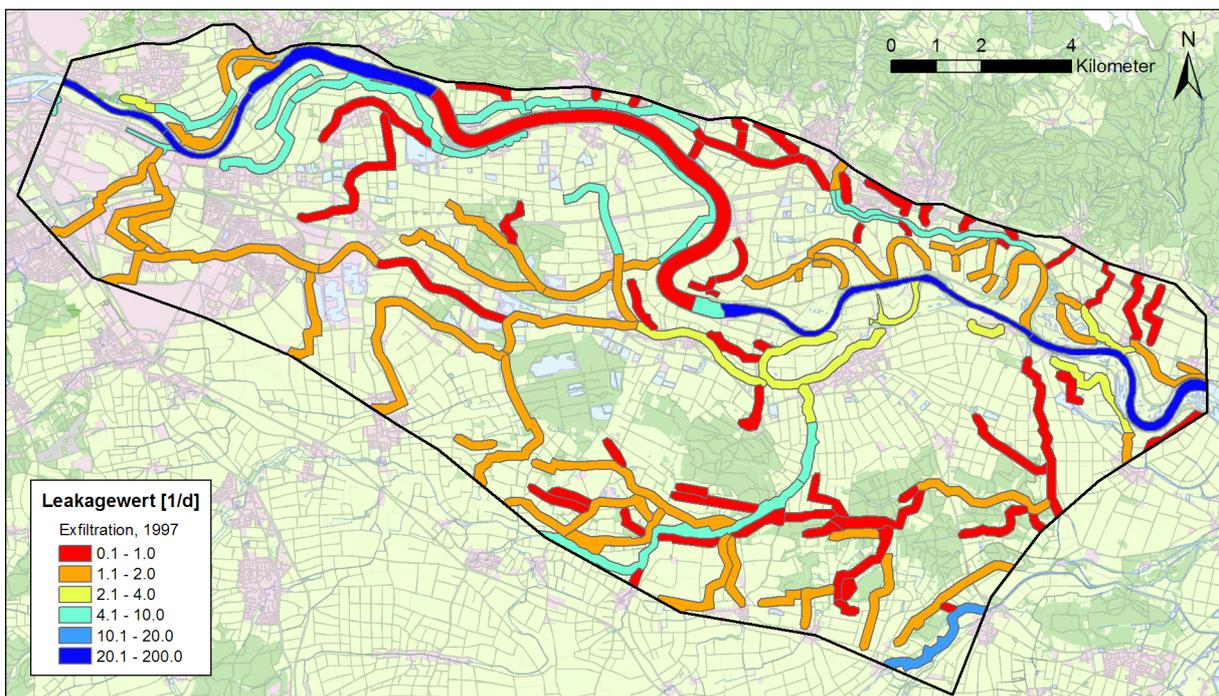


Abbildung 52: Out-Leakage (Exfiltration) im Zustand nach Bau der Staustufen (1997)

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.

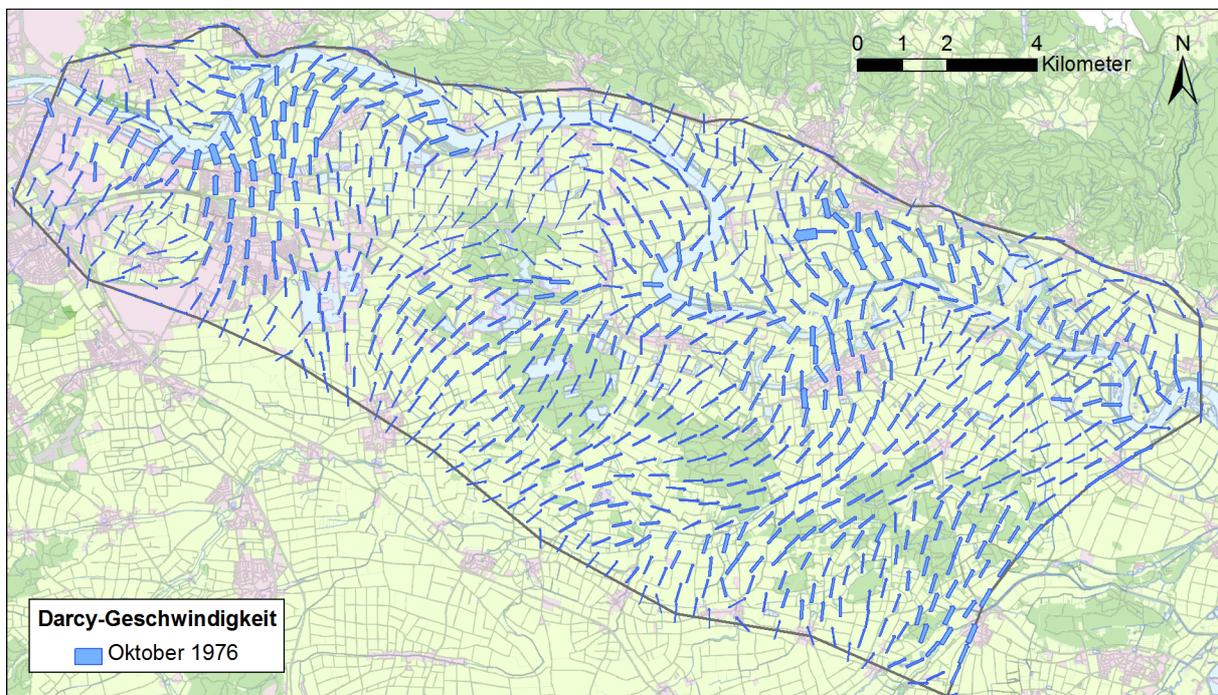


Abbildung 53: Darcy-Geschwindigkeiten am 4. Oktober 1976 (Niederwasser vor dem Bau der Staustufen)

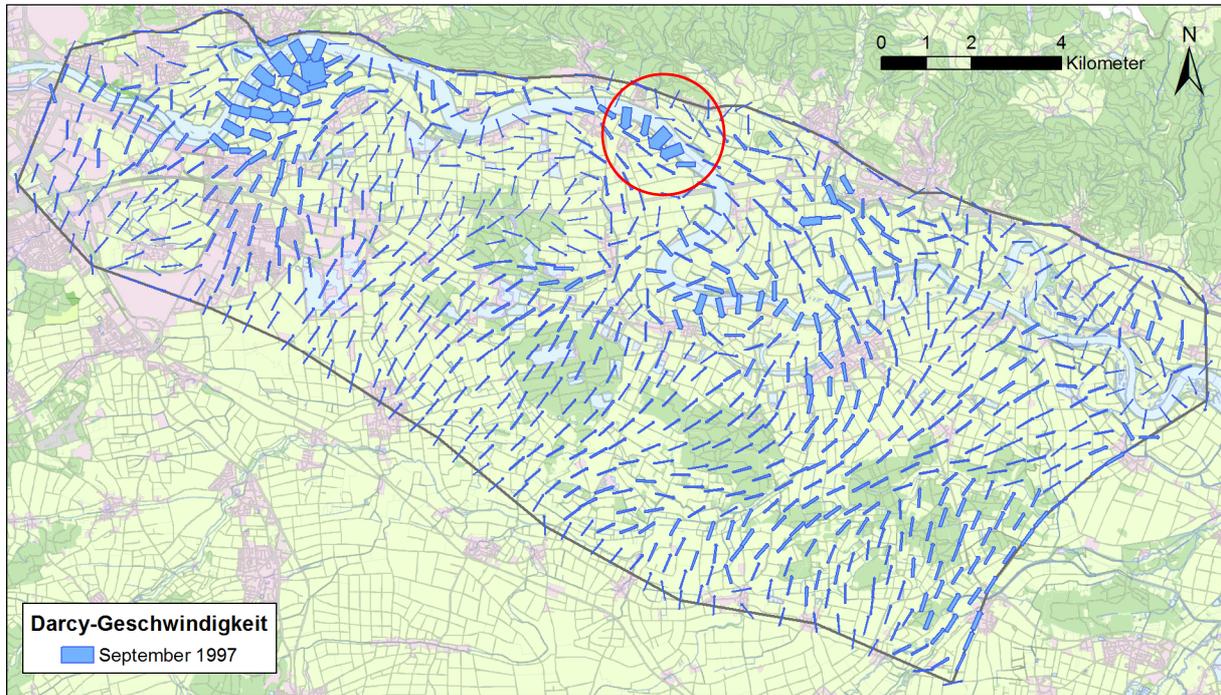


Abbildung 54: Darcy-Geschwindigkeiten am 22. September 1997 (Niederwasser nach dem Bau der Staustufen). Roter Kreis: Bereich der grösseren Dichtwanddurchlässigkeit bei Auburg.

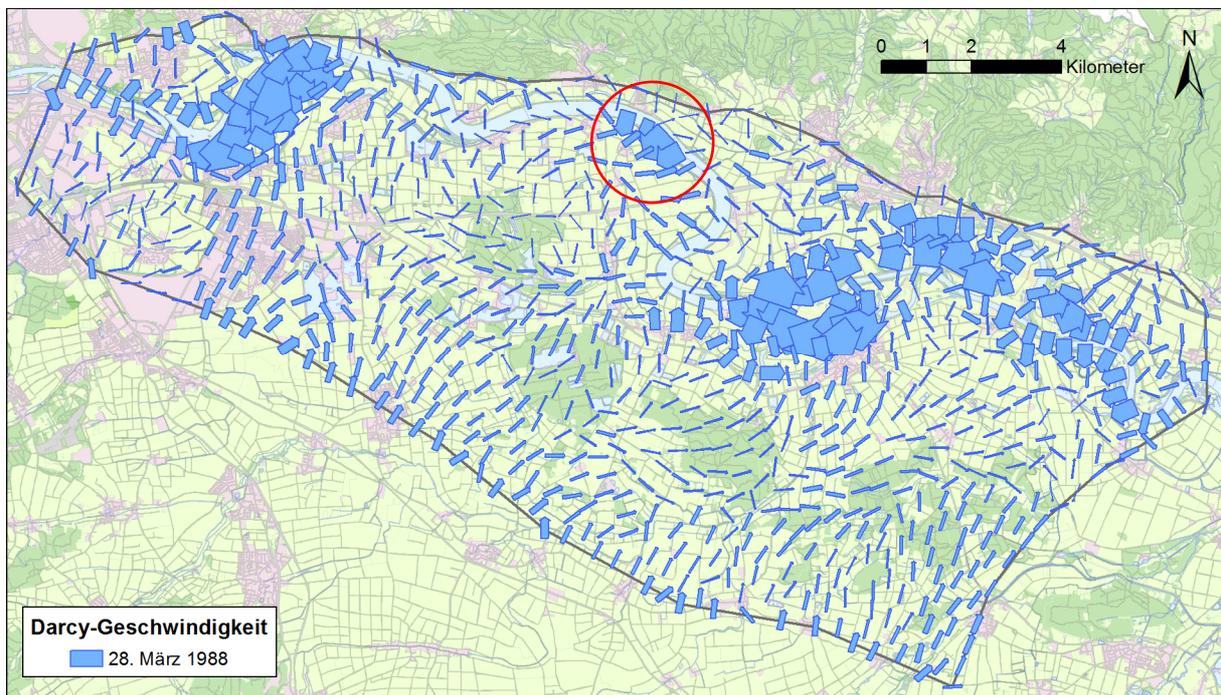


Abbildung 55: Darcy-Geschwindigkeiten am 28. März 1988 (Donau-Hochwasser). Roter Kreis: Bereich der grösseren Dichtwanddurchlässigkeit bei Auburg.

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 grössten Anteile an der Wasserbilanz besitzen die Neubildung aus Niederschlag, sowie der Austausch mit den Oberflächengewässern. Fördermenge, Entnahme für die Bewässerung und Seitenzufluss 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.

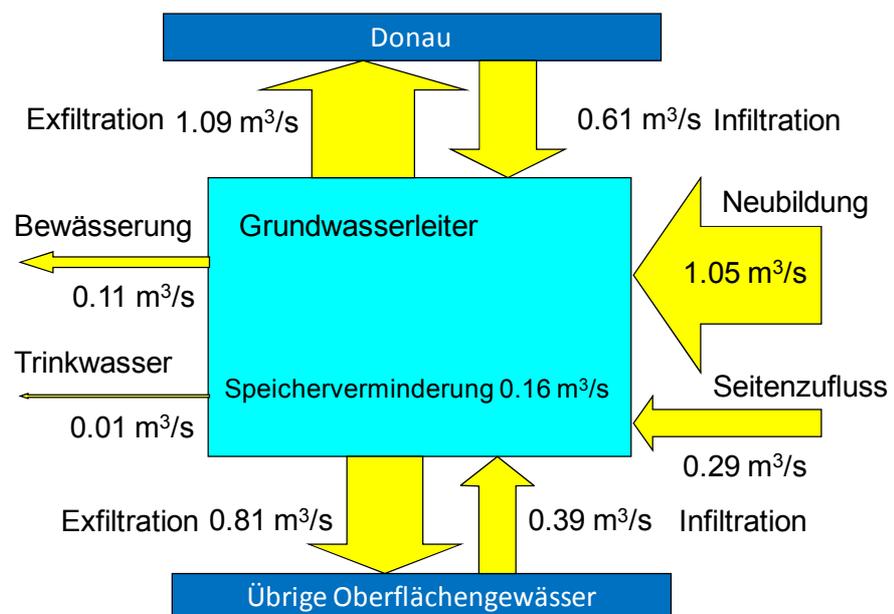


Abbildung 56:

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

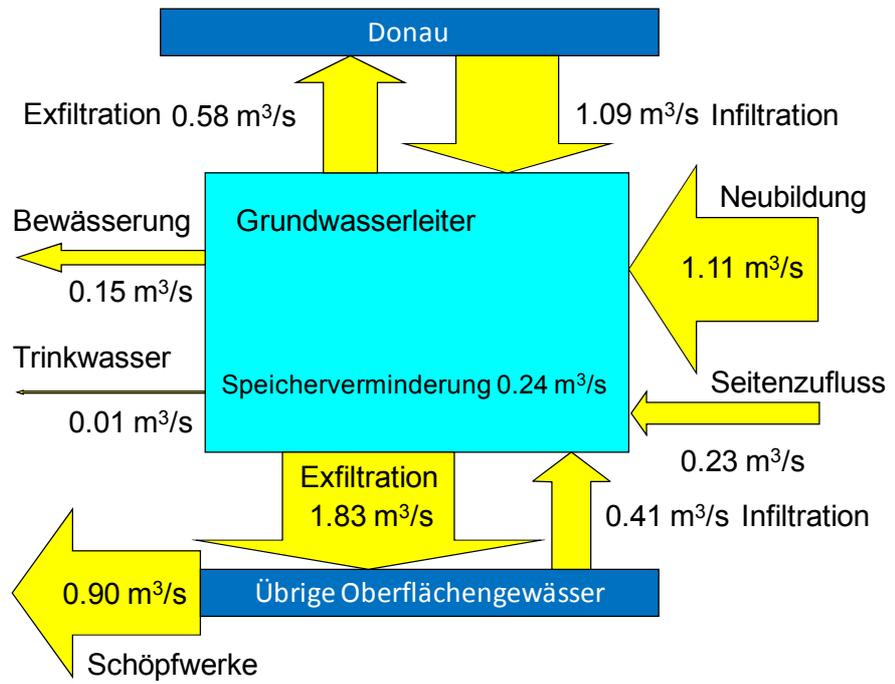


Abbildung 57: Wasserbilanz über das hydrologische Jahr 1993, nach dem Bau der Staustufe Geisling

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 6 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 6: Gütwerte der Validierung

4.2 Grundwasserspiegeldaten des Jahres 2017

Datenlage	<p>Da die Beweissicherung der Staustufen im Jahr 2004 eingestellt wurde, fehlten für die Kalibrierung aktuelle Daten des Grundwasserspiegels. Zudem beschränkte sich die Beweissicherung vor allem auf den donaanahen Bereich, weshalb am südlichen Modellrand nur wenige Messdaten zur Verfügung standen.</p> <p>Im Jahr 2016 wurde im Hinblick auf die Flutpolderprojekte Eltheim und Wörthhof ein neues Messstellennetz zur Beobachtung des Grundwasserspiegels aufgebaut. Dabei wurden soweit als möglich</p>
-----------	---

bestehende Messstellen reaktiviert. Wo dies nicht möglich war wurden neue Bohrungen abgeteuft. Die Messstellen wurden mit Datenloggern instrumentiert, welche seit Anfang 2017 die Grundwasserstände registrieren. Insgesamt stehen 55 Messstellen zur Verfügung.

Analogie

Die erhobenen Daten können für eine weitere Validierung des Grundwassermodells eingesetzt werden. Da bisher nur die Klimadaten und Abflüsse bis zum Jahr 2014 erfasst und ausgewertet wurden, muss dazu das Modell des Jahres 2009 eingesetzt werden. Bezüglich der Niederschlagssituation weist das Jahr 2009 eine ähnliche Charakteristik auf wie das Jahr 2017. Abbildung 58 zeigt das gleitende Mittel der Niederschläge über 7 und 30 Tage der beiden Jahre. Die gleitenden Mittel über 30 Tage verhalten sich sehr ähnlich; vergleichbar sind insbesondere April und Mai.

Vergleich

In Abbildung 59 sind die berechneten Grundwasserspiegel am 1. Mai 2009, zusammen mit den Differenzen zum gemessenen Grundwasserspiegel am 1. Mai 2017 dargestellt. Die Grundwasserspiegel stimmen recht gut überein. Rechtsseitig der Donau ist der berechnete Grundwasserspiegel etwas zu tief, linksseitig der Donau zu hoch. Der Median der Abweichungen liegt bei 26 cm.

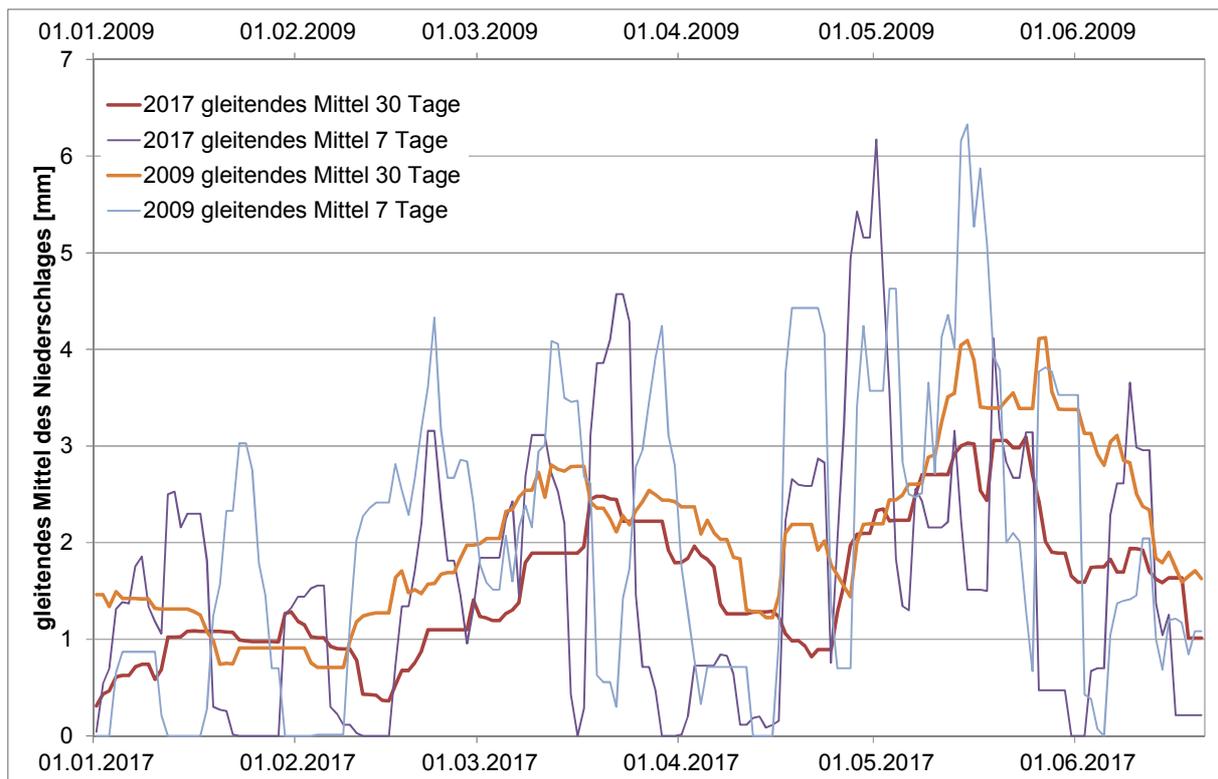


Abbildung 58:

Gleitende Mittel über die Niederschläge der Jahre 2009 und 2017

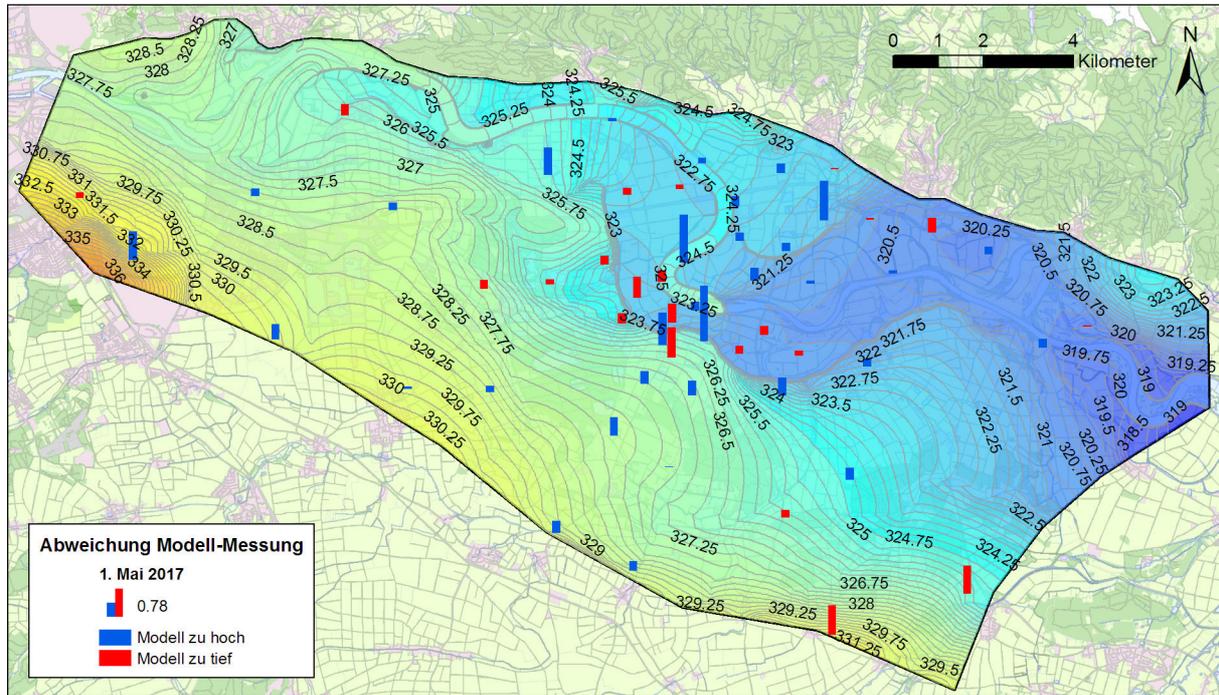


Abbildung 59: berechnete Höhenkurven des Grundwasserspiegels am 1. Mai 2009, verglichen mit den Messungen vom 1. Mai 2017.

4.3 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 61 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.

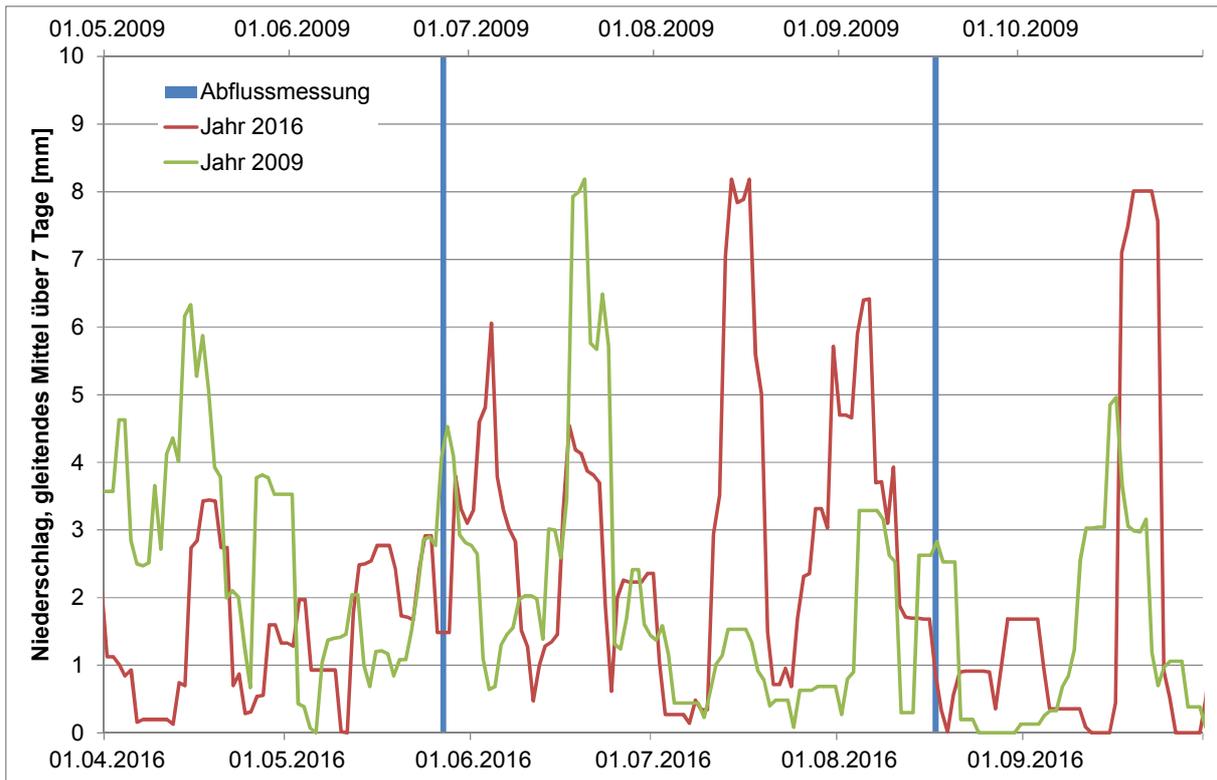


Abbildung 60: Niederschlagsbedingungen vor den Stichtagsmessungen im Vergleich zu einer Zeitperiode im Jahr 2009

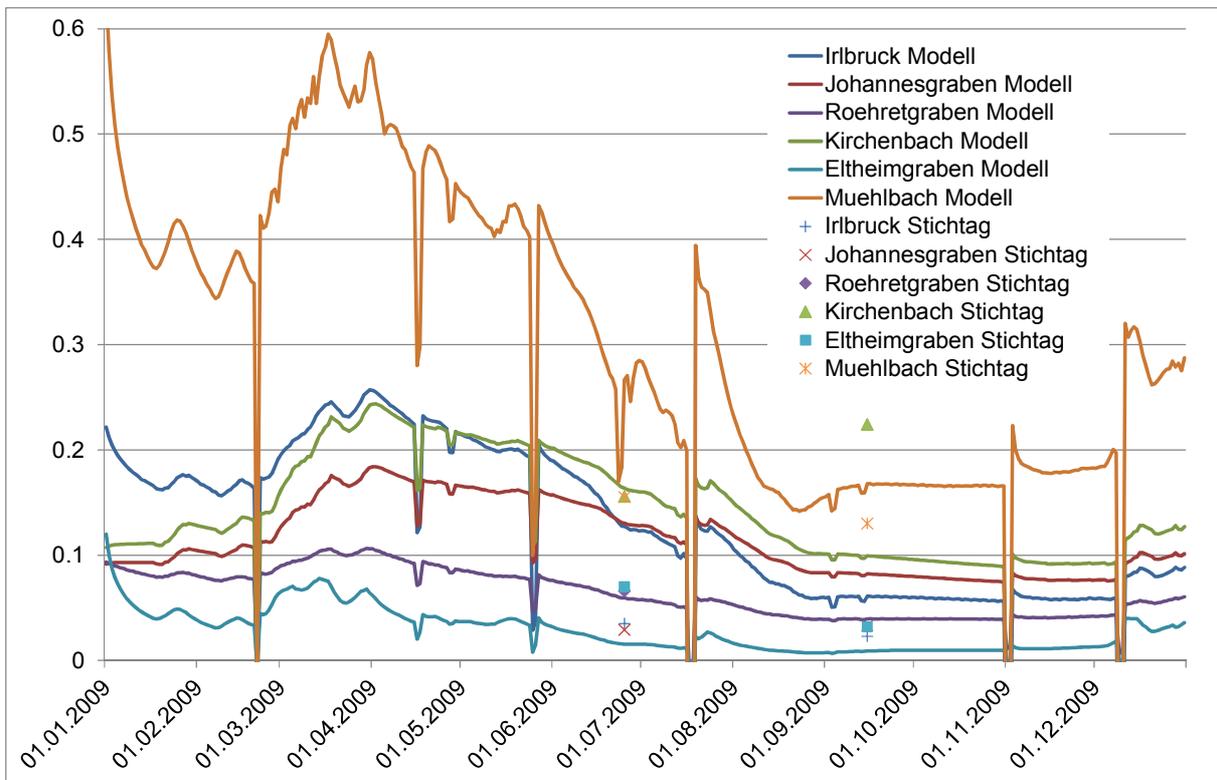


Abbildung 61: Vergleich der berechneten Abflussmengen im Jahr 2009 mit den Abflussmengen des Stichtags. Die Stichtagsmessungen wurden so verschoben, dass die Niederschlagsbedingungen zuvor ähnlich sind.

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 63 bis Abbildung 65 dargestellt. Die Lage der ausgewählten Messstellen ist aus Abbildung 62 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.

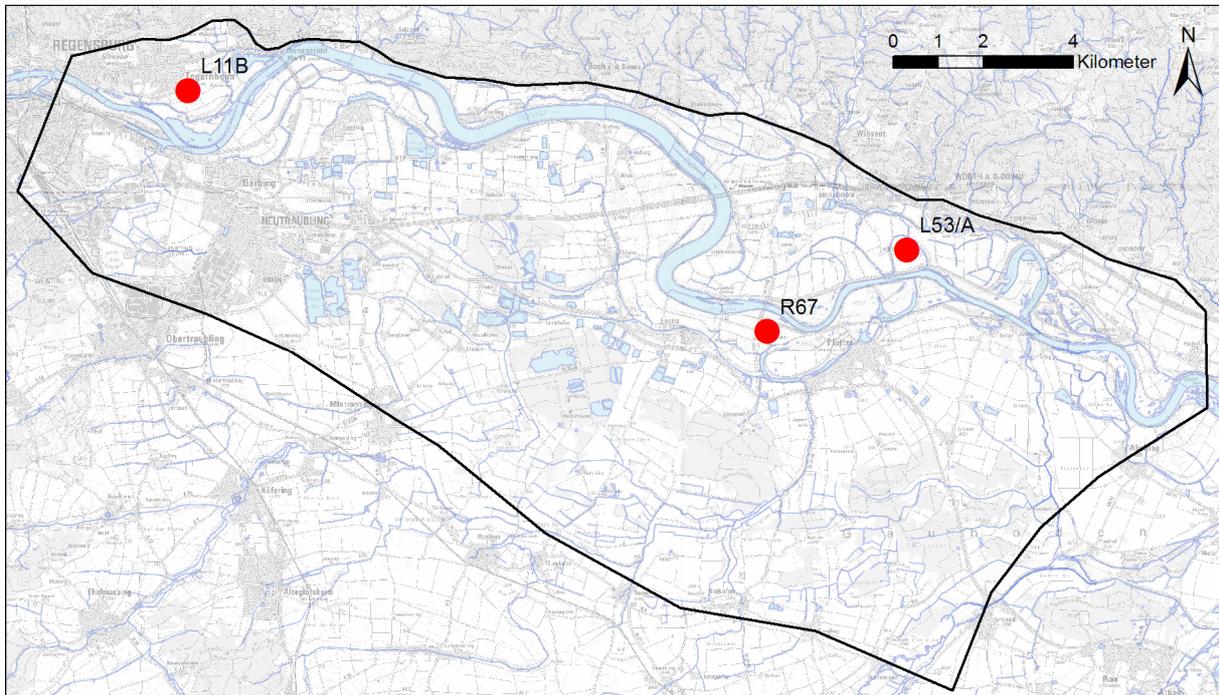


Abbildung 62: Lage der für die Darstellung der Sensitivität verwendeten Messstellen.

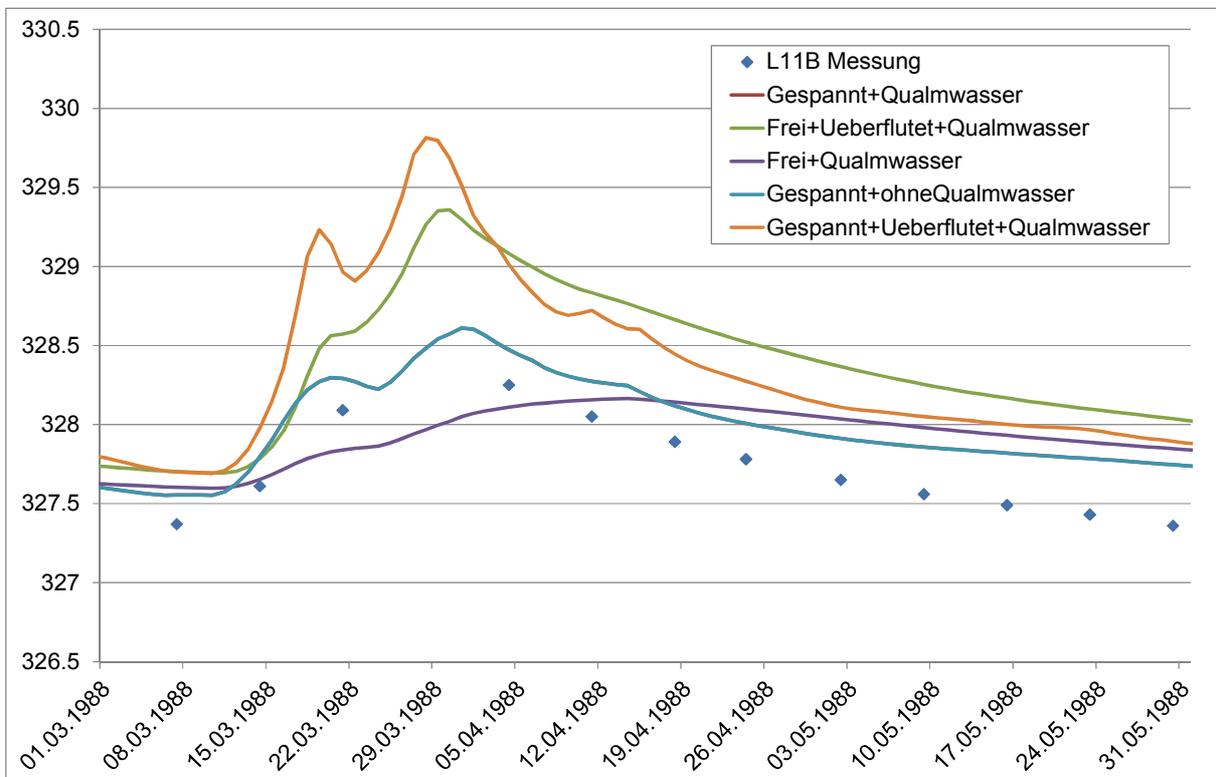


Abbildung 63: Sensitivität des Grundwasserspiegels bei Tegernheim auf die Randbedingungen in der Auestufe. Die Kurve „Gespannt + Qualmwasser“ ist identisch mit derjenigen von „Gespannt ohne Qualmwasser“.

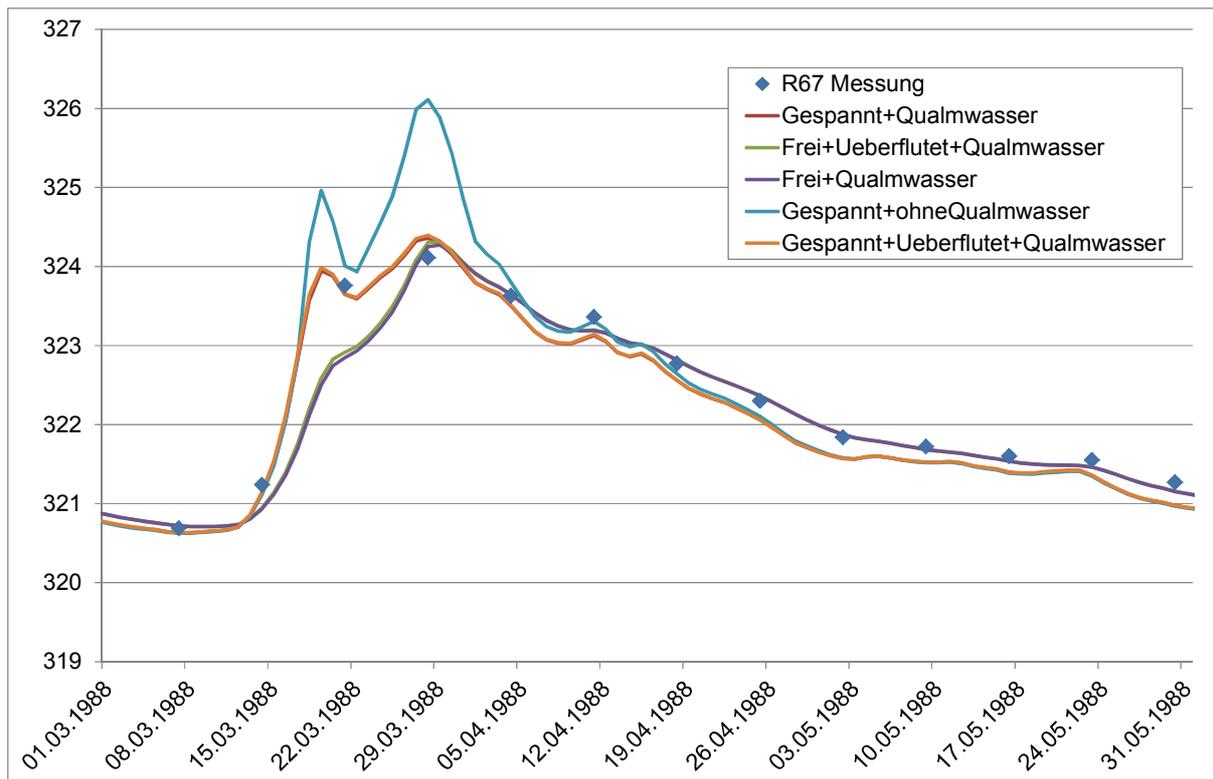


Abbildung 64: Sensitivität des Grundwasserspiegels bei Pfatter auf die Randbedingungen in der Auestufe. Die Kurven von „Gespannt + Qualmwasser“ und „Gespannt + überflutet + Qualmwasser“, sowie die Kurven von „Frei + überflutet + Qualmwasser“ und „Frei + Qualmwasser“ überdecken sich.

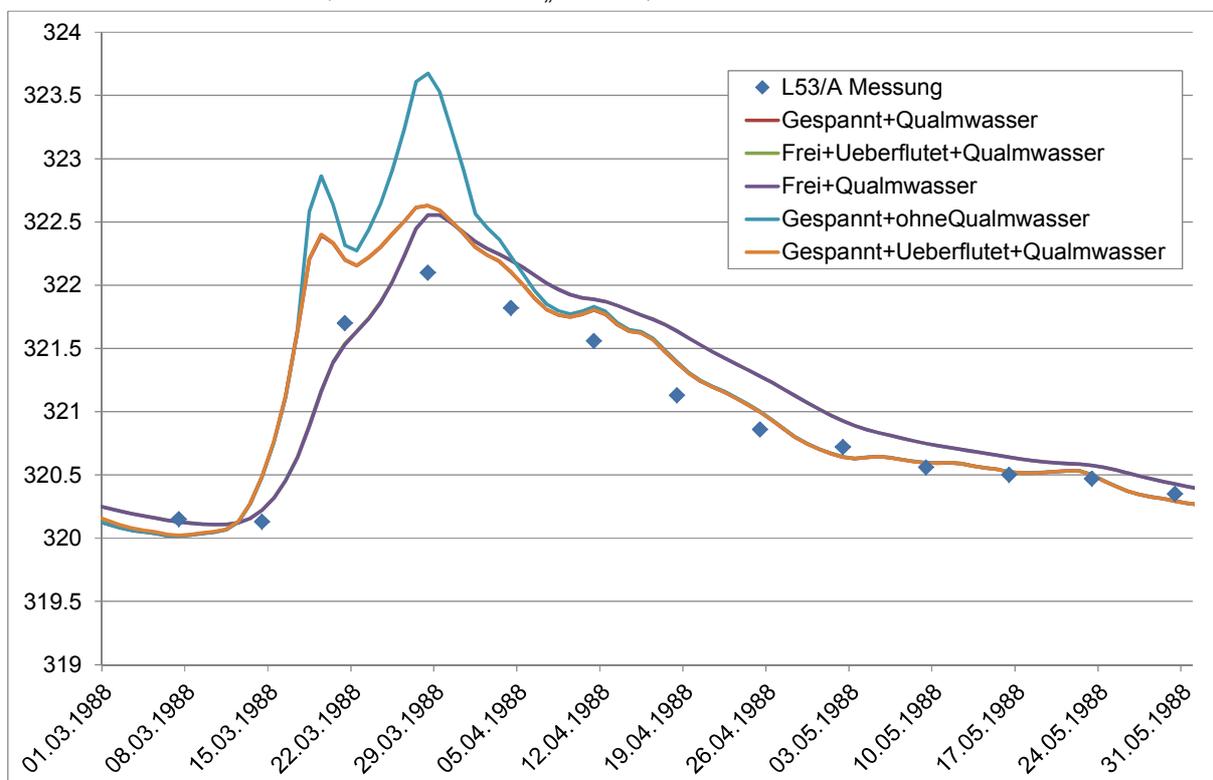


Abbildung 65: Sensitivität des Grundwasserspiegels beim Wörthhof auf die Randbedingungen in der Auestufe. Die Kurven von „Gespannt + Qualmwasser“ und „Gespannt + überflutet + Qualmwasser“, sowie die Kurven von „Frei + überflutet + Qualmwasser“ und „Frei + Qualmwasser“ überdecken sich.

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 66 bis Abbildung 68 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 69), 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>

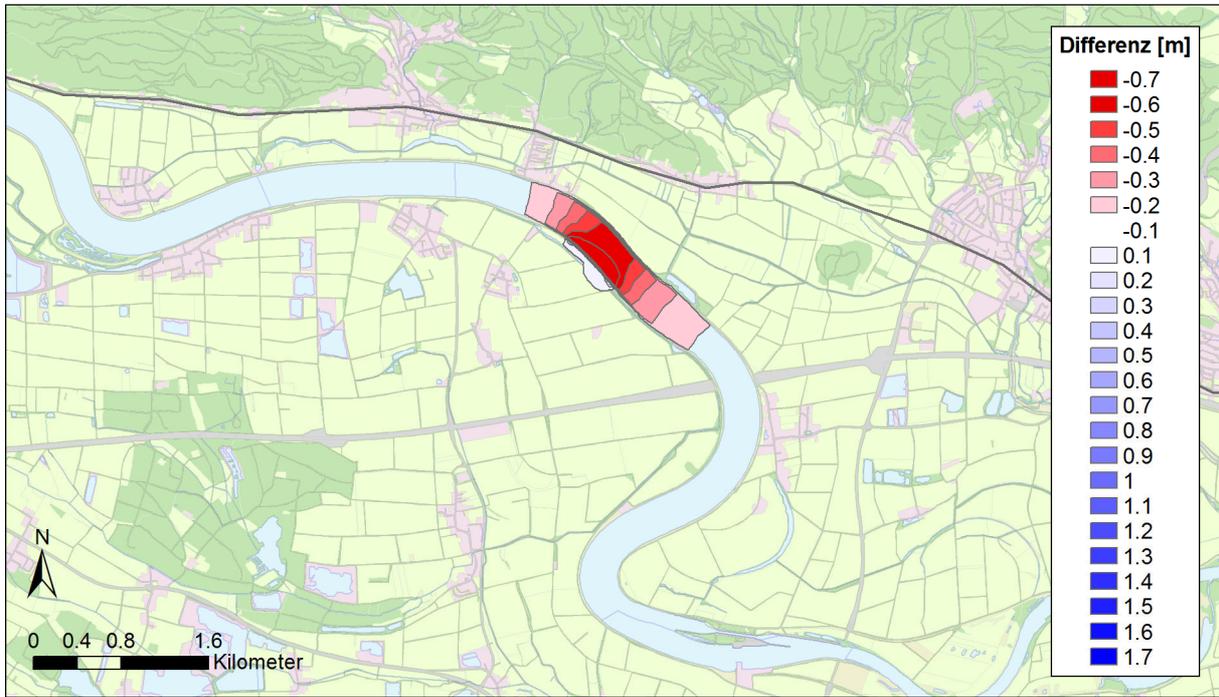


Abbildung 66: Differenz zwischen dem Fall mit erhöhter Dichtwanddurchlässigkeit und dem kalibrierten Modell am 22.09.1997 (Niederwasser).

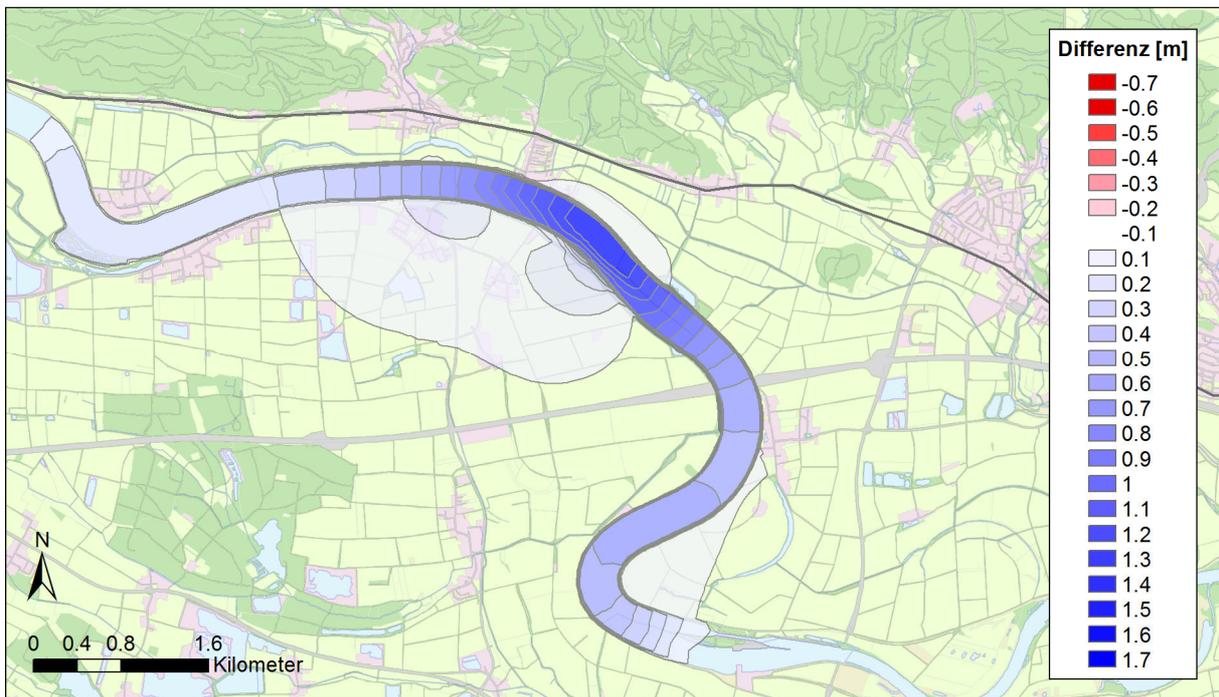


Abbildung 67: Differenz zwischen dem Fall mit erhöhter Donau-Leakage und dem kalibrierten Modell am 22.09.1997 (Niederwasser).

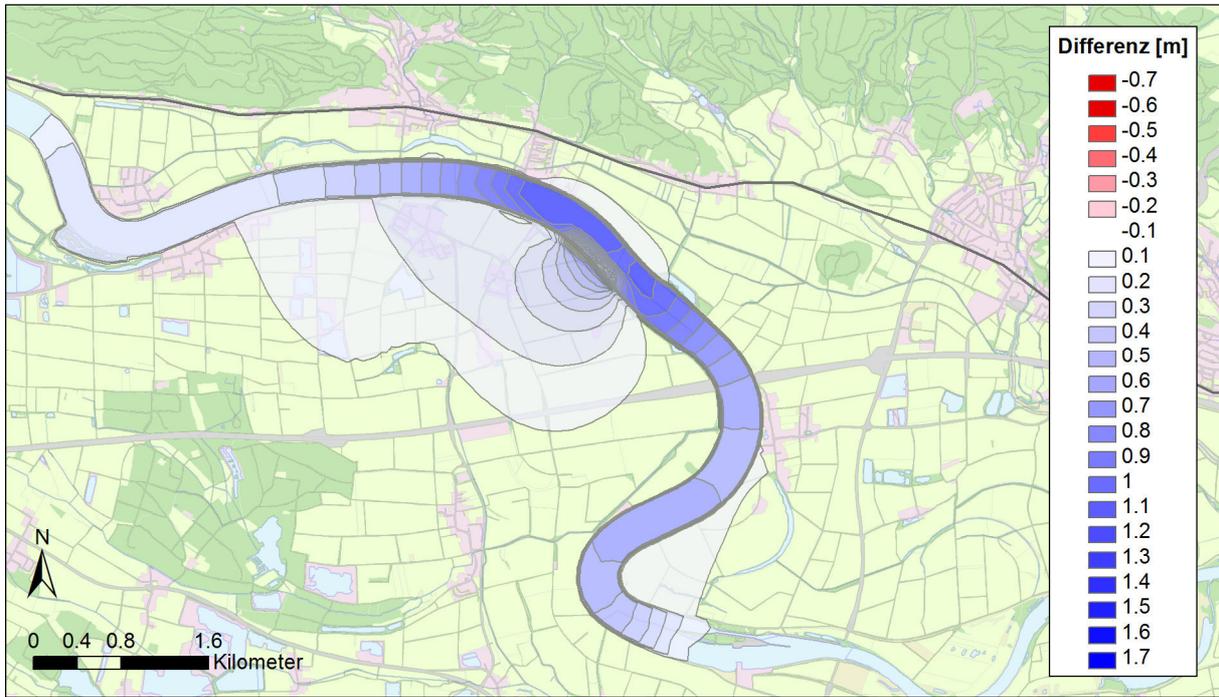


Abbildung 68: Differenz zwischen dem Fall mit erhöhter Dichtwanddurchlässigkeit und erhöhter Donau-Leakage und dem kalibrierten Modell am 22.09.1997 (Niederwasser).

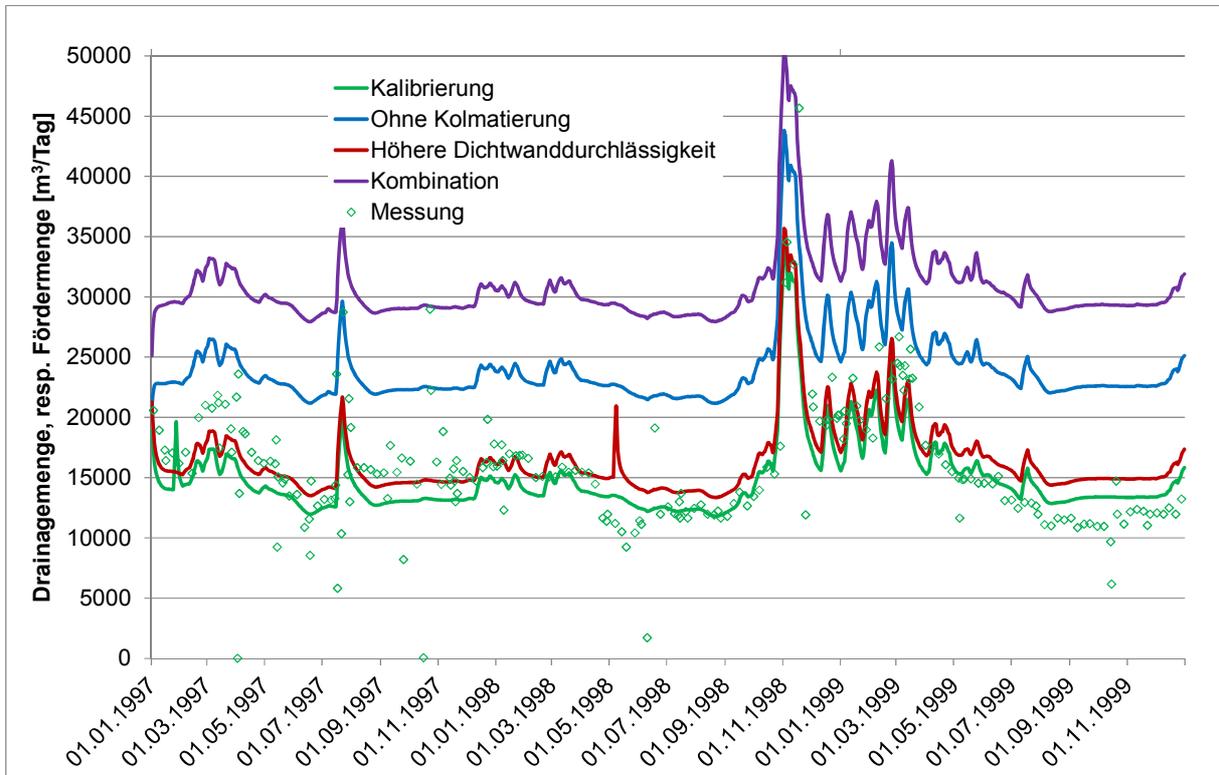


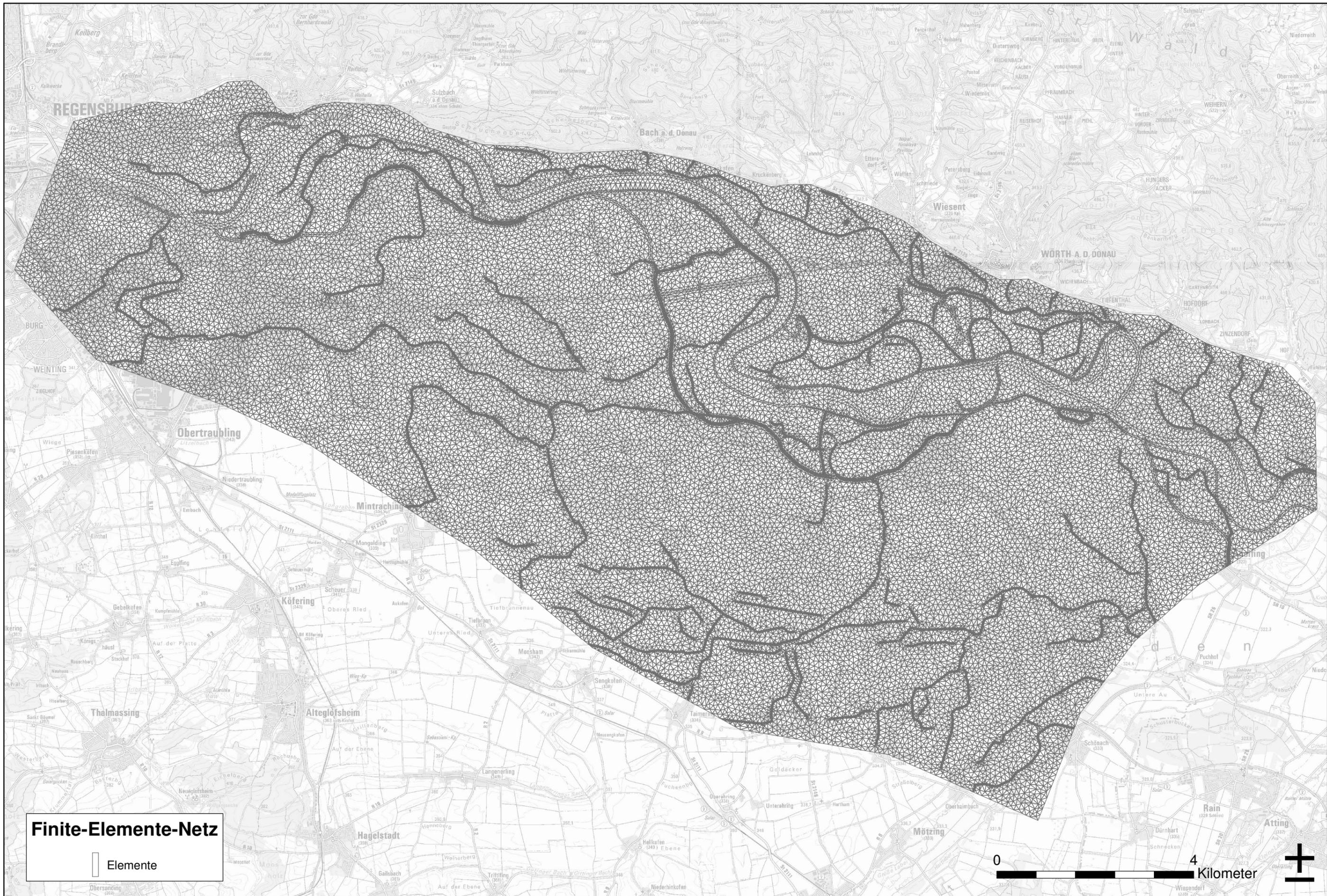
Abbildung 69: Vergleich der drainierten Wassermenge im Zufluss zum Schöpfwerk Auburg.

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 Literatur

- [1] Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (2016), Geländemodell DGM 1
<http://www.lbv.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*



Finite-Elemente-Netz

Elemente

Berichtsverfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg



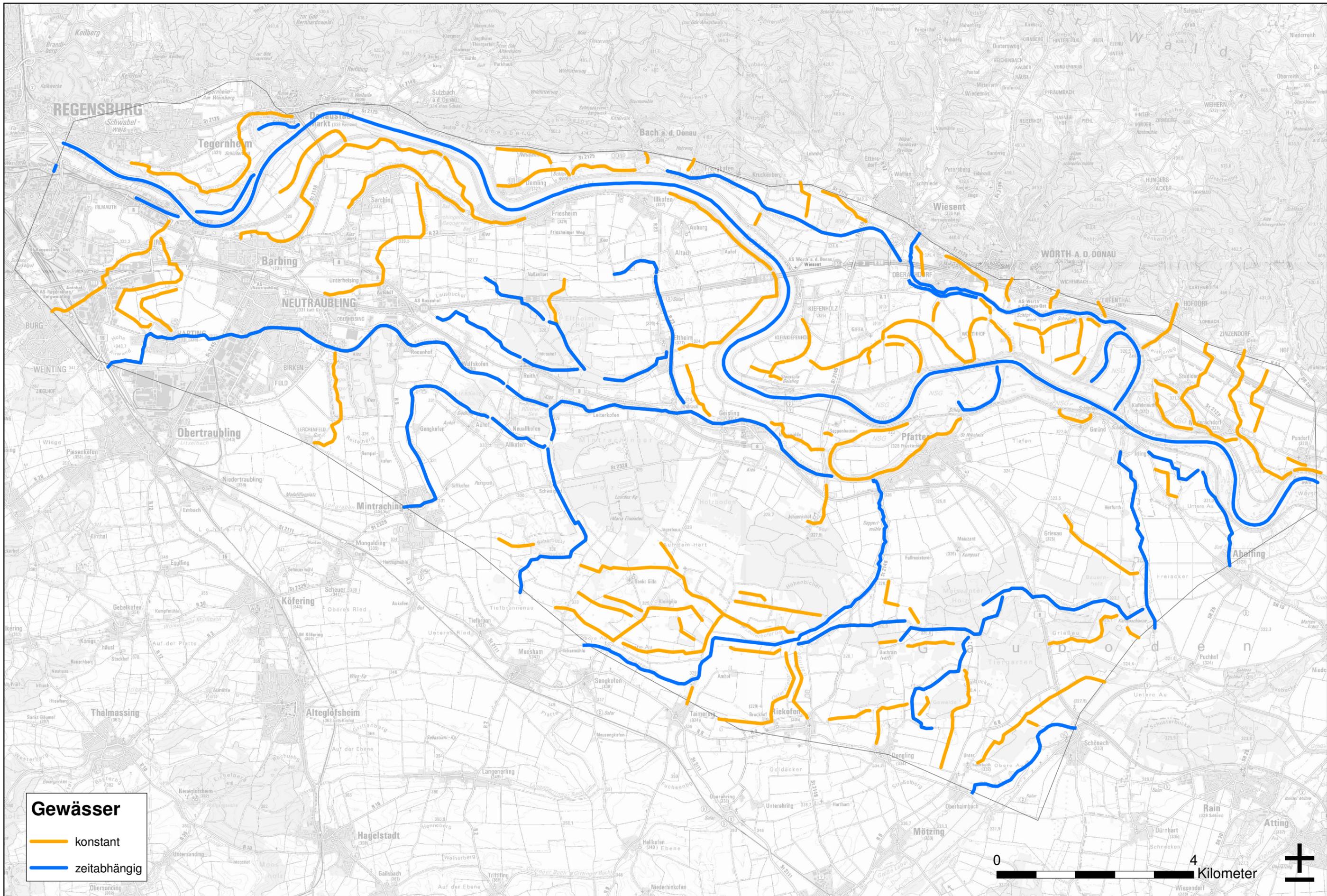
Projekt:
Grundwassermodell -
Flutpolder Elthim und Wörthhof

Planinhalt:
Finite-Elemente-Netz

Maßstab:
1:68 000

Anlage:
1

Plan-Nr.:
1



Gewässer

- konstant
- zeitabhängig



Berichtsverfasser: Simultec AG Datum: 27.11.2017	Auftraggeber: WWA Regensburg 	Projekt: Grundwassermodell - Flutpolder Eltheim und Wörthhof	Planinhalt: Im Modell berücksichtigte Gewässer
		Maßstab: 1:68 000	Anlage: 2 Plan-Nr.: 1



Legende
 Deckschicht > 1m



Berichtsverfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

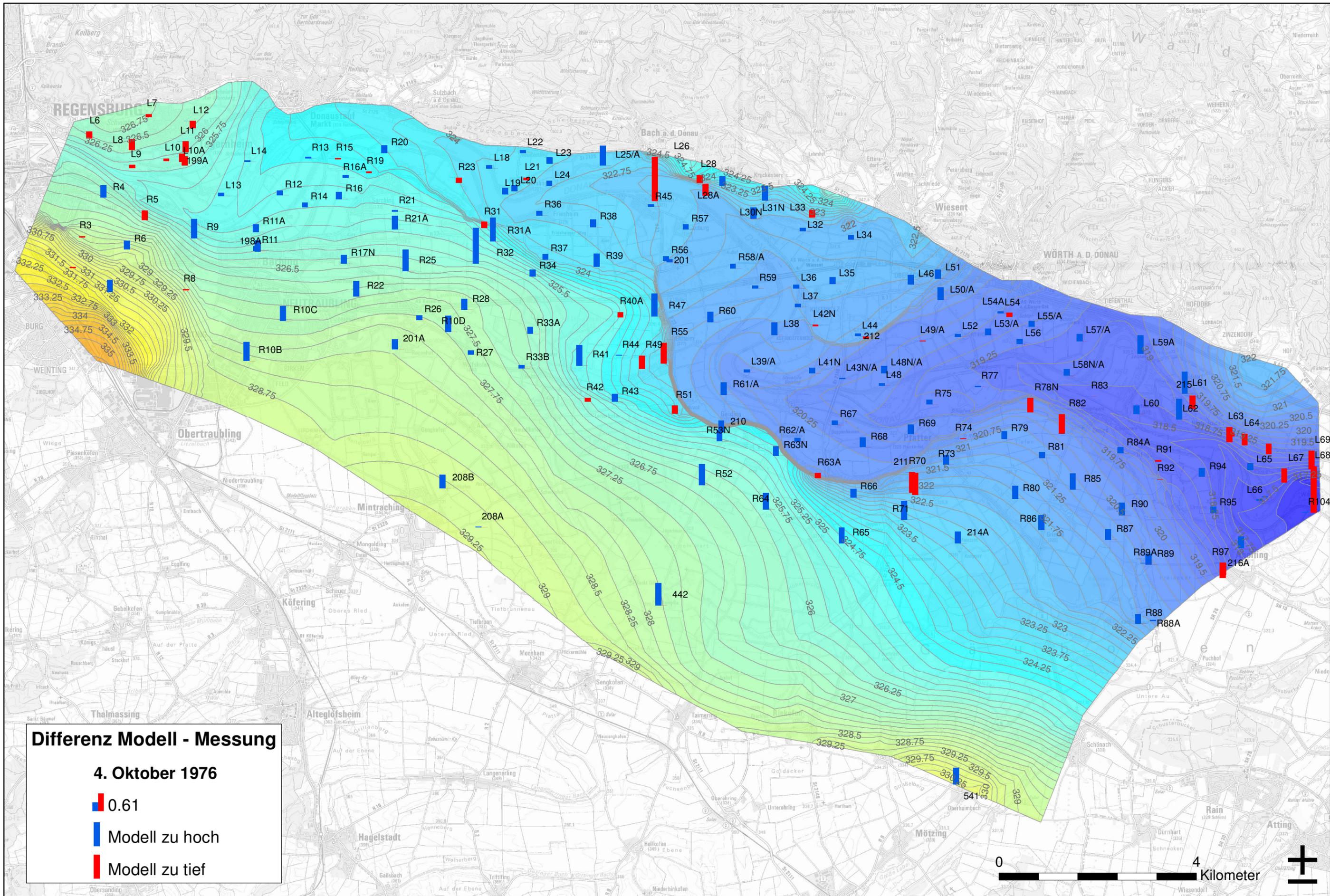


Projekt:
 Grundwassermodell -
 Flutpolder Eltheim und Wörthhof

Planinhalt:
 Bereiche, in denen die Deckschicht
 eine Mächtigkeit grösser 1 m aufweist

Maßstab:
 1:68 000

Anlage:
 3
 Plan-Nr.:
 1



Differenz Modell - Messung

4. Oktober 1976

0.61

Modell zu hoch

Modell zu tief

Berichtsv Verfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

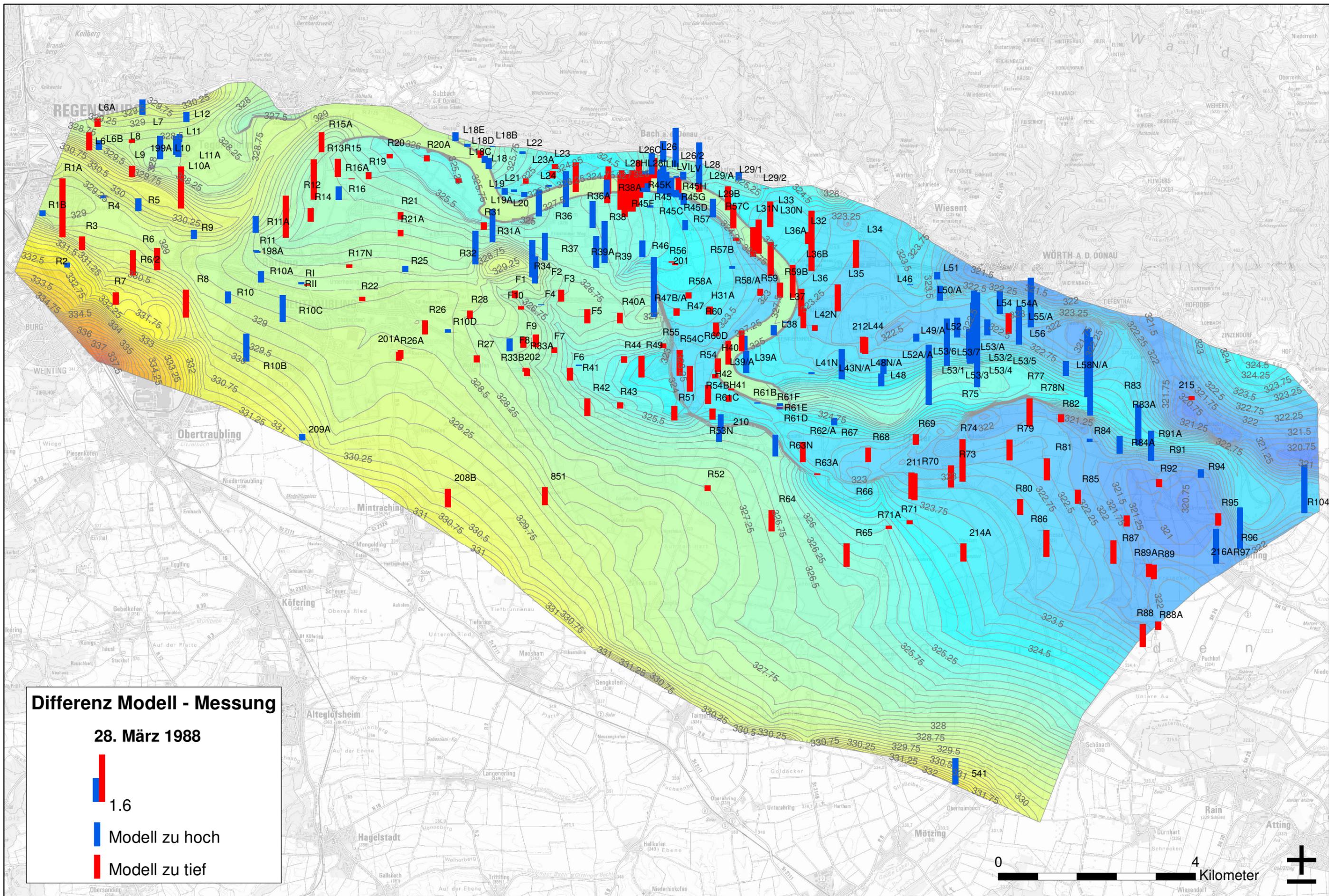


Projekt:
Grundwassermodell -
Flutpolder Elthim und Wörthhof

Planinhalt:
Grundwasserhöhengleichen bei
Niederwasserstand am 4.10.1976.

Maßstab:
1:68 000

Anlage:
4
Plan-Nr.:
1



Berichtsv Verfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

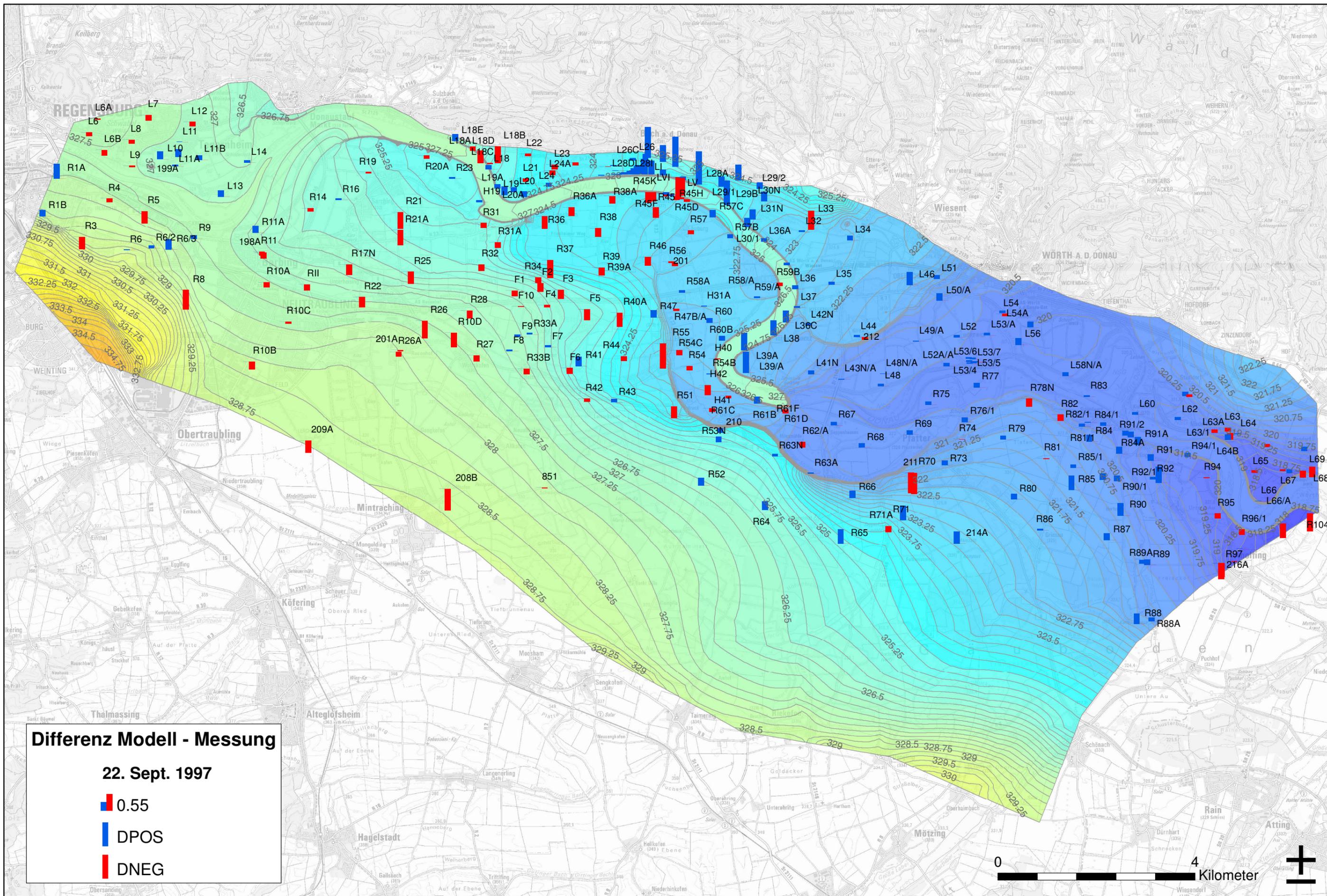


Projekt:
 Grundwassermodell -
 Flutpolder Elthem und Wörthhof

Planinhalt:
 Grundwasserhöhengleichen bei
 Hochwasserstand am 28.3.1988.

Maßstab:
 1:68 000

Anlage:
 5
 Plan-Nr.:
 1



Differenz Modell - Messung

22. Sept. 1997

- 0.55
- DPOS
- DNEG

0 4 Kilometer

Berichtsv Verfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

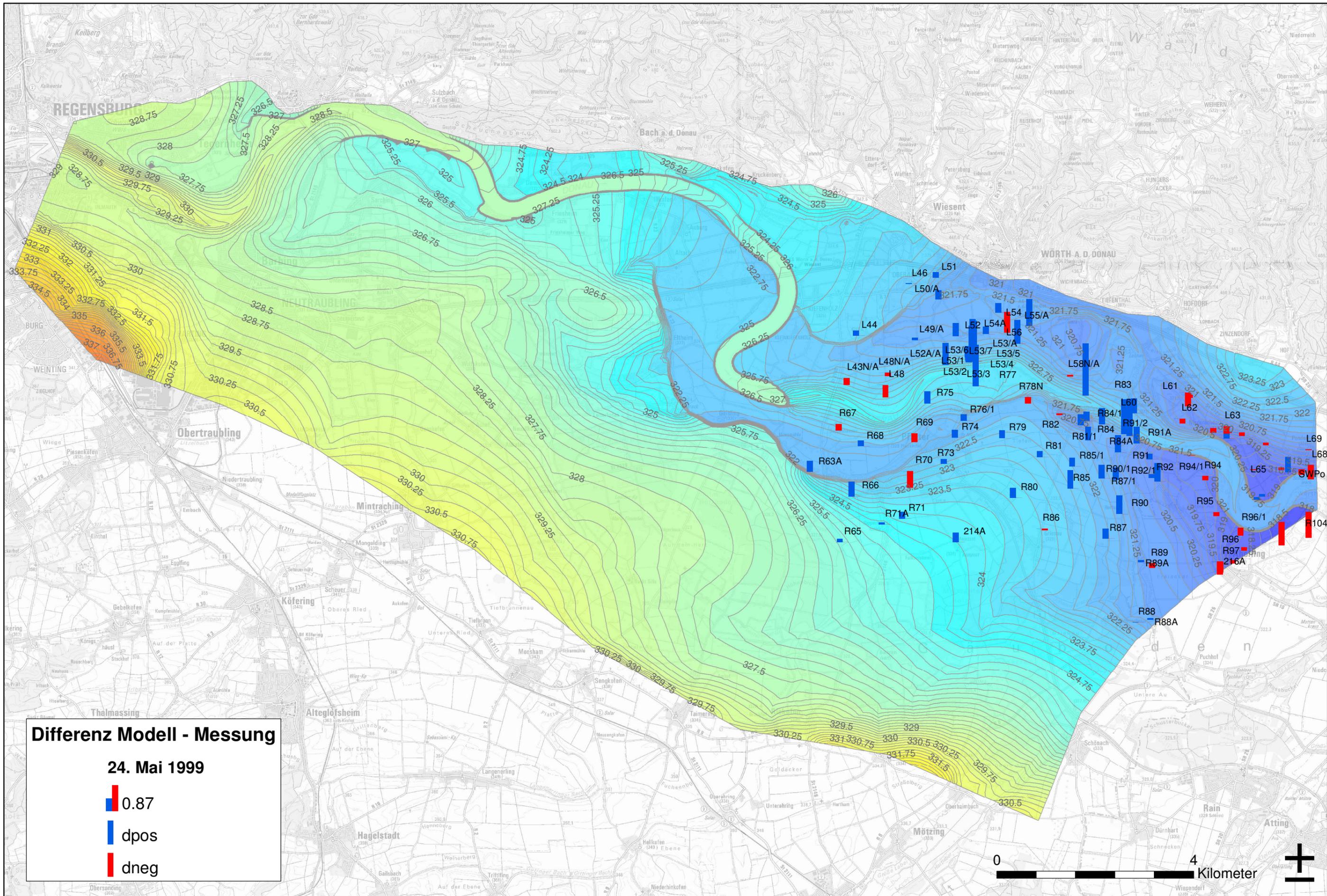


Projekt:
Grundwassermodell -
Flutpolder Elthim und Wörthhof

Planinhalt:
Grundwasserhöhengleichen bei
Niederwasserstand am 22.9.1997.

Maßstab:
1:68 000

Anlage:
6
Plan-Nr.:
1



Differenz Modell - Messung

24. Mai 1999

0.87

dpos

dneg

Berichtsvfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg



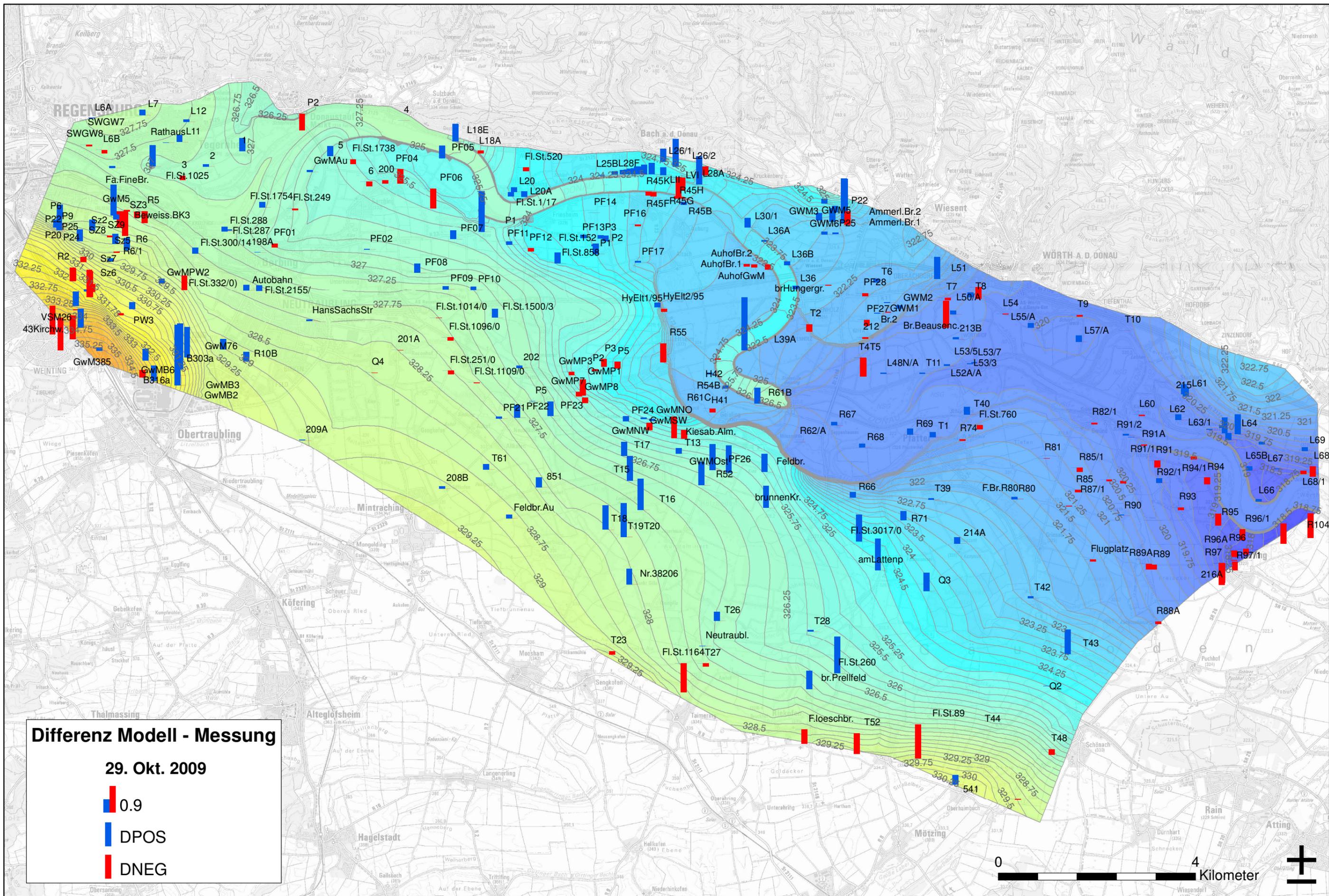
Projekt:
Grundwassermodell -
Flutpolder Elthim und Wörthhof

Planinhalt:
Grundwasserhöhengleichen bei
Hochwasserstand am 24.5.1999.

Maßstab:
1:68 000

Anlage:
7

Plan-Nr.:
1



Differenz Modell - Messung

29. Okt. 2009

- 0.9
- DPOS
- DNEG



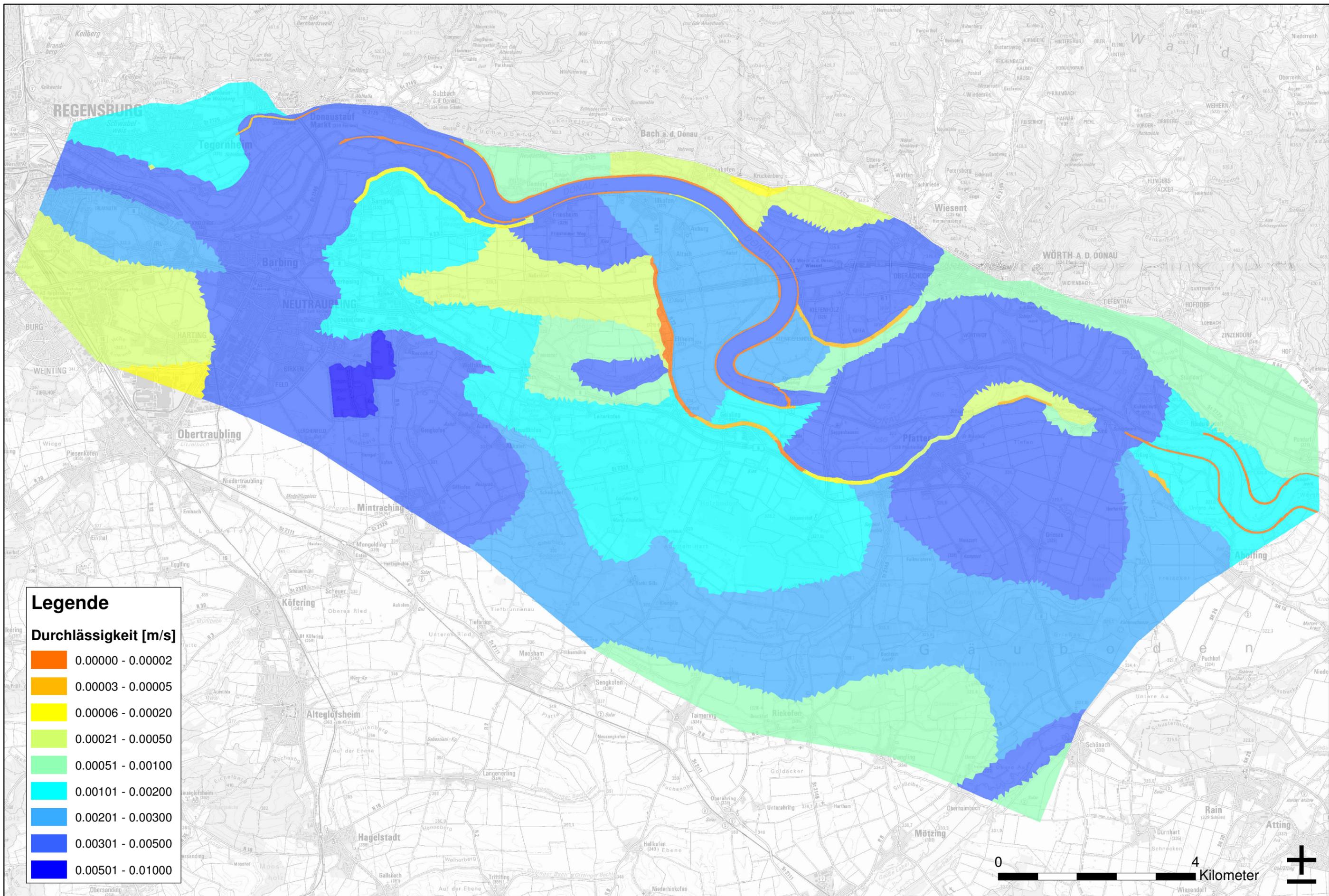
Berichtsv Verfasser: Simultec AG
 Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

Projekt: Grundwassermodell - Flutpolder Eltheim und Wörthhof

Planinhalt: Grundwasserhöhengleichen bei Niederwasserstand am 29.10.2009.

Maßstab: 1:68 000
 Anlage: 8
 Plan-Nr.: 1



Legende

Durchlässigkeit [m/s]

	0.0000 - 0.00002
	0.00003 - 0.00005
	0.00006 - 0.00020
	0.00021 - 0.00050
	0.00101 - 0.00200
	0.00201 - 0.00300
	0.00301 - 0.00500
	0.00501 - 0.01000

Berichtsv Verfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

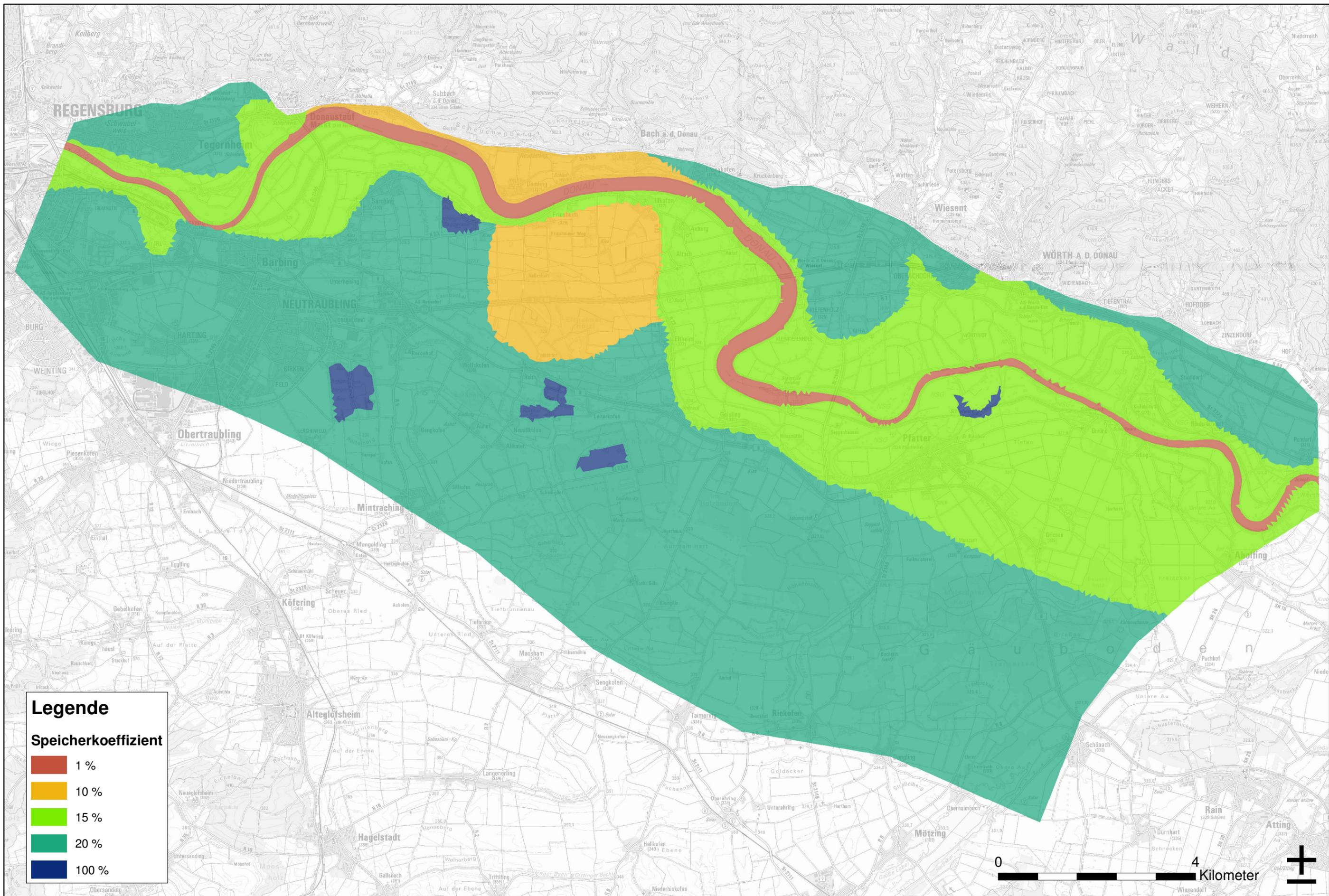


Projekt:
Grundwassermodell -
Flutpolder Elthim und Wörthhof

Planinhalt:
Resultierende Durchlässigkeitswerte
des Modells im Zustand nach Bau
der Staustufen

Maßstab:
1:68 000

Anlage:
9
Plan-Nr.:
1



Berichtsverfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg



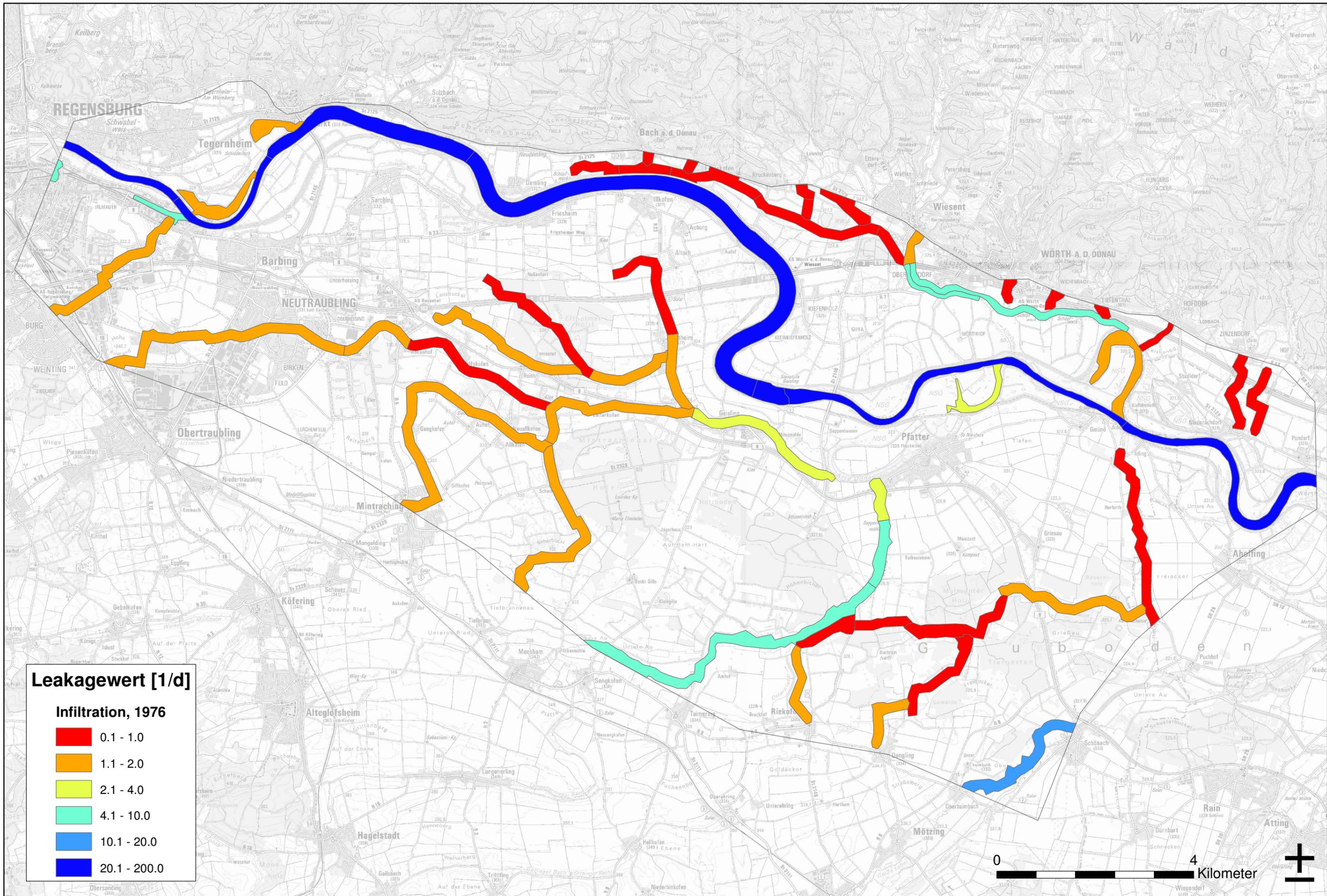
Projekt:
Grundwassermodell -
Flutpolder Elthim und Wörthhof

Planinhalt:
Im Schwankungsbereich des Grund-
wasserspiegels wirksame Porosität

Maßstab:
1:68 000

Anlage:
10

Plan-Nr.:
1



Berichtsv Verfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

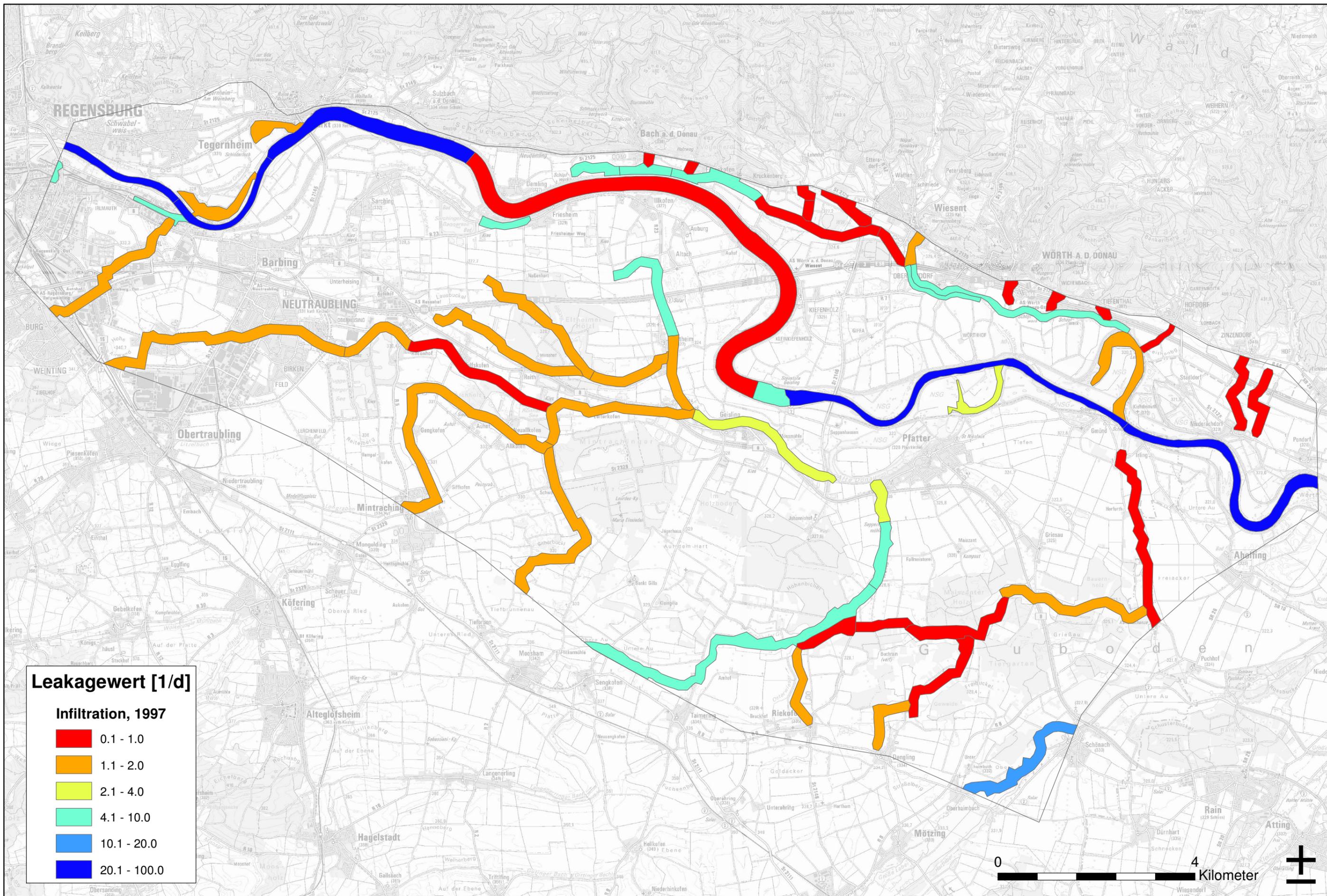


Projekt:
Grundwassermodell -
Flutpolder Eltheim und Wörthhof

Planinhalt:
In-Leakage im Zustand vor Bau
der Staustufen (1976)

Maßstab:
1:68 000

Anlage:
11
Plan-Nr.:
1



Leakagewert [1/d]

Infiltration, 1997

- 0.1 - 1.0
- 1.1 - 2.0
- 2.1 - 4.0
- 4.1 - 10.0
- 10.1 - 20.0
- 20.1 - 100.0

Berichtsv Verfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg



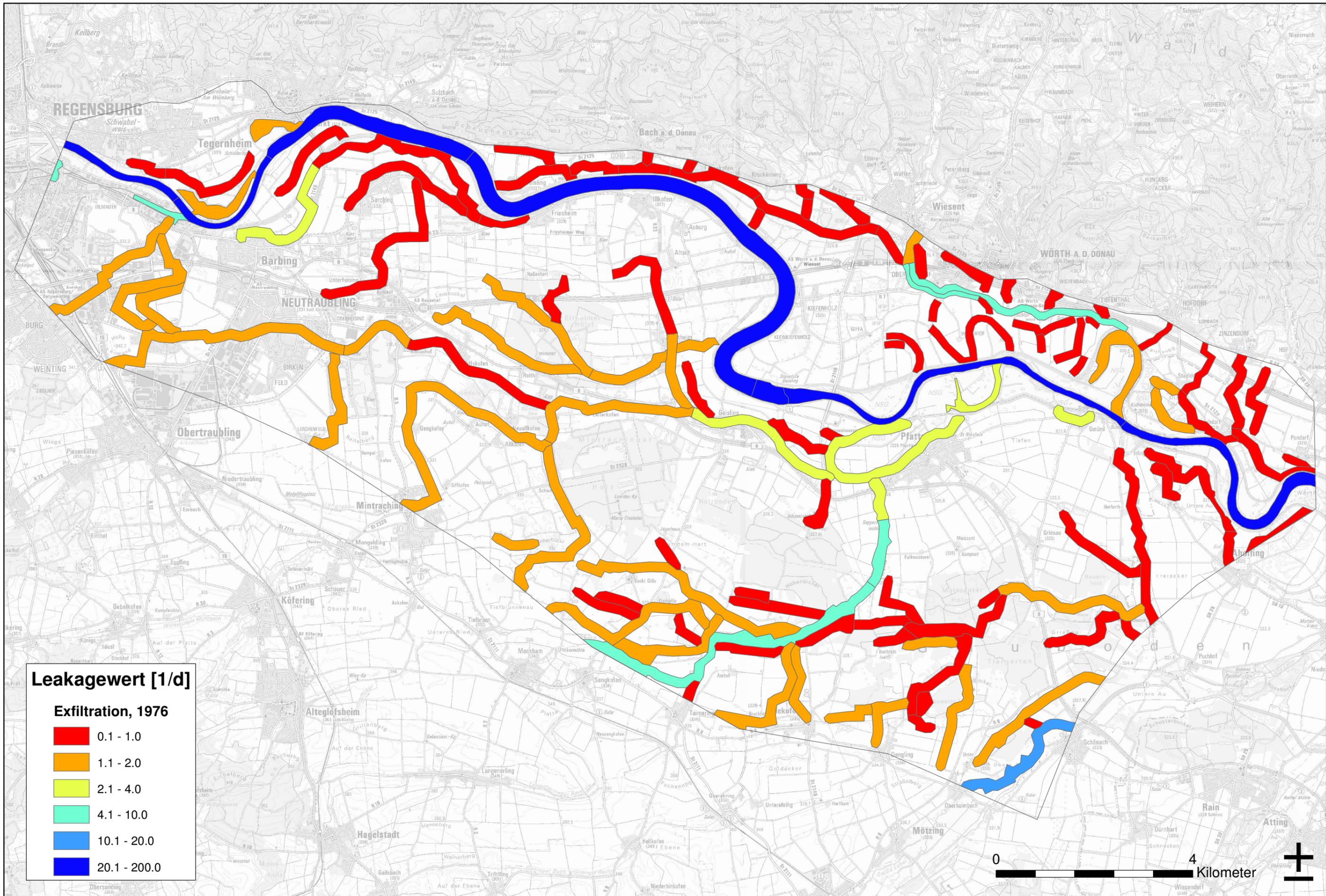
Projekt:
Grundwassermodell -
Flutpolder Eltherm und Würthhof

Planinhalt:
In-Leakage im Zustand nach Bau
der Staustufen (1997)

Maßstab:
1:68 000

Anlage:
12

Plan-Nr.:
1



Leakagewert [1/d]

Exfiltration, 1976

- 0.1 - 1.0
- 1.1 - 2.0
- 2.1 - 4.0
- 4.1 - 10.0
- 10.1 - 20.0
- 20.1 - 200.0

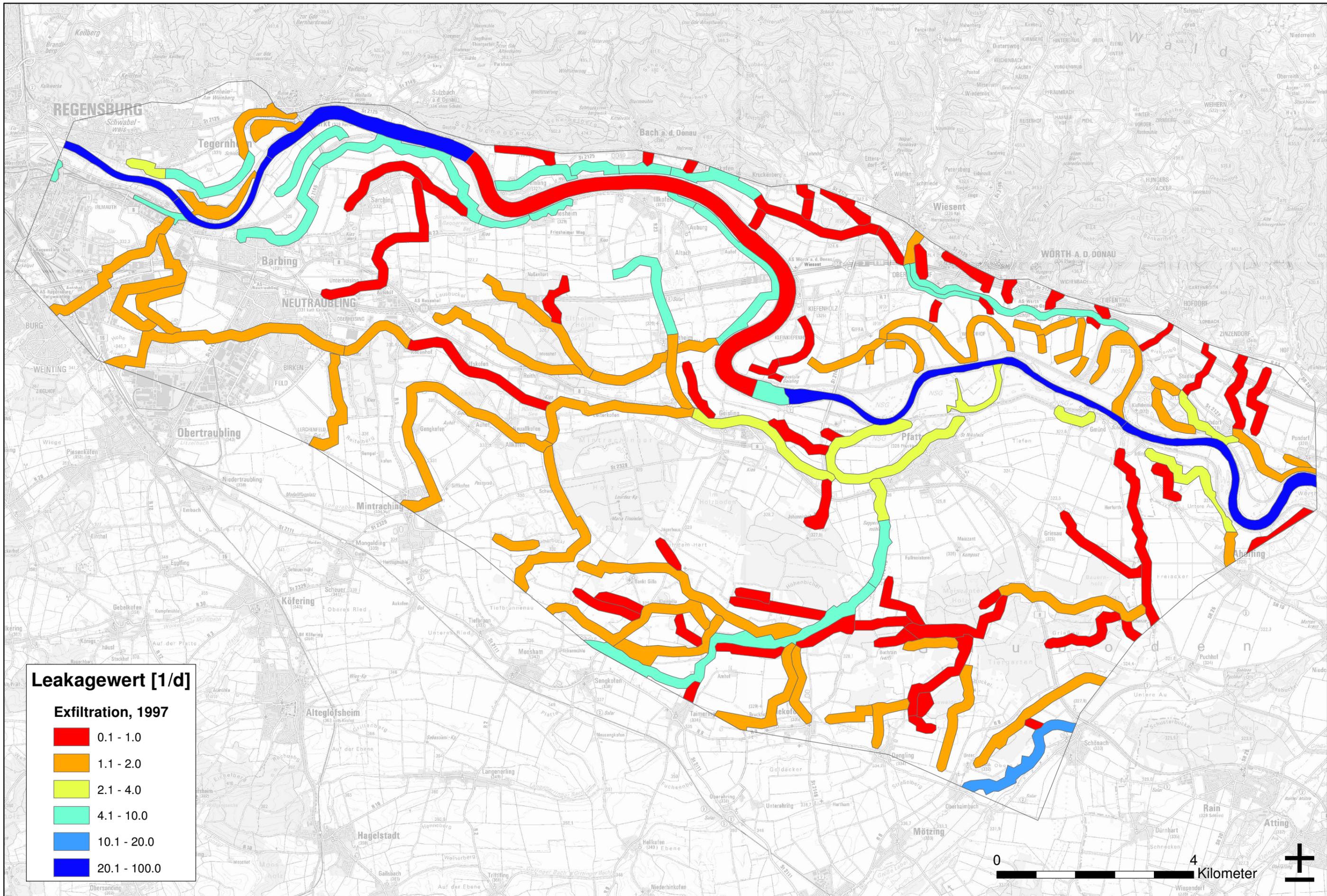
Berichtsverfasser: Simultec AG
 Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

Projekt:
 Grundwassermodell -
 Flutpolder Eltheim und Wörthhof

Planinhalt:
 Out-Leakage im Zustand vor Bau
 der Staustufen (1976)

Maßstab: 1:68 000
 Anlage: 13
 Plan-Nr.: 1



Leakagewert [1/d]

Exfiltration, 1997

- 0.1 - 1.0
- 1.1 - 2.0
- 2.1 - 4.0
- 4.1 - 10.0
- 10.1 - 20.0
- 20.1 - 100.0

Berichtsverfasser: Simultec AG



Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg



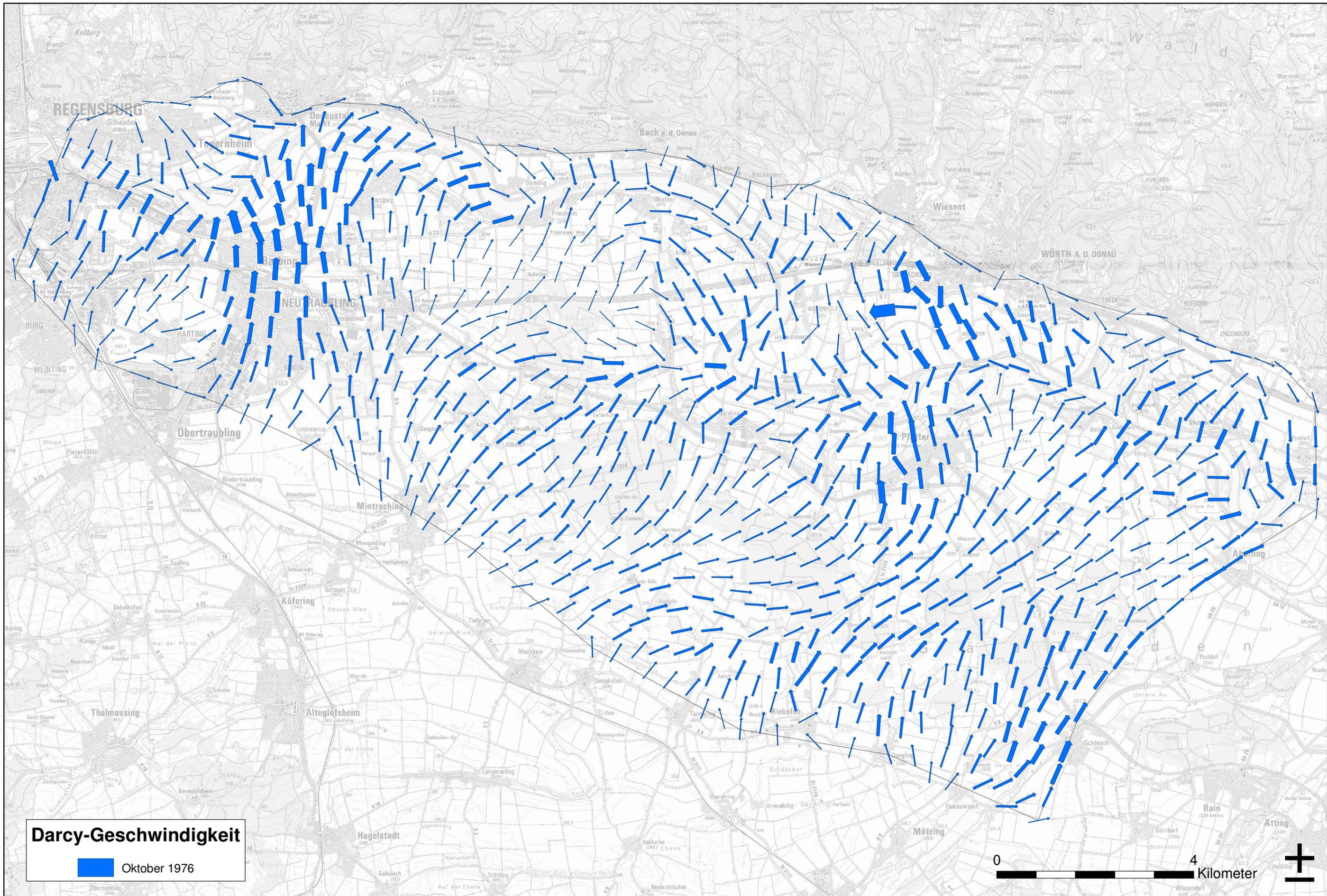
Projekt:
Grundwassermodell -
Flutpolder Eltherm und Würthhof

Planinhalt:
Out-Leakage im Zustand nach Bau
der Staustufen (1997)

Maßstab:
1:68 000

Anlage:
14

Plan-Nr.:
1



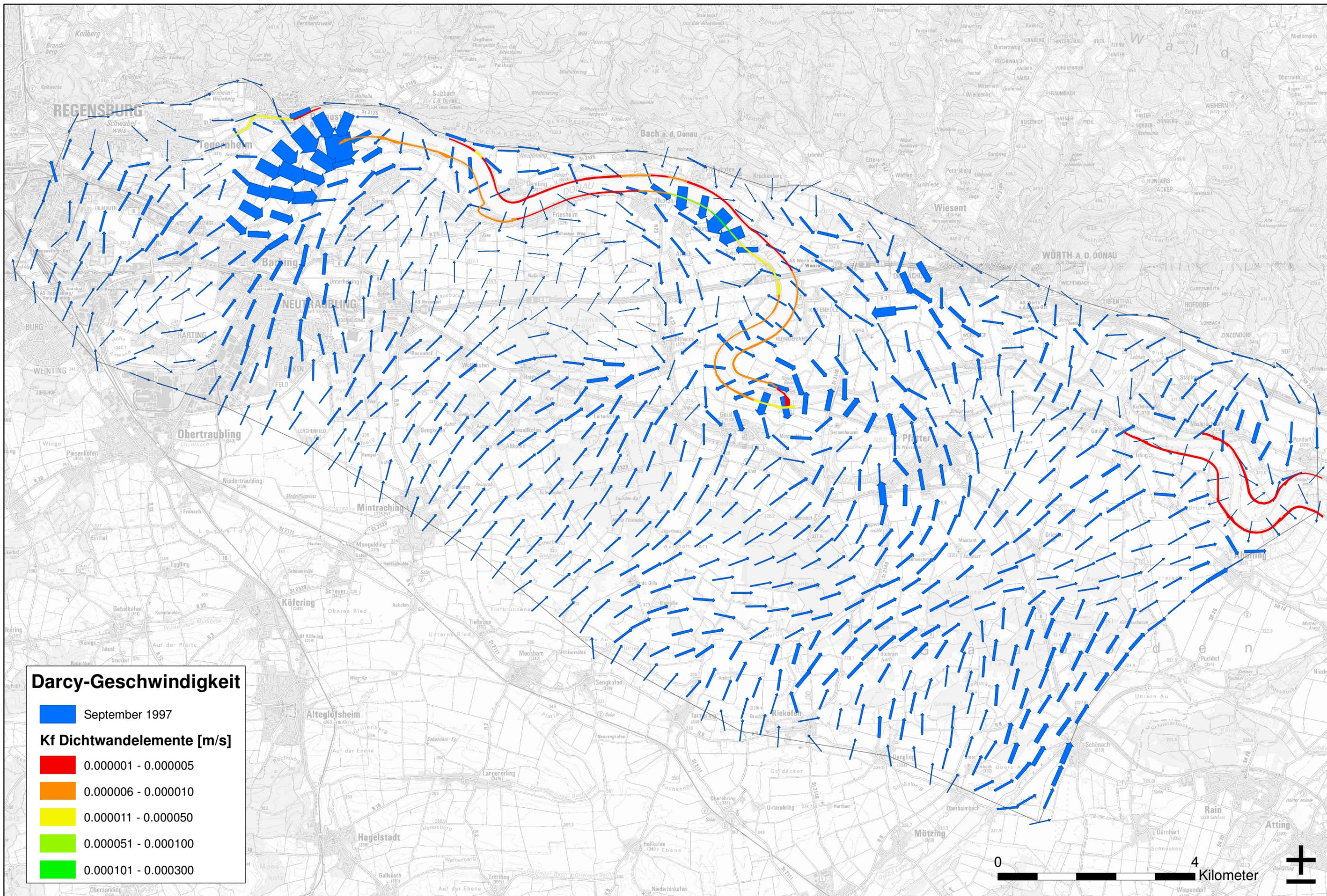
Berichtsv Verfasser: Simultec AG
 Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

Projekt:
 Grundwassermodell -
 Flutpolder Elthim und Würthhof

Planinhalt:
 Darcy-Geschwindigkeiten am
 4. Oktober 1976 (NW vor dem
 Bau der Staustufen)

Maßstab: 1:68 000
 Anlage: 15
 Plan-Nr.: 1



Darcy-Geschwindigkeit

- September 1997
- Kf Dichtwandelemente [m/s]**
- 0.000001 - 0.000005
- 0.000006 - 0.000010
- 0.000011 - 0.000050
- 0.000051 - 0.000100
- 0.000101 - 0.000300

Berichtsverfasser: Simultec AG

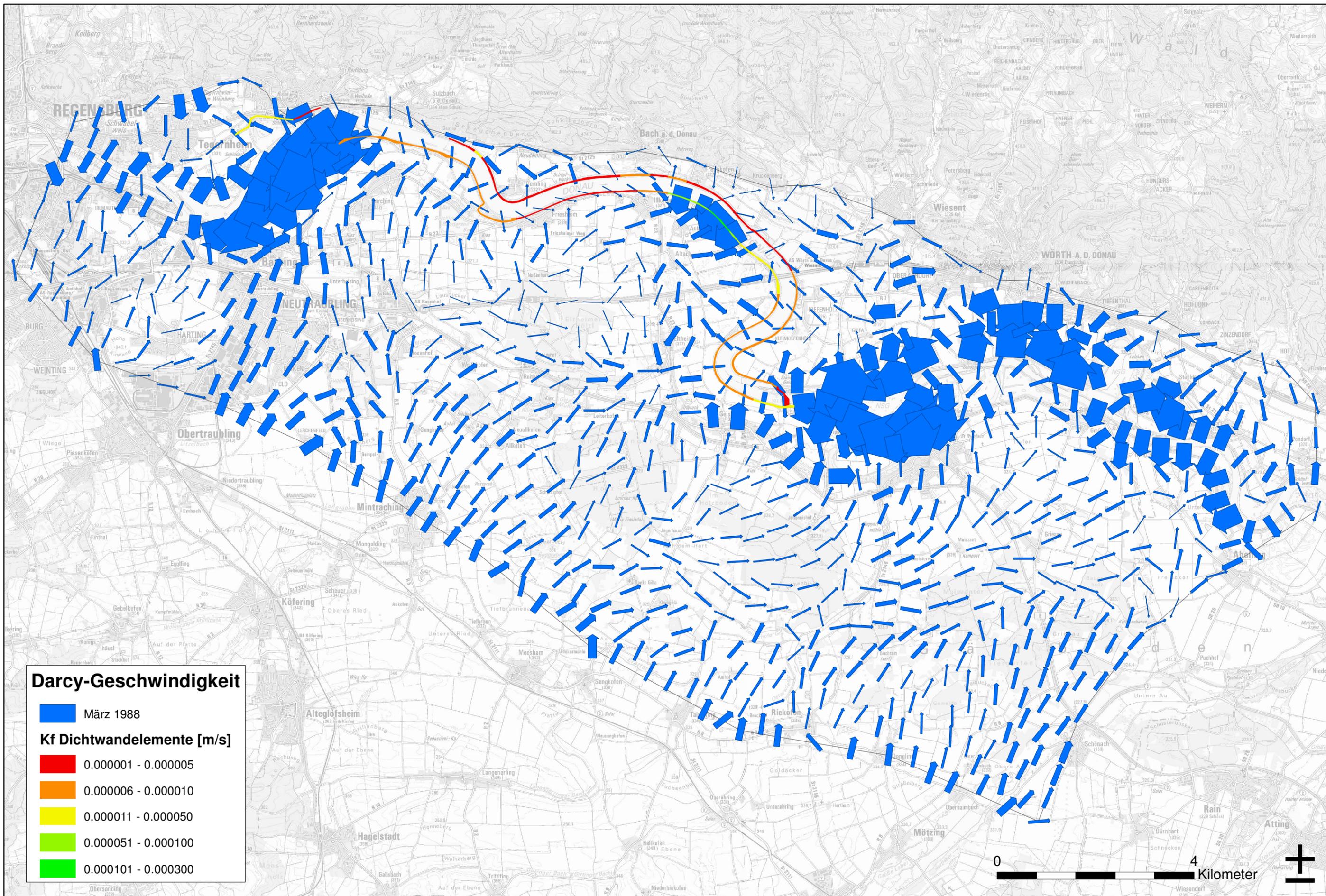
 Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg


Projekt:
 Grundwassermodell -
 Flutpolder Elthim und Wörthhof

Planinhalt:
 Darcy-Geschwindigkeiten am
 22. September 1997 (NW nach
 dem Bau der Staustufen)

Maßstab: 1:68 000
 Anlage: 16
 Plan-Nr.: 1



Darcy-Geschwindigkeit

- März 1988
- Kf Dichtwandelemente [m/s]**
- 0.000001 - 0.000005
- 0.000006 - 0.000010
- 0.000011 - 0.000050
- 0.000051 - 0.000100
- 0.000101 - 0.000300



Berichtsverfasser: Simultec AG
 Datum: 27.11.2017

Auftraggeber: WWA Regensburg

Projekt:
 Grundwassermodell -
 Flutpolder Elthim und Wörthhof

Planinhalt:
 Darcy-Geschwindigkeiten am
 28. März 1988 (HW nach dem
 Bau der Staustufe Geisling)

Maßstab: 1:68 000
 Anlage: 17
 Plan-Nr.: 1