



Anlage 7.1

Grundwassermodell Flutpolder Eltheim und Wörthhof

Hydrogeologisches Modell
Modellkonzepte

Stand April 2017

Ergänzt Oktober 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
Hydrogeologisches Modell, Modellkonzepte

Inhalt

1	Einleitung, Ziel	1
2	Hydrogeologie	3
2.1	Situation	3
2.2	Ergänzende Datenerhebung.....	5
2.3	Datenauswertung	6
2.4	Deckschicht.....	7
2.5	Quartärbasis.....	12
2.6	Schichten unterhalb der Quartärbasis	14
2.7	Dichtwände	18
3	Generelles Modellkonzept	19
3.1	Modellgebiet.....	19
3.2	Abstraktion der Hydrogeologie	25
4	Gewässer	27
4.1	Donau	28
4.2	Übrige zeitabhängig berücksichtigte Gewässer	32
4.3	Drainagen.....	43
5	Grundwasserneubildung aus Niederschlag	46
5.1	Neubildung im Innern des Modellgebietes	46
5.2	Neubildung in den seitlichen Einzugsgebieten.....	51
6	Fördermengen	56
7	Schöpfwerke	58
8	Vorläufige Wasserbilanz	61
9	Kalibrierungsdatensatz	62
9.1	Anforderungen.....	62
9.2	Grundwasserspiegel.....	64
9.3	Abflussmessungen	68
10	Zusammenfassung	69
11	Literatur	71

Anlagen

- Anlage 1: Bohrprofile der Bohrkampagne 2016
- Anlage 2: Bericht zur Geoelektrik-Untersuchung 2016
- Anlage 3: Bericht zu den Infiltrationsversuchen 2017
- Anlage 4: Bericht zu den Pumpversuchen 2017

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 (Abbildung 1). Die Eignung der beiden Standorte soll nun genauer untersucht werden.
Auftrag	Für die Quantifizierung des Einflusses auf die Grundwasserverhältnisse sollen ein hydrogeologisches Modell und darauf aufbauend ein Grundwassermodell für den Einflussbereich der Flutpolder Eltheim und Wörthhof erstellt werden.
Ziele	Mit dem Grundwassermodell werden folgende Ziele verfolgt: <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 maximalen Grundwasserstände.
Untersuchungsgebiet	Das Untersuchungsgebiet umfasst das Donautal zwischen Regensburg und Aholting.
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 das Hydrogeologische Modell und die Modellkonzepte mit Wissensstand vom April 2017.</p>

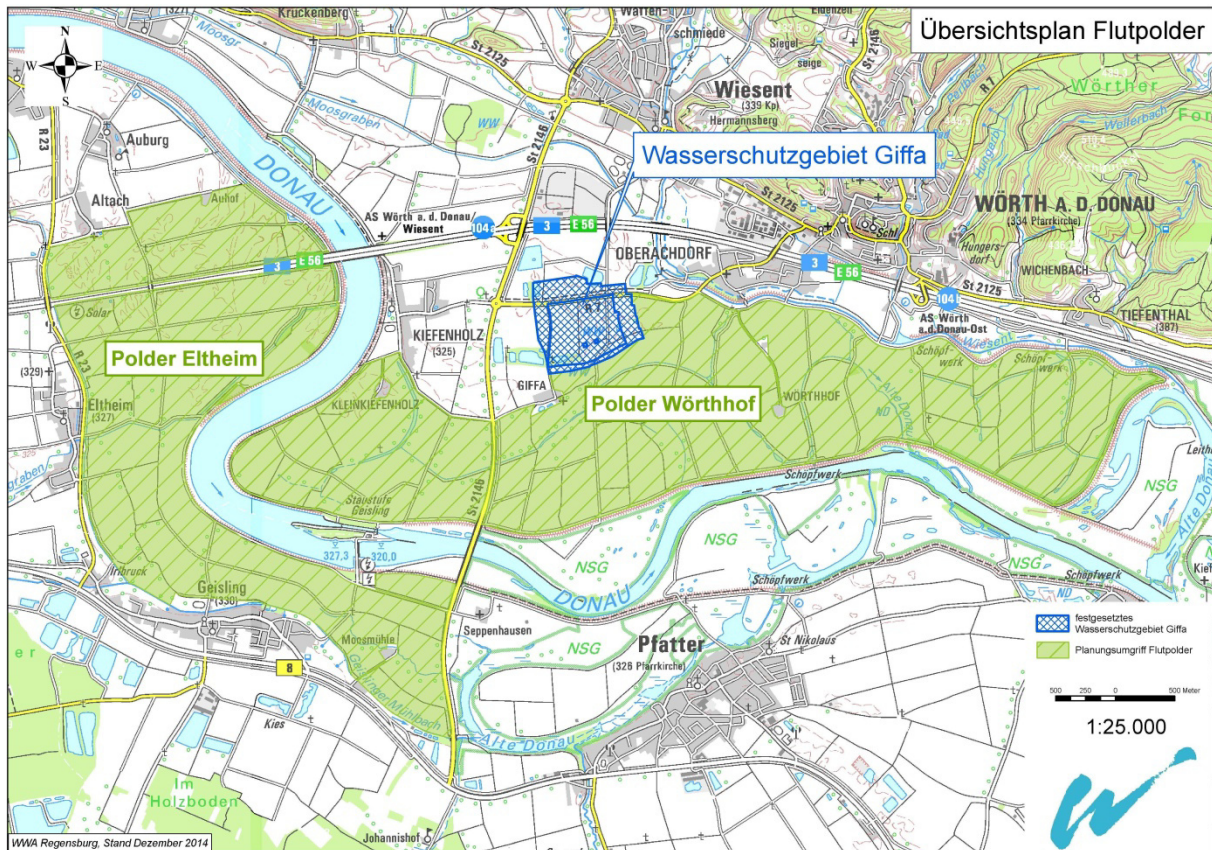


Abbildung 1: Planungsbereich für die Flutpolder Eltheim und Wörthhof.

2 Hydrogeologie

2.1 Situation

Schichtaufbau	Die Felder bei Eltheim und Wörthhof liegen südlich des Donaurandbruchs und werden von Flussschotter- und Auenablagerungen gebildet (Holozän, Quartär). In etwa 10 Metern Tiefe folgen die sehr schwach durchlässigen, schluffig-feinsandigen Tone der Oberen Süßwassermolasse (OSM). Kreide- und Jurasedimente unterlagern die Tertiärschichten. Nördlich des Donaurandbruchs stehen paläozoische Gesteine an.
Grundwasserleiter	Für die Fragestellungen der Flutpolderprojekte ist der quartäre Schottergrundwasserleiter maßgebend. In einer Studie der WATEC [3] wird dessen Durchlässigkeit mit $1 - 2 \times 10^{-3}$ m/s angegeben. In der Oberen Süßwassermolasse können zwar einzelne sandige Schichten Grundwasserleiter bilden, deren Grundwasserführung ist jedoch im Vergleich zum Quartär unbedeutend. Die Kreide- und Jurasedimente besitzen als Kluft- und Karstgrundwasserleiter eine Bedeutung für die Trinkwasserversorgung. Gemäß WATEC-Studie [4] bewegt sich deren Durchlässigkeit im Bereich von 5×10^{-5} m/s. Die Maximalwerte können jedoch 5×10^{-4} m/s erreichen.
Grundwasserströmung	Die Grundwasserströmung ist im Projektgebiet vorwiegend horizontal zweidimensional und beschränkt sich quantitativ auf den quartären Schotter. Durch den Einbau von Sperrwänden wird das Grundwasser jedoch zu einer Unterströmung gezwungen. Damit erhalten die unter dem Quartär liegenden Schichten eine größere Bedeutung.
Stauer	<p>Im Großteil des Untersuchungsgebietes unterlagern tertiäre Sedimente der Oberen Süßwassermolasse mit Tonen, Schluffen und Feinsanden das Quartär. Die tertiären Sedimente bilden für den quartären Schotter einen Stauer. Ist eine Sperrwand in das Tertiär eingebunden, so ist die Unterströmung sehr klein.</p> <p>Im nördlichen Teil des Projektgebietes liegen paläozoische Gesteine (plutonisch/ mylonitisch-metamorph oder permisch-sedimentär) unter dem Quartär. In diesen Bereichen sind Kluftströmungen denkbar. Entscheidender ist jedoch, dass eine Einbindung von Sperrwänden in diese harten Gesteine kaum möglich ist.</p>
Kreideschichten	Im Bereich zwischen Geisling und Pfatter fehlen die tertiären Schichten, so dass unter den Quartärschottern direkt die Kreideschichten folgen. Die Umriss dieses Bereichs lassen sich aufgrund der im Bayerischen Bohrinformationssystem BIS vorhandenen Daten nicht genau bestimmen. Mit einer Bohrkampagne und geoelektrischen Untersuchungen wurde deshalb im Jahr 2016 die Situation in diesem Gebiet näher untersucht.

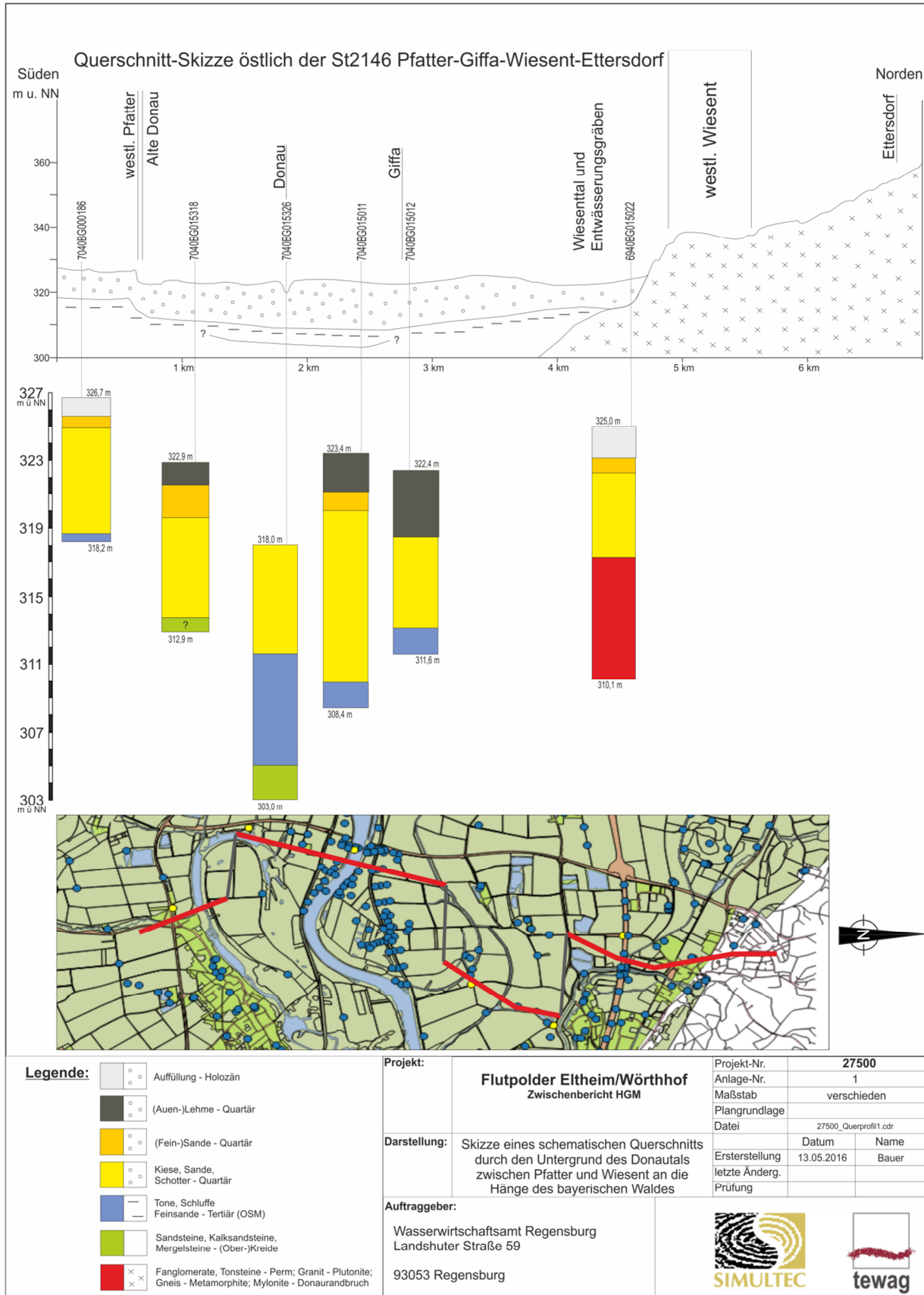


Abbildung 2

Schematischer Querschnitt durch den Untergrund des Donautals zwischen Pfatter und Wiesent an die Hänge des bayerischen Waldes.

2.2 Ergänzende Datenerhebung

Ziele	<p>Mit einer ergänzenden Datenerhebung zwischen April 2016 und April 2017 wurden folgende Ziele verfolgt:</p> <ul style="list-style-type: none">- Klärung der Stauersituation im Bereich Geisling – Pfatter- Klärung der Stauersituation im Bereich Giffa- Erkundung der Quartärbasis im Südteil des Modells- Bereitstellung eines Messnetzes zur Beobachtung des Grundwasserspiegels- Charakterisierung des Deckschichtmaterials im Planungsbereich der Flutpolder.- Messung der Abflussmengen in den Grundwasser drainierenden Gerinnen.
Bohrungen	<p>Im Rahmen der Erhebung wurden 31 Bohrungen abgeteuft. 27 davon wurden zu Grundwassermessstellen ausgebaut. Zusätzlich wurden 27 bestehende Bohrungen neu mit Datenloggern zur Messung des Grundwasserspiegels ausgerüstet und von acht bestehenden Datenloggern werden die Daten übernommen. Das resultierende Beobachtungsnetz ist in Abbildung 3 dargestellt. In der Anlage 1 sind die Bohr- und Ausbauprofile zusammengestellt.</p>
Geoelektrik	<p>Im Gebiet Geisling-Pfatter wurde eine geoelektrische Erkundung durchgeführt, um die Stauersituation im Bereich Geisling – Pfatter zu klären (Anlage 2). Vier Bohrungen bis in eine Tiefe von 30 m dienten zur Kalibrierung der Messungen. Es zeigte sich, dass Tertiär- und Kreideschichten aufgrund ihrer geoelektrischen Eigenschaften nicht unterschieden werden können. Aufgrund der glaukonitischen Einschlüsse in den Bohrkernen konnte zweifelsfrei festgestellt werden, dass der Quartärschotter durch Kreidestein unterlagert wird. Die Tertiärschicht fehlt also im Bereich zwischen der Moosmühle und Seppenhausen.</p> <p>Die Unterscheidung zwischen Bohrkernen des Tertiär und der Kreide ist von Auge kaum möglich. Die Kreideschichten sind etwas kompakter. Bei beiden Schichten handelt es sich um tonig bis schluffiges Material mit einer sehr geringen Durchlässigkeit. Für das Flutpolderprojekt ist deshalb die Unterscheidung in Tertiär- und Kreidestauer nicht relevant.</p>
Giffa	<p>Die noch immer vorhandenen Bohrkern der Tiefbohrung Giffa wurden noch einmal sorgfältig ausgewertet. Es zeigte sich, dass die Erstauswertung korrekt ist und die Tertiärschicht fehlt. In zwei weiteren Bohrungen südwestlich und nordöstlich davon wurde die Kreide ebenfalls direkt unter dem Quartär angetroffen. Auch im Planungsbereich des Flutpolders Wörthhof ist die Kreideschicht jedoch als sehr gering durchlässig zu bezeichnen.</p>

- Deckschichten** Im Planungsbereich der Flutpolder wurden Deckschichten mit einer Mächtigkeit zwischen 0.7 und 4 m angetroffen. Die Körnigkeit des Materials reicht dabei von Feinsand bis zu Ton. Bei 4 Infiltrationsversuchen mit dem Doppelringinfiltrometer, sowie Korngrößenanalysen wurden Durchlässigkeitswerte von 1×10^{-8} m/s bis 1×10^{-5} m/s ermittelt (Anlage 3).
- Durchlässigkeiten** In 7 Bohrungen in der Auestufe und der Niederterrasse wurden Pumpversuche durchgeführt. Zusätzlich wurde die Durchlässigkeit auch aus Korngrößenanalysen abgeschätzt (Anlage 4). Die Versuche ergaben Durchlässigkeiten von 3×10^{-4} m/s bis 6×10^{-3} . Zwischen der Auestufe und der Niederterrasse konnten keine Unterschiede festgestellt werden.
- Abflussmessungen** Die im Jahr 2016 durchgeführten Abflussmessungen sind in Kapitel 4.3.2 dokumentiert.

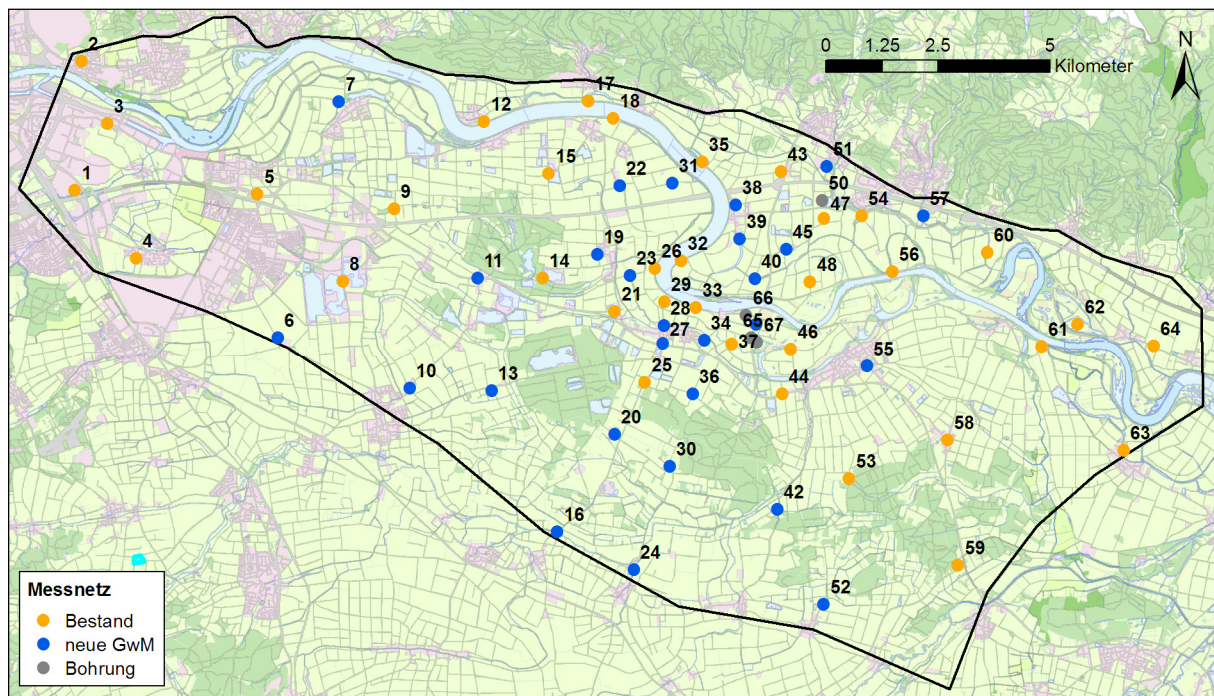


Abbildung 3: Im Rahmen der ergänzenden Erkundungen erstelltes Messnetz.

2.3 Datenauswertung

- Datenlage** Aus den vorliegenden Daten des Landesamtes für Umwelt in Bayern und des Wasserwirtschaftsamtes Regensburg wurden 1.687 Bohrungen von ca. 0,5 m bis 478 m Tiefe ausgewertet. Zu 805 Bohrungen sind Grundwasserstände angegeben. 458 Bohrungen erreichen die Oberkante des Tertiärs, 69 Bohrungen auch die Oberkante der Kreide.
- Datenauswertung** Die vorhandenen Bohrprofile, sowie Profile aus einer WATEC-Studie [2] wurden bezüglich der Schichtgrenzen ausgewertet. Dabei wurden die Schichtzuordnungen aufgrund von Angaben zur Farbe und Mate-

rialbeschaffenheit, sowie Quervergleichen mit anderen Bohrungen überprüft und korrigiert. Folgende Schichtgrenzen wurden in eine Tabelle übertragen:

- Geländeoberkante
- Unterkante Deckschicht
- Unterkante Quartär
- Oberkante Tertiär
- Oberkante Kreide
- Oberkante übrige Schichten
- Endteufe

Bei der jeweils unter dem Quartär liegenden Schicht ist ihre Oberkante identisch mit der Unterkante des Quartärs.

Datendichte und Datenqualität

Die Datendichte variiert innerhalb des Untersuchungsgebietes stark. Die Verteilung der Bohrungen ist entweder vereinzelt und spärlich oder geballt und nestartig. Entlang der Donau ist die Anzahl der Bohrungen hoch, allerdings schwankt die Qualität und Verwertbarkeit der in den Bohrbeschreibungen enthaltenen Angaben stark. Die Daten im städtischen Bereich und bei Brückenbauwerken sind besser verwertbar.

2.4 Deckschicht

Methoden

Für den Aufbau des hydrogeologischen Modells werden aus den Schichtgrenzen in den Bohrpunkten zusammenhängende Schichtflächen interpoliert. Als Instrument dazu wird die Software „Surfer 13“ eingesetzt.

Geländestufen

Die Unterkante der Deckschicht verläuft mehr oder weniger parallel zur Topografie. Entlang von Geländestufen würde daher eine Interpolation fehlerhaft, wenn nicht zu beiden Seiten der Geländestufe Daten in enger Dichte zur Verfügung stehen. Deshalb muss bei der Interpolation folgendes Vorgehen in drei Schritten gewählt werden:

Schritt 1

Als Erstes wurde die Basis der Deckschicht unter Annahme einer Störung entlang der Terrassengrenze interpoliert. In Surfer kann dazu eine Linie definiert werden, bei welcher die Daten auf beiden Seiten getrennt interpoliert werden. Die Lage der verwendeten Störungslinie ist in Abbildung 4 dargestellt. Die resultierende Fläche besitzt entlang der Störungslinie einen vertikalen Versatz.

Schritt 2

Aus der interpolierten Fläche wurde die Deckschichtbasis in beidseits der Störung angeordneten Hilfspunkten rückinterpoliert.

Schritt 3

In einer weiteren Interpolation wurden diese Hilfspunkte ebenfalls verwendet. Entlang der Hilfspunkte wurde eine Linie definiert, welche bei der Interpolation als Kante behandelt wird. Entlang einer Kante bleibt die Höhe stetig, die Neigung darf jedoch einen Sprung aufwei-

sen. Die für diesen Interpolationsschritt verwendeten Bohrpunkte und Hilfspunkte sind in Abbildung 5 dargestellt. Als Interpolationsverfahren wurde die Kriging-Methode verwendet.

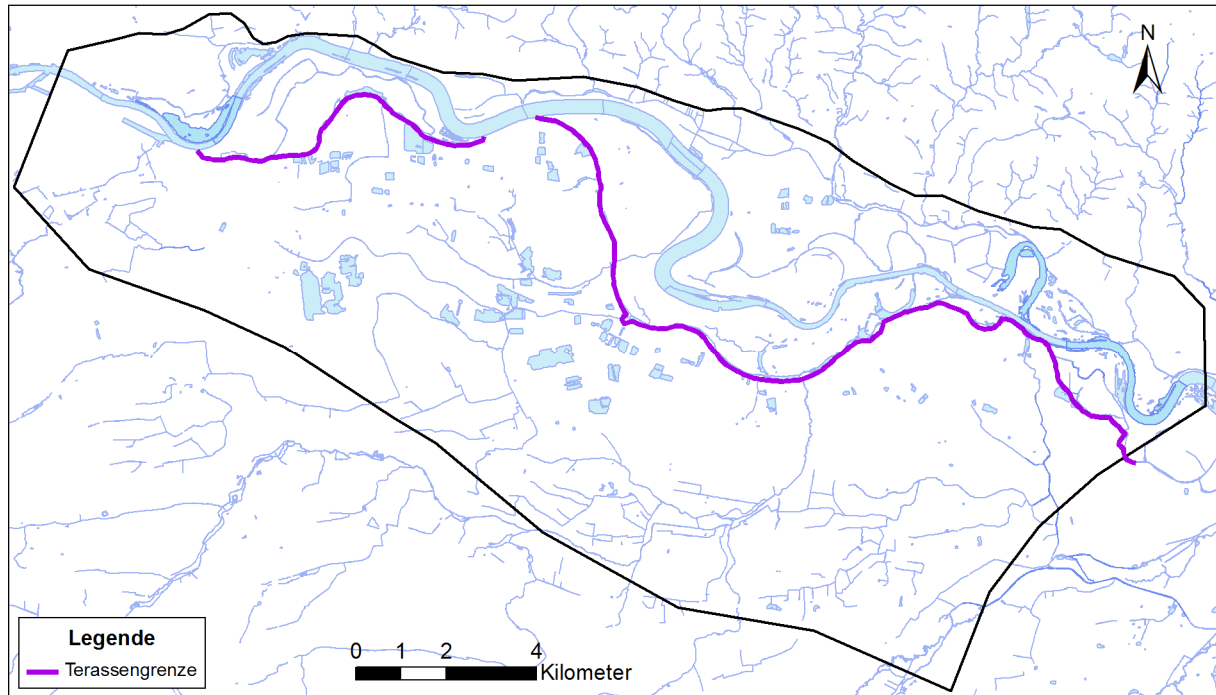


Abbildung 4: Lage der für die Interpolation verwendeten Terrassengrenze.

Resultate

Die resultierende Deckschichtbasis ist in Abbildung 6 dargestellt. Wird die Unterkante der Deckschicht von der heutigen Geländeoberfläche subtrahiert, so kann die Mächtigkeit der Deckschicht dargestellt werden (Abbildung 7). Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt im Bereich der geplanten Flutpolder.

Stellen ohne Deckschicht

Im Bereich des Flutpolders Wörthhof sind verschiedene Teilflächen ohne Deckschicht als weiße Flächen erkennbar. An diesen Stellen ist der Grundwasserleiter mit der Oberfläche verbunden. Eine solche Stelle befindet sich zum Beispiel beim Sichelsee. An Stellen ohne Deckschicht gelangt Grundwasser an die Oberfläche. Umgekehrt kann dort bei einer Realisierung der Flutpolder auch Polderwasser ins Grundwasser gelangen.

Im Bereich des Flutpolders Eltheim ist die Deckschicht durchgehend. Nördlich von Geisling befindet sich eine Stelle mit geringer Mächtigkeit.

Drainagen

Aus der Mächtigkeitsdarstellung wird auch ersichtlich, dass einige der Drainagegräben die Deckschicht nicht durchtrennen. Dies bedeutet, dass sie nur wenig Grundwasser drainieren. Im Gelände ist dies an kleinen oder fehlenden Abflussmengen während Zeiten ohne Niederschlag erkennbar.

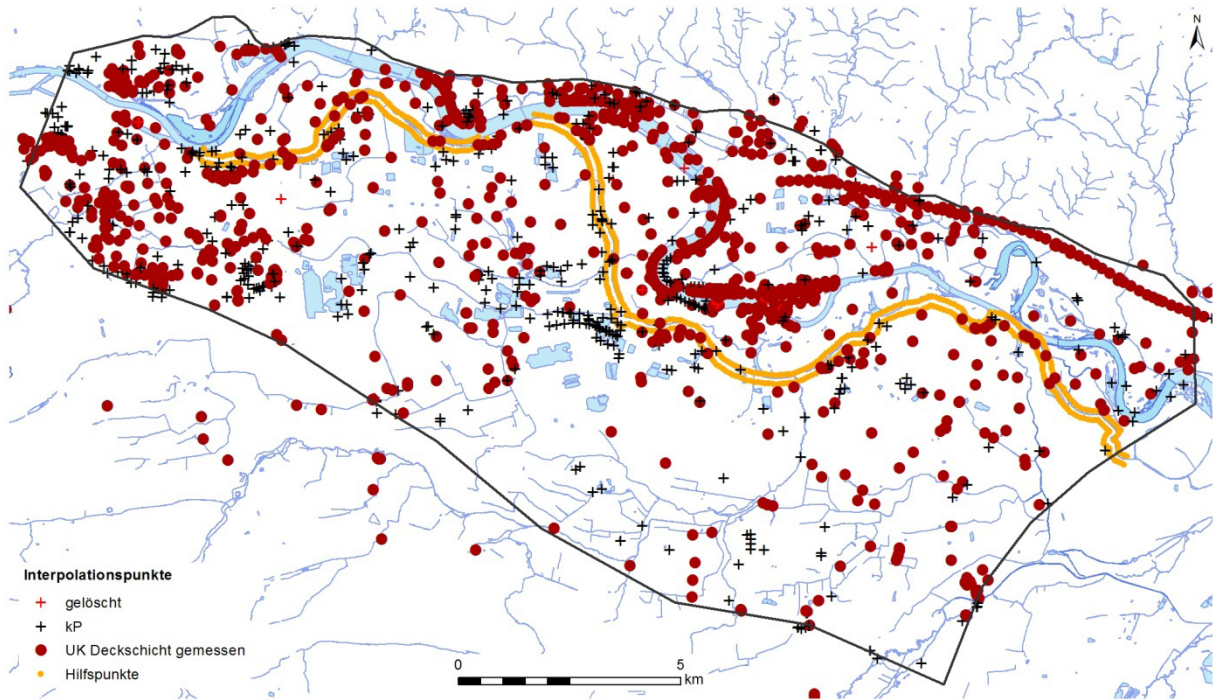


Abbildung 5: Für die Interpolation der Deckschichtbasis verwendete Bohrpunkte und Hilfspunkte

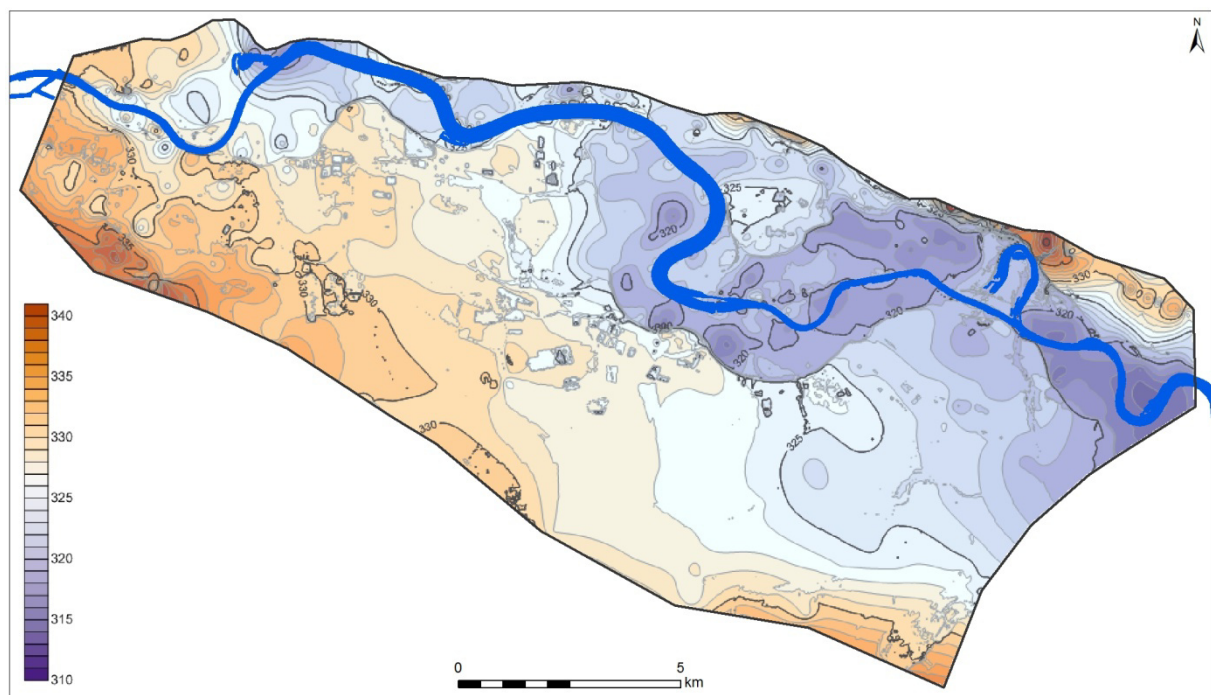


Abbildung 6: Interpolierte Unterkante der Deckschicht

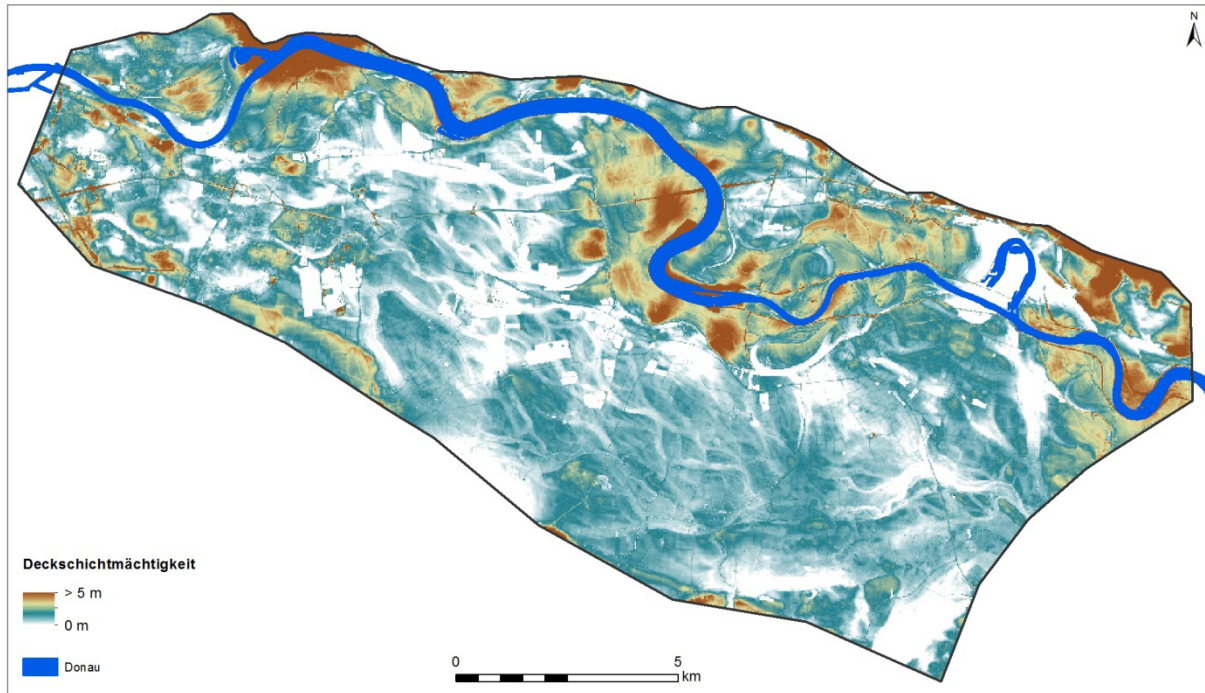


Abbildung 7: Mächtigkeit der Deckschicht im Untersuchungsgebiet

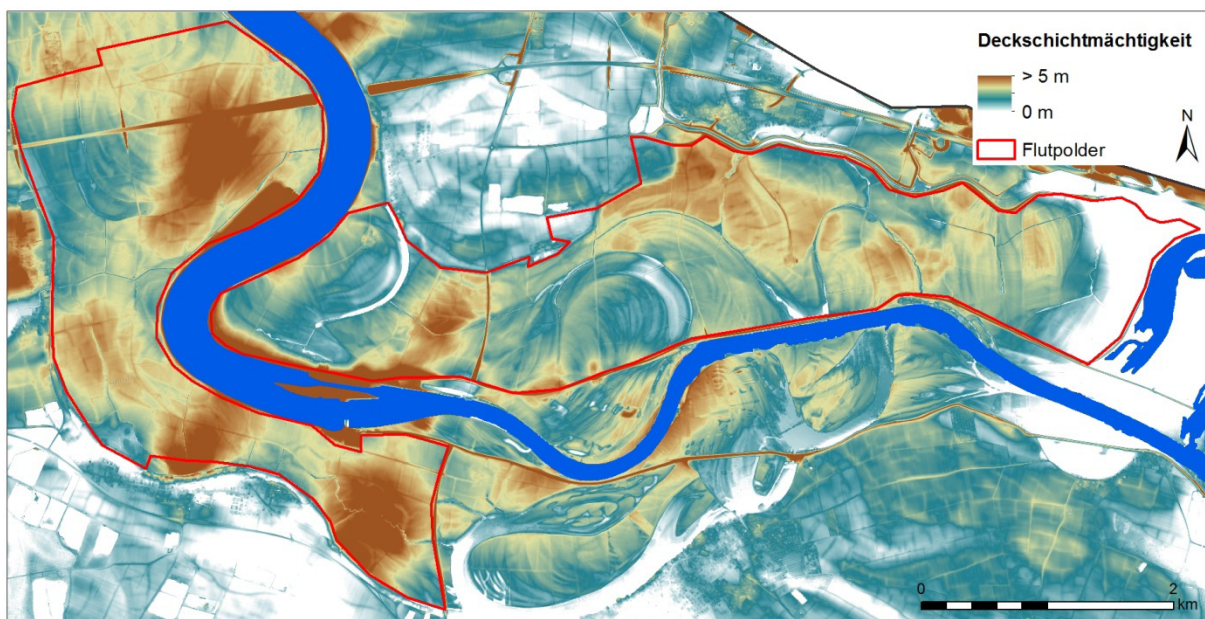


Abbildung 8: Deckschichtmächtigkeit, berechnet aus der Differenz zwischen heutiger Geländeoberfläche und interpolierter Deckschichtunterkante.

Gespannte
Verhältnisse

Die Basis der Deckschicht ist im Grundwassermodell auch wichtig zur Beurteilung, ob der Grundwasserspiegel gespannt ist. Die Resultate einer ersten Modellvariante wurden deshalb mit der Deckschichtbasis verglichen. Abbildung 9 zeigt die Verhältnisse bei niedrigem, Abbildung 10 bei hohem Grundwasserstand. Im Bereich des geplanten Flutpolders Eltheim ist die Deckschichtbasis zu beiden Zeitpunkten eingestaut. Im Bereich des Flutpolders Wörthhof ist im Ostteil ein

dauernder Einstau, im zentralen Bereich ein Einstau bei hohem Grundwasserstand und im Westteil gar kein Einstau zu erwarten.

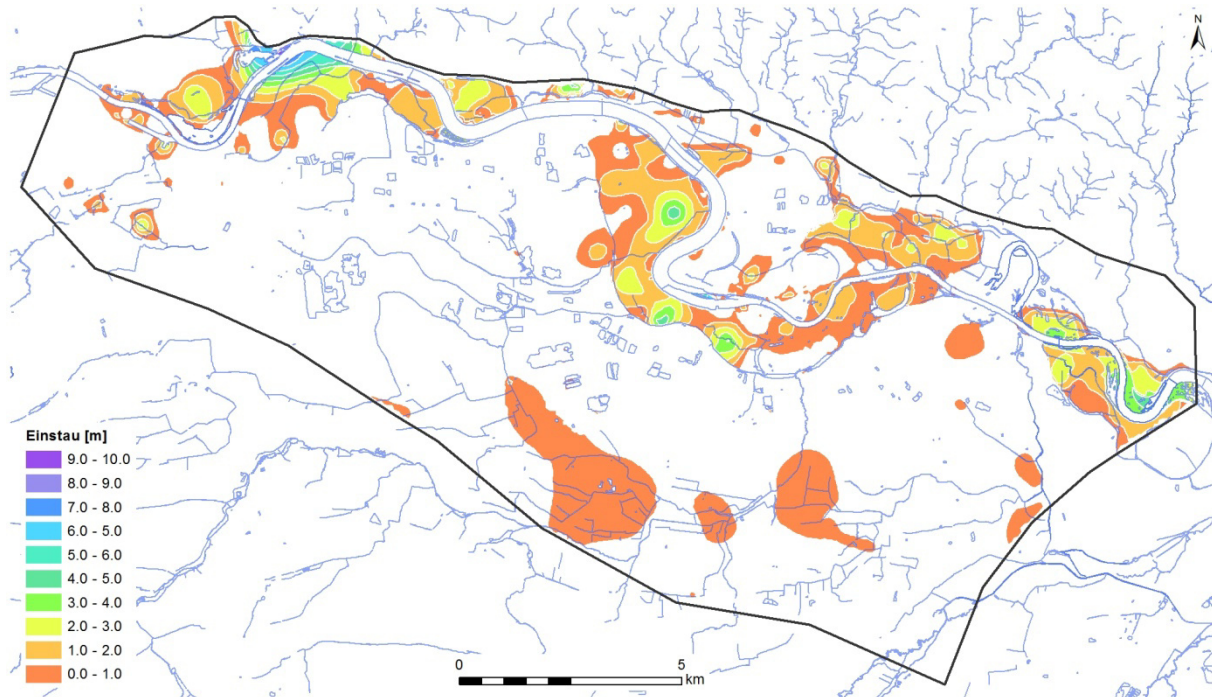


Abbildung 9: Einstau der Deckschicht, berechnet aus der interpolierten Deckschichtunterkante und einem Niederwasserspiegel aus dem Grundwassermodell (1. Sept. 1997).

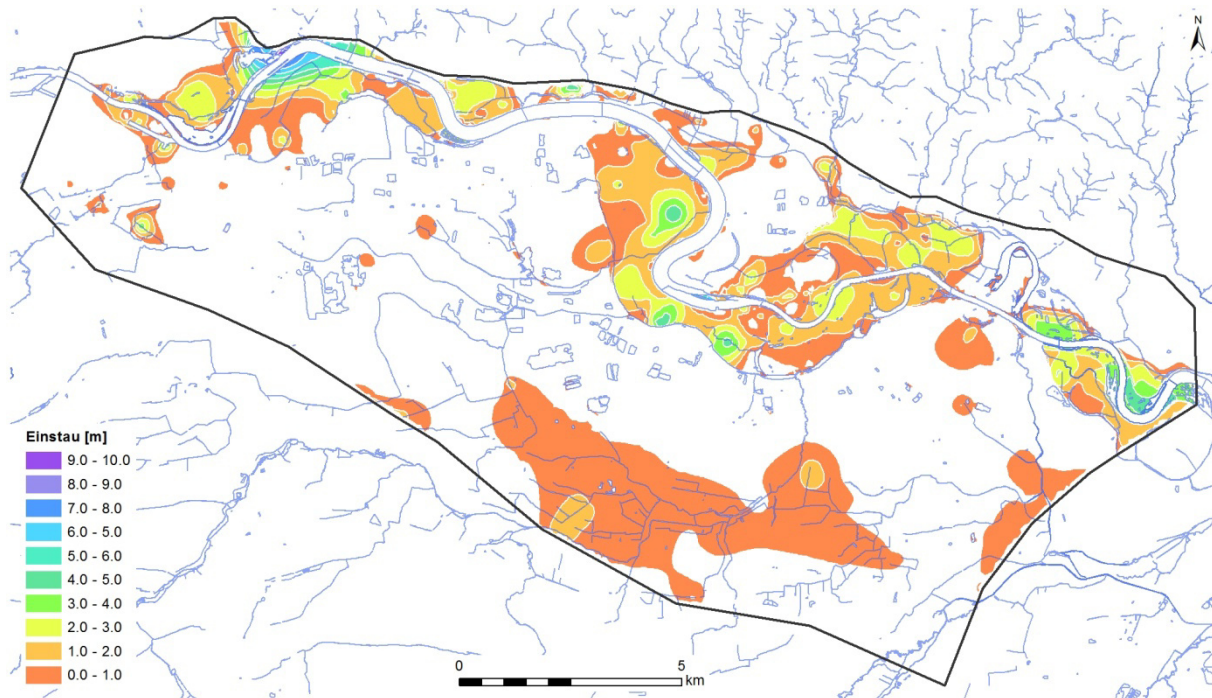


Abbildung 10: Einstau der Deckschicht, berechnet aus der interpolierten Deckschichtunterkante und einem Hochwasserspiegel aus dem Grundwassermodell (1. März 1997).

2.5 Quartärbasis

Methoden	Die Schichtfläche der Quartärbasis wurde aus den Bohraufschlüssen interpoliert. Bohrungen, welche die Quartärbasis nicht erreichen, werden mit einer Maximum-Bedingung berücksichtigt, d.h. die interpolierte Fläche darf nicht oberhalb der Endteufe der Bohrung liegen (UK_Quartär min in Abbildung 11).
Zusatzinformation	Zur Interpolation wurde auch die in Längsschnitten der Dichtwände dokumentierte Quartärbasis verwendet. Einige Bohrpunkte wurden gelöscht, weil ihre Tiefenangaben im Vergleich zu benachbarten Bohrprofilen als unglaubwürdig erschienen.
Interpolationsbereiche	Die Quartären Schotter können im Modellbereich in zwei Teilbereiche unterteilt werden. In der Nähe der Donau und der seitlichen Zuflüsse befinden sich nacheiszeitlich abgelagerte Flussschotter. Weiter entfernt handelt es sich um eiszeitliche Schotter der Niederterrasse (Abbildung 21). Die Grenze zwischen den Teilbereichen ist oberflächlich an einer Geländestufe erkennbar. Die Mächtigkeit der Quartärschotter unterscheidet sich beidseitig der Geländestufe.
Vorgehensschritte	Die Quartärbasis wurde in vier Schritten erzeugt:
Schritt 1	Als Erstes wurde die Quartärmächtigkeit interpoliert. Aus der resultierenden Mächtigkeit wurde die Höhe der Quartärbasis an einigen Hilfspunkten entlang der Südgrenze des Modells durch Subtraktion von der Geländehöhe bestimmt.
Schritt 2	Danach wurde die Quartärbasis unter Annahme einer Störung entlang der Terrassengrenze interpoliert. Die Lage der verwendeten Störungslinie ist in Abbildung 4 dargestellt. Die resultierende Fläche besitzt entlang der Störungslinie einen vertikalen Versatz.
Schritt 3	Aus der interpolierten Fläche wurde die Quartärbasis in beidseits der Störung angeordneten Hilfspunkten rückinterpoliert.
Schritt 4	In einer weiteren Interpolation wurden diese Hilfspunkte ebenfalls verwendet. Entlang der Hilfspunkte wurde eine Linie definiert, welche bei der Interpolation als Kante behandelt wird. Entlang einer Kante bleibt die Höhe stetig, die Neigung darf jedoch einen Sprung aufweisen. Die für diesen Interpolationsschritt verwendeten Bohrpunkte und Hilfspunkte sind in Abbildung 11 dargestellt. Als Interpolationsverfahren wurde die Kriging-Methode verwendet.
Resultat	Das gewählte Verfahren garantiert, dass die Terrassenkante am richtigen Ort ist und keine Interpolationseffekte wie z.B. Überschwingen auftreten. Abbildung 12 zeigt die resultierende Quartärbasis.

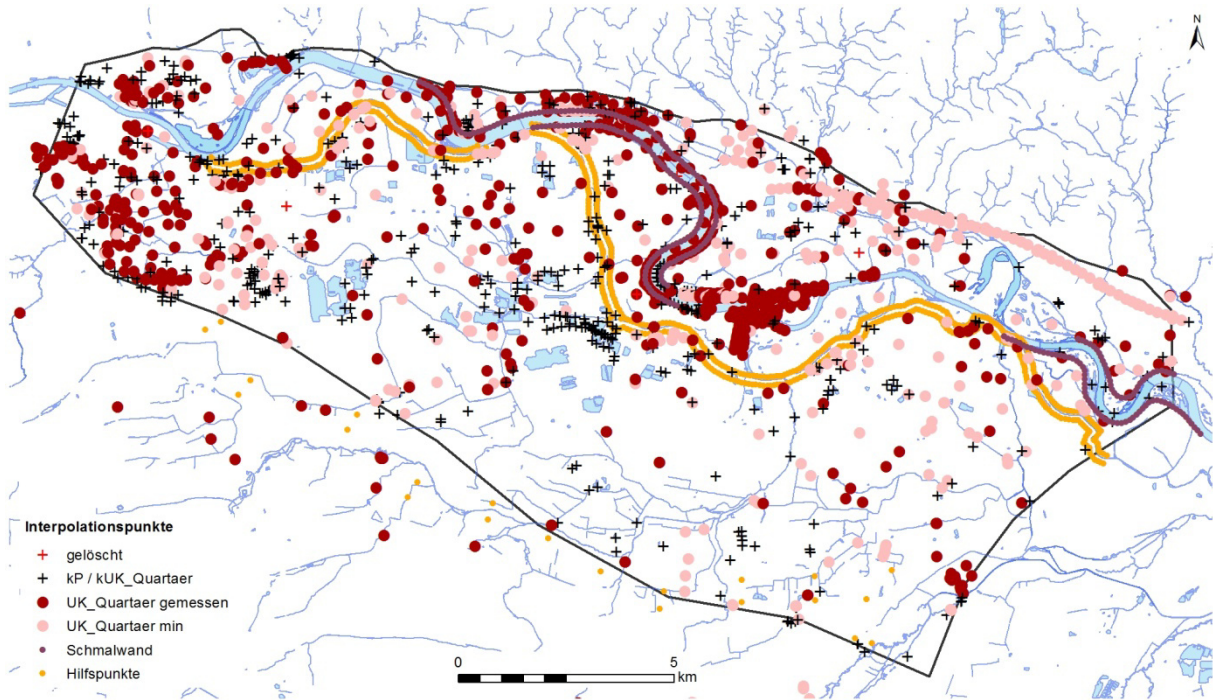


Abbildung 11: Für die Interpolation der Quartärbasis verwendete Bohrpunkte und Hilfspunkte

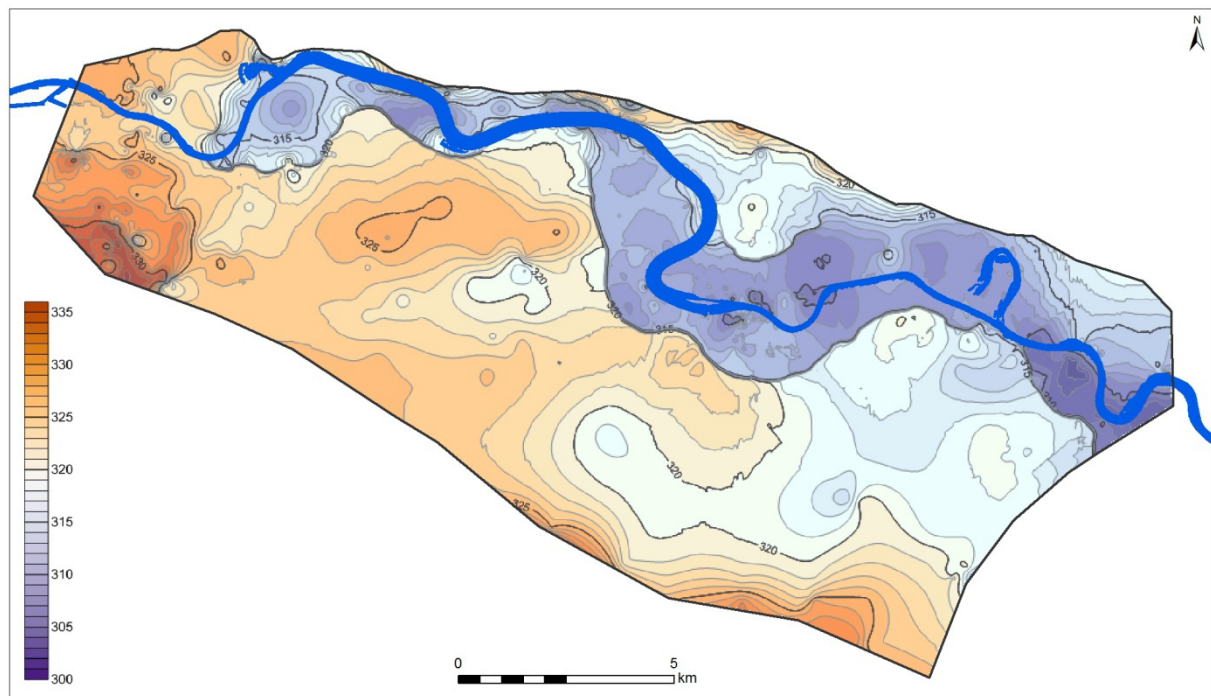


Abbildung 12: Höhengleichen der resultierenden Quartärbasis.

2.6 Schichten unterhalb der Quartärbasis

- Bohraufschlüsse** Unterhalb der Quartärbasis wurden bei Bohrungen entweder Schichten des Tertiär, der Kreide oder des Paläozoikums angetroffen (Abbildung 13). Im größten Teil des Untersuchungsgebiets liegen unter Quartärschotter tertiäre Ablagerungen. In Teilen des Stadtgebietes von Regensburg, in einigen Bohrungen am Ostrand des geplanten Flutpolders Eltheim und im Bereich des Pumpwerks Giffa fehlt das Tertiär. Dort sind unter dem Quartär die Kreideschichten aufgeschlossen. Entlang des nördlichen Talrandes liegt der Quartärschotter auf Gesteinen des Paläozoikums auf.
- Unsicherheiten** Unsicherheiten bestehen bei den Fehlstellen des Tertiärs. Da Tertiär und Kreide im Untersuchungsgebiet schwer zu unterscheiden sind, und im Gebiet zwischen Geisling und Giffa keine Kreideschichten erwartet werden, besteht die Möglichkeit einer Fehlinterpretation der Bohraufschlüsse. Da bei den neu abgeteuften Bohrungen speziell auf die Unterscheidung zwischen Tertiär und Kreide geachtet wurde, sind die damit gewonnenen Informationen zuverlässig. Abbildung 14 zeigt einen Talquerschnitt im Bereich der Tertiärlücke.

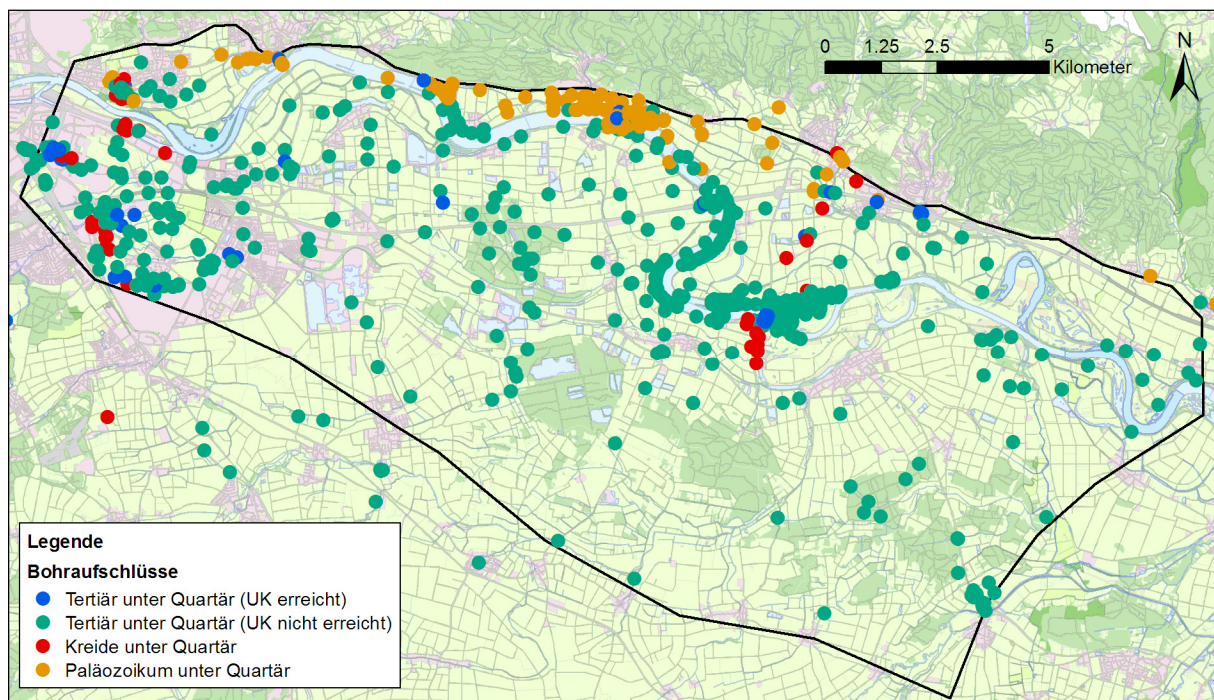


Abbildung 13: Unter der Quartärbasis angetroffene Schichten

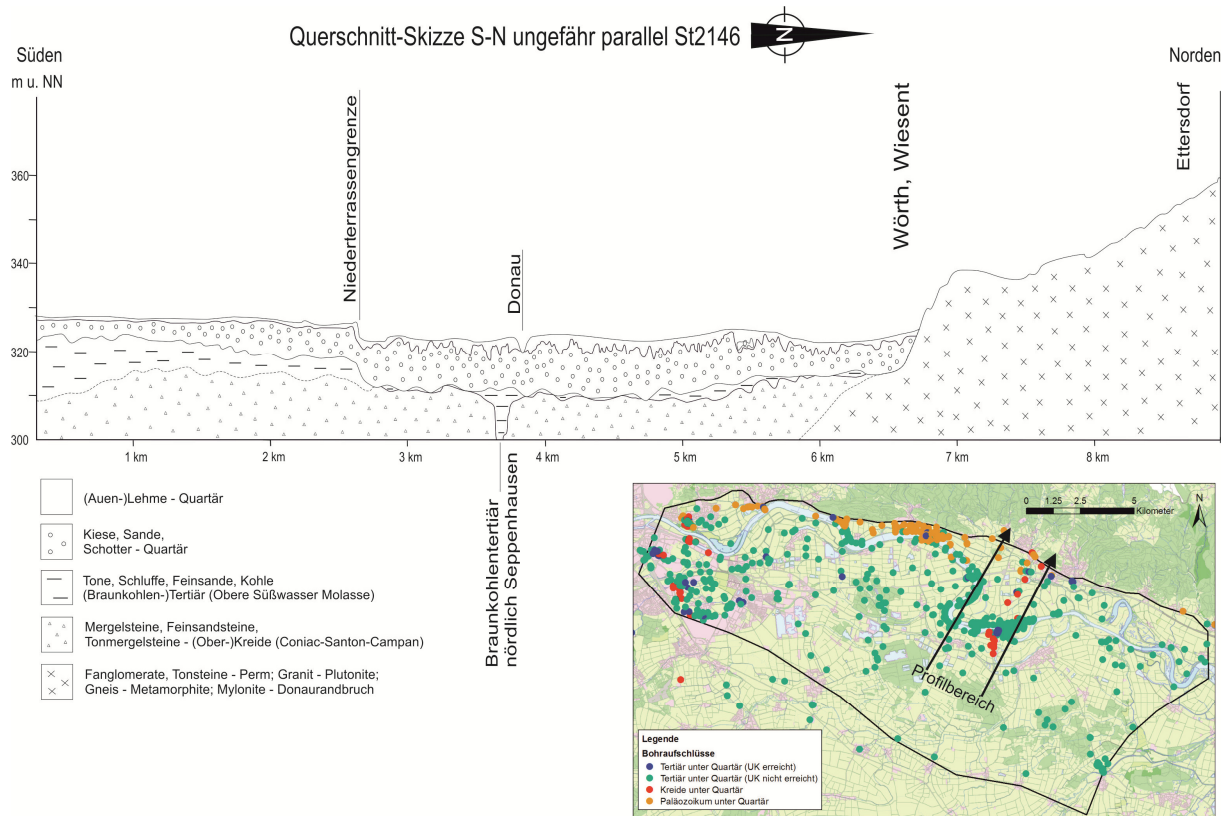


Abbildung 14: Querprofil im Bereich der Strasse St2146.

Interpolation

Eine Interpolation der Tertiärbasis ist aufgrund der wenigen Aufschlüsse nicht zuverlässig. Zur Visualisierung der Gesamtsituation wurde trotzdem eine Interpolation durchgeführt (Abbildung 15). Diese wurde jedoch nicht für das Grundwassermodell verwendet, da dieses nur den Quartärschotter umfasst.

Blockbild

Aus den Schichtgrenzen wurde ein 3D-Blockbild aufgebaut. Anhand des Blockbilds konnte die Lage der Schichtgrenzen in den Bereichen ohne Bohraufschlüsse auf ihre Plausibilität überprüft werden (Abbildung 16 bis Abbildung 18).

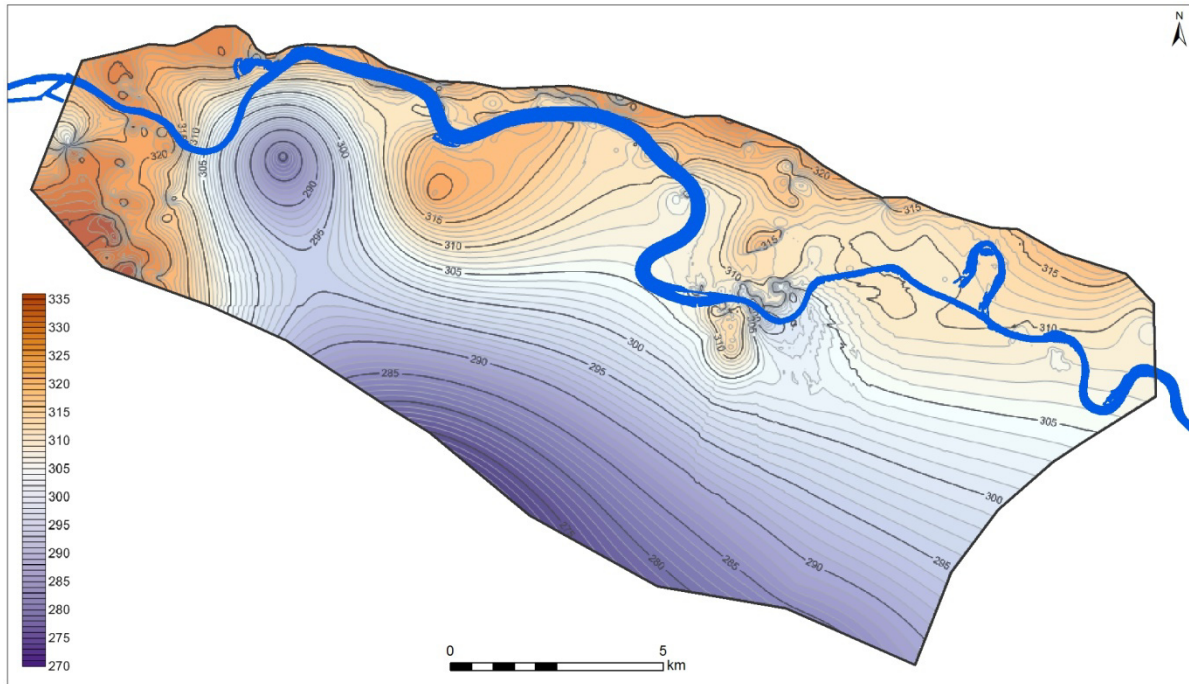


Abbildung 15: Interpolation der Tertiärbasis

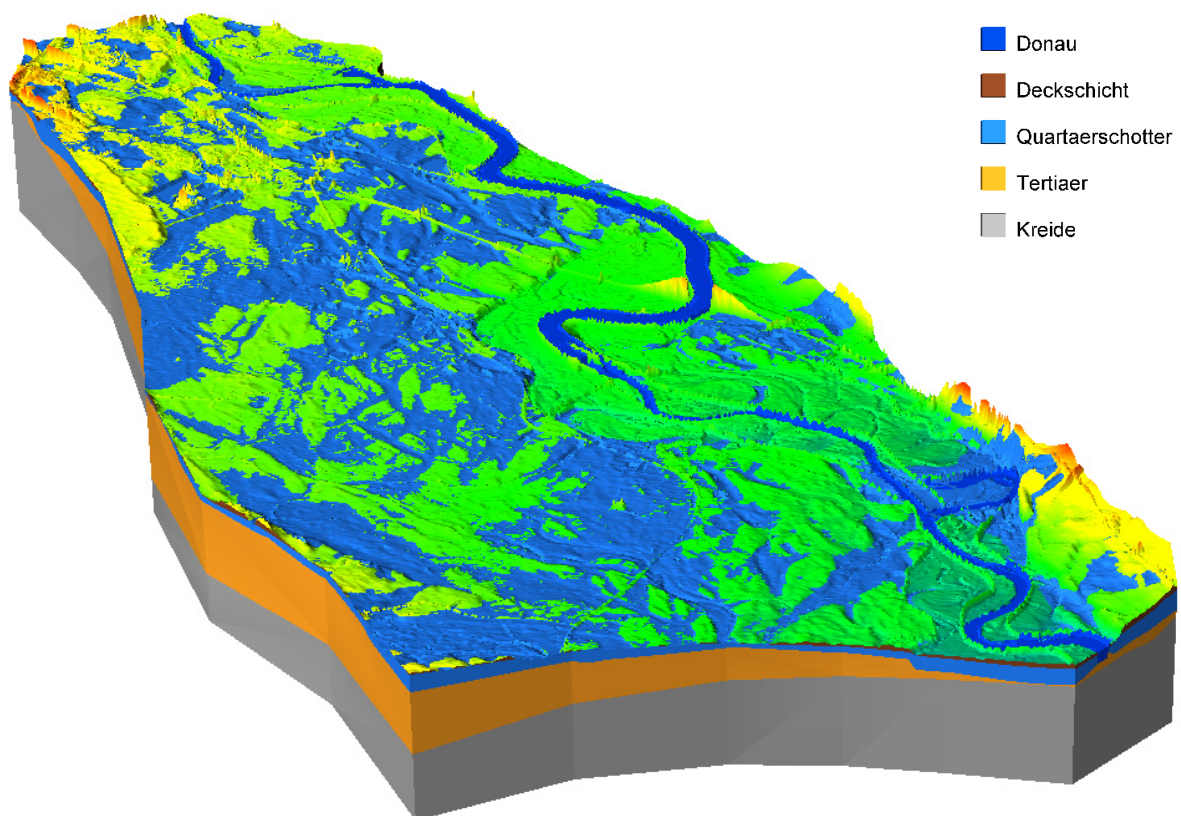


Abbildung 16: Aus den interpolierten Schichtgrenzen aufgebautes 3D-Blockbild. Im Bereich der blauen Flächen ist keine Deckschicht vorhanden.

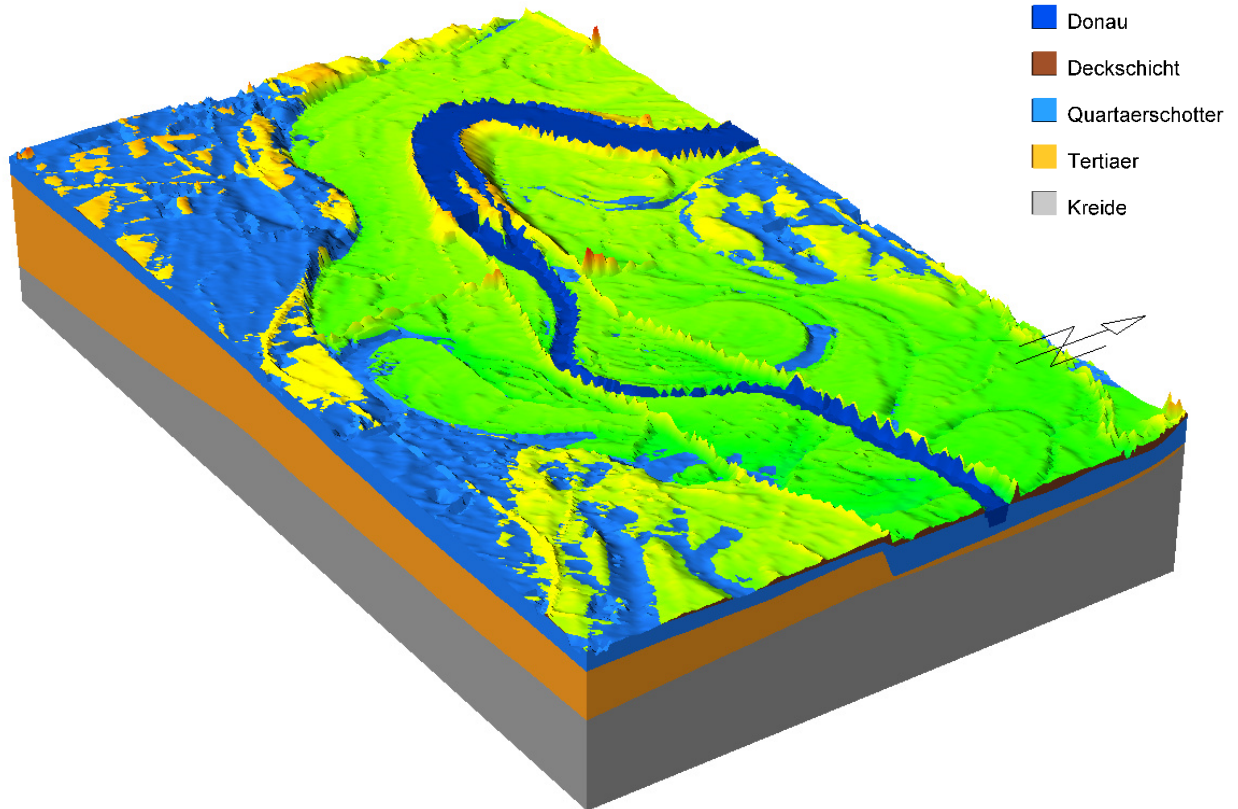


Abbildung 17: Detailausschnitt aus dem 3D-Modell

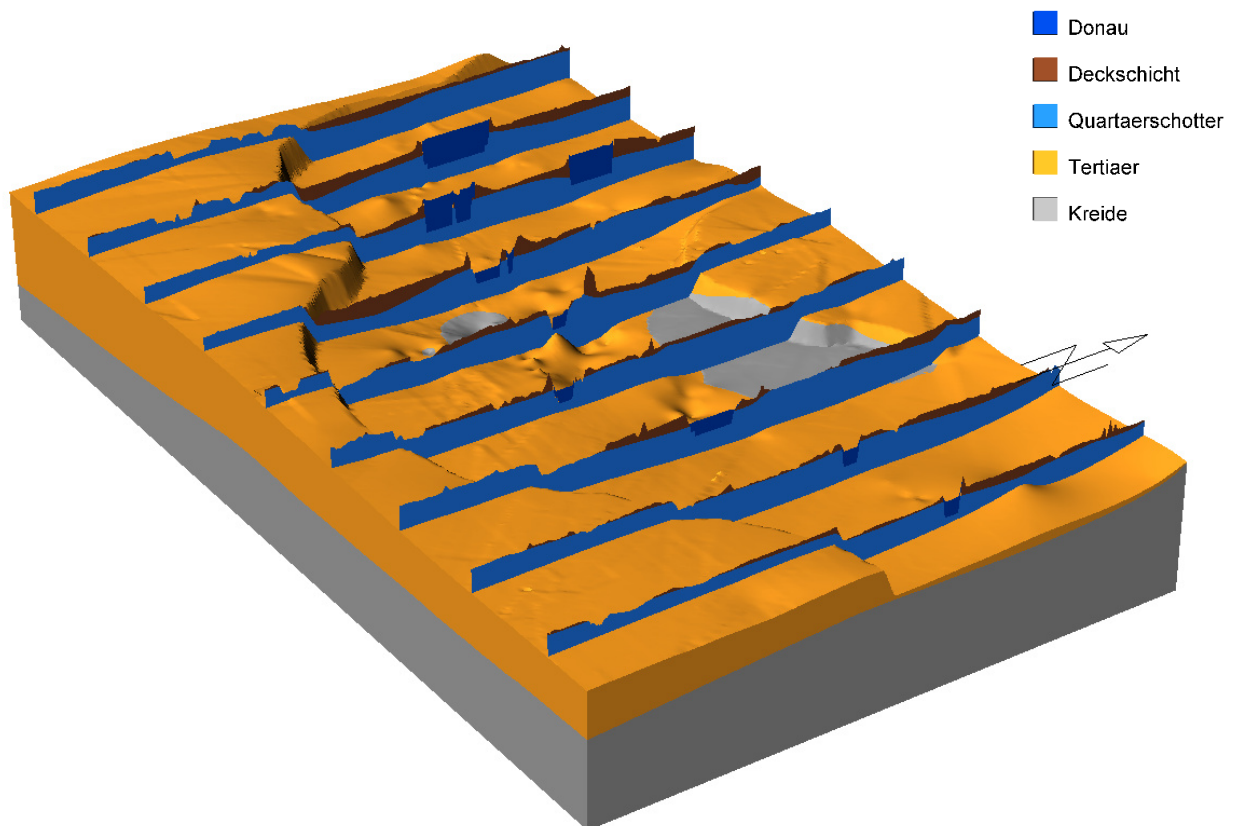


Abbildung 18: Detailausschnitt. Aufsicht auf die Quartärbasis und Querschnitte durch Quartärschotter und Deckschicht. In den grauen Bereichen befinden sich unter dem Quartärschotter Kreideschichten.

2.7 Dichtwände

- Zweck** Beim Bau der Staufstufen Geisling und Straubing wurden entlang der Stauräume Dichtwände gebaut, um die Infiltration von Donauwasser in den Grundwasserleiter zu reduzieren. Die Baujahre der Dichtwandabschnitte sind in Abbildung 19 zusammengestellt. Die Dichtwände wurden als Bohrpfähle realisiert.
- Berücksichtigung im Modell** Im Grundwassermodell werden die Dichtwände mit einer verminderten Durchlässigkeit abgebildet. Eine gewisse Durchlässigkeit ergibt sich auf der ganzen Dichtwandstrecke durch Lücken zwischen den Bohrpfählen und durch die Unterströmung der Dichtwand. Im Bereich von Auburg, wo unter dem Quartär das Paläozoikum ansteht, konnte keine gute Einbindung der Dichtwand realisiert werden, weshalb im Jahr 1989 das Schöpfwerk Auburg in Betrieb genommen und verschiedene Drainagegräben angelegt oder ertüchtigt wurden [22].

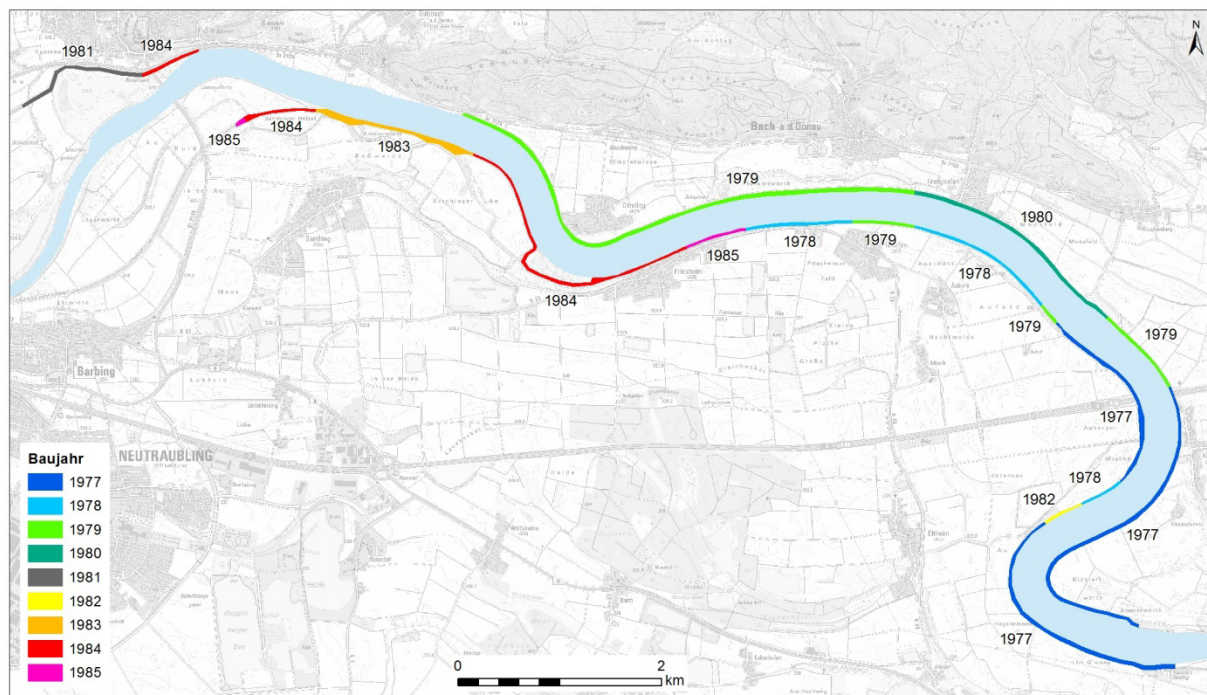


Abbildung 19: Lage und Baujahr der Dichtwände der Staufstufe Geisling.

3 Generelles Modellkonzept

3.1 Modellgebiet

Situation

Das Modellgebiet umfasst den Bereich zwischen Regensburg und Aholting. Die beiden geplanten Flutpolder liegen damit in genügendem Abstand zum Modellrand im Zentrum des Modells. Der gewählte Modellumriss ist in Abbildung 20 dargestellt. Die Modellfläche beträgt 206 km².

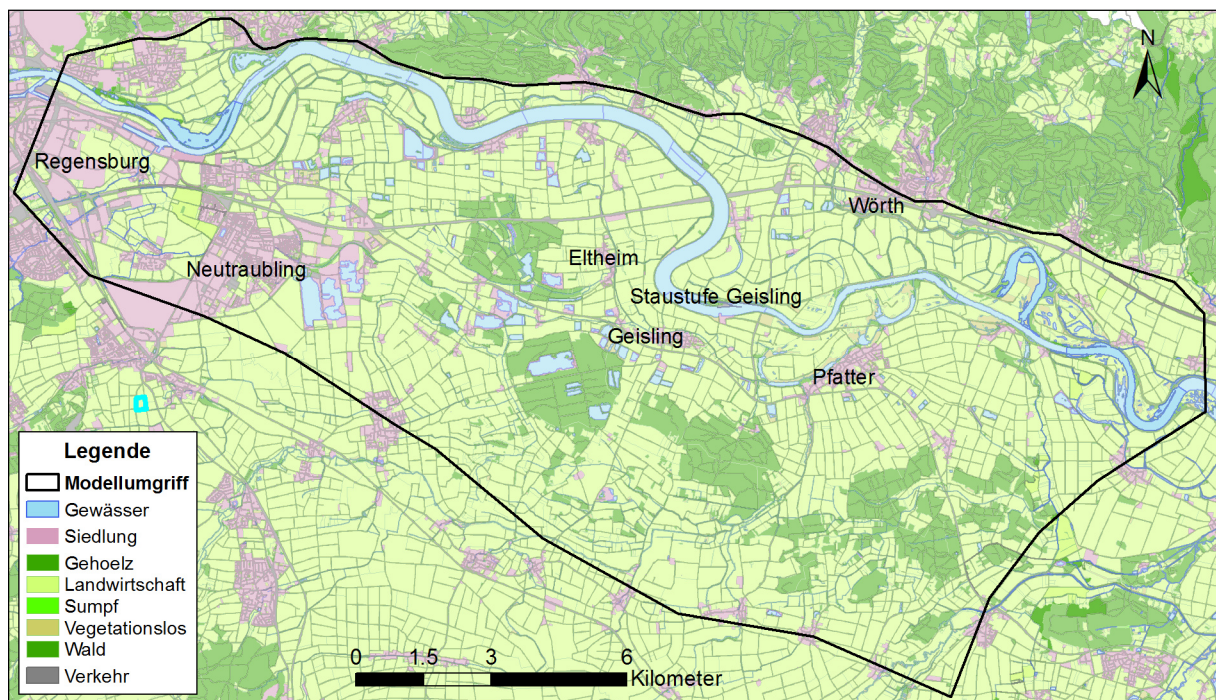


Abbildung 20: Modellrand.

Im Folgenden werden die angenommenen Modellränder begründet.

3.1.1 Nordrand

Donaurandbruch

Die quartären Schotter des Donautals werden am nördlichen Talrand durch den Donaurandbruch begrenzt (Abbildung 21). Es ist deshalb sinnvoll, das Grundwassermodell ebenfalls an dieser Stelle zu begrenzen.

Randbedingung

Das Gebiet nördlich des Modellrands entwässert vorwiegend über Oberflächengewässer. Einzig das über die direkt an das Modell anschließenden Talhänge ist ein seitlicher Zufluss von Grundwasser möglich.

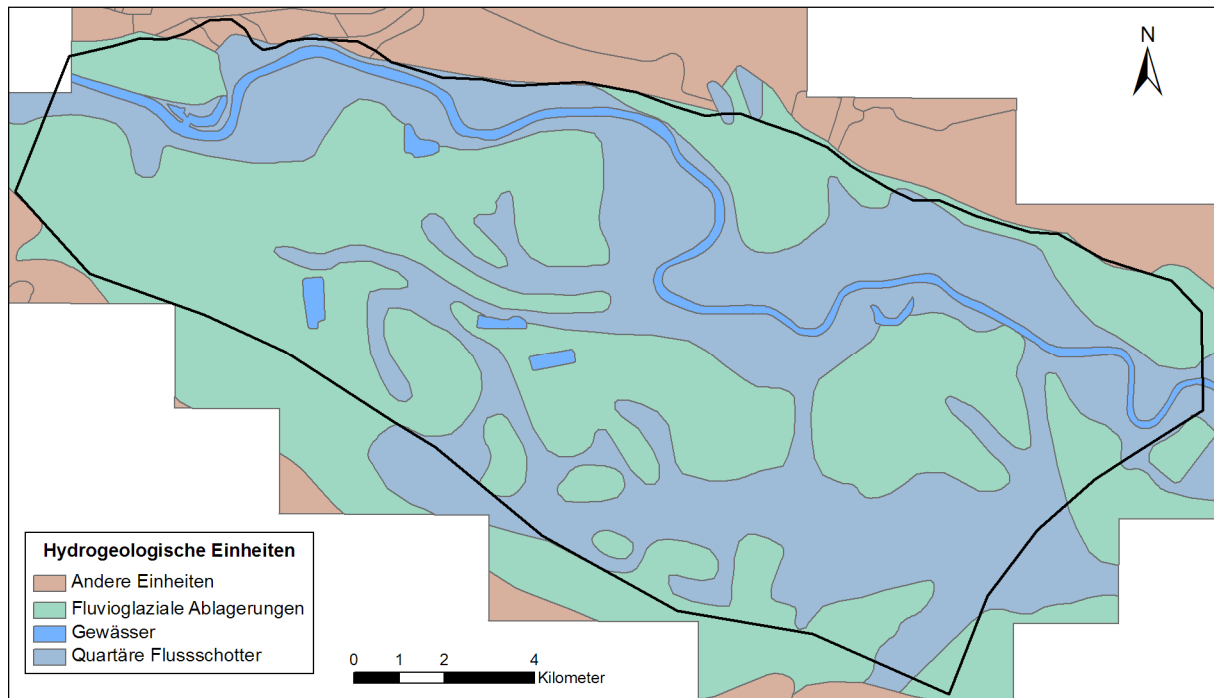


Abbildung 21: Begrenzung der Quartären Schotter im Bereich des Modells gemäß hydrogeologischer Karte 1:500'000 [1].

3.1.2 Westrand

Situation	In Abbildung 23 sind die Grundwasserpegel am Westrand des Modells, sowie die dazwischen linear interpolierten Grundwasserhöhen im Oktober 2009 dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass die Grundwasserspiegel entlang der Donau am tiefsten sind. Die Grundwasserströmung ist von beiden Talrändern zur Donau gerichtet. In Talrichtung ist der Strömungsgradient sehr klein.
Anbindung an Donau	Abbildung 24 zeigt die Ganglinien einiger Grundwasserpegel entlang des Modellrandes zusammen mit dem Donaupegel der Messstelle Schwabelweis. Die Grundwasserpegel L9 und R1A weisen nahezu die gleichen Schwankungen wie der Donauwasserspiegel auf. Dies deutet daraufhin, dass der Grundwasserspiegel eng an die Donau angebunden ist.
Randbedingung	Der Westrand kann deshalb als Stromlinie betrachtet werden. Eine Übernahme von Potentialen vom Modell der Stadt Regensburg ist daher nicht zwingend erforderlich. Dies hat den Vorteil, dass die Berechnungszeiträume unabhängig von diesem Modell gewählt werden können.

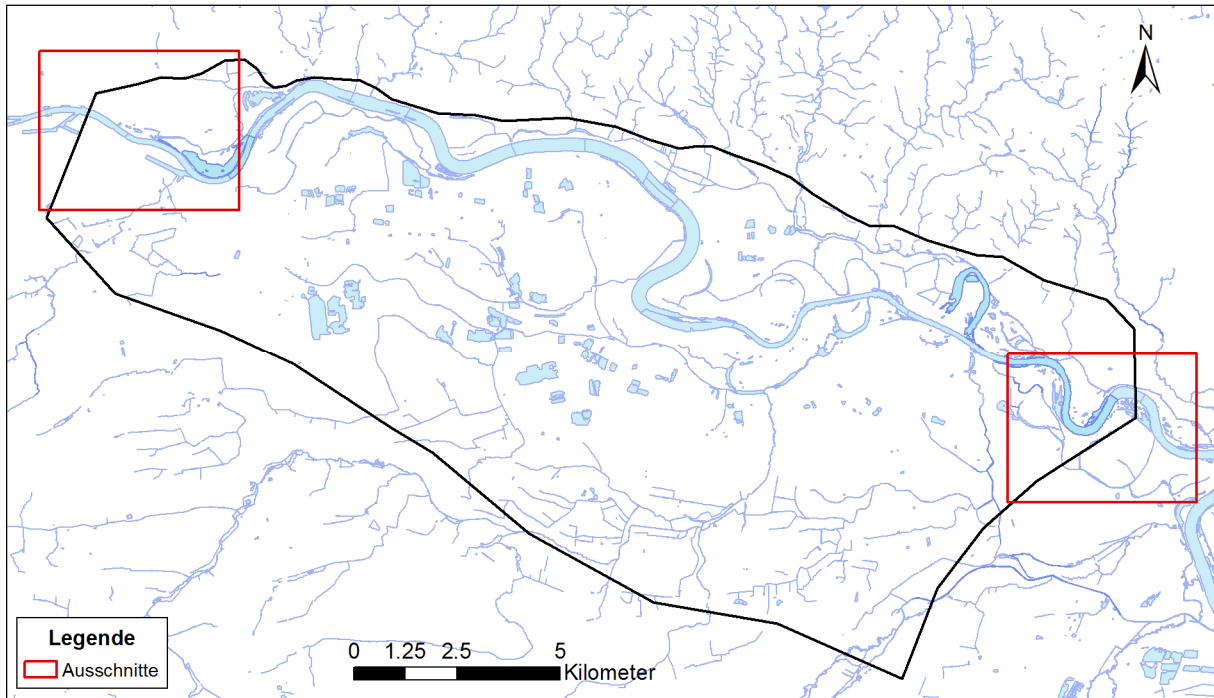


Abbildung 22: Lage der in Abbildung 23 und Abbildung 26 gezeigten Ausschnitte.

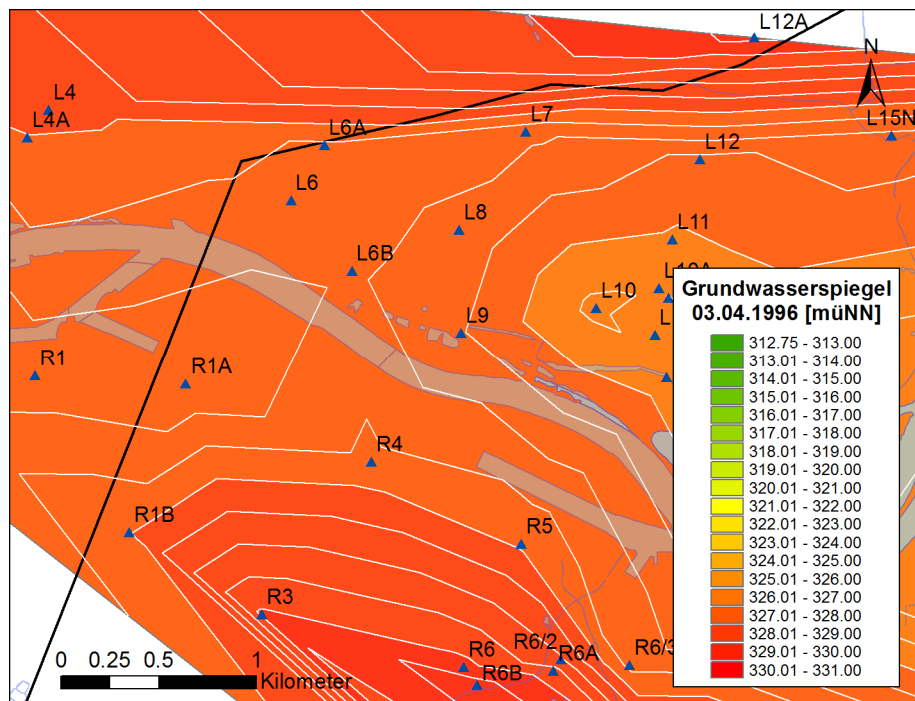


Abbildung 23: Linear interpolierte Grundwasserhöhengleichungen am Westrand des Modells (3. April 1996).

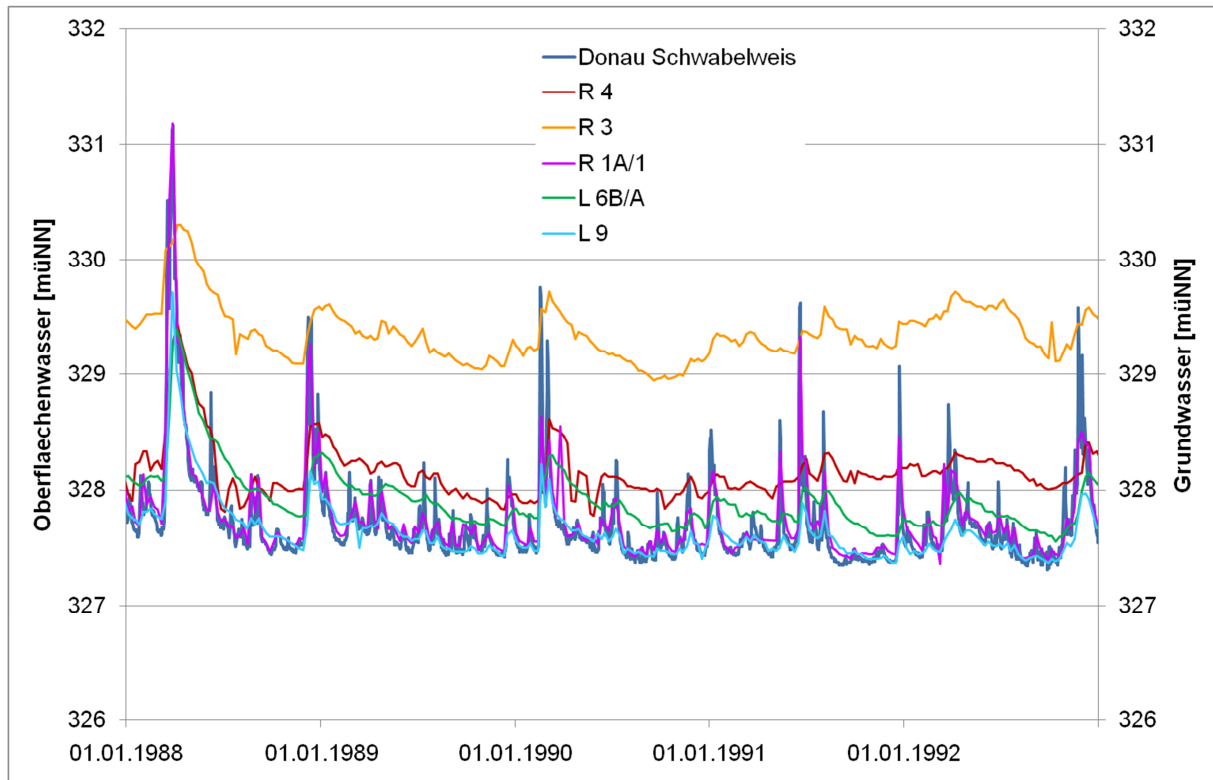


Abbildung 24: Ganglinien des Grundwasserspiegels an ausgewählten Messstellen am Westrand des Modells, zusammen mit dem Donaupegel in Schwabelweis.

3.1.3 Südrand

Situation	Am südlichen Talrand erstrecken sich die quartären Flussschotter bis etwa zur Linie Obertraubing - Köfering - Sünching. Auch südlich davon werden jedoch Schotter angetroffen. Während sich diese im Bereich Westlich Köfering auf einzelne Flusstäler beschränken, werden im östlichen Teil Terrassenschotter größerer Ausdehnung angetroffen.
Modellrand	Die vorhandenen Pegeldata aus der Beweissicherung der Stauhaltungen Geisling und Straubing beschränken sich auf eine Talbreite von etwa 6 km. Weiter südlich gibt es nur noch die Pegel 209A und 541, welche über eine längere Messreihe verfügen. Die südliche Modellgrenze wurde deshalb so gewählt, dass diese beiden Pegel gerade am Rand des Modells liegen. Wie die Visualisierung der Stichtagsmessung vom 29.10.2009 zeigt, steigt der Grundwasserspiegel südlich der gewählten Modellgrenze steil an (Abbildung 25). Dies deutet darauf hin, dass dort die Durchlässigkeiten kleiner sind als im Modellgebiet.

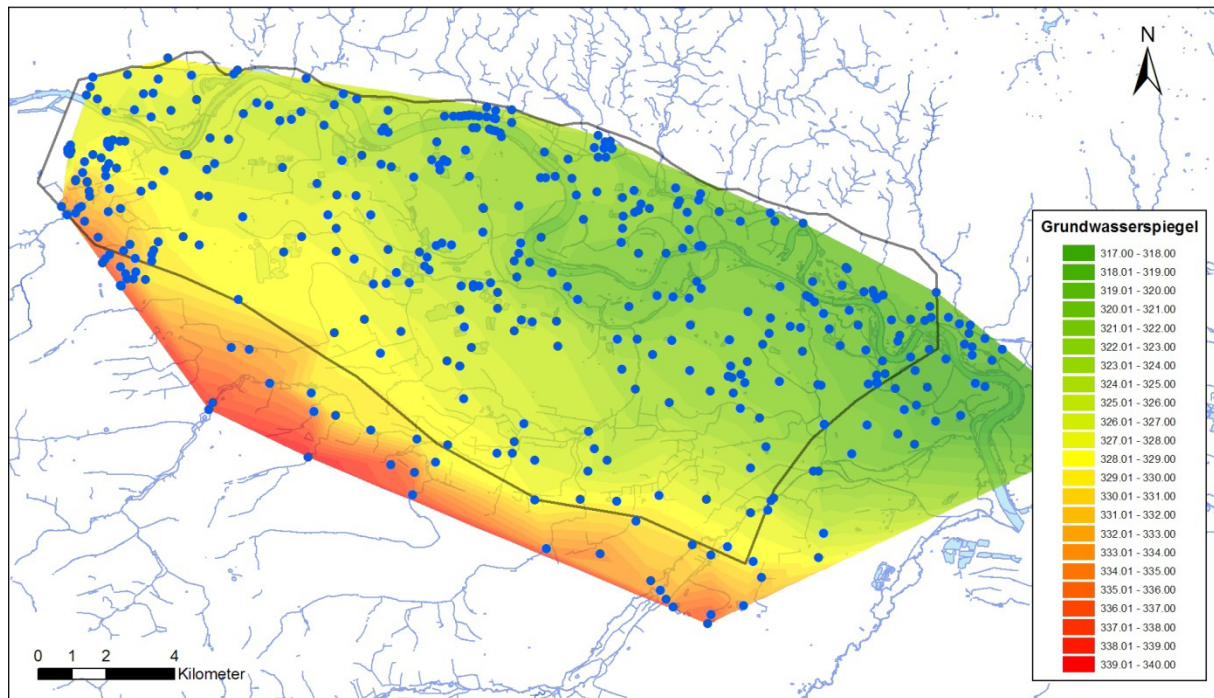


Abbildung 25: Lineare Interpolation der am Stichtag vom 29.10.2009 gemessenen Grundwasserspiegel (blaue Punkte: verwendete Messstellen).

Randbedingung Da der Schotter über den Südrand des Modells hinausgeht, ist mit einem Grundwasserfluss über die Modellgrenze zu rechnen. Der südliche Modellrand wird deshalb mit einer Zufluss-Randbedingung versehen.

3.1.4 Ostrand

Situation Am östlichen Modellrand ist die Situation ähnlich wie am Westrand. Das Grundwasser strömt zuerst von beiden Talrändern zur Donau hin. Im Rückstaubereich der Staustufe Straubing liegt der Donauwasserspiegel jedoch höher als der Grundwasserspiegel. Als Vorfluter wirken dort die beidseitig der Donau angeordneten Drainagegräben. Nördlich von Aholting biegt die Grundwasserströmung nach Osten ab und verlässt das Modellgebiet (Abbildung 26).

Anbindung an Donau Abbildung 27 zeigt die Ganglinien einiger Grundwasserpegel am Ostrand des Modells, zusammen mit dem Donauepegel in Pondorf. Die Grundwasserstände weisen zwar bei Hochwasser der Donau ebenfalls Hochstände auf, liegen aber deutlich unter dem Donauepegel. Die Anbindung des Grundwassers an die Donau ist also nicht besonders ausgeprägt. Gründe dafür können sein:

- Die Donaurohle ist in diesem Bereich kolmatiert, da die Fließgeschwindigkeit im Stauraum der Staustufe Straubing klein ist.
- Die Donau ist gegenüber dem Grundwasser durch eine Dichtwand abgegrenzt.

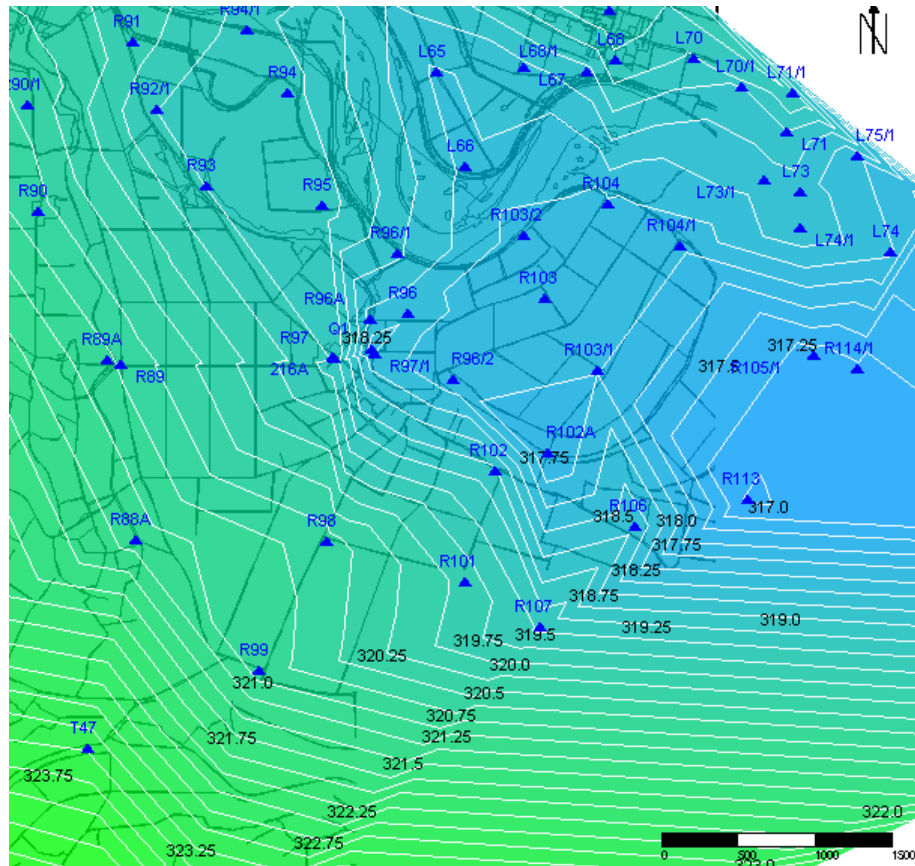


Abbildung 26: Linear interpolierte Grundwasserhöhengleichen am Ostrand des Modells (3. April 1996).

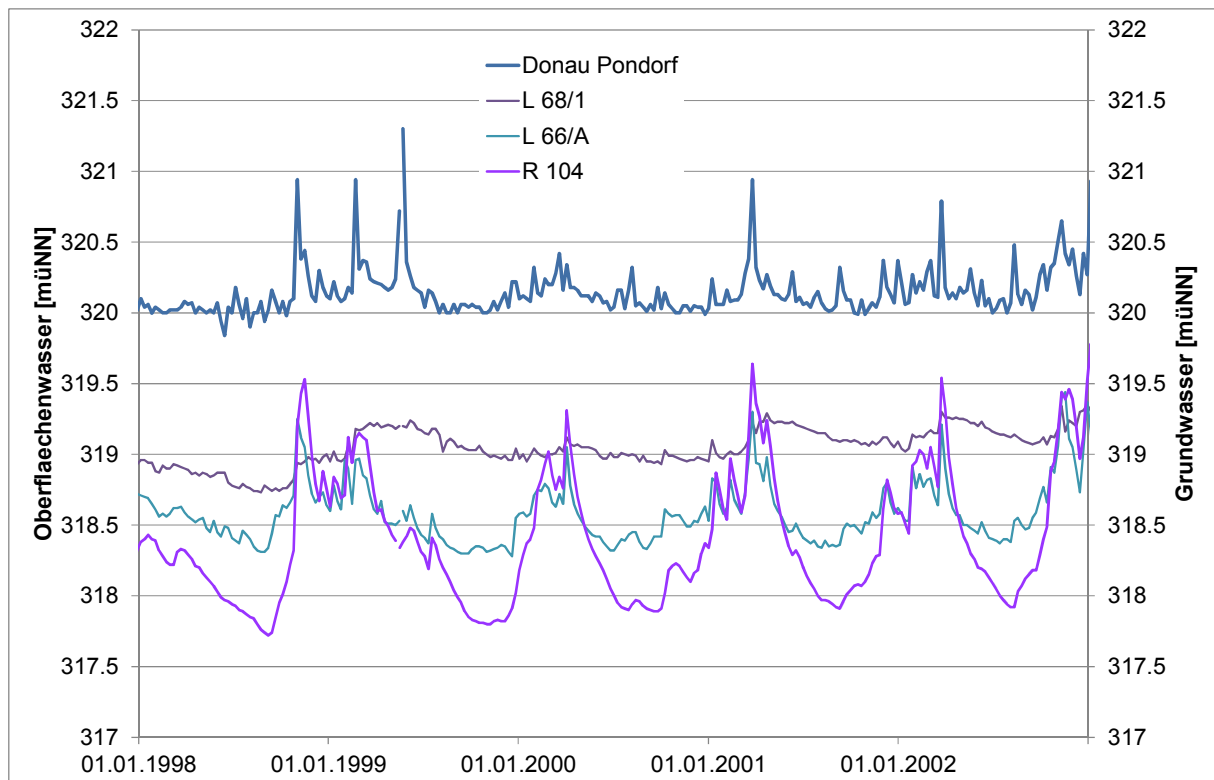


Abbildung 27: Ganglinien des Grundwasserspiegels an ausgewählten Messstellen am Ostrand des Modells, zusammen mit dem Donauegel in Pondorf.

Randbedingung Der östliche Rand des Modells wird als Stromlinie, d.h. undurchlässiger Rand betrachtet. Im Bereich nördlich Aholting wird eine zeitlich konstante Cauchy-Randbedingung verwendet. Mit dieser Randbedingung kann ein variabler, vom Grundwasserstand abhängiger seitlicher Abfluss aus dem Modell nachgebildet werden.

3.2 Abstraktion der Hydrogeologie

Modellkonzept Im regionalen Maßstab kann der Grundwasserleiter des Donautals mit einem horizontal - zweidimensionalen Modell nachgebildet werden. Das Modell umfasst die Quartären Flussschotter und fluvioglazialen Ablagerungen der Talebene. Die darunterliegenden Tertiär- und Kreideschichten besitzen deutlich kleinere Durchlässigkeiten und werden im numerischen Modell als Stauer betrachtet.

Es ist zu überprüfen, ob sich der zweidimensionale Ansatz auch für die Simulation von Polderszenarien eignet.

Topografie Die Oberkante des Modells wird durch die Topografie gebildet. Die Topografie wurde dem digitalen Geländemodell entnommen. Das Geländemodell weist eine Auflösung von 1 m auf. Die Genauigkeit in vertikaler Richtung beträgt ± 20 cm [21].

Randbereiche In Randbereichen mit geringer Mächtigkeit kann der Grundwasserleiter bei tiefem Grundwasserstand trocken fallen. Im Modell wird an dieser Stelle eine minimale Transmissivität aufrechterhalten, damit keine numerischen Instabilitäten auftreten.

Modelloberfläche Die Oberfläche des Modells wird als Sickerfläche vorgegeben. Bei Ansteigen des Grundwasserleiters über die Modelloberfläche wechselt an der betreffenden Stelle die Randbedingung zu einer Fixpotential-Randbedingung und das überschüssige Wasser verlässt das Modell. Lokal festgestellte Fälle von artesisch gespanntem Grundwasser können über eine in der Programmierschnittstelle von FEFLOW implementierte Reduktion der im Schwankungsbereich des Grundwassers angesetzten Porosität berücksichtigt werden.

Struktur Das konzeptionelle Modell wird in Form einer Datenbank und von GIS-Ebenen angelegt. Über verschiedene Randbedingungsmodelle wird daraus der Modell-Input erzeugt. Der numerische Code wird zur Diskretisierung in finite Elemente, zur numerischen Simulation und für die Bilanzierung eingesetzt (Abbildung 28).

Flexibilität Die Trennung von konzeptionellem Modell und Modellcode hat den Vorteil, dass Änderungen der Modelldiskretisierung keine Veränderungen des konzeptionellen Modells erfordern. Über die verschiedenen Randbedingungsmodelle, als Module in der Programmiersprache Perl implementiert, werden die Modelleingaben weit gehend automatisch erzeugt. Dies ermöglicht es, über Sensitivitätsstudien mit geringem Aufwand die Auswirkungen verschiedener Modellannahmen zu untersuchen.

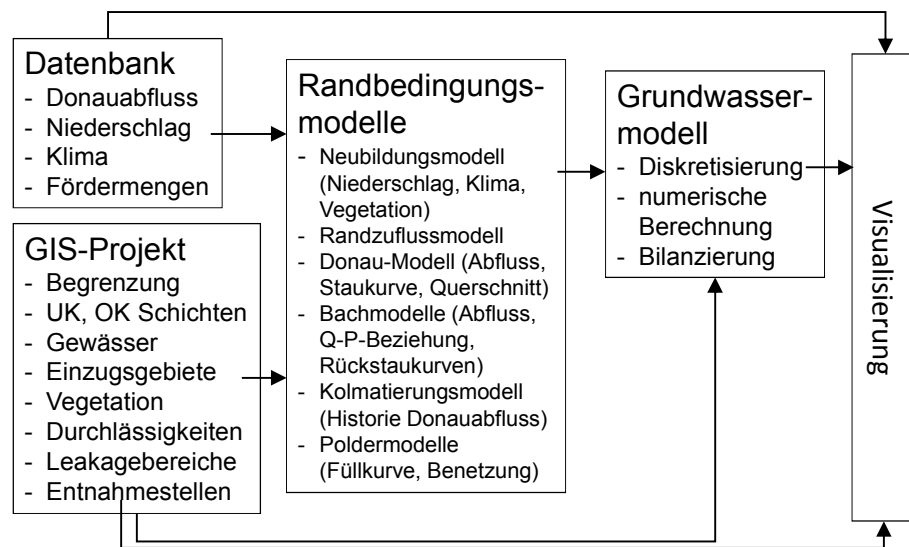


Abbildung 28: Trennung von konzeptionellem Modell und numerischen Modell.

4 Gewässer

Cauchy-Randbedingung

Zur Quantifizierung des Wasseraustauschs zwischen Oberflächen-
gewässern und Grundwasser wird im Grundwassermodell eine
Cauchy-Randbedingung verwendet:

a.) Bei Grundwasserständen unterhalb der Gewässersohle wird eine
vom Grundwasserstand unabhängige Infiltration vorgegeben:

$$Q = (H_P(t) - H_{\text{sohle}}) \cdot f_{\text{LEAK}}(t) \cdot L$$

b.) Bei Grundwasserständen oberhalb der Gewässersohle wird eine
vom Grundwasserstand abhängige Infiltration oder Exfiltration vorge-
geben.

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

Q: Zugegebene oder entnommene Wassermenge [m^3/Tag].

H_P : Wasserspiegel [m ü. NN].

H_{sohle} : Gewässersohle [m ü. NN].

H_{GW} : Grundwasserspiegel [m ü. NN].

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

L: Länge des zugeordneten Gewässerabschnittes [m].

Der Leakagewert kann zeitabhängig (Kolmation) oder abhängig von
der benetzten Fläche sein. Bei Drainagegerinnen wird der Leakage-
wert für die Infiltration zu Null gesetzt, da dort nur Exfiltration auftritt.

Situation

In Abbildung 29 ist ein Überblick über die im numerischen Grundwas-
sermodell berücksichtigten Gewässer dargestellt. Die Konzepte und
Methoden zur Herleitung der im Modell benötigten Wasserspiegel
werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

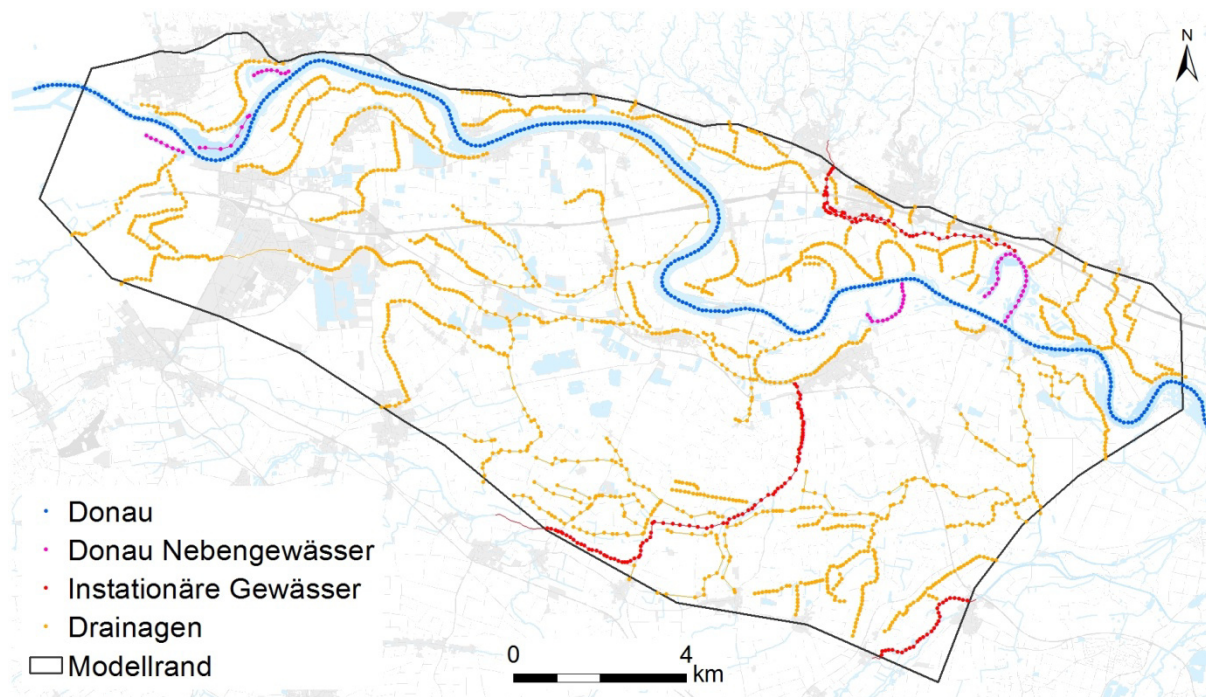


Abbildung 29: Übersicht über die im numerischen Grundwassermodell berücksichtigten Gewässerpunkte.

4.1 Donau

Konzept

Der zeitliche Verlauf des Pegelstands der Donau soll für verschiedene Ausbaustufen und Abflüsse mit Hilfe von hydraulischen Modellen nachgebildet werden. Die modellierten Pegel-Abfluss-Beziehungen (P-Q-Beziehungen) werden anschließend im numerischen Grundwassermodell für die Berechnung der Cauchy-Randbedingung verwendet. Zur Bearbeitung der gesetzten Ziele werden hydraulische Modelle für die folgenden drei Ausbaustufen erstellt:

- vor Donauausbau
- nach Ausbau Stauhaltung Geisling
- nach Ausbau Stauhaltung Straubing (Ist-Zustand).

4.1.1 Ist-Zustand

Vorgehen

Das hydraulische Modell zur Bestimmung der P-Q-Beziehungen der Donau wurde mit Hilfe der Software HEC-RAS des US Army Corps of Engineers [5] erstellt. Dazu wurden die vorhandenen Querprofile aus der Vermessung ausgewertet und in HEC-RAS importiert. In HEC-RAS wurden anschließend die P-Q-Beziehungen entlang des Gerinnes modelliert und über den Rauigkeitsbeiwert nach Strickler (k_{st}) an den Pegelganglinien (instationär) sowie den P-Q-Beziehungen (stationär) der bestehenden Messstellen kalibriert.

Modellgebiet

Das hydraulische Modell umfasst die Donaustrecke von Donau-km 2376.5 (Messstelle Schwabelweis, Regensburg) flussabwärts bis

zu Donau-km 2330.6 (Oberwasser Stauhaltung Straubing). Die Stauhaltung Geisling wird im Modell entsprechend den Angaben in der Wehrbetriebsanweisung des WSA Regensburg [6] berücksichtigt.

Querprofildaten

Die Querprofile in HEC-RAS wurden aus den Vermessungsdaten des WSA übernommen (Abbildung 30). Die Profilaufnahmen fanden mehrheitlich im Jahr 2013 statt. In Abbildung 31 wird beispielhaft die Umsetzung der Profildaten in HEC-RAS gezeigt.



Abbildung 30:

Querprofile des hydraulischen Modells: Ausschnitt bei der Messstelle Donau Pfatter, km 2350.7.

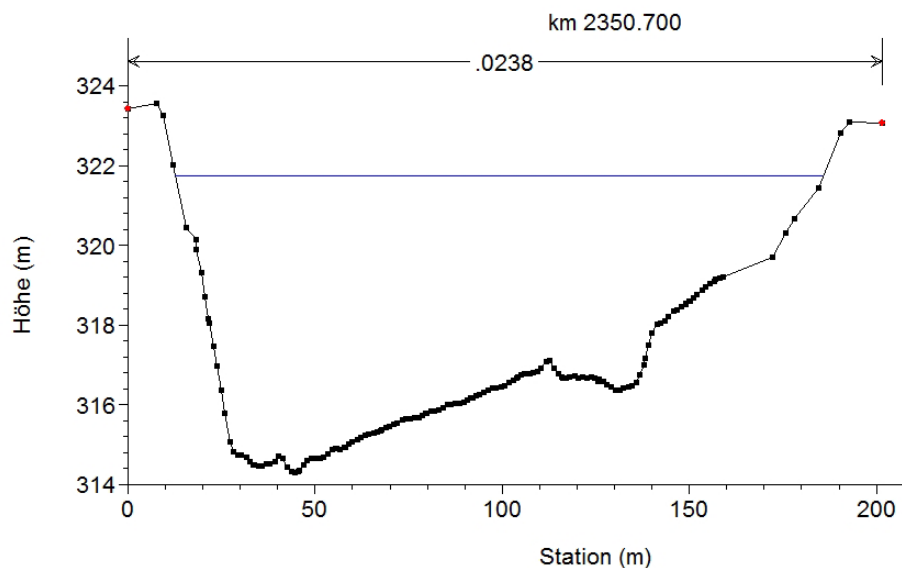


Abbildung 31:

Querprofil aus dem hydraulischen Modell mit Wasserstand bei Abfluss $Q = 1'000 \text{ m}^3/\text{s}$: Ausschnitt bei der Messstelle Donau Pfatter, km 2350.7.

instationäre
Kalibration

Die Kalibration des Stricklerbeiwerts am Zeitraum vom 01.01.2013 bis 31.12.2014 ergab einen Wert von $42 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Dies entspricht etwa den Erfahrungswerten des BAW aus früheren Studien [8][9]. Der Wert wurde über den gesamten Flusslauf konstant gehalten, d.h. es wurde weder eine Unterscheidung zwischen Hauptgerinne und Vorland vorgenommen noch eine Zonierung entlang der Flussachse eingeführt.

Eine detaillierte Zonierung lässt sich aufgrund der Kalibrierung und den Anforderungen des Grundwassermodells nicht rechtfertigen. Ein Vergleich zwischen den modellierten und den gemessenen Donaupegel für den Kalibrierungszeitraum bei der Messstelle Donau Pfatter, km 2350.7, ist in Abbildung 32 dargestellt.

Für die instationäre Berechnung wurden folgende Randbedingungen gewählt:

- km 2376.500: Pegelganglinie der Messstelle Schwabelweis
- km 2354.285: Stauhaltung Geisling, Stauziel 327.30 m ü. NN
- km 2330.600: Pegelganglinie Straubing, Stauziel 320.00 m ü. NN.

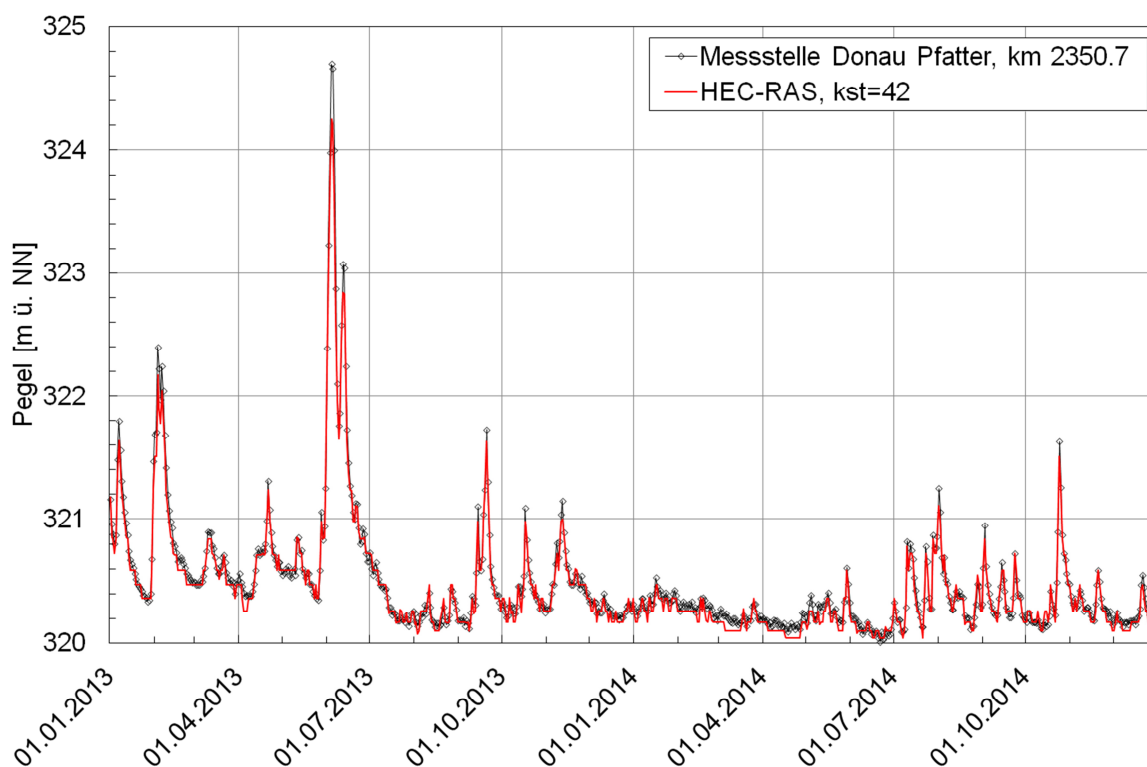


Abbildung 32: Vergleich der modellierten (HEC-RAS) mit den gemessenen Donaupegel für den Zeitraum vom 01.01.2013 - 31.12.2014 an der Messstelle Donau Pfatter, km 2350.7.

P-Q-Beziehungen

Die Berechnung der P-Q-Beziehung erfolgte stationär für ausgewählte Abflüsse. Die resultierenden P-Q-Beziehungen für die Messstellen Schwabelweis (km 2376.5) und Donau Pfatter (km 2350.7) im Vergleich mit den Messdaten werden in Abbildung 33 bzw. Abbildung 34 gezeigt.

Folgende Randbedingungen wurden im stationären Modell verwendet:

- km 2376.500: Normalabflusstiefe, Sohlgefälle 0.0003
- km 2354.285: Stauhaltung Geisling, Stauziel 327.30 m ü. NN
- km 2330.600: Bekannte Wassertiefe, Stauziel 320.00 m ü. NN.

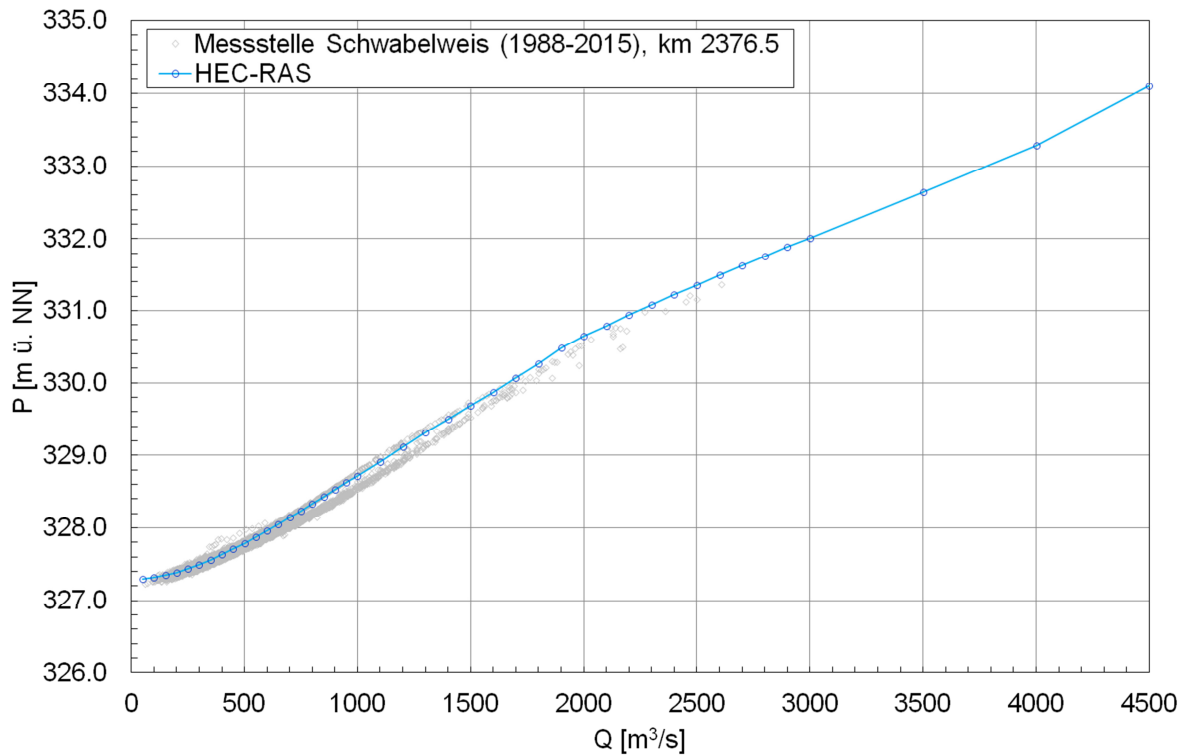


Abbildung 33: Vergleich der mit HEC-RAS modellierten P-Q-Beziehung der Donau mit den Daten der Messstelle Schwabelweis bei Donau-km 2376.5.

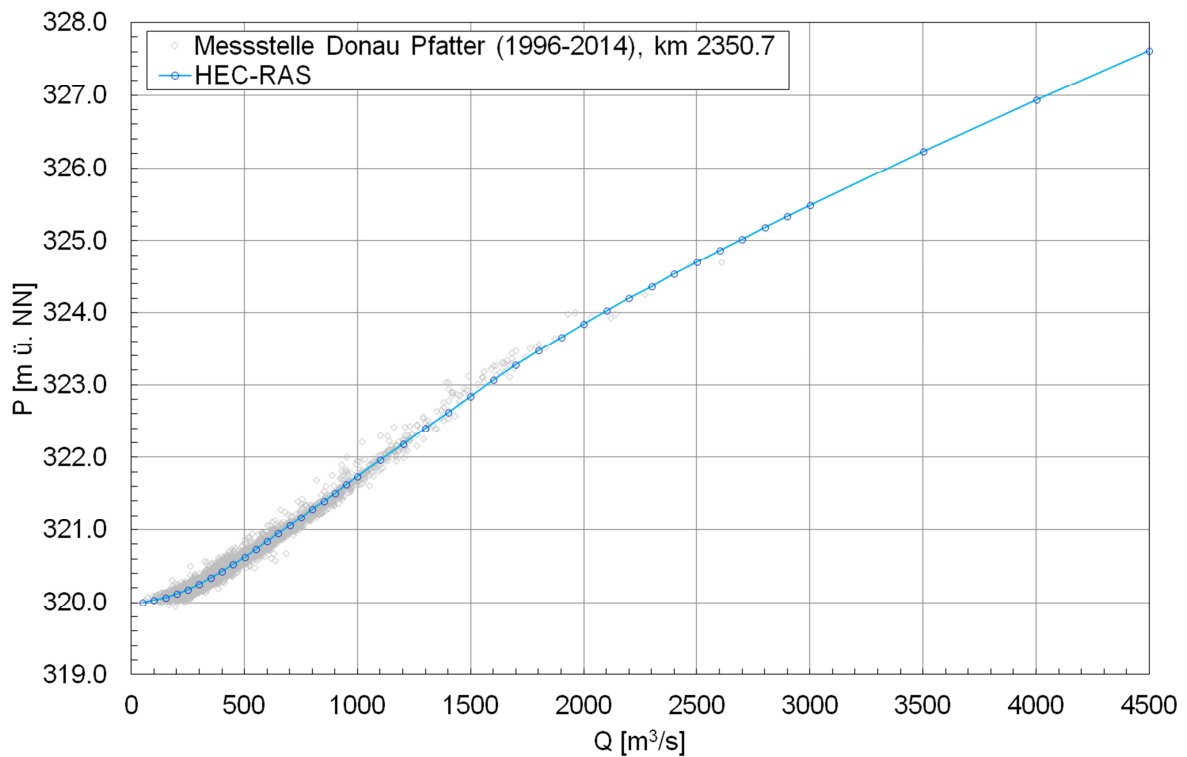


Abbildung 34: Vergleich der mit HEC-RAS modellierten P-Q-Beziehung der Donau mit den Daten der Messstelle Donau Pfatter bei Donau-km 2350.5.

4.2 Übrige zeitabhängig berücksichtigte Gewässer

4.2.1 Abflussbestimmung

Ausgangslage	Pfatter und Wiesent werden im Grundwassermodell mit zeitabhängigen Pegelständen berücksichtigt. Zur Bestimmung der Pegelstände werden deren Abflüsse benötigt. Für das Einzugsgebiet der Wiesent gibt es keine Abfluss-Messstation. Das Einzugsgebiet der Pfatter verfügt über eine Messstation (Köfering Pfatter, km 22.60) mit Pegel- und Abflussmessungen ab dem Jahr 1979. Die Messstelle befindet sich jedoch außerhalb des Grundwassermodells.
Pfatter	Die gemessenen Abflüsse an der Messstation Köfering enthalten nicht die gesamten Wassermengen bis zum Modellrand. Der restliche Zufluss wird aus der hydrologischen Wasserbilanz im fehlenden Einzugsbereich berechnet. Da von einem Teilzeitraum Pegelmessungen entlang der Pfatter existieren, können die so ermittelten Abflüsse validiert werden.
Wiesent	Um die Abflüsse der Wiesent als Randbedingung für das Grundwassermodell zu erhalten, wurden diese mit Hilfe eines Niederschlag-Abfluss-Modells (N-A-Modell) simuliert. Zuerst wurde für das Einzugsgebiet der Pfatter ein N-A-Modell aufgebaut und an der Messstelle Köfering kalibriert. Anschließend wurde das Modell für das Einzugsgebiet der Wiesent eingesetzt. Für das Einzugsgebiet der Wiesent unterscheiden sich die im Modell vorgegebenen Parameter wie Neigung, Höhe, Vegetation und Bodentyp von jenen der Pfatter. Da keine Kalibrierungsdaten vorliegen, ist dieses Modell natürlich weniger genau.
Grosse Laber	An der großen Laber gibt es bei Schönach einen Pegel, welcher über den gesamten Modellzeitraum zur Verfügung steht. Daher erübrigt sich dort eine Bestimmung des Abflusses.

4.2.2 Niederschlags-Abfluss-Modell

Modellkonzept	Für die Abschätzung der Abflüsse wurde das physikalisch-basierte, kontinuierliche Rastermodell TETIS [11][12] verwendet. Der Abfluss wird für jede Rasterzelle einzeln berechnet. Die Erzeugung des Abflusses in TETIS kann mittels sechs schematischen Speichern dargestellt werden (vgl. Abbildung 35). Diese Speicher repräsentieren die wichtigsten hydrologischen Prozesse wie Schneeschmelze, Evapotranspiration, direkter Abfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss. Als Inputdaten werden klimatische Daten (z.B. Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung), das digitale Geländemodell (DGM), Bodenkennwerte (Abbildung 37) und Daten zur Landnutzung benötigt. Der Abfluss von einem zum nächsten Speicher wird jeweils als Funktion des Speicherinhaltes beschrieben. Diese Beziehung gilt für jede Zelle des Rasters.
---------------	--

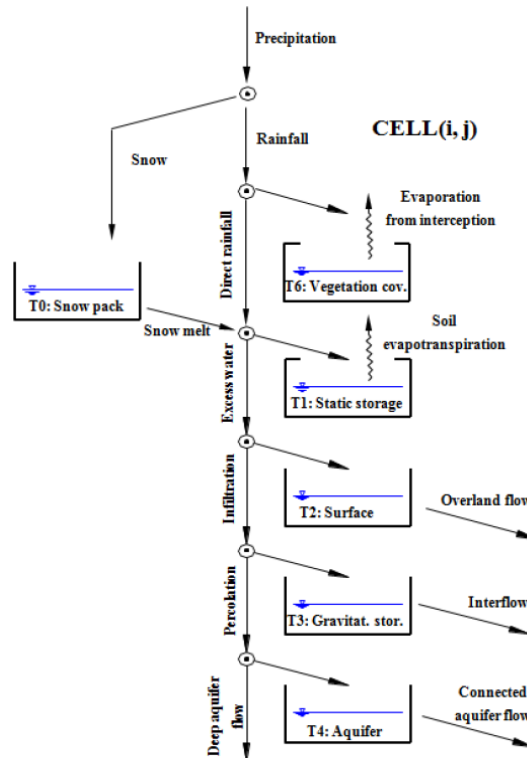


Abbildung 35: Modellaufbau von TETIS.

- Vorgehen** In einem ersten Modell (Köferingmodell) wurde das Modell kalibriert und validiert. anschließend wurden die kalibrierten Werte auf separate Modelle für die Einzugsgebiete der Pfatter sowie der Wiesent übertragen und damit die am Rand des Grundwassermodells anfallenden Abflüsse abgeschätzt.
- Einzugsgebiete** Die Einzugsgebiete (EZG) der Wiesent, der Pfatter sowie des Kalibrierungsgebietes wurden anhand des DGM bestimmt. Abbildung 36 zeigt das EZG der Wiesent (oben rechts) und das EZG der Pfatter (unten links) mit dem EZG der Kalibration. In den Einzugsgebieten ist nicht mit einer Verkarstung zu rechnen. Deshalb stimmen oberflächliche und unterirdische Einzugsgebiete etwa überein.

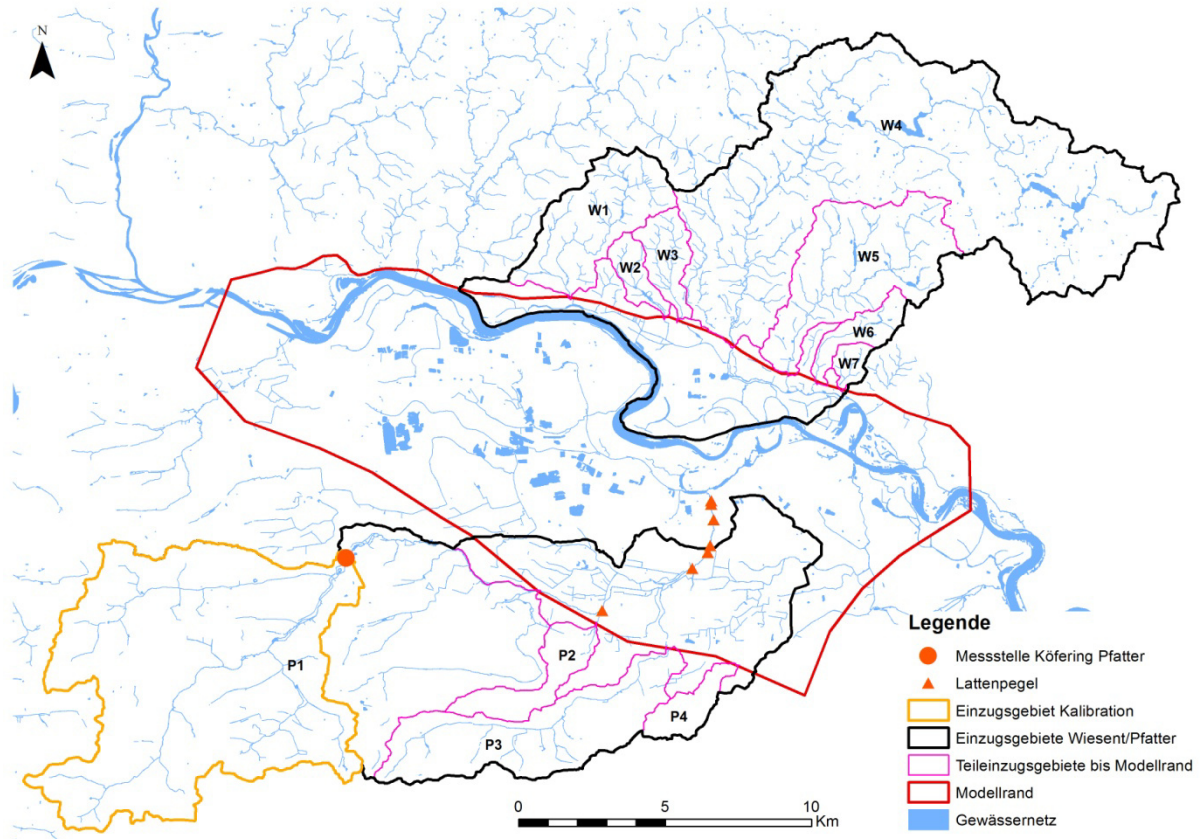


Abbildung 36: Einzugsgebiete sowie Teileinzugsgebiete der Pfatter und der Wiesent mit Messstellen, Gewässernetz und Modellrand.

Kalibration	Das Köferingmodell wurde anhand der gemessenen Abflüsse der Messstation Köfering Pfatter kalibriert. Dazu wurden die Abflüsse des Zeitraums vom 01.01.1990 bis zum 31.12.1995 verwendet.
Validierung	Zur Validierung wurde die gesamte Zeitreihe von 1980 bis 2015 verwendet. Der Vergleich der modellierten mit den gemessenen Abflüssen ist in Abbildung 38 dargestellt.
Abweichungen	Die Hochwasserabflüsse im Niederschlags / Abfluss-Modell sind vor allem von den Regenereignissen abhängig. Insbesondere Starkniederschläge können lokal sehr große Unterschiede aufweisen. Bei Verwendung von Regenmessstationen außerhalb des Einzugsbereiches können daher große Fehler auftreten. Dies erklärt die schlechte Übereinstimmung der Hochwasserspitzen in Abbildung 38.

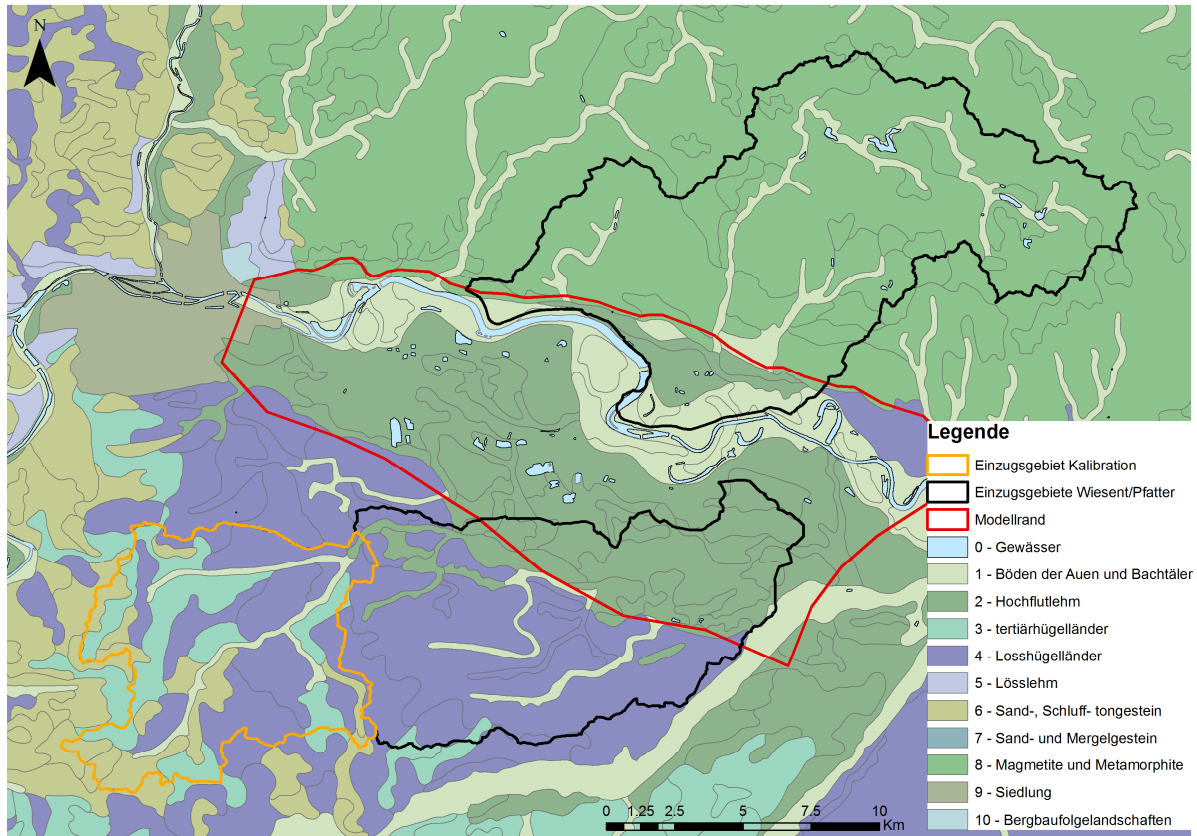


Abbildung 37: Im Niederschlags - Abfluss - Modell verwendete Bodentypen

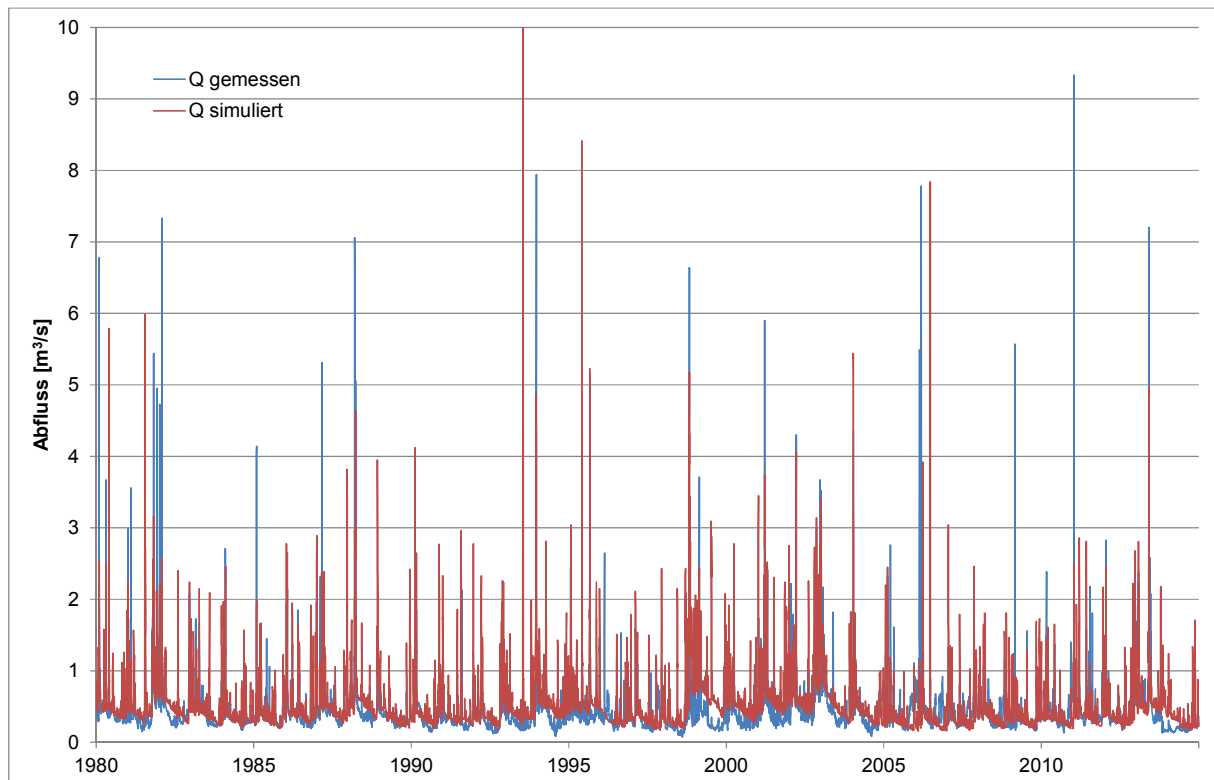


Abbildung 38: Vergleich zwischen den mit TETIS für das Kalibrationsgebiet modellierten und den gemessenen Abflüsse für den Zeitraum vom 01.01.1980 - 31.12.2015 an der Messstelle Köfering Pfatter.

4.2.3 Pfatter

Vorgehen	Das hydraulische Modell zur Bestimmung der Pegel-Abfluss-Beziehung (P-Q-Beziehungen) der Pfatter wurde analog dem Vorgehen für die Donau in HEC-RAS erstellt. Dazu wurden die vorhandenen Querprofile aus der Vermessung ausgewertet und in HEC-RAS importiert. anschließend wurden die P-Q-Beziehungen entlang des Gerinnes in HEC-RAS modelliert.
Datengrundlage	Innerhalb des Modellgebiets befinden sich 7 Lattenpegel. Für diese liegen über einen begrenzten Zeitraum (zwischen 21.07.2000 - 19.09.2005) Wasserstandmessungen vor. Die Querprofilaten stammen aus der Vermessung 2009.
Abflüsse	Da keine für den Modellabschnitt repräsentativen Abflussmessungen vorliegen, wurde der Abfluss aus der Summe des gemessenen Abflusses in Köfering, den in der hydrologischen Wasserbilanz des restlichen Einzugsgebiets bestimmten Oberflächenabflüssen und der Hälfte der in diesem Einzugsgebiet errechneten Grundwasserneubildung bestimmt. Die weiteren Zuflüsse zwischen Taimering und der Pfattermündung wurden vernachlässigt.



Abbildung 39: Lage der sieben Lattenpegel innerhalb des Modellgebiets entlang der Pfatter.

Rauhigkeitsbeiwert	Für den Rauhigkeitsbeiwert nach Strickler wurde ein Wert von $33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gewählt. Dies entspricht dem Erfahrungswert für Gewässer mit einer ähnlichen Flussmorphologie (Morris 1998, [10]).
Validierung	Das Modell wurde anhand der gemessenen Wasserstände der vorhandenen Lattenpegel innerhalb des Modellgebiets überprüft. Abbil-

Abbildung 40 bis Abbildung 43 zeigen einen Vergleich der Messdaten mit den modellierten Pegeln für ausgewählte Lattenpegel. Die modellierten Werte stimmen grundsätzlich gut mit den Messdaten überein.

Abweichungen

Beim Vergleich ist zu beachten, dass die Abflüsse nur im wöchentlichen Rhythmus gemessen wurden. Deshalb ist zu erwarten, dass die Hochwasserspitzen teilweise nicht gemessen wurden. Im Modell dürfen deshalb die Hochwasserspitzen höher sein als bei der Messung.

Zwischen Taimering und der Mündung der Pfatter in die Alte Donau gibt es weitere Zuflüsse, welche im Modell vernachlässigt wurden. Dies könnte erklären, weshalb die modellierten Pegel bei den Messstellen „Ende Ausbau“ und „Seppenhausen“ eher etwas zu tief sind. Die Genauigkeit ist jedoch für den Verwendungszweck in einer Cauchy-Randbedingung ausreichend.

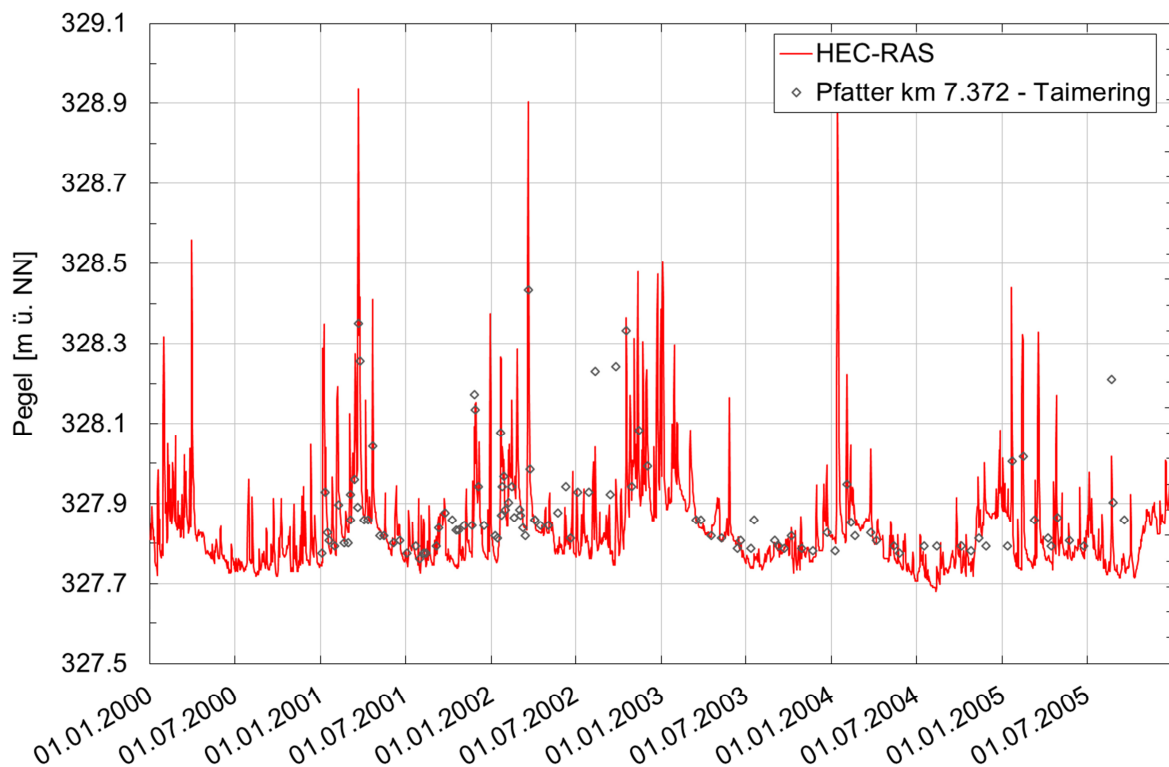


Abbildung 40: Vergleich der modellierten (HEC-RAS) mit den gemessenen Pfatterpegeln für den Zeitraum vom 01.01.2000 - 31.12.2005 an der Messstelle Taimering (Pegel 6), km 7.372.

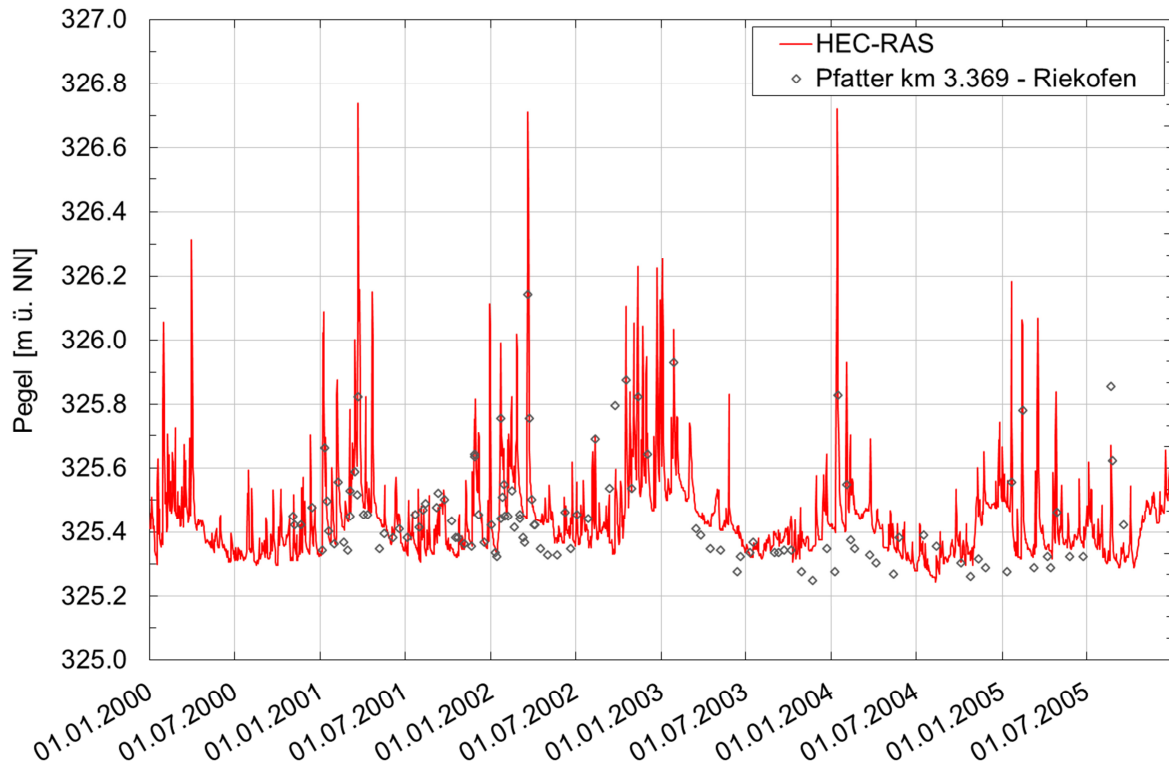


Abbildung 41: Vergleich der modellierten (HEC-RAS) mit den gemessenen Pfatterpegeln für den Zeitraum vom 01.01.2000 - 31.12.2005 an der Messstelle Riekofen (Pegel 5), km 3.369.

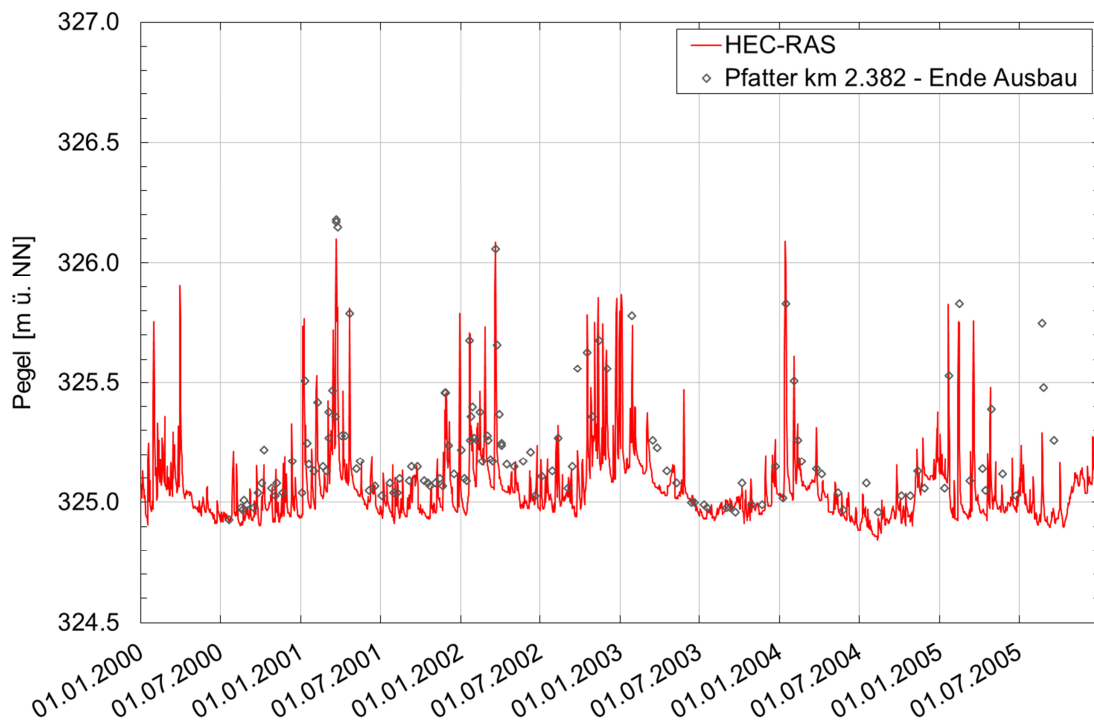


Abbildung 42: Vergleich der modellierten (HEC-RAS) mit den gemessenen Pfatterpegeln für den Zeitraum vom 01.01.2000 - 31.12.2005 an der Messstelle Ende Ausbau (Pegel 3), km 2.382.

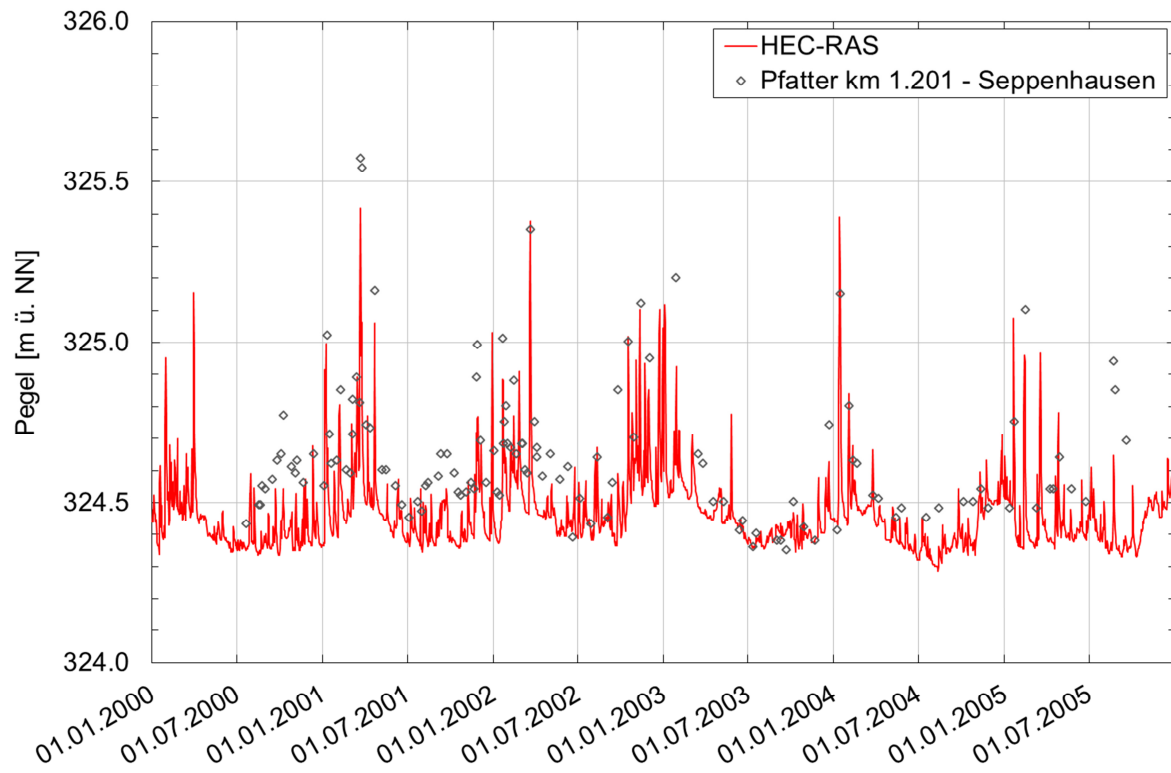


Abbildung 43: Vergleich der modellierten (HEC-RAS) mit den gemessenen Pfatterpegeln für den Zeitraum vom 01.01.2000 - 31.12.2005 an der Messstelle Seppenhäusen, km 1.201.

4.2.4 Wiesent

Situation

Die Wiesent besteht innerhalb des Modellgebietes aus einem Hauptgerinne und einer Flutmulde (siehe Abbildung 44 und Abbildung 45). Während Nieder- und Mittelwasser wird das Wasser über das Hauptgerinne durch das besiedelte Gebiet abgeführt. Die Flutmulde wird benötigt, um bei einem Donau-Hochwasser den Rückstau aus der Donau aus dem Siedlungsgebiet fern zu halten. Gesteuert wird das System über zwei Siele. Diese werden bei Hochwasser geschlossen, so dass die Wiesent und der Zufluss aus dem Moosgraben, sowie der Rückstau aus der Donau, über die Flutmulde abgeführt werden. Das Restwasser im Hauptgerinne wird über ein Gerinne dem Schöpfwerk SW Wörthhof zugeführt.

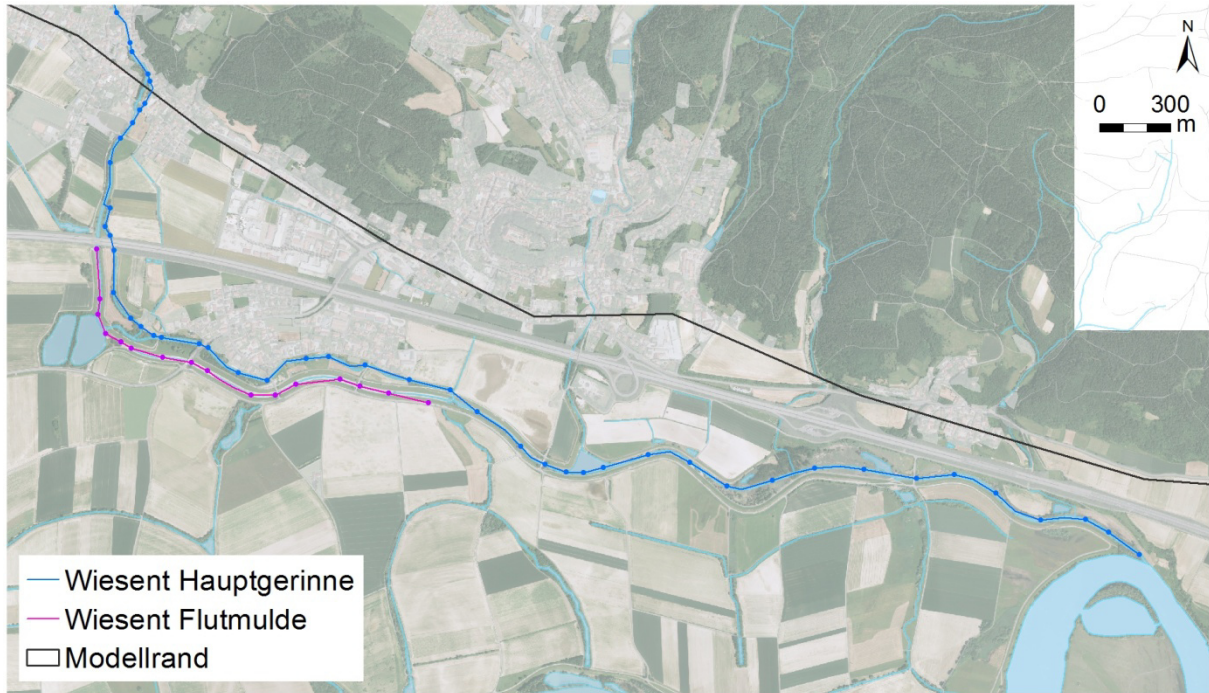


Abbildung 44: Verlauf des Hauptgerinnes und der Flutmulde der Wiesent.

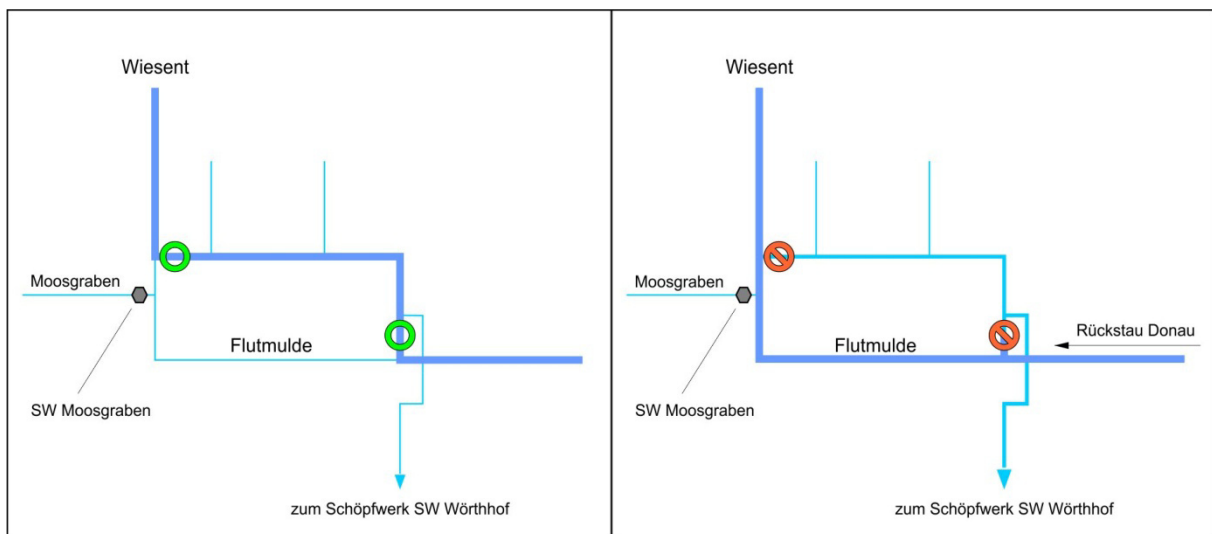


Abbildung 45: Abflussverlauf der Wiesent bei Nieder- und Mittelwasser (links) und bei Hochwasser in der Donau (rechts).

Vorgehen Zur Bestimmung der P-Q-Beziehungen entlang der Wiesent wurde, basierend auf den Querprofildaten aus der Vermessung, ein HEC-RAS Modell des Hauptgerinnes aufgebaut. Die Pegel der Flutmulde bei Hochwasserstand in der Donau wurden über ein Rückstaumodell berechnet. Bei Nieder- und Mittelwasser wird eine vereinfachte P-Q-Beziehung verwendet.

Datengrundlage Abfluss- oder Pegelmessungen liegen an der Wiesent nicht vor. Die benötigten Abflussdaten wurden deshalb mittels N-A-Modell modelliert. Die Querprofildaten stammen aus der Vermessung 2009.

Modellannahmen

Während Nieder- und Mittelwasser wird der gesamte Abfluss in der Wiesent über das Hautgerinne abgeführt. Die Pegelhöhen werden über die P-Q-Beziehung aus dem HEC-RAS Modell berechnet. In der Flutmulde wird der Abfluss des Moosgrabens abgeleitet. Bei Hochwasser in der Donau (Annahme $Q > 2'000 \text{ m}^3/\text{s}$) wird im Hauptgerinne der Wiesent im Abschnitt zwischen den beiden Sielen ein Restwasserabfluss von 10% des Wiesent-Abflusses vorgegeben. Die Pegelhöhen in der Flutmulde berechnen sich aus dem Rückstau der Donau, dem Abfluss des Moosgrabens sowie 90% des Abflusses der Wiesent.

P-Q-Beziehung

Die Berechnung der P-Q-Beziehung erfolgte stationär für ausgewählte Abflüsse. Ein Beispiel einer in HEC-RAS berechneten P-Q-Beziehung im Hauptgerinne der Wiesent ist in Abbildung 46 dargestellt. Daten zur Validierung der berechneten P-Q-Beziehungen liegen bisher nicht vor.

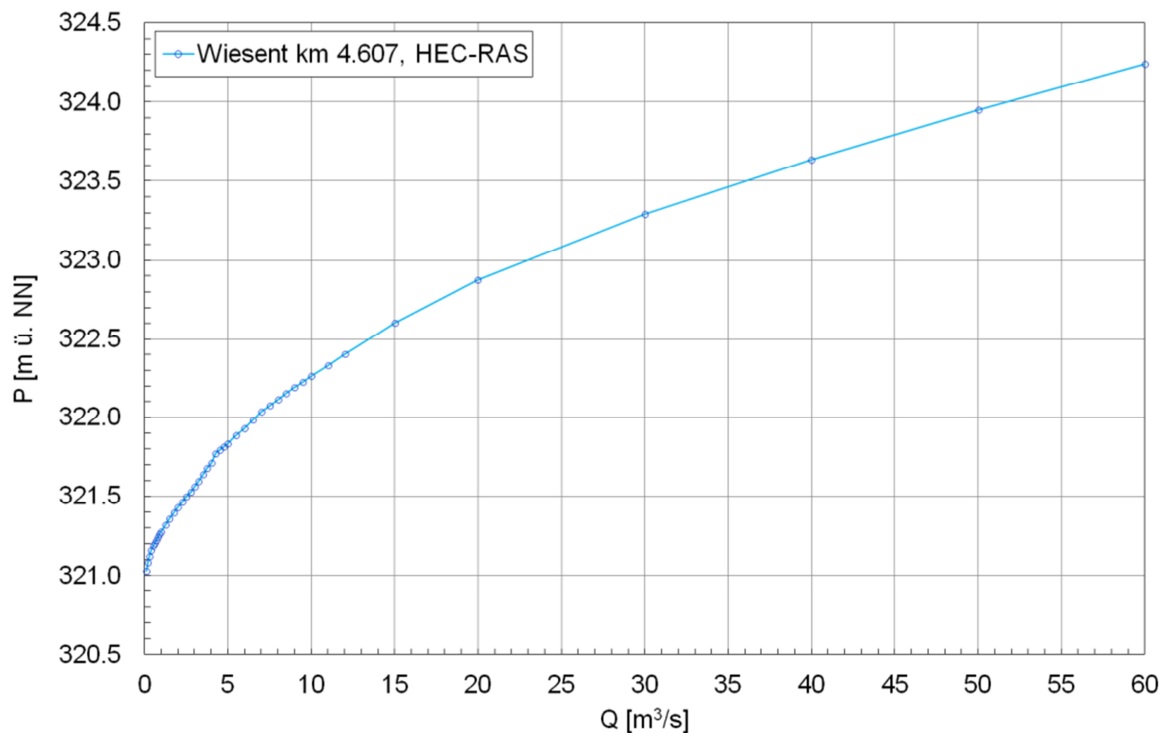


Abbildung 46:

Mit HEC-RAS modellierte P-Q-Beziehung des Hauptgerinnes der Wiesent bei km 4.607 auf Höhe des Siedlungsgebiets.

4.2.5 Große Laber

Vorgehen

Der Wasserspiegel der Großen Laber wurde auf der ganzen Strecke als zeitabhängiger Wert vorgegeben. Als Grundlage wurden die Pegel der Messstelle Schönach verwendet, welche sich im Abstrom der Großen Laber außerhalb des Modellgebiets befindet (Abbildung 47). Die Pegel an den Stützpunkten innerhalb des Modellgebiets wurden aus dem Pegel Schönach unter Annahme eines zeitlich konstanten Wasserspiegelgefälles berechnet. Das Wasserspiegelgefälle wurde aus dem digitalen Geländemodell übernommen.

Datengrundlage

Für die Messstelle Schönach liegen langjährige Pegel- und Abflussmessreihen vom 01.11.1969 bis 01.01.2016 (Pegelwerte) bzw. vom 01.11.1953 bis 01.01.2016 (Abflusswerte) vor. In Abbildung 48 ist der im Modell verwendete Pegelverlauf der Messstelle Schönach vom 01.01.1980 bis zum 31.12.2015 dargestellt.

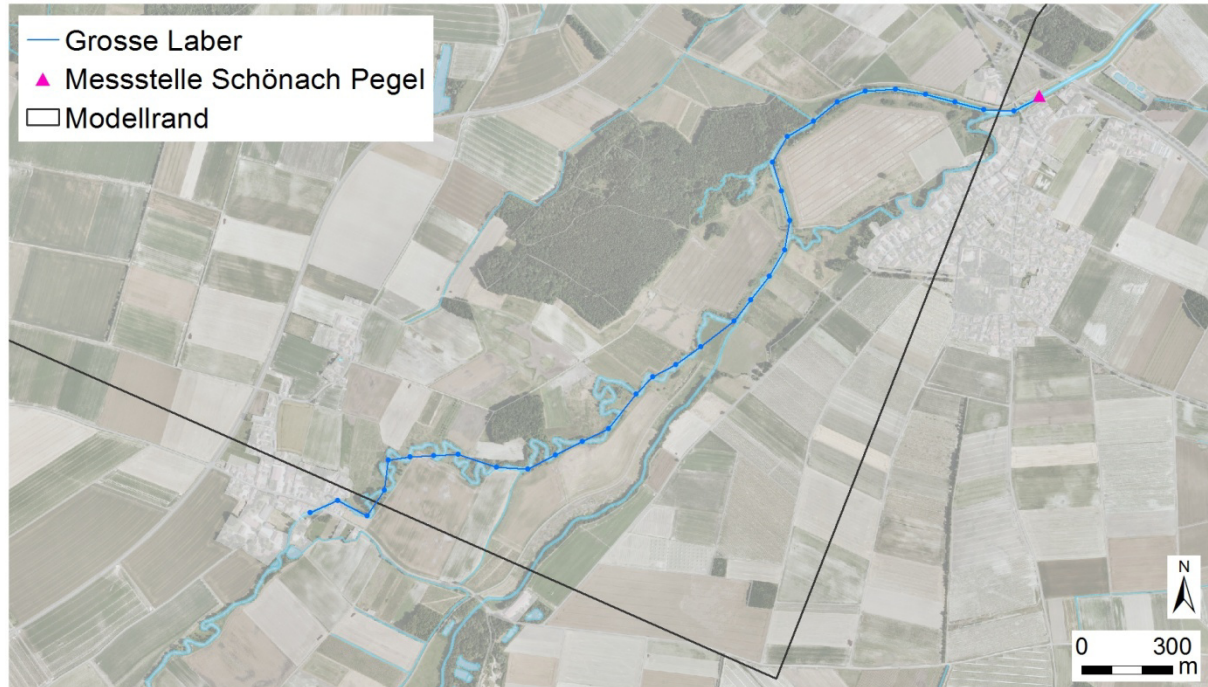


Abbildung 47: Verlauf der Großen Laber innerhalb des Modellgebiets und Lage der Messstelle Schönach Pegel.

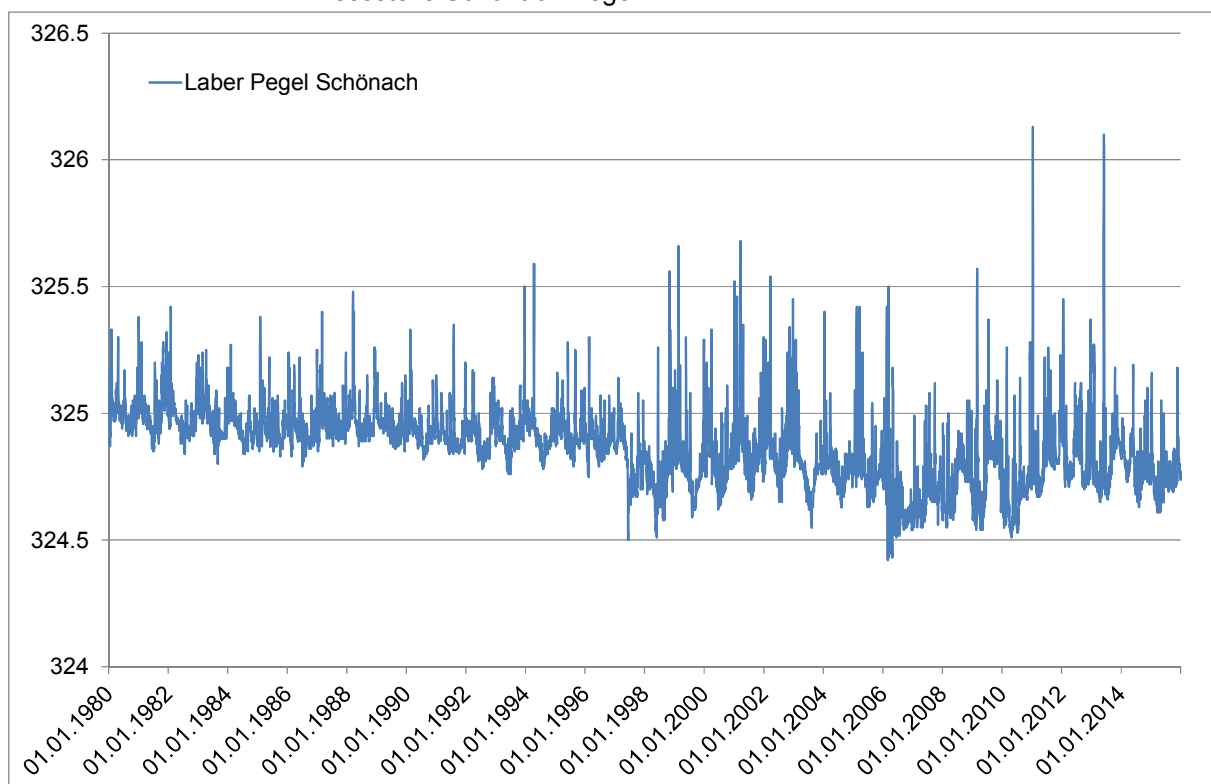


Abbildung 48: Gemessene Pegel der Großen Laber in der Messstelle Schönach Pegel für den Zeitraum vom 01.01.1980 - 31.12.2015.

4.2.6 Donau Nebengewässer und Donaualtarme

Vorgehen Donau-Altarme und Donau-Nebengewässer werden im Modell mit zeitabhängigen Pegelwerten berücksichtigt. Entlang der Donau-Altarme wird dabei allen Gewässerpunkten der dem Mündungspegel entsprechende Donauepegel zugeordnet. Für Donau Nebengewässer (von einem Teil der Donau durchflossen) wird an allen Gewässerpunkten jeweils der entsprechende Donauepegel im Modell übernommen.

4.3 Drainagen

4.3.1 Höhenlage

Vorgehen Für Gewässer, welche im Grundwassermodell mit einem stationären Pegelstand modelliert werden, werden die Höhenlage des Pegels und der Sohle benötigt. Die Wasserspiegelhöhe wurde mit Hilfe des Digitalen Geländemodells (DGM) bestimmt. Dazu wurde die Lage der Gewässerpunkte anhand des DGM im GIS auf die Flussachse gesetzt und anschließend der tiefste Wert aus einem 3 x 3-Raster des DGM übernommen (Abbildung 49). Die resultierenden Drainagepunkte sind in der Übersicht (Abbildung 29) dargestellt.

Datengrundlage Als Datengrundlage wurde das DGM 1 des Landesamts für Vermessung und Geoinformation Bayern (Laserscan 2006, Gitterweite 1 m) verwendet.

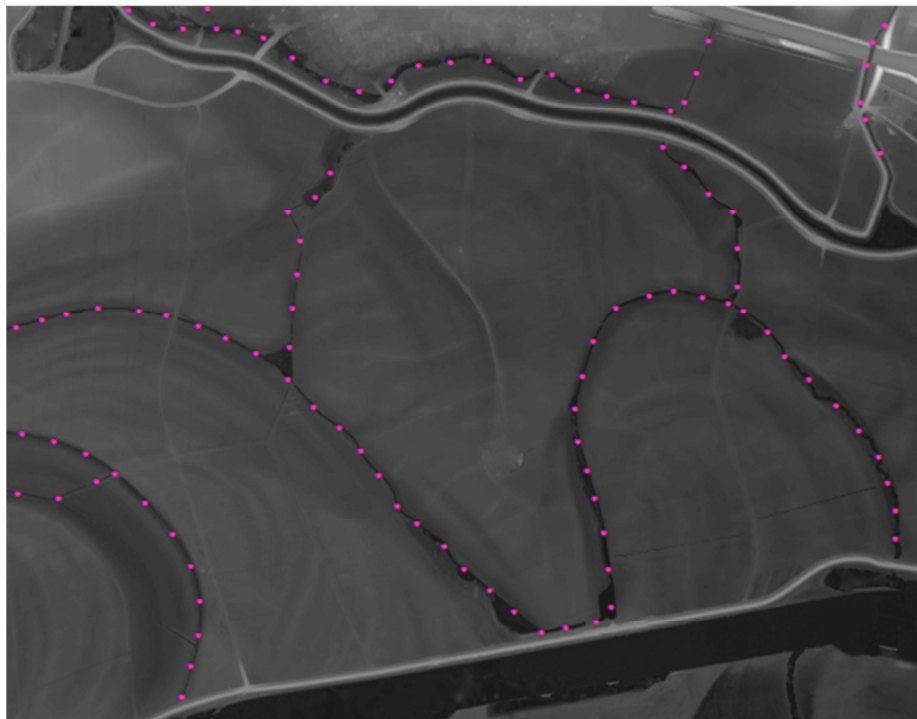


Abbildung 49: Ausschnitt aus dem DGM mit Gewässerpunkten entlang der Flussachsen.

Validierung Die aus dem DGM gewonnen Pegeldata wurden über das Höhengefälle entlang der Flussachse und wenn vorhanden, über Vermes-

sungsdaten sowie Daten der Lattenpegel überprüft. Fehlerquellen wie z.B. eingedolte Streckenabschnitte oder Brücken wurden bereits bei der Wahl der Gewässerpunkte berücksichtigt.

Ungenauigkeiten

Es wurde festgestellt, dass die Genauigkeit der Wasserspiegel im digitalen Höhenmodell stellenweise nicht den angegebenen 20 cm entspricht. Gründe dafür können sein:

- Befliegungsdaten bei unterschiedlichen Wasserständen,
- In das Gerinne hinein ragender Bewuchs,
- Sohlenbewuchs.

Offensichtliche, durch eine falsche Gefällsrichtung erkennbare Höhenfehler wurden korrigiert. Da die Drainagen im Modell mit vielen Punkten berücksichtigt werden, gleichen sich die Ungenauigkeiten über die Gewässerslänge aus.

planfestgestellte Höhen

Für die Fallstudien mit Polderprojekten können auch die planfestgestellten Höhenlagen der Drainagen verwendet werden. Für die Kalibrierung sind diese jedoch nicht relevant.

4.3.2 Abflussmengen

Messstellen

Da in Drainagegewässern der Abfluss in Zeiten ohne Niederschlag direkt dem drainierten Grundwasser entspricht, wurden an den wichtigsten Drainagegewässern Abflussmessungen durchgeführt. Die gewählten Messstellen sind in Abbildung 50 dargestellt.

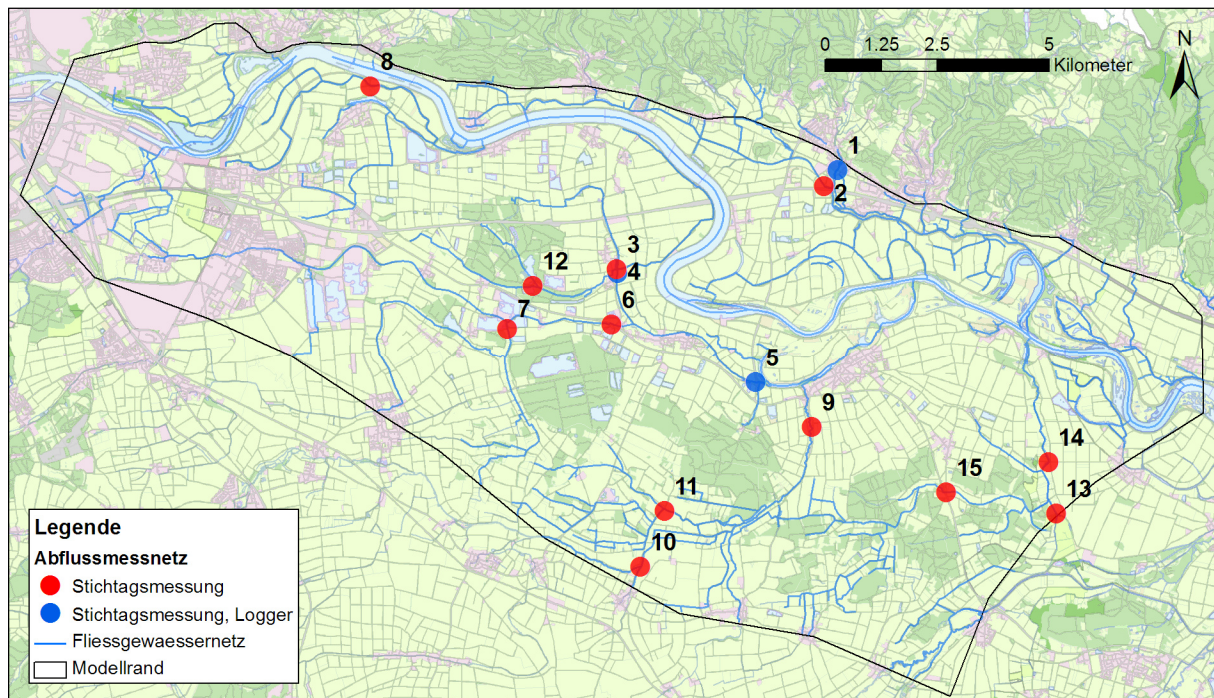


Abbildung 50: Messstellen, an welchen Stichtagsmessungen des Abflusses durchgeführt wurden.

Abflussmengen

Tabelle 1 zeigt die gemessenen Abflüsse. Am 17.08.2016 war der Abfluss bei den Messstellen 3 (Röhretgraben), 7 (Geislinger Mühlbach beim Roither See), 11 (Leutherhofer Graben), 12 (Moosgraben Gröhrwiesen) und 14 (Kirchenbach beim Modellrand) zu klein für eine Abflussmessung.

Drainagemengen

Die Abflüsse des Mühlbachs, des Röhretgrabens, des Eltheimer Grabens, des Friesheimer Ableiters und des Johannesgrabens entsprechen direkt den im Modellgebiet drainierten Grundwassermengen.

Da der Kirchenbach am Modellrand noch kaum Wasser führt, kann die Exfiltration aus der Differenz zwischen dem Abfluss im Kirchenbach und dem Zufluss aus dem Johannesgraben ermittelt werden.

Die in die Pfatter exfiltrierende Grundwassermenge zwischen Taimering und Seppelmühle kann ebenfalls aus der Abflussdifferenz bestimmt werden.

Der Friesheimer Ableiter wird durch das Schöpfwerk Sarching in die Donau entwässert. Die Fördermengen lassen sich aus den Betriebsstunden errechnen. Die beiden Stichtagsmessungen ergeben die ungefähre Aufteilung der Abflussmenge in West- und Ostarm.

	Datum	Abfluss [m ³ /s]	Datum	Abfluss [m ³ /s]
Wiesent	24.05.2016	0.635	16.08.2016	0.571
Pfatter Taimering	25.05.2016	0.431	27.05.2016	0.312
Pfatter Seppelmühle	24.05.2016	0.664	27.05.2016	0.412
Mühlbach Irlbruck	25.05.2016	0.035	17.08.2016	0.023
Mühlbach Mündung	24.05.2016	0.155	27.05.2016	0.130
Röhretgraben	25.05.2016	0.066	17.08.2016	-
Eltheimer Graben	25.05.2016	0.070	17.08.2016	0.032
Friesheimer Ableiter	24.05.2016	0.073	16.08.2016	0.303
Moosgraben Wiesent	24.05.2016	0.084	16.08.2016	0.029
Johannesgraben	16.08.2016	0.029	17.08.2016	0.033
Kirchenbach	16.08.2016	0.156	17.08.2016	0.224

Tabelle 1: Gemessene Abflüsse der wichtigsten Nebengewässer im Modellgebiet

Die Messung im Friesheimer Ableiter vom 24.05.2016 wurde beim östlichen Zufluss zum Pumpwerk Saching, jene am 16.08.2016 am westlichen Zufluss vorgenommen.

5 Grundwasserneubildung aus Niederschlag

5.1 Neubildung im Innern des Modellgebietes

5.1.1 Berechnungsverfahren

Hydrologische Bilanz Für ein ausgewähltes Bilanzgebiet gilt folgende hydrologische Bilanzgleichung:

$$N - ET - G - A = \Delta S$$

Mit N: Niederschlag
 ET: Evapotranspiration
 G: Grundwasserneubildung
 A: Oberflächenabfluss
 ΔS : Speicherveränderung

Das Bilanzgebiet umfasst die Oberfläche und die ungesättigte Zone des Untergrundes. Grundwasserneubildung bedeutet hier deshalb den Übergang von Wasser von der ungesättigten in die gesättigte Grundwasserzone. Die Speicherveränderung bezieht sich auf die Speicher der Oberfläche und der ungesättigten Bodenzone. Der Niederschlag ist eine messbare Größe. Alle übrigen Glieder der Gleichung müssen modelliert werden und sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Verfahren Die Grundwasserneubildung wurde aus der hydrologischen Wasserbilanz berechnet. Zur Berechnung der Evapotranspiration wurde die Methode nach Penman-Monteith (FAO 56, [13]) verwendet. Für den Oberflächenabfluss auf unversiegeltem Gebiet wird die SCS curve number method eingesetzt [14]. Zur Berücksichtigung des Oberflächenabflusses auf versiegelten Flächen wird die Grundwasserneubildung nur für den unversiegelten Flächenanteil berechnet und anschließend durch die Gesamtfläche dividiert.

Speichermodell Zur Berechnung der Speicherveränderung wurde ein Speichermodell implementiert, welches den Bodenspeicher und den Schneespeicher berücksichtigt. Die Grundwasserneubildung steigt dabei mit der Auffüllung des Bodenspeichers nach der folgenden Regel [19]:

$$\frac{Sick}{Inf} = \left(\frac{BWG}{nFKWe} \right)^{BETA}$$

Sick Sickerung (Grundwasserneubildung)
 Inf Infiltrierendes Wasser
 BWG aktueller Bodenwassergehalt
 nFKWe pflanzenverfügbarer Bodenspeicher
 BETA Exponent, welcher die Form der Funktion beschreibt

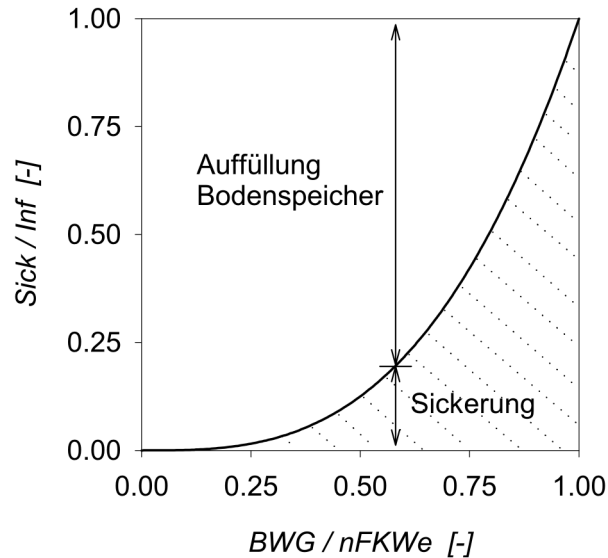


Abbildung 51: Grundwasserneubildung in Funktion der Auffüllung des Bodenspeichers (aus Armbruster, 2002 [19])

Bodenspeicher	Zur Berechnung der Grundwasserneubildung wird eine Schätzung des pflanzenverfügbaren Bodenspeichers benötigt. Bei Berechnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der TU München wurden Werte von 75 mm für Sandböden bis 180 mm für Lehmböden verwendet [17]. Für die Berechnung der Grundwasserneubildung des Grundwassermodells „Flutpolder Eltheim und Wörthhof“ wurde ein Bodenspeicher von 120 mm vorgegeben.
Bewässerung	Gemäß Angaben der Gruppe Landwirtschaft und Forsten wird im Projektbereich die Bewässerungsmenge auf 25 - 75 mm pro Jahr geschätzt [18]. Da die Bewässerung von der jeweiligen klimatischen Situation abhängig ist, wurde sie in das Berechnungsverfahren für die Grundwasserneubildung integriert. Es wurde angenommen, dass dann bewässert wird, wenn der verfügbare Bodenspeicher zu 95% aufgebraucht ist. Aus der Berechnung ergeben sich je nach Anbauprodukt und Ort mittlere Bewässerungsmengen von 46 bis 94 mm. Wird die Bewässerung bereits dann angesetzt, wenn der Bodenspeicher erst zu 70% aufgebraucht ist, so ergeben sich deutlich höhere Bewässerungsmengen.

5.1.2 Zonierung

Zonierung	Die Grundwasserneubildung hängt einerseits von den klimatischen Bedingungen, andererseits von der Vegetation und von der Bodenbeschaffenheit ab. Zur Differenzierung der örtlichen Unterschiede in der Grundwasserneubildung wurde daher eine Zonierung vorgenommen.
Vegetationszonen	Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Vegetation wurden fünf Zonen ausgeschieden (Abbildung 52). Für die Festlegung von Be-

wässerungsgebieten wurde die Lage konzessionierte Bewässerungsbrunnen herangezogen (Abbildung 53).

- Wald
- Siedlung
- Landwirtschaft
- Landwirtschaft mit Bewässerung
- Gewässer

Niederschlagszonen Zur Unterscheidung der klimatischen Bedingungen wurden die Niederschläge jeweils nach dem Ansatz der inversen Distanz auf die Neubildungszonen interpoliert.

Anbauprodukte Innerhalb der Zonen wurde wiederum eine grobe Aufteilung nach einzelnen Anbauprodukten vorgenommen. Die Anbauprodukte beeinflussen Höhe und zeitlichen Verlauf der Evapotranspiration. Die prozentualen Anteile wurden einer Zusammenstellung der Abteilung Landwirtschaft und Forsten der Regierung der Oberpfalz entnommen (Abbildung 54).

Anteile	Wald	Siedlung	Landwirtschaft
Wiese, Feldränder [%]		40	10
Wald [%]	100	25	
Wintergetreide [%]			36
Mais [%]			19
Übrige (vor allem Hackfrüchte) [%]			35
Versiegelt [%]		35	

Tabelle 2: Anteile der Anbauprodukte an den Vegetationszonen.

Vergleich mit LfU Zur Überprüfung der resultierenden Grundwasserneubildungsraten (Abbildung 55) werden in Abbildung 56 die durch das Landesamt für Umwelt errechneten Neubildungsraten dargestellt. Das Modell des LfU ist räumlich etwas feiner aufgelöst. Die Neubildungsraten sind ähnlich in Größe und räumlicher Verteilung.

Unterschiede In landwirtschaftlich genutzten Bereichen unterscheiden sich die berechneten Werte für bewässerte und nicht bewässerte Gebiete. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Bewässerung die Evapotranspiration erhöht wird. Dieser Unterschied wurde in der Berechnung des LfU nicht gemacht. Im Modell des LfU ist die Versiegelung in besiedelten Gebieten nicht berücksichtigt. Die für das Grundwassermodell berechneten Werte sind dort deshalb etwas tiefer.

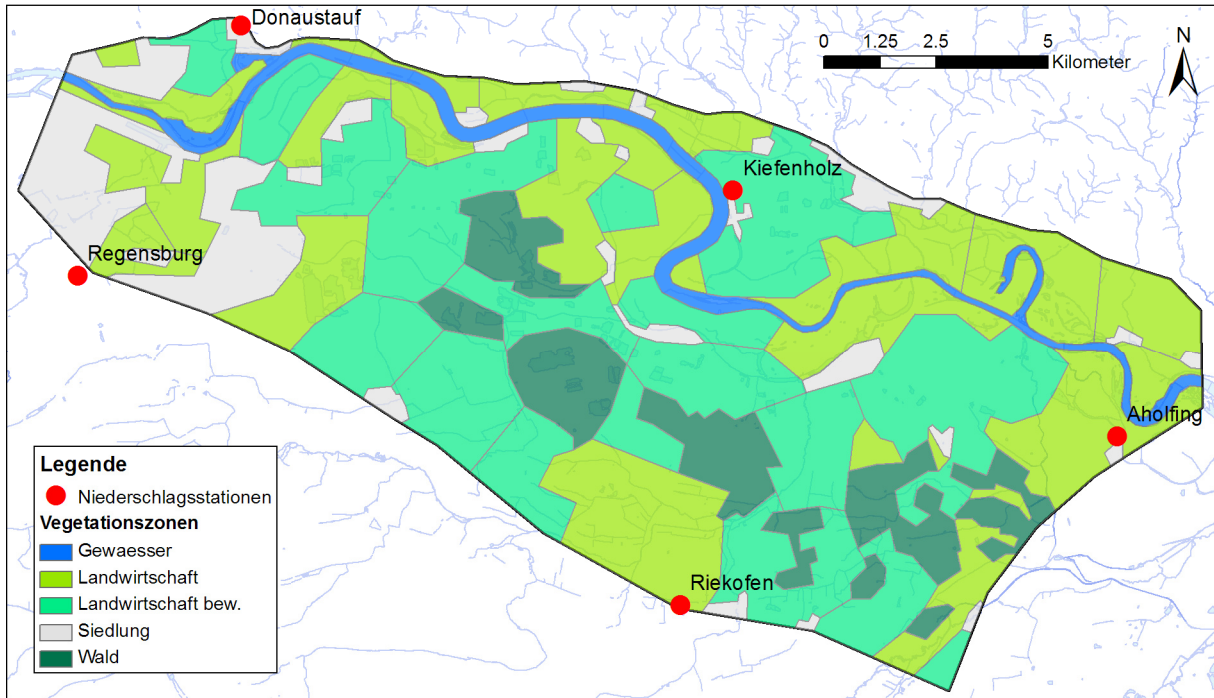


Abbildung 52: Verwendete Klimastationen und Vegetationsbereiche.

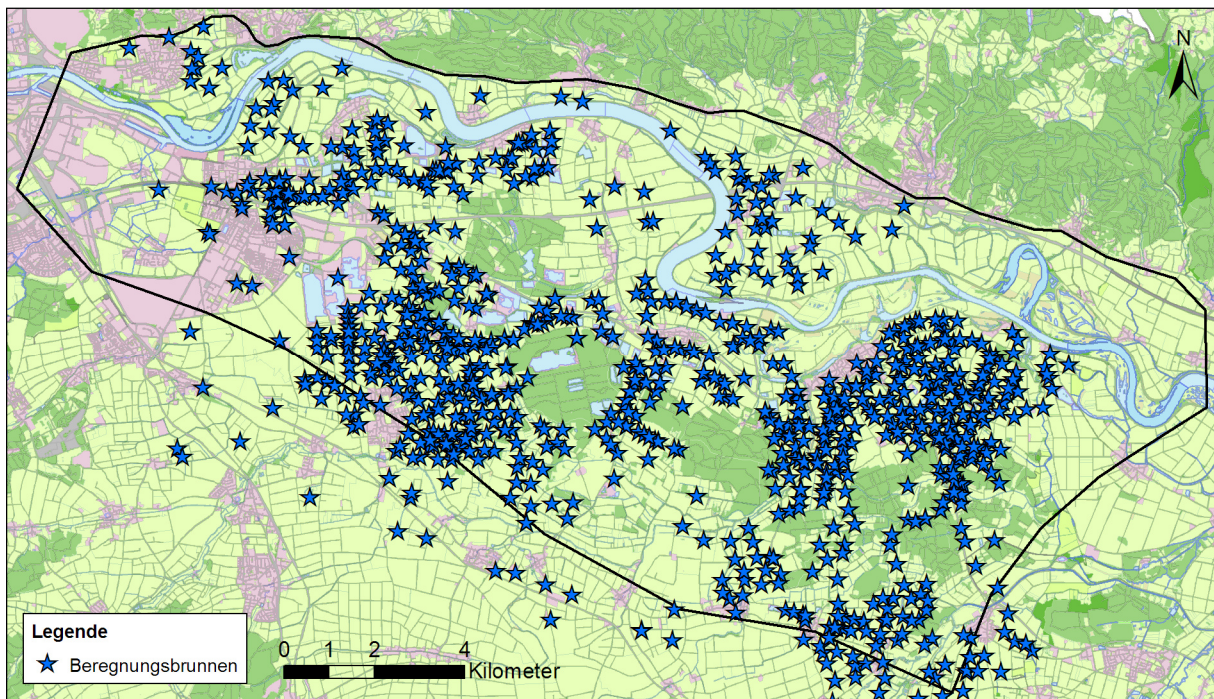


Abbildung 53: Lage der konzessionierten Beregnungsbrunnen.

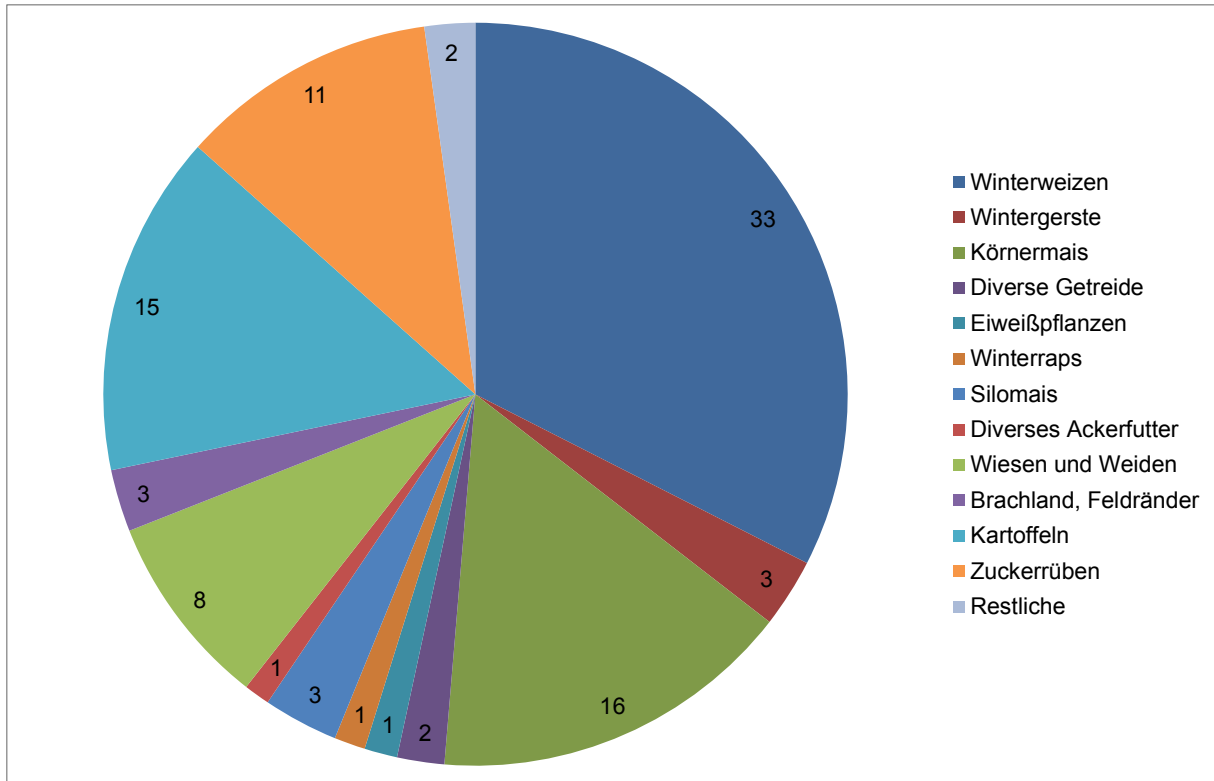


Abbildung 54: Flächennutzung im Bereich und Umfeld der geplanten Flutpolder.

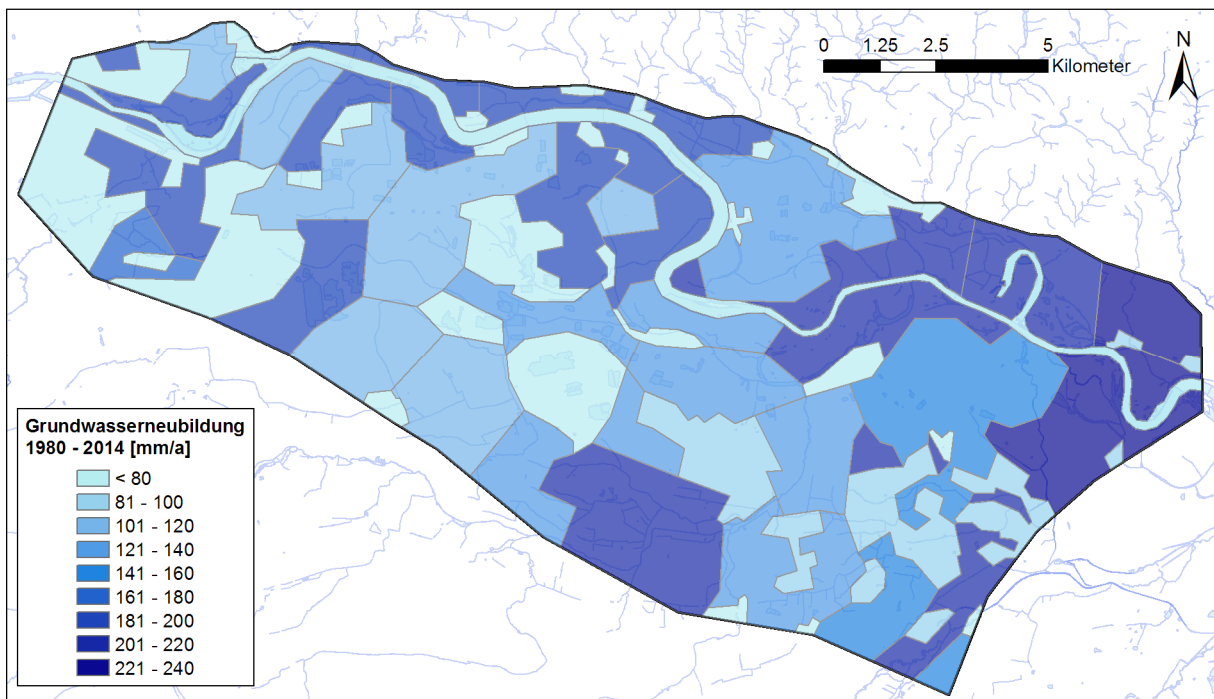


Abbildung 55: Resultierende Grundwasserneubildung (Mittel der Jahre 1980 bis 2014).

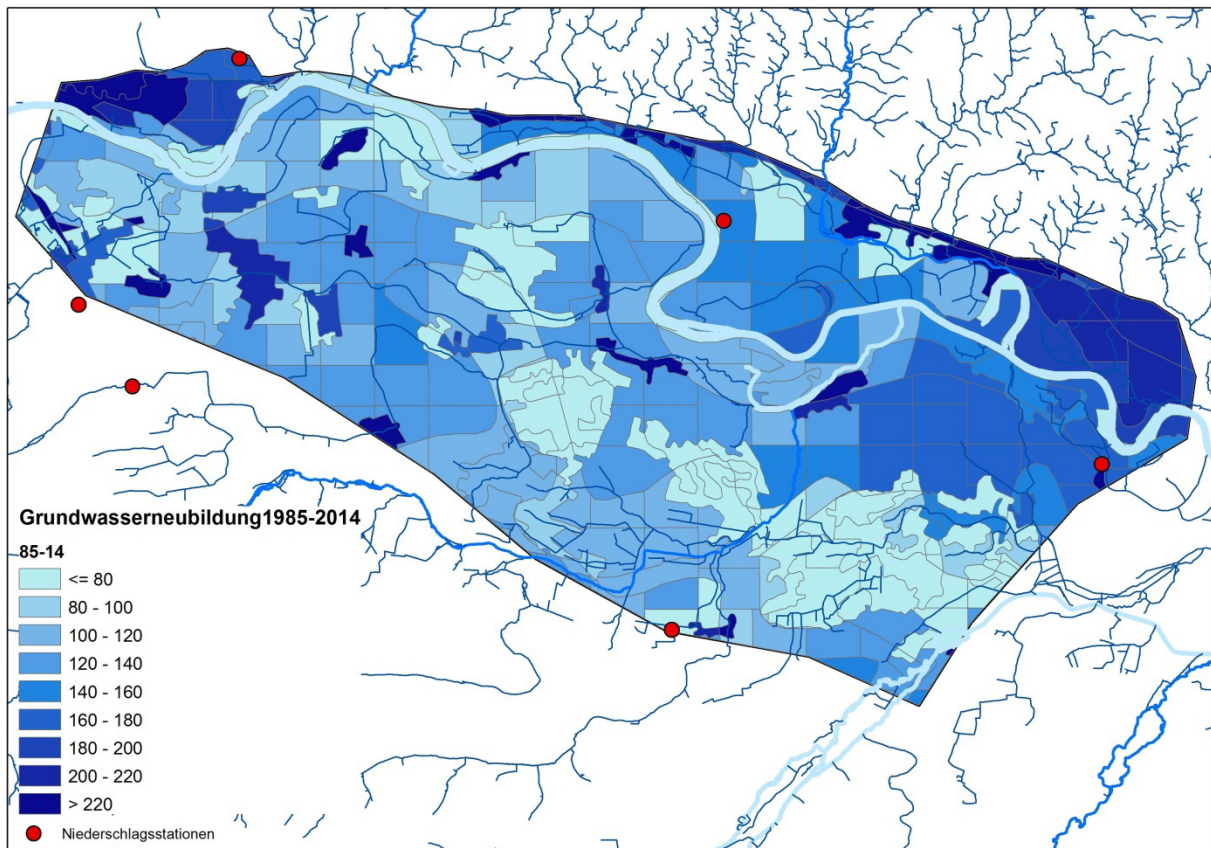


Abbildung 56: Ausschnitt aus der Hydrogeologischen Karte von Bayern 1:500'000. Blatt4: Mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971 – 2000)[1].

5.2 Neubildung in den seitlichen Einzugsgebieten

Vorgehen	Für die Bestimmung des Seitenzuflusses aus angrenzenden Bereichen wurde folgendes Vorgehen gewählt:
Nordrand	Am Nordrand des Modells wurden die Einzugsbereiche ausgeschieden, aus welchen versickertes Niederschlagswasser direkt in das Modellgebiet gelangen kann (Abbildung 58). Gebiete, aus welchen der infiltrierte Niederschlag zuerst in ein Oberflächengewässer und erst mit diesem in das Modellgebiet gelangt, wurden nicht berücksichtigt.
Südrand	Am Südrand des Modells ist die Situation komplexer, da die Terrassenschotter über das Modellgebiet hinausgehen. Die Gewässer, welche diesen Bereich durchqueren, können sowohl Wasser infiltrieren, wie auch Grundwasser drainieren. Die Einzugsgebiete wurden deshalb auf den Bereich der Flussschotter und -sande gemäß hydrogeologischer Karte im Maßstab 1:100'000 begrenzt (Abbildung 57). Sie umfassen jedoch auch die Einzugsbereiche von Gewässern. Es wurden folgende Annahmen getroffen: <ul style="list-style-type: none"> - Außerhalb der in Abbildung 58 eingezeichneten Einzugsbereiche wird sämtliches Wasser über die Gewässer abgeführt.

- Innerhalb der in Abbildung 58 eingezeichneten Einzugsbereiche wird die Grundwasserneubildung aus der hydrologischen Wasserbilanz berechnet. Ein Anteil davon fließt als Seitenzufluss unterirdisch in das Grundwassermodell, der Rest exfiltriert in Gewässer. Als Startwert für die Kalibrierung wird ein Anteil von 50% angesetzt.

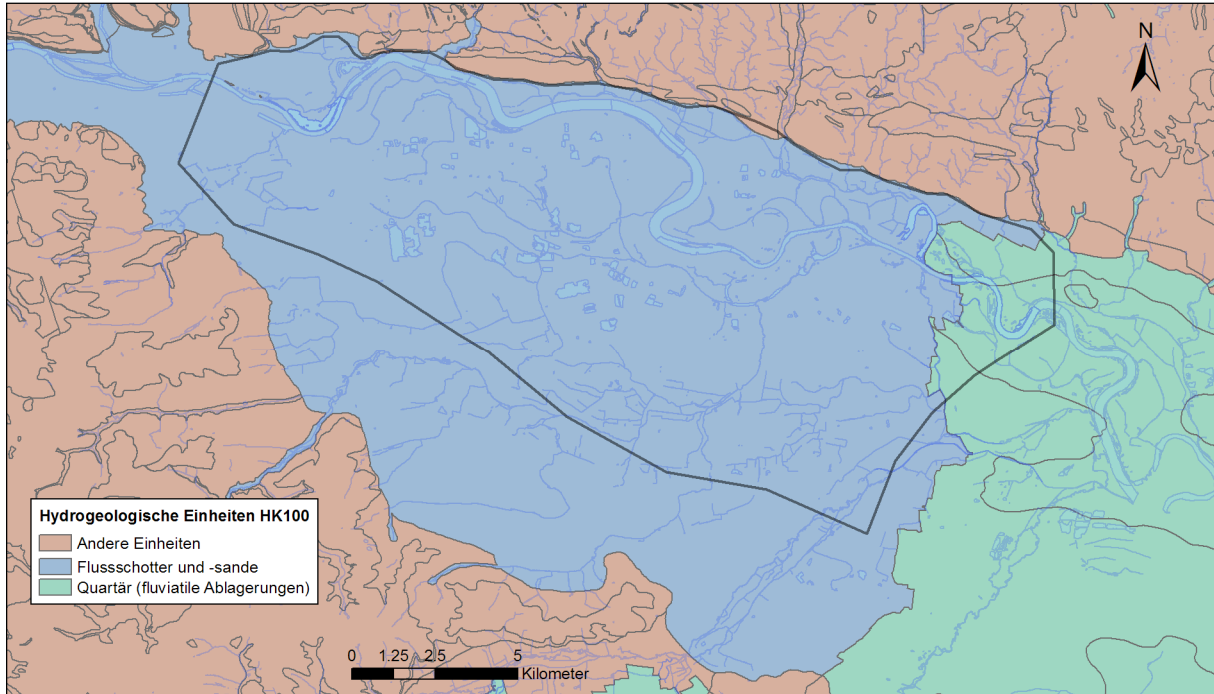


Abbildung 57: Ausdehnung Flussschotter gemäß hydrogeologischer Karte 1:100'000.

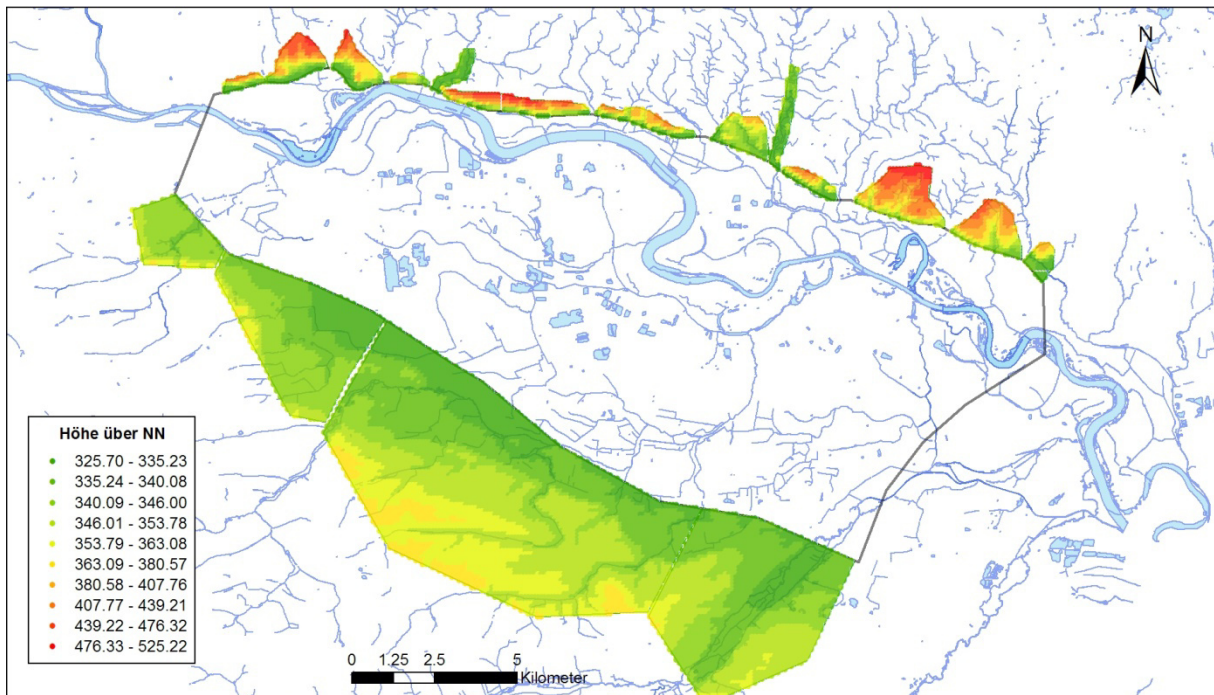


Abbildung 58: Einzugsbereiche, aus welchen unterirdische Zuflüsse zum Modellgebiet zu erwarten sind.

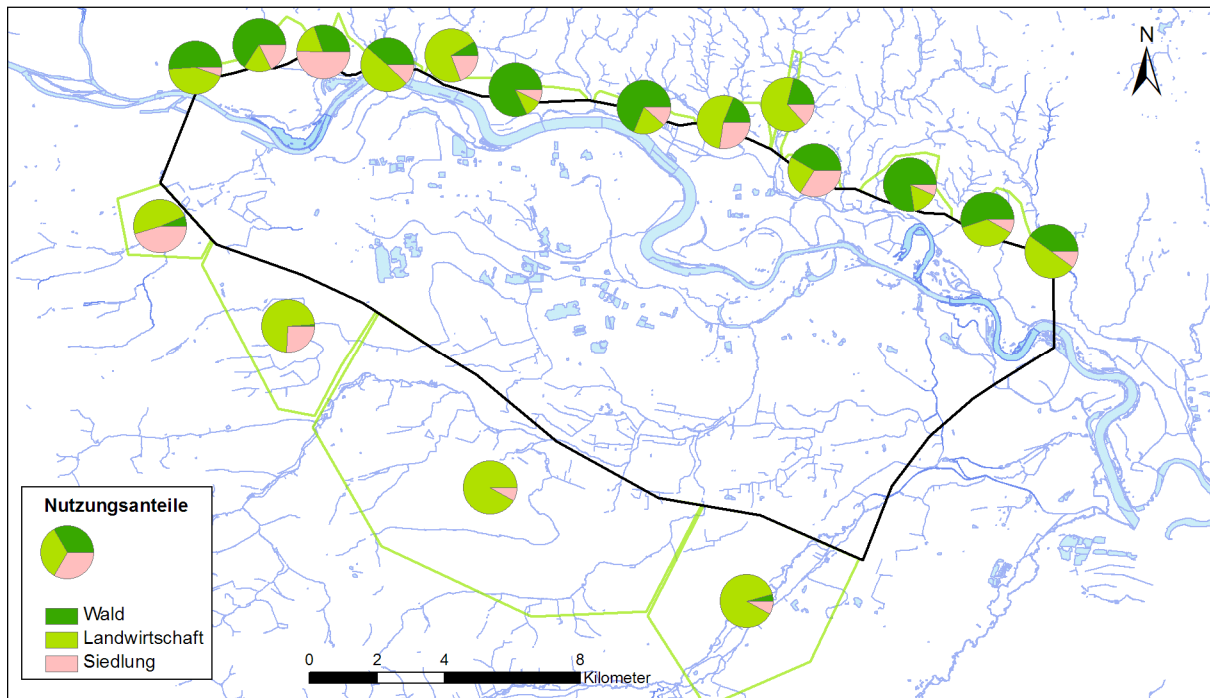


Abbildung 59: Flächenmäßige Aufteilung der Nutzung in den Einzugsbereichen.

Wasserbilanz

Die hydrologische Wasserbilanz in den Einzugsbereichen wurde aus den Klimadaten nach FAO 56 berechnet. Die Evapotranspiration ist dabei vegetationsabhängig. Zu deren Berücksichtigung wurde für jedes Einzugsgebiet aufgrund der Bodenbedeckungskarten eine Aufteilung in Landwirtschaftsfläche, Wald und Siedlungsgebiet vorgenommen (Abbildung 59). Für jeden Einzugsbereich wurden die Niederschlagsmengen der nächstgelegenen Messstation verwendet. Die Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur wurde überschlägig berücksichtigt. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass die Lufttemperatur pro 100 Metern Höhe um 0.6 Grad Celsius abnimmt.

Neubildung

Die resultierende Abflusskomponente wurde nach Döll & Fiedler [20] auf Direktabfluss und Grundwasserneubildung aufgeteilt. Dabei wird der Anteil der Grundwasserneubildung in Abhängigkeit der Bodenbeschaffenheit, der Hydrogeologie, des Frostbodens und der Hangneigung bestimmt. Maßgebend ist dabei die Hangneigung (Abbildung 61). Die Berechnung wurde in einem Gitternetz von 100 x 100 m durchgeführt und anschließend für das jeweilige Einzugsgebiet aufsummiert.

$$R_g = \min(R_{g \max}, f_g \cdot R_l) \text{ mit } f_g = f_r \cdot f_t \cdot f_h \cdot f_{pg}$$

$R_{g \max}$: Infiltrationskapazität

R_l : Totaler Abfluss

f_r : Reliefaktor

f_t : Faktor Bodentyp

f_h : Faktor Hydrogeologie

f_{pg} : Faktor Frostboden

Verfahren

Abbildung 60 zeigt eine Übersicht über das Verfahren nach Döll und Fiedler [20]. In Tabelle 3 ist der empirisch bestimmte Einflussfaktor der Hangneigung aufgelistet.

Klasse	Neigung [%]	Faktor fr
1	0-2	1
2	2-5	0.95
3	5-8	0.90
4	8-16	0.75
5	16-30	0.60
6	30-45	0.30
7	>45	0.15

Tabelle 3: Faktor für in Funktion der Hangneigung (nach Döll und Fiedler 2008).

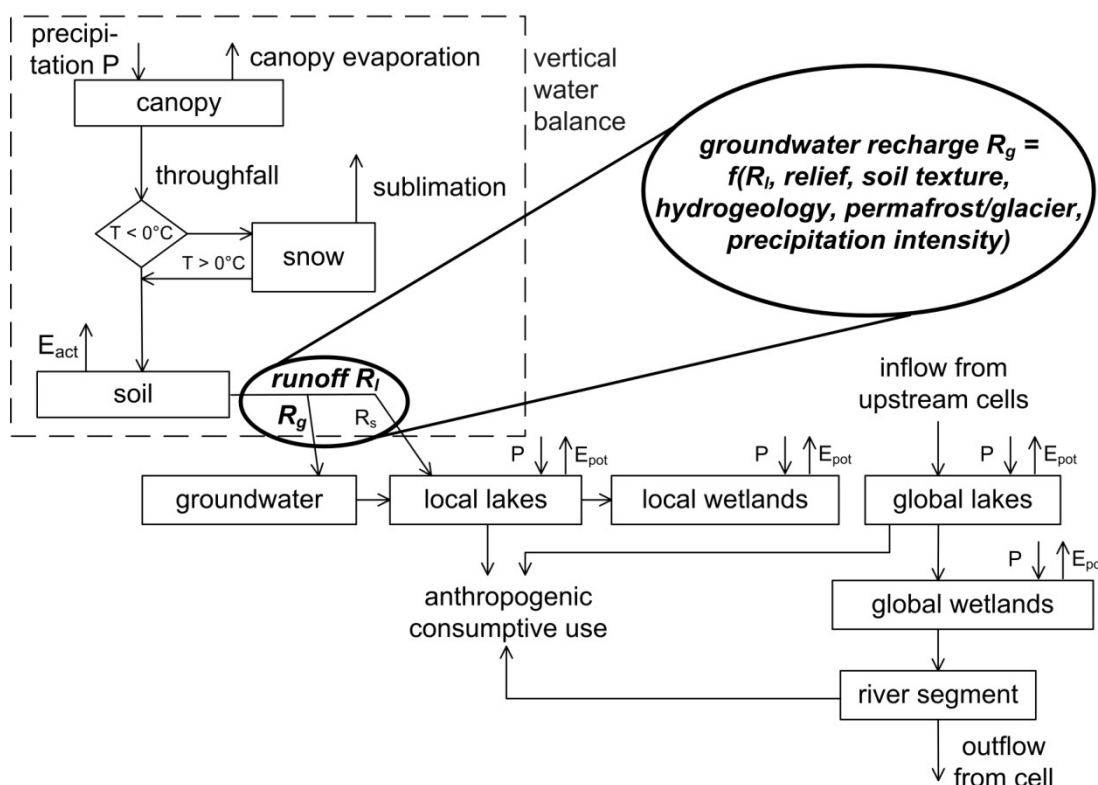


Abbildung 60: Aufteilung der Abflusskomponente auf Direktabfluss und Grundwasserneubildung nach Döll und Fiedler 2008.

Resultate

Die resultierende Grundwasserneubildung in den Einzugsbereichen ist in Abbildung 62 dargestellt. Für jede Einzugsgebietsfläche wird die resultierende Neubildungsrate aufsummiert und über die an das Modell angrenzende Seitenlänge aufgeteilt.

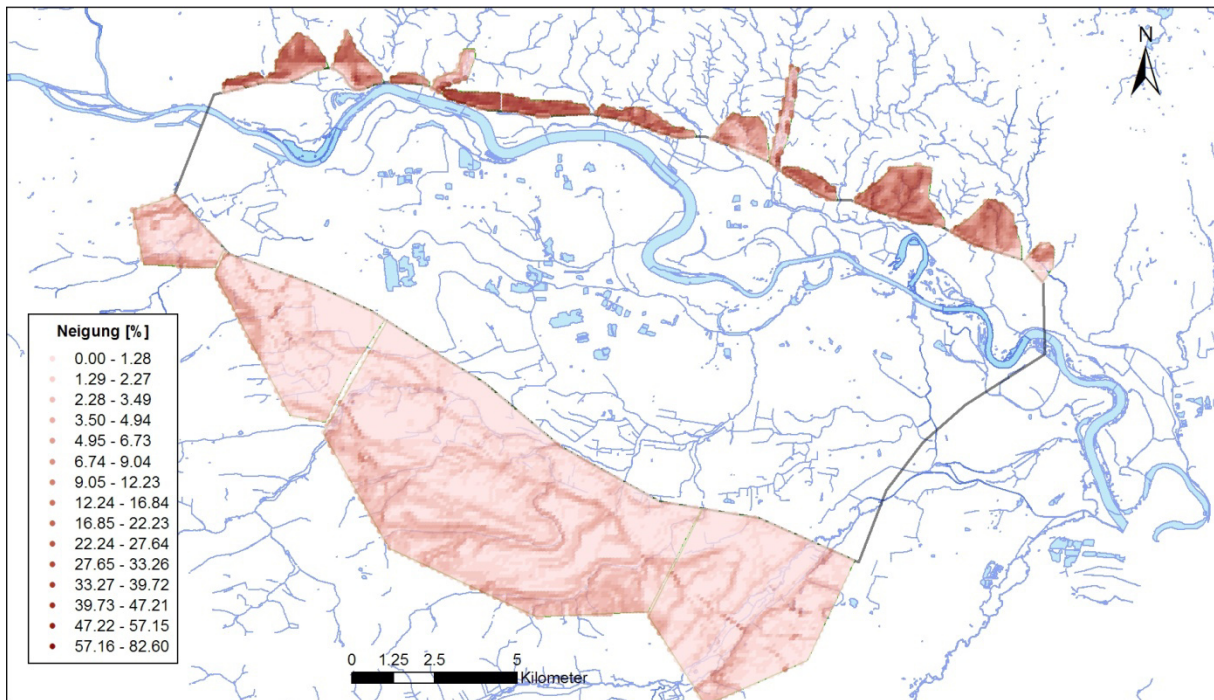


Abbildung 61: Hangneigung in den Einzugsbereichen.

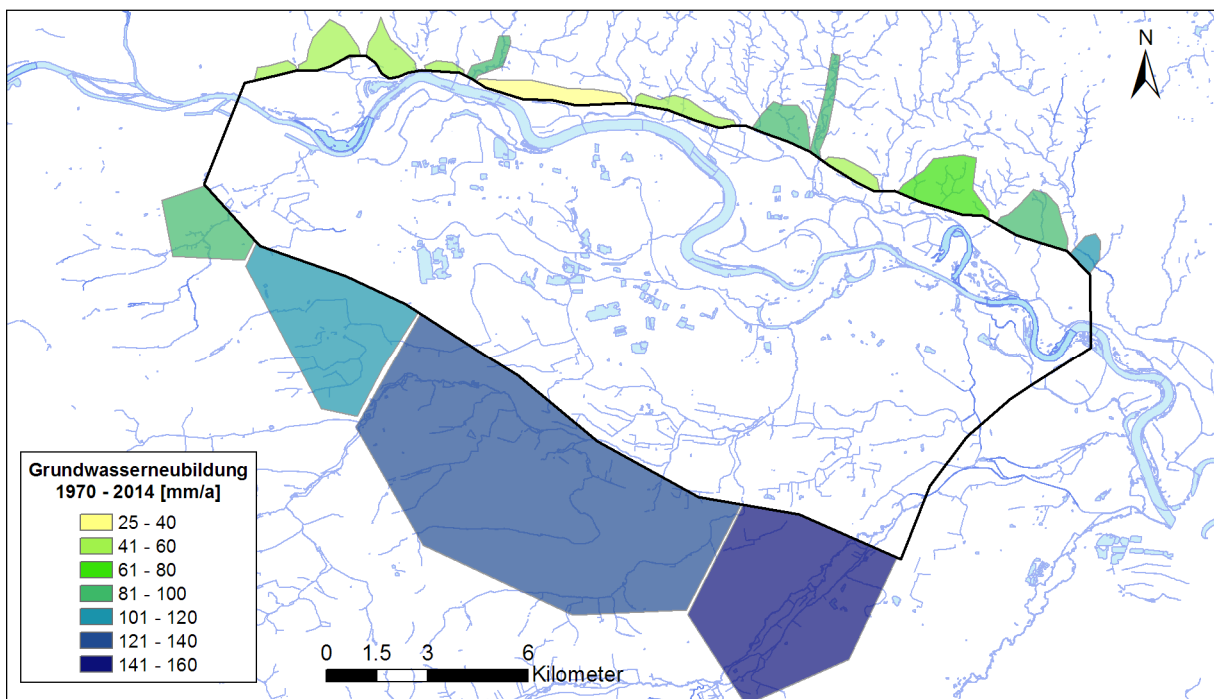


Abbildung 62: Resultierende Neubildung in den seitlichen Einzugsgebieten.

6 Fördermengen

Brunnenstandorte Im Modellgebiet befinden sich die Trinkwasserwerke Wiesent und Giffa. Abbildung 63 zeigt ihre Lage.

Entnahmemengen Die Entnahmemengen der einzelnen Brunnen sind seit 1991 bekannt. Der Brunnen Wiesent III ist erst seit dem Jahr 2011 in Betrieb. Für die Zeit vor dem Jahr 1991 wurde angenommen, dass die Brunnen mit der gleichen Entnahmemenge wie 1991 gefördert haben. Die jährlichen Entnahmemengen sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Abbildung 64 zeigt die monatlichen Entnahmemengen in Funktion der Zeit.

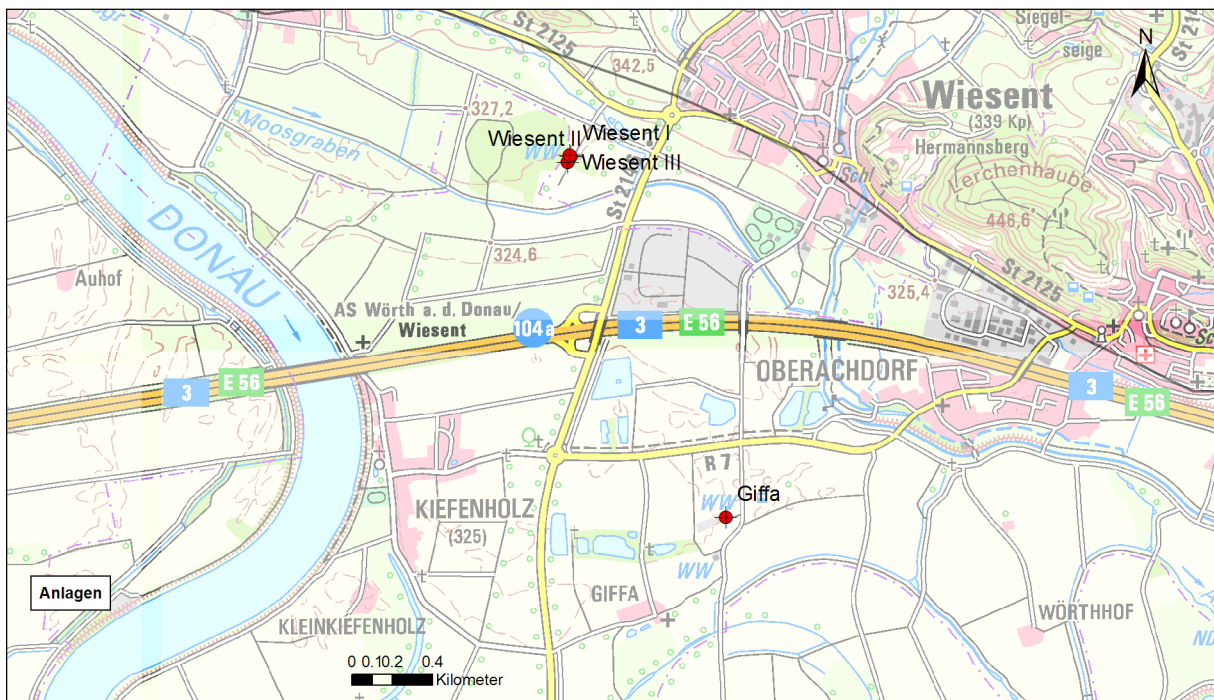


Abbildung 63: Lage der Brunnen Wiesent und Giffa.

Datum	Entnahme [m³/a]			
	Giffa	Wiesent I	Wiesent II	Wiesent III
1991	150'200	57'588	124'924	
1992	94'710	47'544	120'595	
1993	108'000	50'655	122'149	
1994	83'130	52'551	122'338	
1995	112'920	50'214	126'482	
1996	104'690	64'587	121'703	
1997	115'850	70'250	124'280	
1998	139'480	62'600	124'449	
1999	159'340	66'495	119'180	
2000	153'910	67'241	113'007	
2001	144'340	65'279	125'860	
2002	131'330	79'846	126'806	
2003	145'420	77'193	118'027	

2004	185'940	76'177	119'697	
2005	231'720	72'816	118'989	
2006	214'810	62'642	127'651	
2007	175'160	78'236	128'183	
2008	158'280	72'721	117'785	
2009	147'440	76'050	124'744	
2010	158'040	71'956	138'379	
2011	127'870	61'351	109'474	44'242
2012	156'310	69'113	71'138	69'573
2013	154'160	55'736	55'905	55'043
2014		50'857	51'827	50'785
2015		34'228	57'663	59'005

Tabelle 4

Jährliche Entnahmemengen in den Brunnen Wiesent und Giffa.

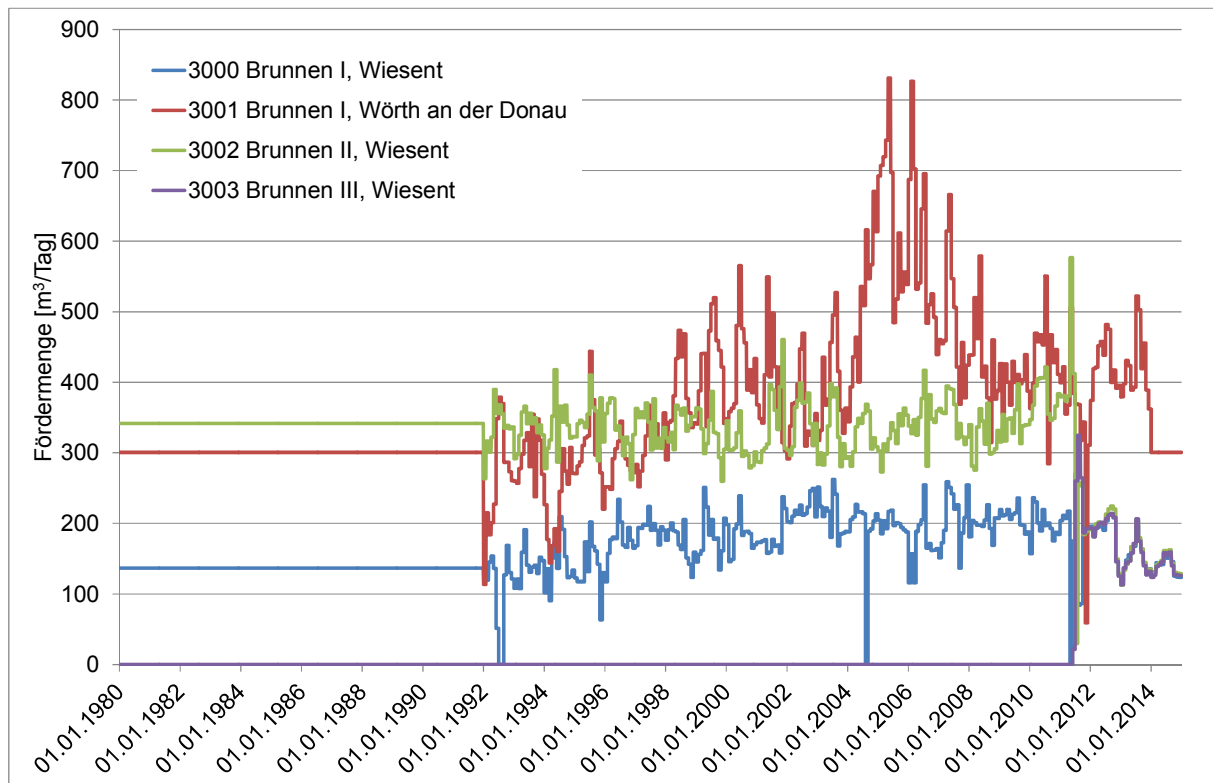


Abbildung 64:

Im Grundwassermodell vorgegebene Fördermengen.

7 Schöpfwerke

Schöpfwerke	Im Modellbereich befinden sich verschiedene Schöpfwerke, welche dazu dienen, die in den Binnengewässern anfallenden Wassermengen in den Vorfluter zu pumpen, sofern diese nicht in freier Vorflut abfließen können.
Unterteilung	<p>Aus der Sicht der Grundwassermodellierung gibt es zwei Typen von Schöpfwerken:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Schöpfwerke, die immer in Betrieb sind, da die Donau infolge des Aufstaus immer höher liegt als das Binnengewässer, 2. Schöpfwerke, welche nur bei Hochwasser der Donau in Betrieb gehen. <p>Die Pumpmengen der Schöpfwerke von Typ 1 entsprechen den Abflussmengen der Binnengewässer. Bei Typ 2 können die Pumpmengen nur Hinweise auf den Abfluss während der Donauhochwasser geben. Eine Zusammenstellung der Schöpfwerke findet sich in Tabelle 5.</p>

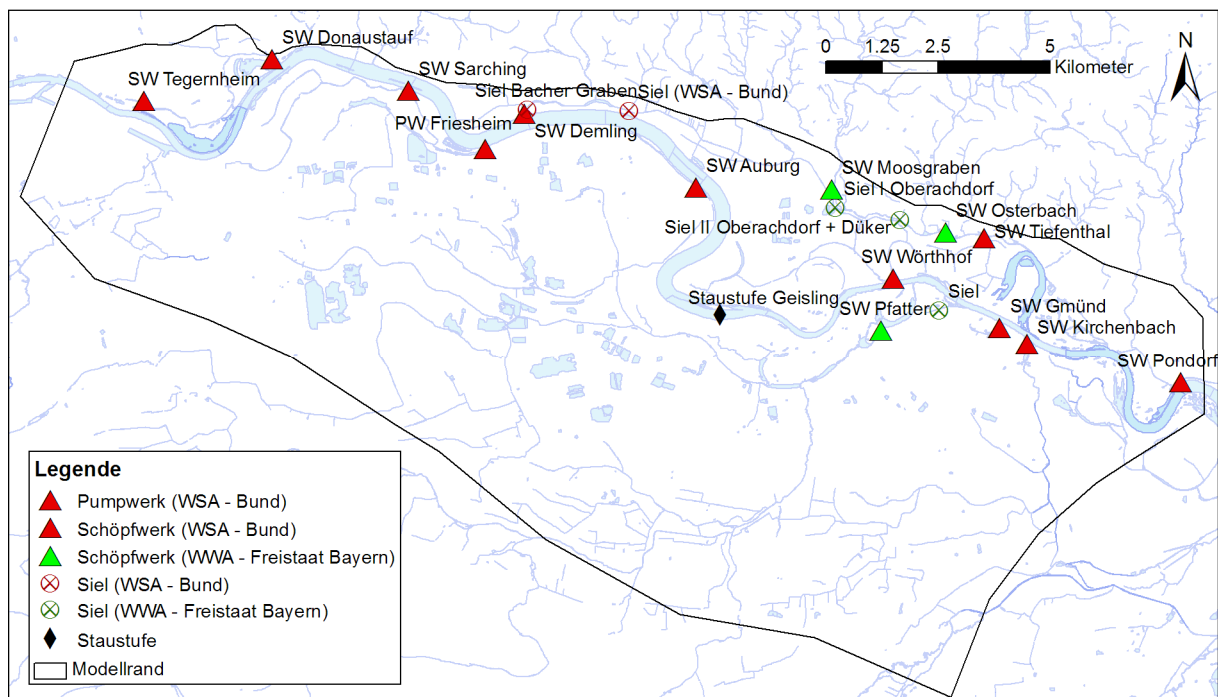


Abbildung 65: Lage der Schöpfwerke und Siele.

Berücksichtigung im Modell	Die Wasserstände der Binnengewässer werden im Grundwassermodell mit einer Cauchy-Bedingung berücksichtigt. Bei bekannten Abflüssen in den Binnengewässern kann aus den Einschaltbedingungen und dem Donauwasserstand der Wasserstand beim Pumpwerk errechnet werden. Die angrenzenden Abschnitte der Binnengewässer können also mit einem zeitabhängigen Wasserstand berücksichtigt werden.
----------------------------	---

Schöpfwerk	Jahr	Anz. Pum.	Leistung / Pumpe	Einschalt-W. Donau	Einschalt-W. Binnengew.	Ausschalt-W.st.
SW Tegernheim	1981	2	2x 0,025 m ³ /s	immer	P1 325.80 P2 326.00	324.30
SW Donaustauf	1985	4	4x 1,0 m ³ /s	immer	P1 325.97 P2 326.23 P3 326.49 P4 326.75	325.50
SW Sarching	1985	3	3x 1,0 m ³ /s	immer	P1 324.78 P2 324.94 P3 325.10	324.38
PW Friesheim	1984	3	3x 0,025 m ³ /s	immer	P1 322.60 P2 322.80 P3 323.00	321.50
SW Demling	1983	4	4x 1,0 m ³ /s	immer	P1 323.90 P2 324.10 P3 324.30 P4 324.50	323.50
SW Auburg	1989	2	2x 1,0 m ³ /s	immer	P1 322.70 P2 322.90	322.30
SW Wörthhof	1987	3	3x 1,0 m ³ /s	immer	P1 320.20 P2 320.40 P3 320.60	319.8
SW Tiefenthal	1987	2	2x 1,0 m ³ /s	immer	P1 319.40 P2 319.60	319.00
SW Gmünd	1990	2	2x 0,25 m ³ /s	immer	P1 319.90 P2 321.00	319.60
SW Kirchenbach	1991	5	5x 1,0 m ³ /s	320.45	P1 320.50 P2 320.60 P3 320.70 P4 320.80 P5 320.90	320.30
SW Pondorf	1994	3	3x 1,0 m ³ /s	immer	P1 318.45 P2 318.55 P3 318.65	318.30
SW Pfatter	1991	4	4x 1,75 m ³ /s	-	P1 321,87 P2 321,89 P3 321,91 P4 321,93	W Donau 10cm unter W "Alte Donau"
SW Moosgraben	1985	2	2x 0,9 m ³ /s	-	P1 322,90 P2 323,10	322.00
SW Osterbach	1983	2	2x 0,1 m ³ /s	keine NN Höhen, Bauwerk wird bei höheren Wasserständen überströmt.	Beim Steigen des Wasserstandes in der Kammer schalten die Pumpen ein.	bei 1m Absenkung

Tabelle 5: Charakterisierung der Schöpfwerke

Fördermengen

Die einzelnen Pumpen der Schöpfwerke sind entweder ausgeschaltet oder sie fördern mit der vollen Leistung. Die Fördermengen der Schöpfwerke konnten deshalb aus den Aufzeichnungen zu den Betriebsstunden der einzelnen Pumpen ermittelt werden. Da der Aufwand zur Digitalisierung der Daten sehr groß ist, wurde dies nur für die Kalibrierungszeiträume ausgeführt (Abbildung 66). Im Pumpwerk Auburg nahmen die Fördermengen im Verlauf der ersten 20 Jahre nach der Inbetriebnahme um etwa 75% ab (Abbildung 67). Dies ist auf die Abdichtung der Donausohle durch die im Stauraum abgelagerten Feinsedimente zurückzuführen.

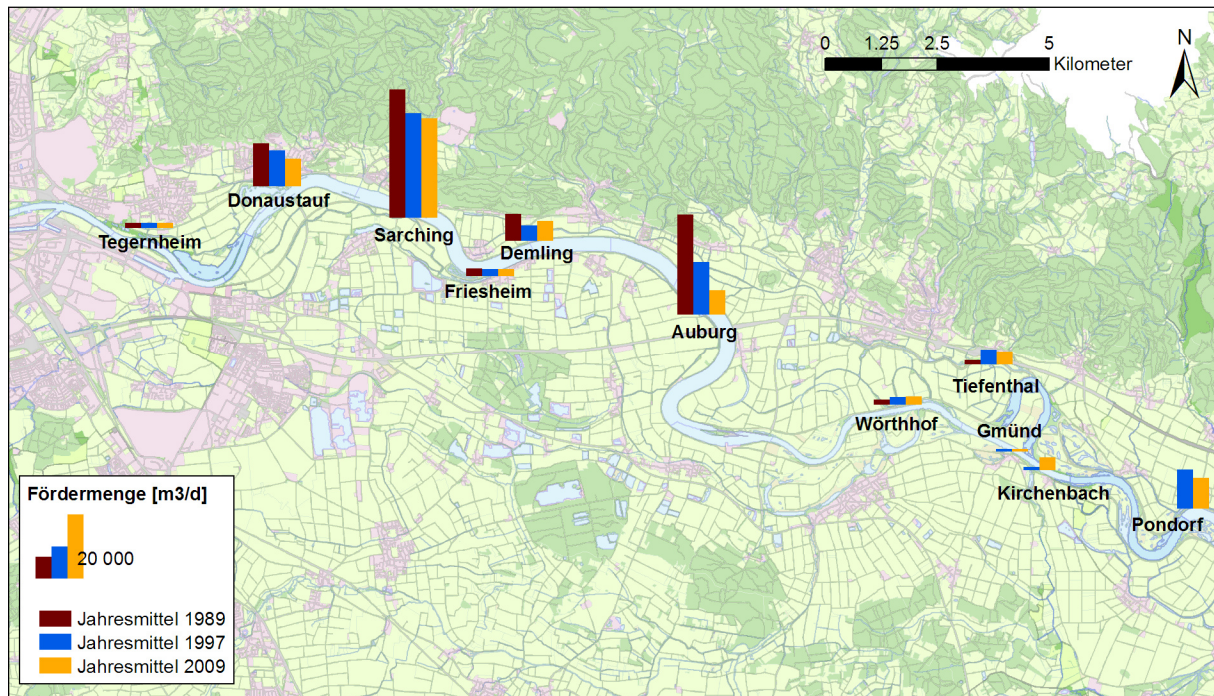


Abbildung 66: Fördermengen der Schöpfwerke

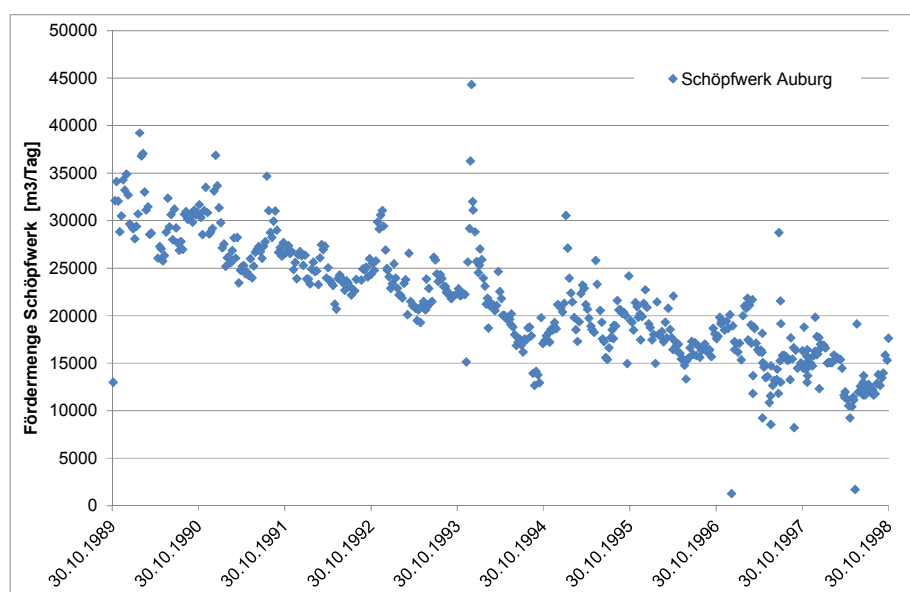


Abbildung 67: Abnahme der Fördermenge im Schöpfwerk Auburg in Funktion der Zeit.

8 Vorläufige Wasserbilanz

Bilanzraum	Der Bilanzraum entspricht dem Modellgebiet.
Bilanzzeitraum	Für die vorläufige Wasserbilanz wurde das Jahr 2009 ausgewählt. In diesem Jahr entsprechen sowohl die Abflussmengen in der Donau, wie auch die Grundwasserneubildung etwa den langjährigen Mittelwerten.
Bilanzanteile	<p>Die Wasserbilanzanteile wurden nach den oben beschriebenen Verfahren ermittelt.</p> <p>Die Fördermengen der Schöpfwerke wurden aus den Betriebsstunden ermittelt. Die Schöpfwerke erfassen auch den Oberflächenabfluss eines Einzugsgebietes von ca. 70 km². Aus der klimatischen Wasserbilanz ergibt sich ein mittlerer Oberflächenabfluss von 25 mm/Jahr, aufsummiert auf das Einzugsgebiet 1.8 Mio. m³/a. Dieser Anteil wird von der Fördermenge abgezogen.</p> <p>Der seitliche Abfluss am Ostrand des Modells wurde aus dem beobachteten Strömungsgradienten, dem Schotterquerschnitt und einer angenommenen Schotterdurchlässigkeit von 3×10^{-3} m/s abgeschätzt.</p> <p>Die Drainagemengen der Grundwasser drainierenden Gewässer, welche nicht über ein Schöpfwerk in die Donau entwässert werden, wurden aus den im Jahr 2016 gemessenen Abflüssen geschätzt.</p>
Fehlende Bilanzanteile	In der Wasserbilanz fehlt der unbekannte Austausch zwischen der Donau und dem Grundwasser. Zudem ist zu erwarten, dass bei starken Niederschlägen Wasser aus den Nebengewässern in den Grundwasserleiter infiltriert. Aufgrund der vorläufigen Wasserbilanz wird ein Überschuss der Infiltration von 6.5 Mio. m ³ erwartet.

Bilanzanteil	Zustrom [Mio. m ³]	Abstrom [Mio. m ³]
Grundwasserneubildung (Niederschlag)	28.2	
Seitenzuflüsse	6.4	
Seitenabfluss am Ostrand		1.9
Fördermenge		0.4
Schöpfwerke		24.3
Drainagemengen		14.5
Summe	34.6	41.1

Tabelle 6: Vorläufige Wasserbilanz für das Jahr 2009

9 Kalibrierungsdatensatz

9.1 Anforderungen

Modellparameter	Grundwassermodelle enthalten eine große Anzahl von Parametern. Dies sind einerseits Durchlässigkeitswerte und Porositäten des Untergrunds, andererseits Parameter zur Beschreibung der Anbindung des Grundwassers an Gewässer. Auch Seitenzuflüsse und Grundwasserneubildung können als Modellparameter betrachtet werden. Bei der Kalibrierung werden diese Parameter in physikalisch plausiblen Grenzen variiert und die daraus resultierenden Grundwasserstände mit gemessenen Werten verglichen. Eine gute Übereinstimmung von Modellresultaten und Messwerten kann meistens mit verschiedenen Parameterkombinationen erzielt werden, da nie alle Parameter voneinander unabhängig sind.
Abhängigkeit vom Systemzustand	Bei Grundwassermodellen gibt es Parameter, welche vom Systemzustand abhängig sind und solche die unveränderlich sind. Zum Beispiel werden Durchlässigkeitswerte üblicherweise als unveränderlich, Grundwasserneubildungsraten als abhängig von den klimatischen Bedingungen betrachtet. Wird ein Modell für verschiedene Systemzustände kalibriert, so sollten daraus jeweils die gleichen Werte für die unveränderlichen Parameter resultieren.
Gegenseitige Abhängigkeiten	Sind zwei Parameter voneinander abhängig, wie zum Beispiel der Seitenzufluss ins Modell und die Durchlässigkeit innerhalb des Modells, so empfiehlt es sich, denjenigen Parameter, welcher abhängig vom Systemzustand ist, mit anderen Verfahren abzuschätzen und im Modell fest vorzuschreiben. Nur wenn es nicht gelingt, dem anderen Parameter eine unveränderliche Größe zuzuordnen, muss der fest vorgeschriebene Parameter nochmals in Frage gestellt werden.
Kalibrierungsparameter	<p>Beim Modell „Flutpolder Eltheim und Wörthhof“ werden folgende Parameter vorerst fest vorgeschrieben:</p> <ul style="list-style-type: none">- Grundwasserneubildung- Seitenzuflüsse von den Talrändern- Wasserstände und Sohlenlage der Gewässer <p>Bei der Kalibrierung werden folgende Parameter variiert:</p> <ul style="list-style-type: none">- Durchlässigkeitswerte des Untergrundes- Sohlendurchlässigkeiten der Gewässer (Leakage)- Porosität im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels <p>Gelingt die Kalibrierung nicht mit der gewünschten Güte, so soll in einem zweiten Schritt entlang des Südrandes die Aufteilung der Seitenzuflüsse in Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss variiert werden. Für die korrekte zeitliche Nachbildung der Grundwasser-</p>

spiegelschwankungen infolge der Grundwasserneubildung kann es zudem erforderlich sein, den Bodenspeicher zu variieren.

Systemzustände	Die Betrachtung verschiedener Systemzustände ist bei der Kalibrierung ein Vorteil und wirkt sich positiv auf die Prognosefähigkeit eines Modells aus. Verschiedene Systemzustände ergeben sich aus den variablen Abflüssen der Gewässer und der zeitlich variablen Grundwasserneubildung. Im konkreten Fall des Grundwassermodells „Flutpolder Eltheim und Wörthhof“ wurden weitere Systemzustände durch den Bau der Staustufen Geisling und Straubing erzeugt.
Anforderungen	Wird das Grundwassermodell an den Messungen eines einzelnen Tages (Stichtagsmessung) kalibriert, so ist es in der Regel nicht fähig, die beobachtete zeitliche Variation des Grundwasserspiegels nachzubilden. Eine Kalibrierung an Messungen eines längeren Zeitraumes ist deshalb unerlässlich. Grundsätzlich genügt dazu ein Zeitraum von einem Jahr, sofern dieses sowohl Hochwasser-, wie auch Niederwassersituationen enthält. Das Modell sollte zudem an Messungen der gleichen Dauer überprüft werden (Validierung).
Vorschlag	<p>Für das Grundwassermodell „Flutpolder Eltheim und Wörthhof“ wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:</p> <ul style="list-style-type: none">- Kalibrierung an Messungen von jeweils mindestens einem Jahr in den Systemzuständen „vor Bau der Staustufe Geisling“, „zwischen Bau der Staustufen Geisling und Straubing“ und „nach Bau der Staustufe Straubing“.- Validierung des Modells an unabhängigen Messungen von jeweils mindestens einem Jahr in den drei Systemzuständen. <p>Nach dem Bau der Staustufen fand im Stauraum mit großer Wahrscheinlichkeit eine Abdichtung der Donausohle durch Kolmation statt. Dies bedeutet, dass die Anbindung des Grundwassers an die Donau mit der Zeit kleiner wurde. Das Grundwassermodell wird deshalb an den Grundwasserspiegelmessungen des Jahres 2009, in dem eine Stichtagsmessung durchgeführt wurde, nochmals kalibriert.</p>
Neue Messungen	Nach Abschluss der Beweissicherung der Staustufenprojekte im Jahr 2004 wurde das Messprogramm stark reduziert. Im Modellgebiet stehen nur noch wenige Messstellen zur Verfügung. Im Verlauf des Jahres 2016 wurde deshalb ein neues Beobachtungsnetz aufgebaut, in welchem an 62 Messstellen die Grundwasserstände kontinuierlich aufgezeichnet werden. Die Aufzeichnungen der beiden ersten Betriebsmonate dienen der Überprüfung der Kalibrierung. Bis zum Projektende Ende 2017 wird ein Beobachtungszeitraum von einem Jahr zur Verfügung stellen.
Abflussmessungen	Im Modellbereich gibt es einige Gewässer, die dazu dienen, Grundwasser zu drainieren und damit den Grundwasserstand tief zu halten. Mit dem Grundwassermodell können die in diese Gewässer exfiltrierenden Wassermengen berechnet werden. In Trockenzeiten, wenn diese Gewässer keine Oberflächenabflüsse führen, sollte also die im

Grundwassermodell bestimmte Abflussmenge der Wasserführung der Gewässer entsprechen.

Im Verlauf der Modellerstellung sollen deshalb an etwa 20 Stellen die Abflüsse von Drainagegewässern gemessen werden. Mit einem Vergleich der im Modell berechneten und der im Feld gemessenen Wasserführung wird das Grundwassermodell überprüft. Der Vergleich ist besonders wertvoll, weil direkt die Bilanzmenge im Modell überprüft werden kann.

9.2 Grundwasserspiegel

9.2.1 Zusammenstellung vorhandener Daten

Übersicht

Abbildung 68 zeigt eine Übersicht über die im Modellgebiet vorhandenen Grundwasserspiegelmessungen über den betrachteten Zeitraum von 1980 bis heute. Die meisten Messungen wurden zur Beweissicherung vor und nach dem Bau der Staustufen Geisling und Straubing durchgeführt. Im Modellgebiet befinden sich von der Beweissicherung Geisling etwa 220, von der Staustufe Straubing etwa 95 Messstellen. Etwa 30 Messstellen wurden für beide Beweissicherungen verwendet.

Die Beobachtung einzelner Grundwasserpegel wurde nach Ende der Beweissicherung weitergeführt. Zudem gibt es noch einige Messstellen, welche zu anderen Zwecken eingerichtet wurden. Im Jahr 2009 führte das Landesamt für Umwelt eine Stichtagsmessung durch. Innerhalb des Modellgebietes wurden 316 Pegelstände gemessen.

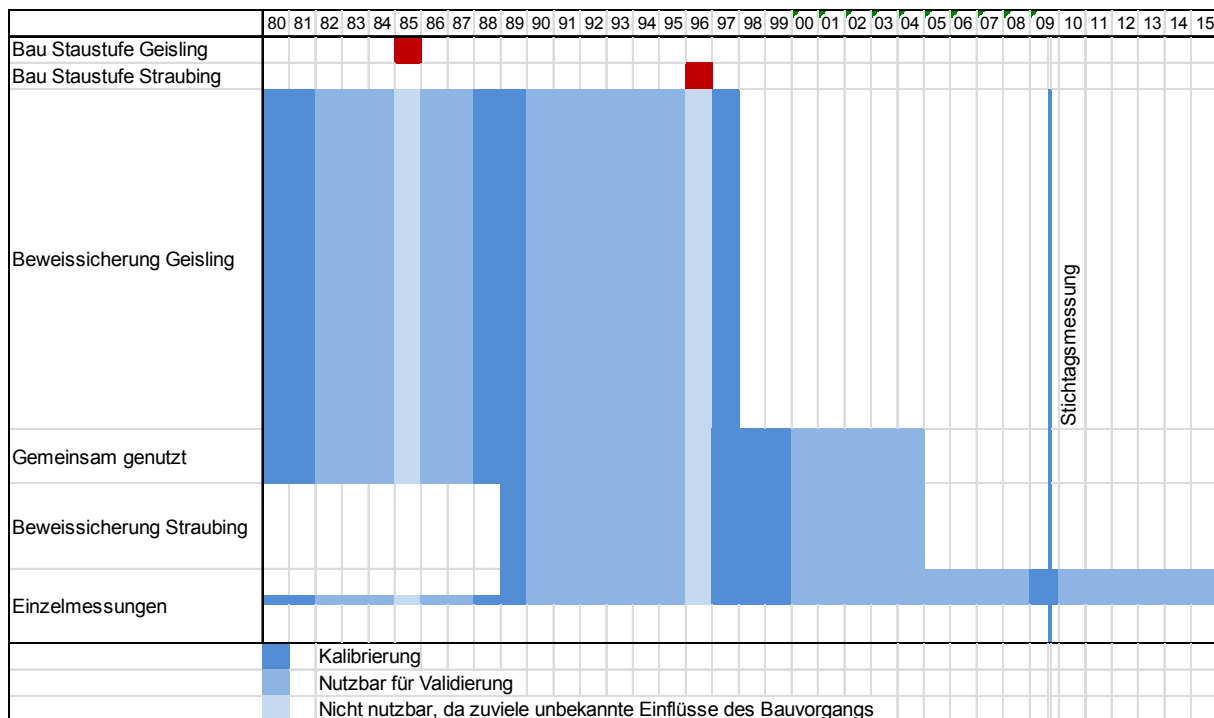


Abbildung 68: Übersicht über die im Modellgebiet vorhandenen Grundwasserspiegelmessungen (Balkenhöhe proportional zu Anzahl Messstellen).

Räumliche Verteilung In Abbildung 69 bis Abbildung 72 ist die räumliche Verteilung der Messstellen in verschiedenen Zeiträumen dargestellt. Für die Beweissicherung der Staustufe Geisling wurden auch bereits Messstellen im Einflussbereich der Staustufe Straubing eingerichtet. Damit steht im Zeitraum von 1980 bis 1997 ein sehr dichtes Messstellennetz zur Verfügung. Bis zum Ende der Beweissicherung der Staustufe Straubing im Jahr 2004 besteht noch ein reduziertes Messstellennetz im Ostteil des Modells. Im Jahr 2009 ist das Modellgebiet durch eine Stichtagsmessung lückenlos abgedeckt.

Messfrequenz In den Messstellen der Beweissicherungen Geisling und Straubing wurde der Grundwasserspiegel wöchentlich gemessen. Von einer Messstelle existieren Tageswerte. Ab dem Jahr 2004, resp. 2006 betrieb das Landesamt für Umwelt vier Messstellen mit täglichen Messwerten.

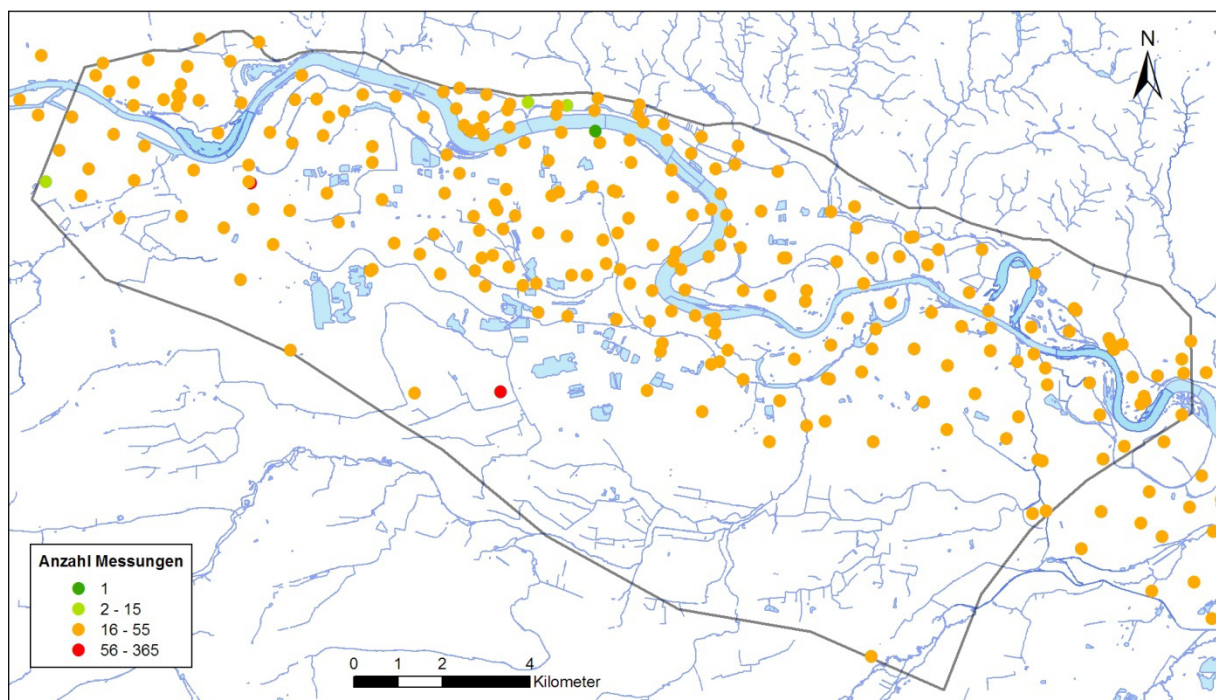


Abbildung 69: Räumliche Verteilung der Messstellen im Jahr 1983, vor dem Bau der Staustufe Geisling.

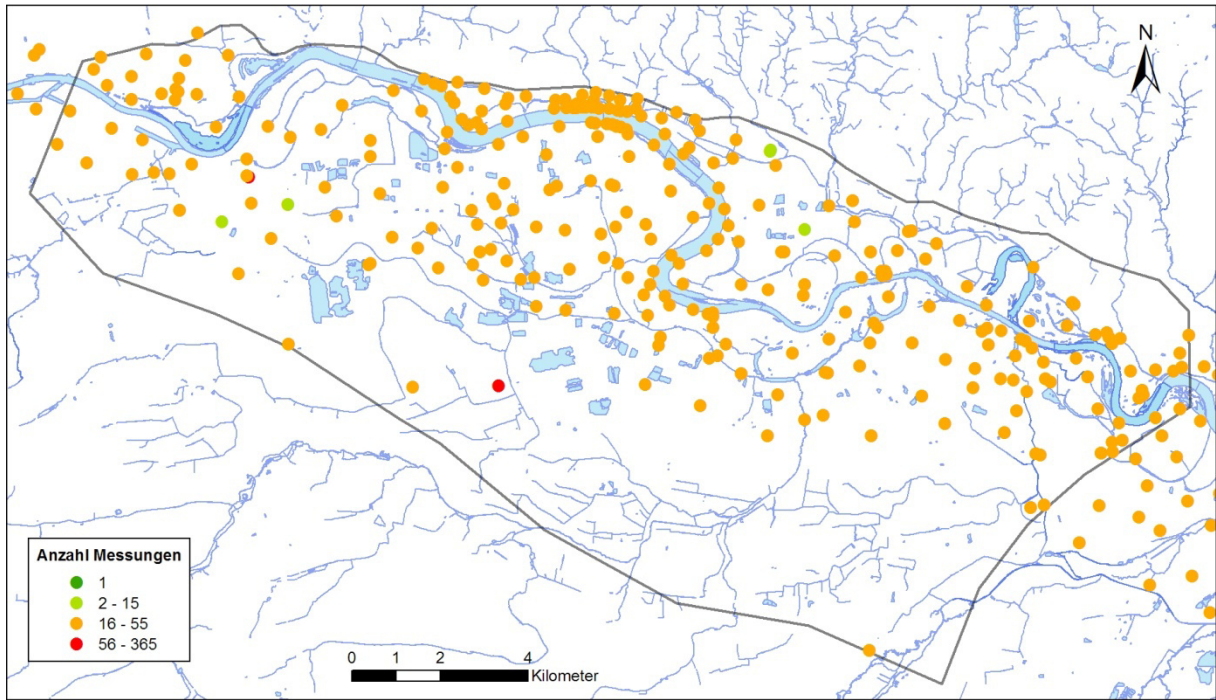


Abbildung 70: Räumliche Verteilung der Messstellen im Jahr 1995, nach dem Bau der Staustufe Geisling und vor dem Bau der Staustufe Straubing.

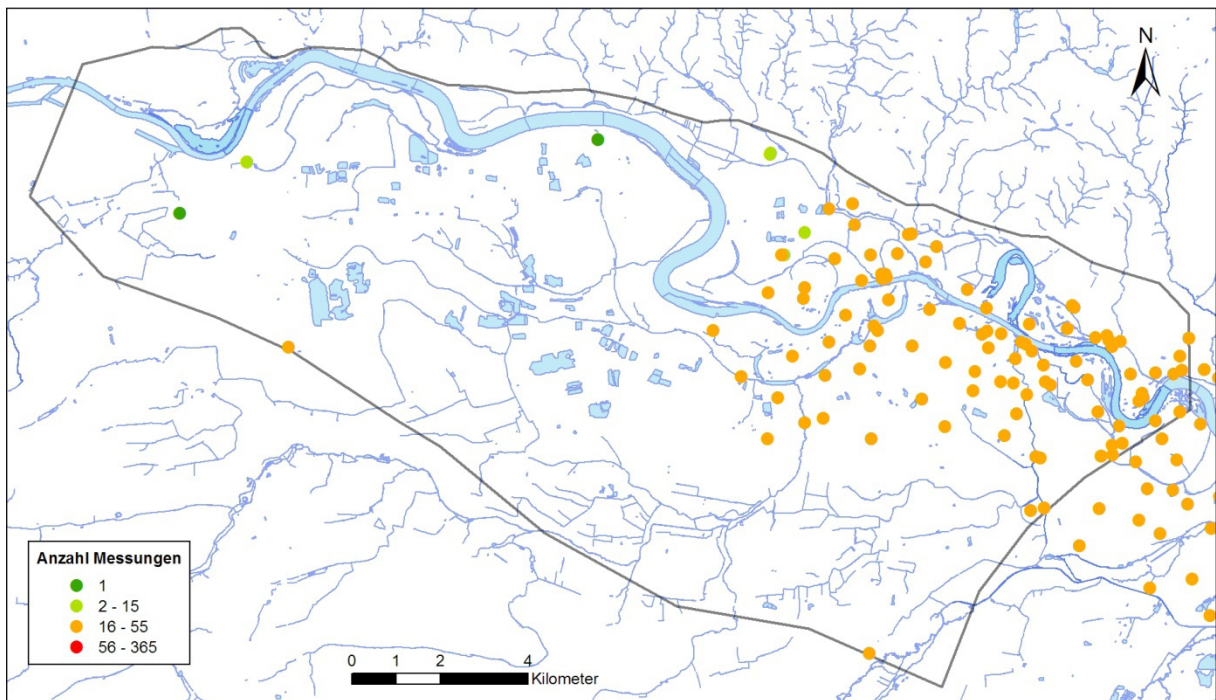


Abbildung 71: Räumliche Verteilung der Messstellen im Jahr 1998, nach dem Bau der Staustufe Straubing.

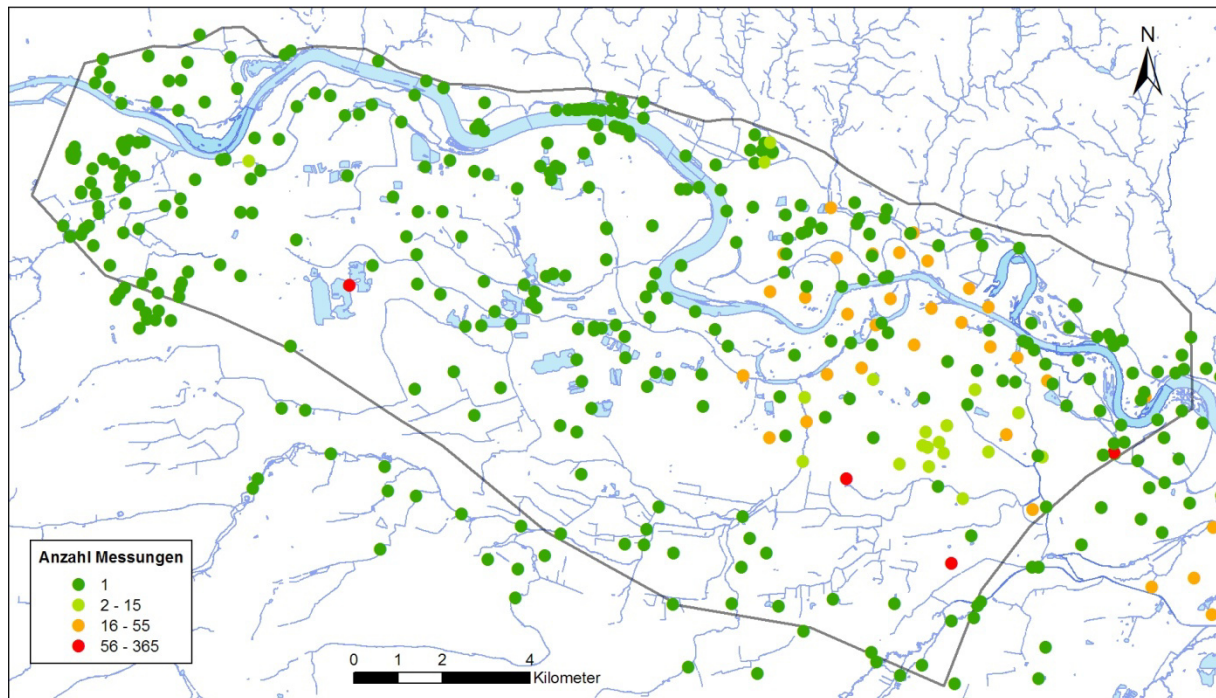


Abbildung 72: Räumliche Verteilung der Messstellen im Jahr 2009, nach dem Bau der Staustufe Straubing. Stichtagsmessung im Oktober.

Neues Messstellennetz

Zu Beginn des Jahres 2017 wurde ein neues Messstellennetz in Betrieb genommen. Dieses Netz umfasst zwar nur noch 62 Messstellen, jedoch wird der Grundwasserstand kontinuierlich abgelesen. Zudem werden die Messstellen für die Kalibrierung und Validierung des Grundwassermodells optimal angeordnet.

9.2.2 Bewertung der Datenlage für die Kalibrierung

Kalibrierung

In Abbildung 68 sind die für die Kalibrierung vorgesehenen Zeiträume eingezeichnet. Es wurde darauf geachtet, dass die Zeiträume auch Donauhochwasser enthalten. In den Zeiträumen 1980-81, 1988-89 und 1997-99 steht ein dichtes Netz von Pegelmessungen mit wöchentlichen Ablesungen des Grundwasserstandes zur Verfügung. Dies bedeutet, dass die Anforderungen an den Kalibrierungsdatensatz erfüllt sind.

Stichtag

Zusätzlich zu den drei Kalibrierungszeiträumen ist eine Kalibrierung an der Stichtagsmessung des Jahres 2009 vorgesehen. Im Jahr 2009 gab es zwar nur wenige Messstellen mit regelmäßiger Ablesung, hingegen ist die Abdeckung des Modellgebietes optimal.

Datenlücke

Zwischen 2004 und heute gibt es mit Ausnahme der Stichtagsmessung eine große Datenlücke. In dieser Zeit waren der Zustand des Grundwasserleiters und der Donau im Modellgebiet jedoch im Wesentlichen unverändert. Die Kolmation des Stauraums Geisling dürfte 2004, 18 Jahre nach dem Aufstau, zu einem wesentlichen Anteil stattgefunden haben. Zur abschließenden Bewertung der Datenlücke

ist eine Validierung an den im Jahr 2017 neu erhobenen Daten vorgesehen.

Renaturierung
Pfatter

Die Renaturierung der Pfatter fand in den Jahren 2001 - 2002 statt. Allfällige Einflüsse davon sollten bereits im Jahr 2004 feststellbar sein. Im Bereich von Pfatter stehen zudem auch nach 2004 einige Messstellen zur Verfügung.

Neue Messungen

Nach Vorliegen eines Beobachtungszeitraums von einem Monat im neuen Messstellennetz ist eine Nachbildung mit dem Grundwassermodell geplant. Dies erlaubt eine abschließende Bewertung der vorhandenen Datenlücke.

9.3 Abflussmessungen

Abflussmessungen

Im Betrachtungszeitraum von 1980 bis 2015 sind im Modellgebiet keine Abflussmessungen an Drainagegewässern verfügbar. 2016 wurden Stichtagsmessungen der Abflüsse an 11 Gewässerquerschnitten durchgeführt. Bei der Begehung weiterer Gewässerabschnitte wurden Gewässer ohne nennenswerte Abflüsse identifiziert.

Schöpfwerke

Verschiedene Schöpfwerke sind auch bei Niedrigwasser der Donau in Betrieb, da sie sich im Bereich des Stauraums befinden. Aus den Einschaltzeiten der Pumpen wurde die geförderte Wassermenge ermittelt. Die Fördermengen werden zur Validierung des Modells eingesetzt.

10 Zusammenfassung

Hydrogeologisches Modell	<p>Für den Aufbau des hydrogeologischen Modells wurden die Bohrprofile von ca. 1700 Bohrungen des Bodeninformationssystems des Landesamtes für Umwelt ausgewertet. Zusätzlich wurden 30 neue Bohrungen abgeteuft. Aus diesen Daten wurden die Schichtflächen der Deckschichtbasis und der Quartärbasis erzeugt. Da im Grundwassermodell die Transmissivität, d.h. das Produkt aus Grundwassermächtigkeit und Durchlässigkeit maßgebend ist, werden bei der Kalibrierung Fehler in der Mächtigkeit durch höhere oder tiefere Durchlässigkeiten ausgeglichen.</p> <p>Die Schichten unter der Quartärbasis sind nur für die Beurteilung der Unterströmung von darin eingebundenen Dichtwänden relevant. Aus den Bohraufschlüssen der neu abgeteuften Bohrungen kann geschlossen werden, dass die im Bereich zwischen Geisling und Giffa unter dem Quartär aufliegenden Kreideschichten eine sehr geringe Durchlässigkeit aufweisen.</p>
Modellkonzept	<p>Das Grundwassermodell wird als zweidimensionales ebenes Modell mit freier Oberfläche realisiert. Gespannte Verhältnisse können durch eine Reduktion der Porosität im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels simuliert werden. Bei Fragestellungen, welche eine räumliche Betrachtungsweise erfordern, kann eine Modelllupe in 3D erzeugt werden. Als Rechencode für die numerische Berechnung wird FEFLOW eingesetzt.</p>
Modellränder	<p>Die Ränder des Grundwassermodells wurden aufgrund der vorhandenen Daten zum Grundwasserspiegel festgelegt. Entlang des Süd- und des Nordrands werden im Modell Seitenzuflüsse vorgegeben. Die Seitenzuflüsse wurden aufgrund der hydrologischen Wasserbilanz abgeschätzt. Grundlagen dazu sind Klimadaten, Reliefdaten und Daten zur Vegetation. Unsicherheiten bestehen am Südrand des Modells, da unbekannt ist, welcher Anteil des versickerten Wassers in Oberflächengewässern wieder gefasst und abgeleitet wird. Als erste Annahme wird ein Anteil von 50% angenommen. Für den Abfluss der Pfatter ist diese Annahme realistisch. Die Annahme wird im Verlauf der Kalibrierung überprüft.</p>
Gewässer	<p>Die Wasserstände der Gewässer werden im Modell in einer Cauchy-Randbedingung (Infiltrations- / Exfiltrations-Randbedingung) vorgegeben. Die Donau, Pfatter, Wiesent und Große Laber werden mit einem zeitabhängigen Wasserstand berücksichtigt. Da dazu ein zeitlich und räumlich lückenloser Datensatz erforderlich ist, mussten die Abflussganglinien der Pfatter und Wiesent geschätzt werden. Für die Wiesent wurde dazu ein Niederschlags-Abfluss-Modell aufgebaut, die Abflüsse der Pfatter wurden aus den Daten des Pegels Köfering und der hydrologischen Wasserbilanz errechnet.</p> <p>Für alle Gewässer standen Profildaten zur Verfügung. Anhand dieser Profile wurden mit dem Programm HECRAS hydraulische Gewäs-</p>

sermodelle erstellt, welchen für jeden Punkt den Zusammenhang zwischen Abfluss und Pegelstand bereitstellen.

Die übrigen Gewässer werden vorläufig im Model mit einem konstanten Wasserspiegel berücksichtigt. Die Höhenlage der Wasserspiegel wurde aus dem digitalen Höhenmodell entnommen. Sollte die Kalibrierung dies erfordern, so können einzelne Drainagen auch mit zeitabhängigem Wasserspiegel berücksichtigt werden.

Neubildung	Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag wurde mit Hilfe der hydrologischen Wasserbilanz ermittelt. Grundlagen dazu sind Klimadaten, Niederschlagsdaten der Stationen Regensburg, Kiefenholz und Aholting, Vegetationskarten des LfU, Erhebungen zu den Anbauprodukten, Schätzungen des verfügbaren Bodenspeichers und der Bewässerungsmenge. Die Annahmen zum Bodenspeicher sollen im Rahmen der Kalibrierung geprüft werden.
Fördermengen	Die Fördermengen der Brunnen Wiesent und Giffa liegen seit 1991 vor. Für den restlichen Zeitraum werden Werte in gleicher Größe verwendet.
Modellaufbau	Im April 2016 wurde ein erstes Grundwassermodell aufgebaut. Aufbau und Kalibrierung des Modells werden in einem späteren Bericht dokumentiert.
Kalibrierungsdaten	Für die Kalibrierung sind Pegeldaten aus dem Zeitraum von 1980 bis 2015 vorhanden. Die meisten Daten stammen dabei aus den Beweissicherungsprogrammen im Zusammenhang mit dem Bau der Staustufen Geisling und Straubing. Weitere Daten wurden beim Bau der Autobahn, der MERO-Leitung und von der Gemeinde Pfatter erfasst. Das Landesamt für Umwelt betreibt im Modellbereich drei Datenlogger. Eine Kalibrierung an Messungen von jeweils mindestens einem Jahr in den Systemzuständen „vor Bau der Staustufe Geisling“, „zwischen Bau der Staustufen Geisling und Straubing“ und „nach Bau der Staustufe Straubing“ ist möglich.
Validierung	<p>Das WWA Regensburg hat ein Messstellennetz mit 59 Datenloggern realisiert. Die Messdaten der ersten zwei Monate sollen zur Validierung des Modells eingesetzt werden. Zusätzlich stehen aktuelle Loggerdaten des Landesamtes für Umwelt zur Verfügung.</p> <p>Das Grundwassermodell soll ebenfalls an Abflussdaten der Drainagegewässer validiert werden. Mit den Förderdaten der Schöpfwerke, welche das anfallende Drainagewasser in die Staustufe Geisling pumpen, stehen dazu Daten zur Verfügung. Mittels zweier Stichtagsmessungen wurden zudem die Abflüsse einiger weiterer Drainagegewässer bestimmt.</p>

11 Literatur

- [1] Bayrisches Landesamt für Umwelt (2009), Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500'000.
- [2] WATEC Ingenieurgesellschaft für Hydrogeologie und Hydrochemie mbH (1988): Durchführbarkeitstudie zur Grundwassererschließung im Gebiet Woerth a.d. Donau. *Studie im Auftrag der Stadt Würth a.d. Donau.*
- [3] WATEC (1990): Untersuchung der hydraulischen Verhältnisse im quartären Grundwasserleiter im Anstrombereich der Brunnenanlage bei Giffa. *Studie im Auftrag der Stadt Würth a.d. Donau.*
- [4] WATEC (1991): Basisstudie zur qualitativen und quantitativen Sicherung der Grundwasservorkommen im Nordostteil des tertiären Hügellandes und dem Südrand der südlichen Frankenalb. *Studie im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Region Isar-Laaber-Donau.*
- [5] US Army Corps of Engineers (2010): HEC-RAS, River Analysis System, *User's Manual, Version 4.1.*
- [6] WSA Regensburg (2012): Wehrbetriebsanweisung, Wehranlage Geisling, Donau-km 2354,285. Wasser- und Schifffahrtsamt Regensburg, Stand: 01.07.2012.
- [7] WSA Regensburg (2012): Wehrbetriebsanweisung, Wehranlage Straubing, Donau-km 2329,780. Wasser- und Schifffahrtsamt Regensburg, Stand: 01.07.2012.
- [8] Dr.-Ing. F. Ritzert (2004): Hydraulische Modellierung der Donau bei Straubing, Erstellung des Berechnungsmodells. Berechnung mit dem 1D-hydrodynamisch-numerischen Modell Cascade+. Dr.-Ing. F. Ritzert, Ingenieurbüro für Wasserbau, Karlsruhe im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, April 2004.
- [9] O. Suaznabar, J. Kellermann (2005): 1D-HN-Modellierung der Stauhaltung Geisling, Modellerstellung und Kalibrierung. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, November 2005.
- [10] Morris, Gregory L. and Fan, Jiahua. 1998. Reservoir Sedimentation Handbook, McGraw-Hill Book Co., New York.
- [11] F. F. García (2014): User manual Tetis v.8.3.0. Valencia, Universitat Politècnica de València, June 2014.
- [12] F. F. García et al.(2014): Description of the distributed conceptual hydrological model Tetis v.8, València, Universitat Politècnica de València, May 2014.
- [13] Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (2006): Crop Evapotranspiration. *FAO Irrigation and Drainage Paper No 56.*

- [14] Mockus V. (1972): Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 10.*
- [15] Dr. Stefan Kremb, Wolfgang Viehbacher und Dr. Thomas Rötzer (1999): Vergleich der Ergebnisse verschiedener Wasserhaushaltsmodelle zur Berechnung des Sickerwasseranfalls, SuB Heft 11/99.
- [16] Stefan Kremb, Thomas Rotzer, Heino Schaupp (2000): Berechnung des Sickerwasseranfalls nach verschiedenen Wasserhaushaltsmodellen, Wasser & Boden, 52. Jahrg., 4/2000.
- [17] Regierung der Oberpfalz, Gruppe Landwirtschaft und Forsten (2016): Flächennutzung 2015 in der Kulisse des Grundwassermodells, Datengrundlage: InVeKoS 2015, FEKA 2015 (BayStMinELF), mail S. Kremb, Mai 2016.
- [18] Regierung der Oberpfalz, Gruppe Landwirtschaft und Forsten (2016): Grobe Abschätzung der Bewässerungsmengen für landwirtschaftliche Kulturen im Bereich der möglichen Flutpolder Eltheim und Wörthhof, mail S. Kremb, April 2016.
- [19] Volker Armbruster (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 17.
- [20] P. Döll and K. Fiedler (2008): Global-scale modeling of groundwater recharge, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 863–885, 2008
- [21] Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (2016), Geländemodell DGM 1
<http://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/gelaende.html>
- [22] Müller (1988): Sanierung der Binnenentwässerung nach Inbetriebnahme der Donaustauhaltung Geisling. *Wasserwirtschaft 78 (1988) 10*

Simultec AG, Zürich, 16.05.2022



Christian Gmünder