



Grundwassermodell Flutpolder Bertoldsheim

Hydrogeologisches Modell
Modellkonzepte

Stand Juni 2019



GeoBüro Ulm

Arbeitsgemeinschaft Simultec – GeoBüro Ulm

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

Tel: +41 44 563 86 20, Fax: +41 44 563 86 29, E-Mail: info@simultec.ch

Grundwassermodell Flutpolder Bertoldsheim

1	Einleitung, Ziel	1
1.1	Auftrag	1
2	Grundlagen	2
2.1	Datengrundlagen	2
2.2	Bewertung	3
3	Hydrogeologisches Modell	3
3.1	Hydrogeologische Übersicht	3
3.2	Datenaufbereitung und Vorgehen	5
3.3	Hydrostratigraphische Einheiten	6
3.3.1	Deckschichten	6
3.3.2	Quartär	8
3.3.3	Tertiär	10
3.3.4	Weisser Jura	11
3.4	Geohydraulische Kennwerte	12
3.4.1	Deckschicht	12
3.4.2	Quartär	13
3.4.3	Tertiär und Jura	14
3.5	Grundwasserhydraulik	16
4	Modellkonzept des numerischen Modells	18
4.1	Abstraktion der Hydrogeologie	18
4.2	Modellraum und Bilanzraum	19
4.3	Seitlicher Modellrand	20
5	Randbedingungen	24
5.1	Gewässer	24
5.1.1	Höhenlage der Wasseroberfläche	24
5.2	Niederschlag-Abfluss-Modell	28
5.2.1	Methodik	28
5.2.2	Gewässernetz	30
5.2.3	Klimatische Wasserbilanz	33
5.2.4	Bauwerke	39
5.2.5	Anfangsbedingungen und Kalibrierung	41
5.2.6	Resultate	43
5.2.7	Hochwasserprognose	46
5.3	Neubildung durch Niederschlag	47
5.4	Seitliche Zuflüsse	51
5.4.1	Direkt in das Modellgebiet entwässernde Gebiete	51
5.4.2	Zustrom aus grundwasserführenden Schotter	55

5.4.3	Grundwasserzustrom aus dem Karst.....	57
5.5	Überflutungsflächen.....	58
5.6	Grundwasserentnahmen	58
5.7	Bauwerke	60
6	Vorläufige Wasserbilanz	61
7	Vorgehen bei der Kalibrierung	65
8	Zusammenfassung, Empfehlungen	68
9	Literatur.....	69

1 Einleitung, Ziel

1.1 Auftrag

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

Der vorliegende Teilbericht beschreibt das Hydrogeologische Modell und die Modellkonzepte mit Wissensstand vom Januar 2019.

2 Grundlagen

2.1 Datengrundlagen

Die folgenden Daten wurden bei der Erstellung des hydrogeologischen Modells verwendet:

Daten zu den geologischen Strukturen

- Auszug aus der BIS-Datenbank des Landesamts für Umwelt mit dazugehörigen Schichtenverzeichnissen
- Quartärbasis und Durchlässigkeitsbeiwerte des Grundwassermodells Genderkingen
- Digitales Höhenmodell im 1m Raster
- Lage und Regelprofile von Dichtwänden der Staustufe Feldheim (Lech) und der Staustufe Bertoldsheim (Donau).

Daten zur Lage des Grundwasserspiegels

- Grundwasserspiegel in Messstellen des WWA Ingolstadt
- Grundwasserspiegel in Messstellen des ZFW (N-ERGIE)
- Grundwasserspiegeldaten des LfU
- Grundwasserspiegeldaten der Uniper

Daten zu den klimatischen Bedingungen

- Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (Stationen Augsburg, RainLech)
- Klimadaten des Gewässerkundlichen Dienstes von Bayern (Burgheim)

Nutzungsdaten

- Vektorkarte des Freistaats Bayern
- Bodennutzung der landwirtschaftlichen Betriebe in Bayern 2010. Erhebung des Landesamts für Statistik
- Vom LfU zusammengestellte Liste der Entnahmeverbrunnen
- Tägliche Entnahmemengen der ZFW des Zeitraums 1994 – 2018

Gewässerdaten

Gewässernetz des LfU Bayern

Pegel und Abflussmengen des Hochwassernachrichtendienstes Bayern von den Gewässern Donau, Lech und Ussel

2.2 Bewertung

Die vorliegenden Daten sind sehr umfangreich und für die Erstellung eines numerischen Grundwassermodells im Rahmen eines Raumordnungsverfahrens ausreichend.

3 Hydrogeologisches Modell

3.1 Hydrogeologische Übersicht

Übersicht

Im Untersuchungsgebiet ist ein Porengrundwasserleiter aus quartären Schottern (Kiese und Sande) ausgebildet. Der Schotter ist häufig bedeckt von Auelehmen, welche bei früheren Überflutungen der Donau abgelagert wurden (Deckschichten). Unter dem Schotter liegen die schwach durchlässigen schluffigen Tone der Tertiären Molasse, welche eine von Süden nach Norden abnehmende Mächtigkeit aufweisen.

Entlang des nördlichen Talrandes keilen die Tertiärschichten stellenweise aus und der quartäre Grundwasserleiter ist in direktem Kontakt zu den darunterliegenden Schichten des Weissen Jura. Diese Schichten können verkarstet sein und beträchtliche Mengen an Grundwasser führen. An anderen Stellen grenzt der Grundwasserleiter an die Trümmermassen des Riedkraters, welche nur schwach durchlässig sind.

Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt durch das Donautal im Bereich von Niederschönenfeld, Abbildung 2 zeigt einen Querschnitt im Bereich von Burgheim.

Quartär

Im Untersuchungsgebiet ist ein Porengrundwasserleiter aus quartären Schottern (Kiese und Sande) ausgebildet. Er befindet sich in den jungen Talfüllungen, würmzeitlichen Niederterrassenschottern, postglazialen Terrassenschottern und in der am südlichen Talrand sedimentierten Hochterrasse.

Kennwerte des Grundwasserleiters wie hydraulische Durchlässigkeit, Transmissivität, Mächtigkeit und Speicherkoeffizient zeigen in den Bereichen der Nieder- und Hochterrasse räumlich differenzierte Strukturen je nach Sedimentation des Kieskörpers. Grundsätzlich liegt in den quartären Sedimenten ein mit hoher bis sehr hoher Durchlässigkeit ergiebiger Grundwasserleiter vor. Die Mächtigkeit des quartären Grundwasserleiters liegt bei bis zu 12 Metern, die Durchlässigkeit des Kies-Grundwasserleiters bei etwa 1×10^{-3} bis 1×10^{-2} m/s.

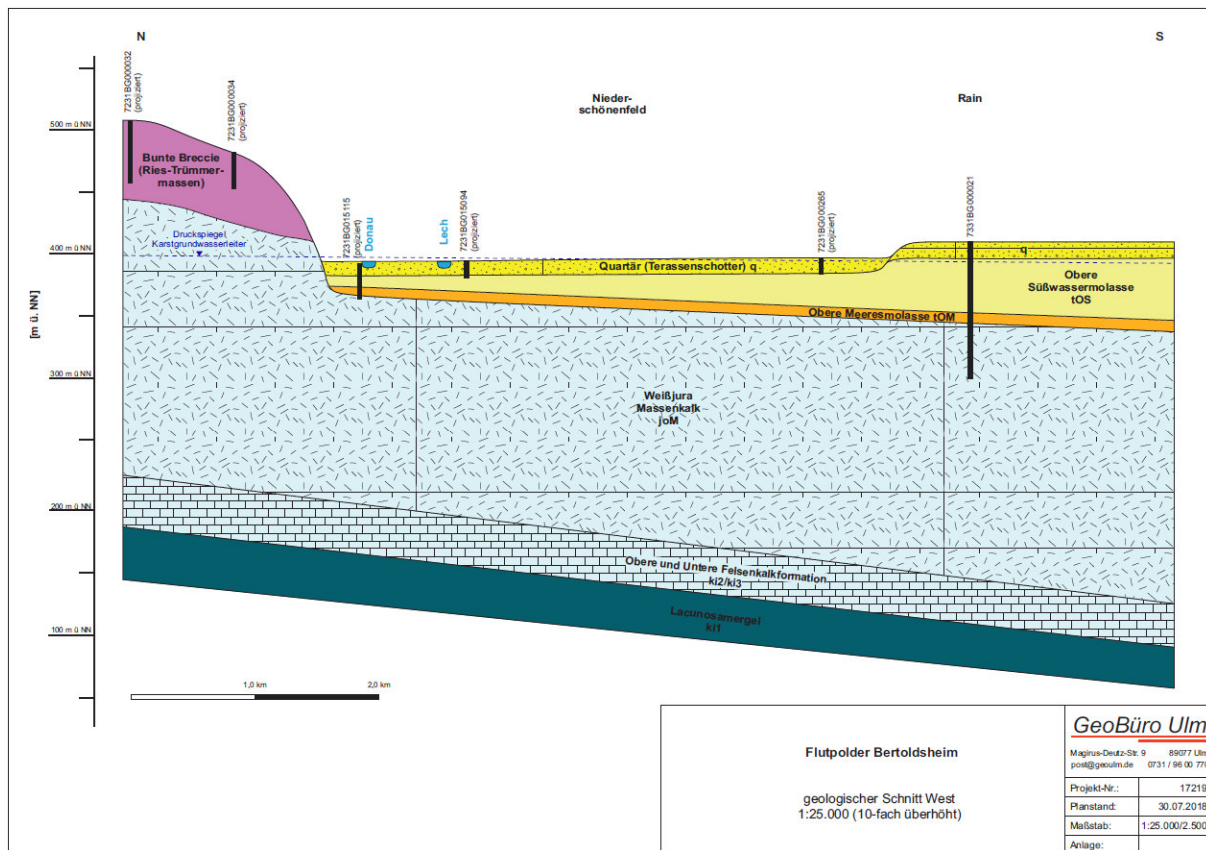


Abbildung 1: Geologischer Schnitt durch Rain und Niederschönenfeld

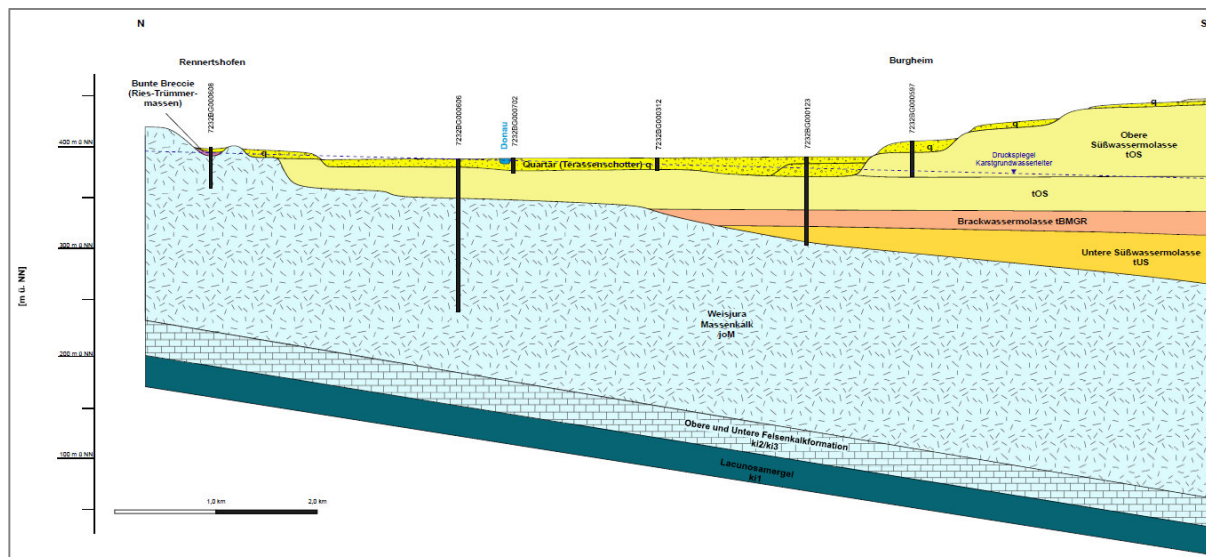


Abbildung 2: Geologischer Schnitt durch Rennertshofen und Burgheim.

Tertiär	Im Untersuchungsgebiet sind die tertiären Sedimente überwiegend mergelig-tonig ausgeprägt und verfügen nur über einen geringen wirksamen Porenanteil. Sie wirken überwiegend als hydraulische Trennschicht zwischen Kies- und Karstgrundwasserleiter. Die Mächtigkeit der tertiären Ablagerungen nimmt von wenigen Metern am Nordrand des Tals bis zu über 50 Metern am Südrand des Tals zu.
Weisser Jura	<p>Die karbonatischen Ablagerungen des Weisser Jura treten in eng verzahnten Fazies-Typen auf: Als geschichtete/gebankte Kalke und Mergelkalke mit mergelig-tonigen Zwischenlagen und als massig ausgebildete Riffkalke mit dolomitischen Anteilen.</p> <p>Der Weisse Jura fällt mit ca. 2° nach Süd-Süd-Ost ein und bildet im Modellgebiet einen bis zu 200 Meter tiefen, zusammenhängenden Karstgrundwasserkörper aus. Das Grundwasser füllt den Karst nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren entlang von Schichtflächen, Klüften und Spalten mit einem mittleren Hohlraumanteil von 2% [1] aus.</p>

3.2 Datenaufbereitung und Vorgehen

Datengrundlage	Als Datengrundlage für das hydrogeologische Modell wurden insbesondere die Schichtenverzeichnisse aus dem BIS des Bayerischen Landesamtes für Umwelt verwendet. Insgesamt wurden rund 700 Schichtenverzeichnisse ausgewertet.
Datenauswertung	<p>Folgende Schichtgrenzen wurden in eine Tabelle übertragen:</p> <ul style="list-style-type: none">- Geländeoberkante- Unterkante Auffüllung- Unterkante Deckschicht- Oberkante Grundwasserleiter Quartär- Unterkante Quartär- Oberkante Tertiär- Unterkante Tertiär- Oberkante übrige Schichten (Jura)- Endteufe <p>Bei der jeweils unter dem Quartär liegenden Schicht (z.B. Tertiär oder Jura) ist ihre Oberkante identisch mit der Unterkante des Quartärs.</p>
Genderkingen	Die BIS-Daten wurden um die Daten der Quartärbasis aus dem Grundwassermodell Genderkingen [2] ergänzt. Es wurden jeweils die Schichtgrenzen an den verwendeten Stützstellen ausgelesen.
Interpolation	Für den Aufbau der einzelnen Schichtgrenzen wurde aus den Bohrpunkten eine zusammenhängende Schichtfläche interpoliert. Nach der Interpolation wurden die Schichtgrenzen durch den Hydrogeologen auf ihre Plausibilität überprüft und angepasst.

Datendichte und Datenqualität Die Datendichte variiert innerhalb des Untersuchungsgebietes stark. Entlang der Staustufe Bertoldsheim, im Gebiet östlich Marxheim und nördlich Burgheim ist die Anzahl der Bohrungen hoch, zwischen Niederschönenfeld und dem Schnödhof gibt es praktisch keine Bohrungen. Insgesamt ist jedoch die Datendichte hoch. Die meisten Bohrungen wurden zur Stauraumerkundung, für Bauvorhaben, die Kieswerkerkundung und die Trinkwasserversorgung abgeteuft.

3.3 Hydrostratigraphische Einheiten

3.3.1 Deckschichten

Datenbasis Insgesamt wurde in rund 591 Bohrprofilen die Unterkante der Deckschicht erschlossen. Zusätzlich zu den Bohrungen mit Endteufe bis unter die Deckschichtbasis, wurden die Bohrungen, welche die Unterkante der Deckschicht nicht erreichen mit einer Maximum-Bedingung in der Interpolation berücksichtigt. Das heißt, die interpolierte Fläche darf nicht oberhalb der Endtiefe der Bohrung liegen (Abbildung 3).

Geländestufen Die Unterkante der Deckschicht verläuft mehr oder weniger parallel zur Topografie. Entlang von Geländestufen (Terrassengrenzen) wurde bei der Interpolation folgendes Vorgehen in drei Schritten gewählt:

1. Als Erstes wurde die Basis der Deckschicht unter Annahme einer Störung entlang der Terrassengrenze interpoliert. Die resultierende Fläche besitzt entlang der Störungslinie einen vertikalen Versatz. Als Interpolationsverfahren wurde die Minimum-Curvature-Methode verwendet.
2. Aus der interpolierten Fläche wurde die Deckschichtbasis in beidseits der Störung angeordneten Hilfspunkten rückinterpoliert.
3. In einer weiteren Interpolation wurden diese Hilfspunkte 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 3 dargestellt. Als Interpolationsverfahren wurde die Kriging-Methode verwendet.

Randgebiete In den Randgebieten über dem Talrand wurde eine konstante Deckschichtmächtigkeit von einem Meter vorgegeben.

Interpolationsresultate Die resultierende Deckschichtbasis ist in Abbildung 4 dargestellt. Wird die Unterkante der Deckschicht von der heutigen Geländeoberfläche subtrahiert, so kann die Mächtigkeit der Deckschicht dargestellt werden (Abbildung 5).

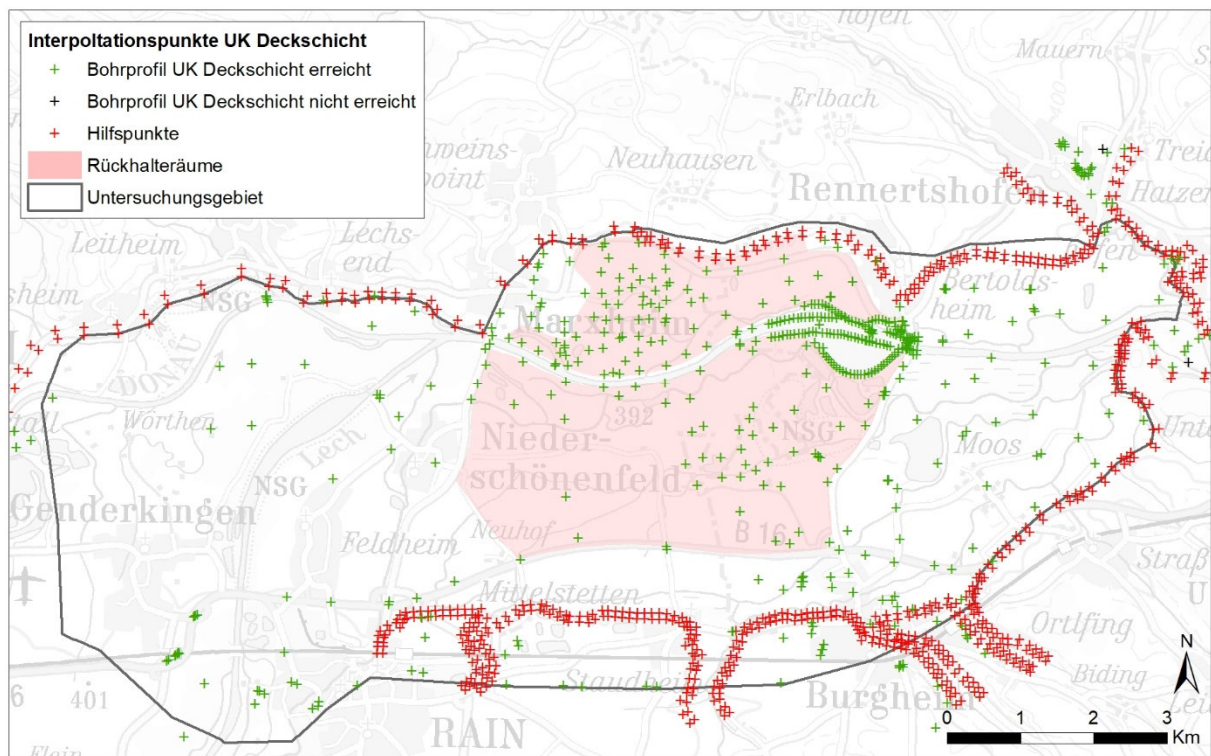


Abbildung 3: Für die Interpolation der Deckschichtbasis verwendete Bohr- und Hilfspunkte.

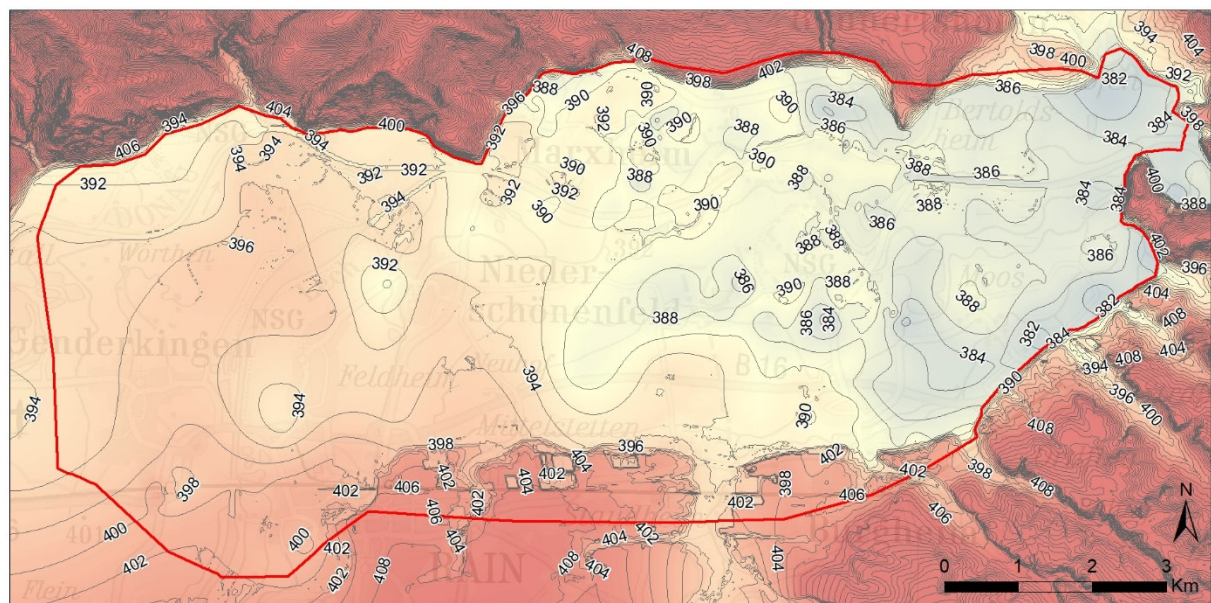


Abbildung 4: Interpolierte Unterkante der Deckschicht.

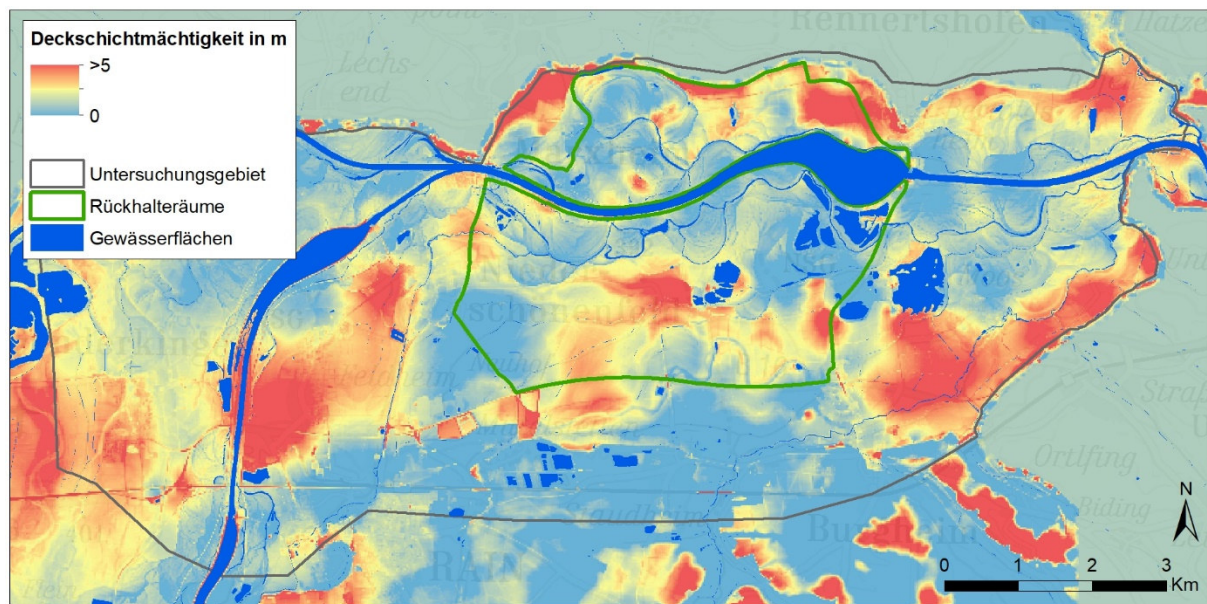


Abbildung 5: Berechnete Deckschichtmächtigkeit.

3.3.2 Quartär

- Datenbasis** Insgesamt wurde in rund 593 Bohrprofilen die Unterkante des Quartärs erbohrt. Dazu wurden noch 227 Stützpunkte aus dem Modell Genderkingen verwendet. Bohrungen, welche die Unterkante des Quartärs nicht erreichen, wurden mit einer Maximum-Bedingung in der Interpolation berücksichtigt. (Abbildung 6).
- Datenbasis** Die Quartären Schotter können im Untersuchungsgebiet in zwei Teilbereiche unterteilt werden. Im Donautalboden befinden sich würmeiszeitliche Niederterrassenschotter und postglaziale Terrassenschotter. In Richtung des südlichen Talhangs befinden sich die Hochterrassenschotter aus der Riss-Kaltzeit, welche sich bis zu 10 - 15 m über den Talboden erheben. Die Grenze zwischen den Teilbereichen ist oberflächlich an einer Geländestufe erkennbar. Die Mächtigkeit der Quartärschotter unterscheidet sich beidseitig der Geländestufe.
- Interpolation** Die Quartärbasis wurde analog zur Interpolation der Deckschichtunterkante in drei Schritten erzeugt (siehe Vorgehen unter Kapitel 3.3.1). Die Terrassengrenze zwischen Nieder- und Hochterrassenschotter wurde mit Hilfe von Störungslinien und Hilfspunkten in der Interpolation berücksichtigt. Über den Talrändern, in Gebieten welche nicht mit den Quartären Grundwasserleitern der Nieder- und Hochterrasse verbunden sind, wurde die Höhe der Quartärbasis entsprechend der Topographie aus dem DGM vorgegeben. Die verwendeten Bohrpunkte und Hilfspunkte sind in Abbildung 6 dargestellt. Als Interpolationsverfahren wurde die Kriging-Methode verwendet. Abbildung 7 zeigt die resultierende Quartärbasis.

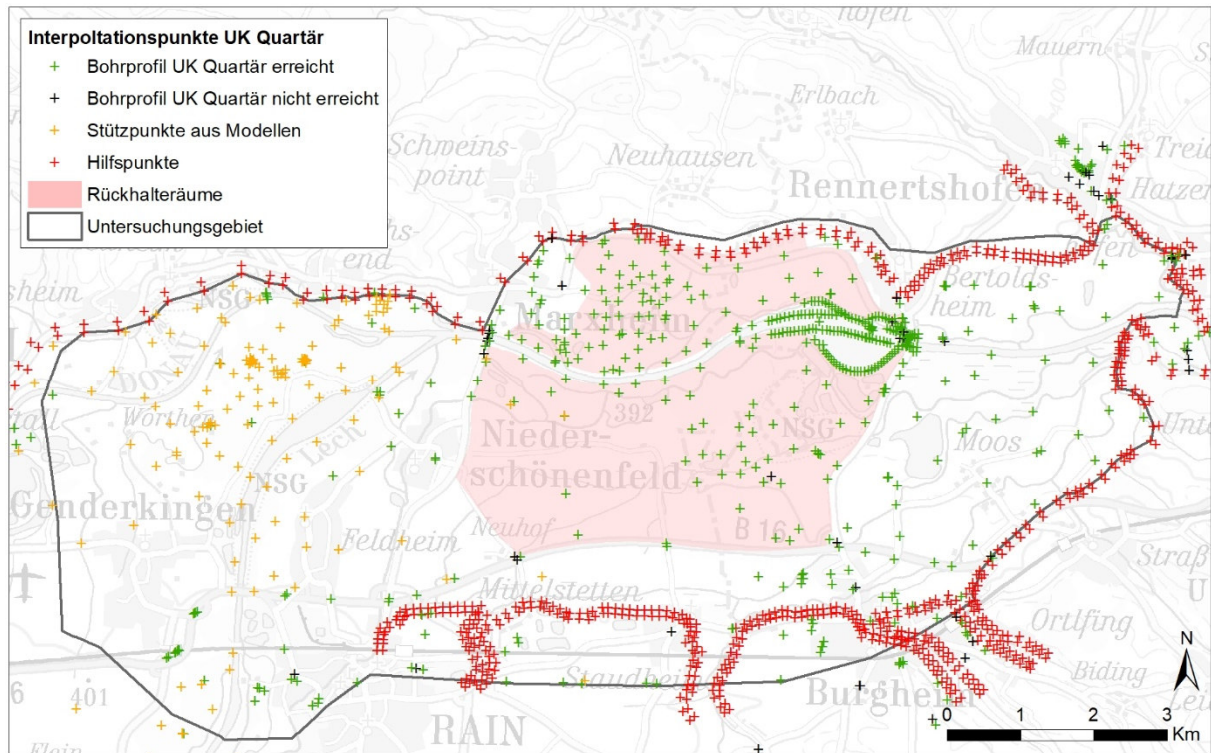


Abbildung 6: Für die Interpolation der Quartärbasis verwendete Bohr- und Hilfspunkte.

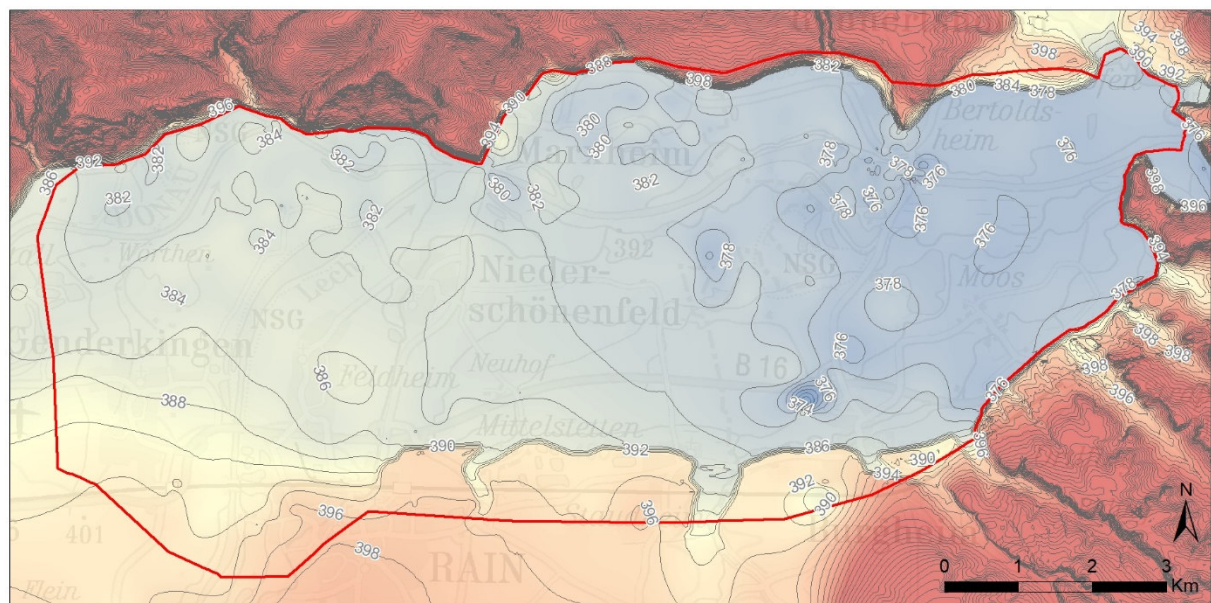


Abbildung 7: Höhengleichen der resultierenden Quartärbasis.

3.3.3 Tertiär

Datenbasis	<p>Für die Interpolation der Tertiärunterkante standen 22 Bohrungen mit Endteufe unter der Tertiärbasis zur Verfügung.</p> <p>Nördlich der Talebene liegen über dem Weissen Jura die Trümmernmassen des Rieskraters. Diese werden zeitlich dem Tertiär zugeordnet und weisen ebenfalls eine sehr geringe Durchlässigkeit auf. Die Trümmernmassen wurden nicht in die Interpolation miteinbezogen, alle Bohrdaten nördlich der Talebene wurden bei der Interpolation weggelassen (Abbildung 8).</p>
Interpolation	<p>Die Interpolation der Unterkante des Tertiärs erfolgte mit der Kriging-Methode. Die resultierende Tertiärbasis ist in Abbildung 9 dargestellt.</p>
Mächtigkeit	<p>Für die vertikale Zuströmung von Grundwasser aus dem darunterliegenden Karst des Weissen Jura ist die Mächtigkeit der Tertiärschicht von Bedeutung. Die aus der Differenz von Quartärbasis und Tertiärbasis berechnete Tertiärmächtigkeit ist in Abbildung 10 dargestellt.</p>

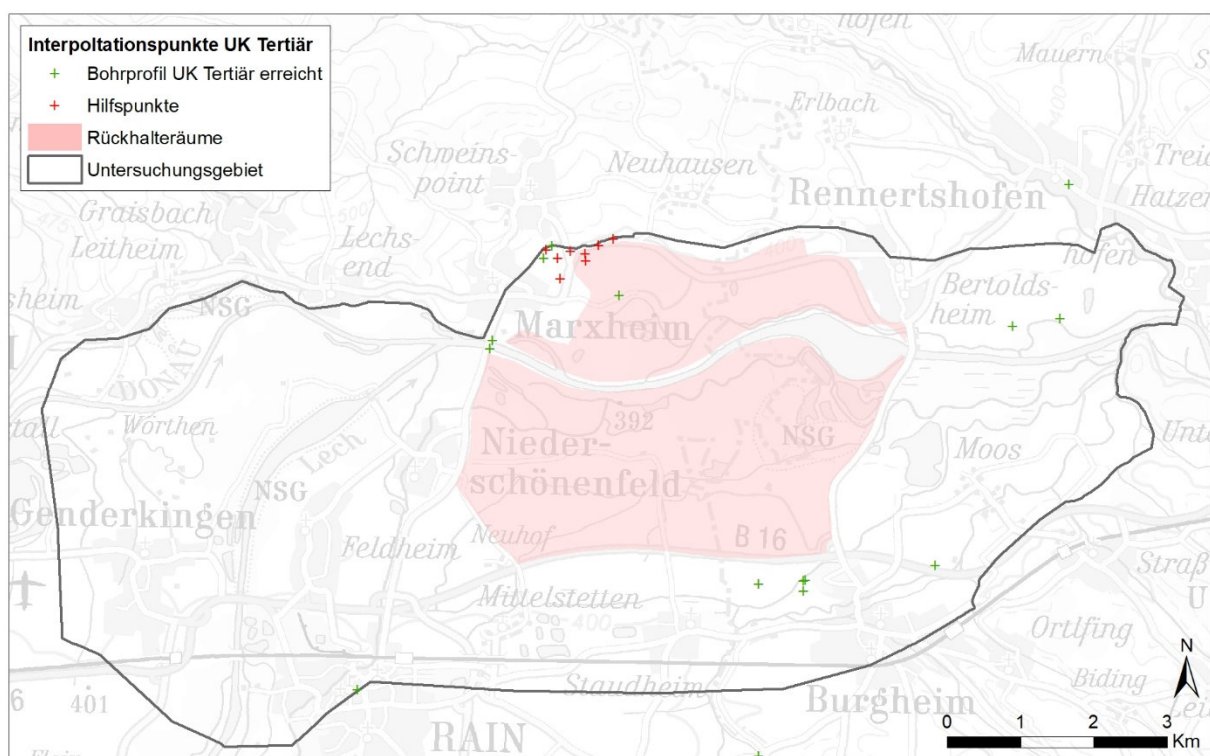


Abbildung 8: Für die Interpolation der Tertiärbasis verwendete Bohrpunkte.

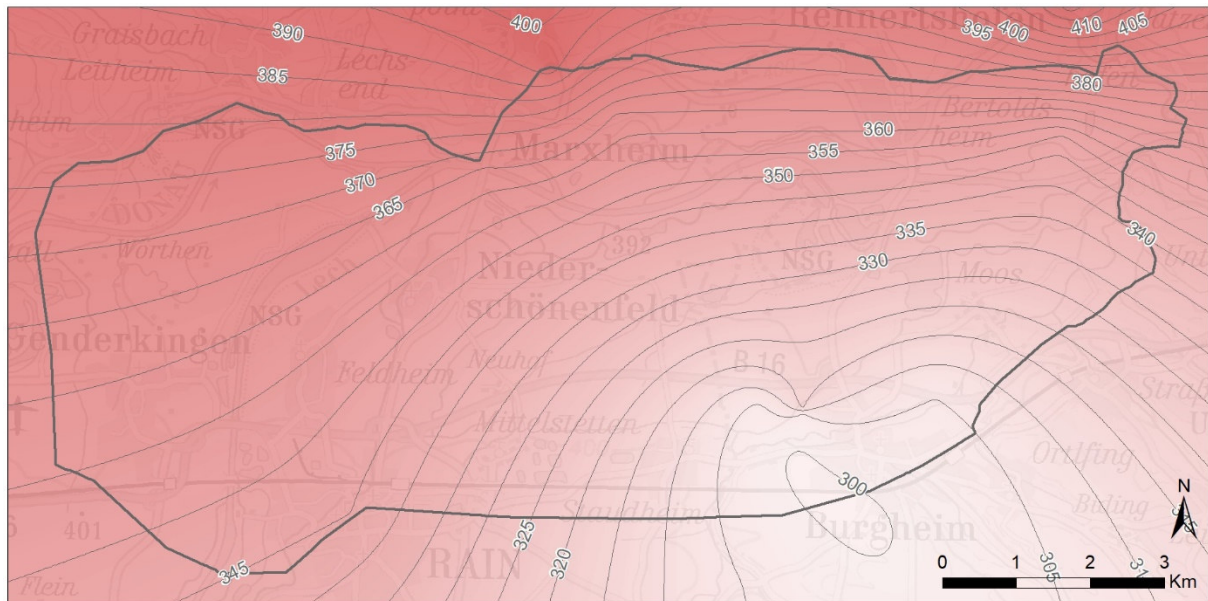


Abbildung 9: Höhengleichen der resultierenden Tertiärbasis.

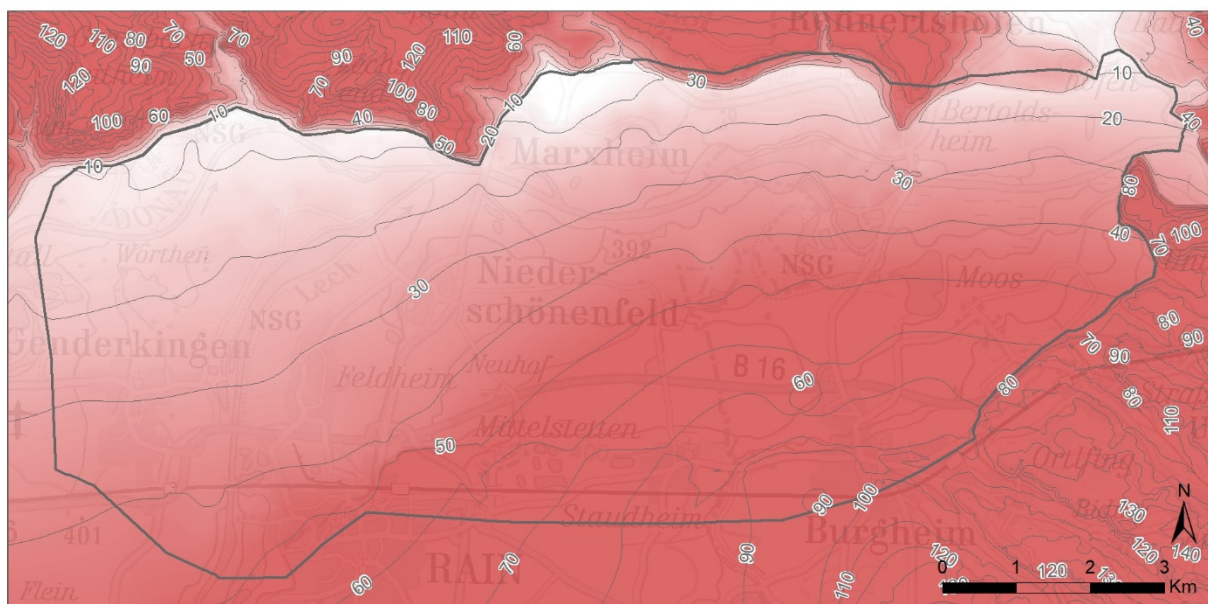


Abbildung 10: Mächtigkeit der Tertiärschichten.

3.3.4 Weisser Jura

Unter dem Tertiär liegen Schichten des Weissen Jura. Entlang des nördlichen Modellrandes ist die Tertiärschicht nicht durchgehend vorhanden und der Oberjura liegt gebietsweise direkt unter dem Quartär. Dies ist in einigen Bohrungen des BIS dokumentiert. Die Juraschichten müssen im hydrogeologischen Modell nicht nach unten abgegrenzt werden, da dies im Hinblick auf die Fragestellung nicht relevant ist.

3.4 Geohydraulische Kennwerte

3.4.1 Deckschicht

- Definition** Die Grenze zwischen Deckschicht und quartärem Grundwasserleiter wurde aufgrund der Materialbeschreibung im Schichtenverzeichnis bestimmt. Tonige, schluffige und organische Böden wurden zur Deckschicht, sandige und kiesige Böden zum Grundwasserleiter zugeordnet. Dabei gehört ein stark schluffiger Sand noch zur Deckschicht, ein schwach schluffiger Sand gehört bereits zum Grundwasserleiter.
- Durchlässigkeit** Aufgrund dieser Definition können die Deckschichten als schwach bis sehr schwach durchlässig bezeichnet werden. Die Zuordnung von kf-Werten erfolgte gemäss Prinz, Strauss [3][3]. Die Klassierung wurde aufgrund der Materialbezeichnung nach DIN vorgenommen:
- sehr schwach durchlässig:
Bodenarten T, U, UT, OT, kf-Wert $< 1 \times 10^{-8}$ m/s
 - schwach durchlässig:
Bodenarten U, SU, kf-Wert 1×10^{-6} bis 1×10^{-8} m/s
- Räumliche Verteilung** Abbildung 11 zeigt die Klassierung der Deckschichtdurchlässigkeiten. Es ist keine örtliche Unterscheidung feststellbar.

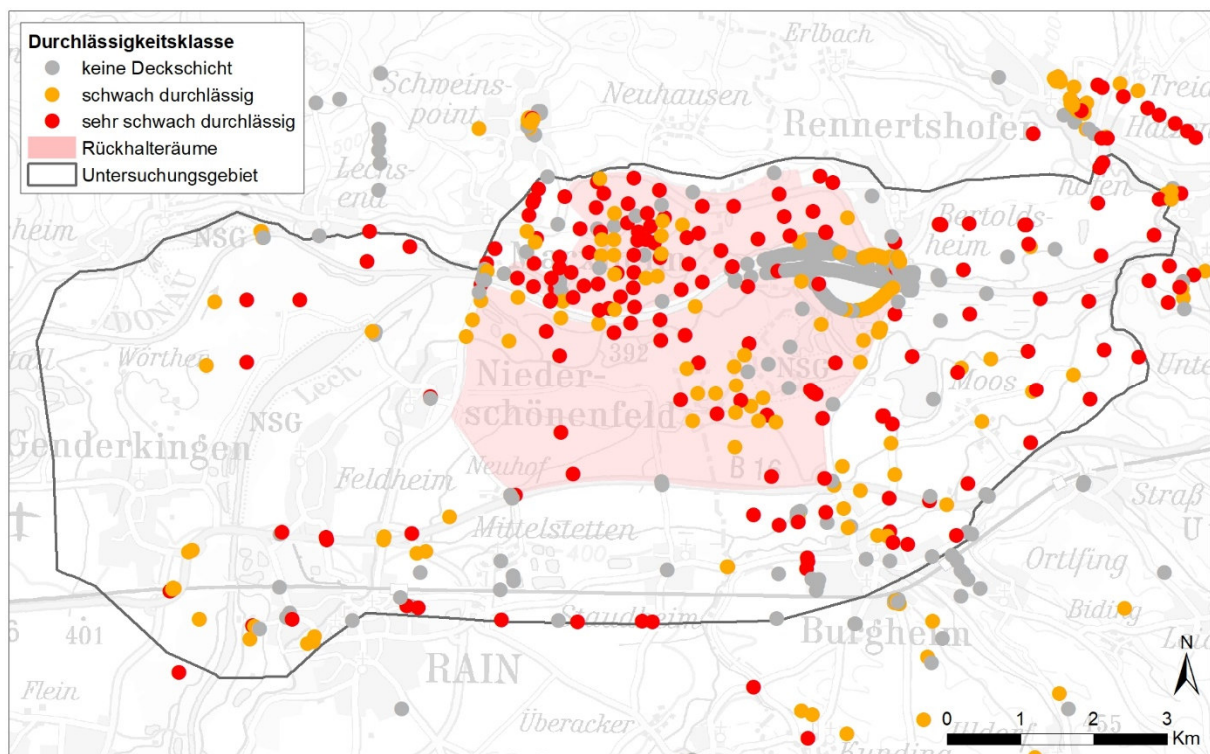


Abbildung 11: Klassierung der Deckschichtdurchlässigkeit aufgrund der Materialbeschreibung nach DIN.

3.4.2 Quartär

Durchlässigkeit In der BIS-Datenbank des LfU sind auch Pumpversuche dokumentiert. Allerdings beschränken sich die Angaben auf die Fördermenge und die damit erzielte Absenkung. Bei einigen Versuchen ist auch die Dauer bis zum Erreichen des stationären Zustandes angegeben. Aus den Angaben der BIS-Datenbank kann die Transmissivität wie folgt abgeschätzt werden (Logan [4]):

$$T = \frac{1,22 \cdot Q}{s}$$

T = Transmissivität [m²/s]

Q = Förderleistung im Pumpversuch [m³/s]

s = Absenkungsbetrag [m]

Bei bekannter Mächtigkeit des Grundwasserleiters kann die Durchlässigkeit (k_f-Wert) bestimmt werden. Da der Grundwasserstand während der Versuchsdurchführung nicht bekannt ist, wurde dazu die Gesamtmächtigkeit des Schotters verwendet.

$$k_f = \frac{T}{M}$$

k_f = Durchlässigkeit [m/s]

M = Mächtigkeit des Grundwasserleiters [m]

Die auf diese Weise ausgewerteten Pumpversuche sind in Abbildung 12 dargestellt. Da keine genaueren Dokumentationen der Versuche vorliegen, handelt es sich um grobe Schätzwerte. Die berechneten Durchlässigkeiten liegen zwischen 3.0 x 10⁻⁵ m/s – 2.2 x 10⁻² m/s. Das geometrische Mittel beträgt 4.3 x 10⁻³ m/s.

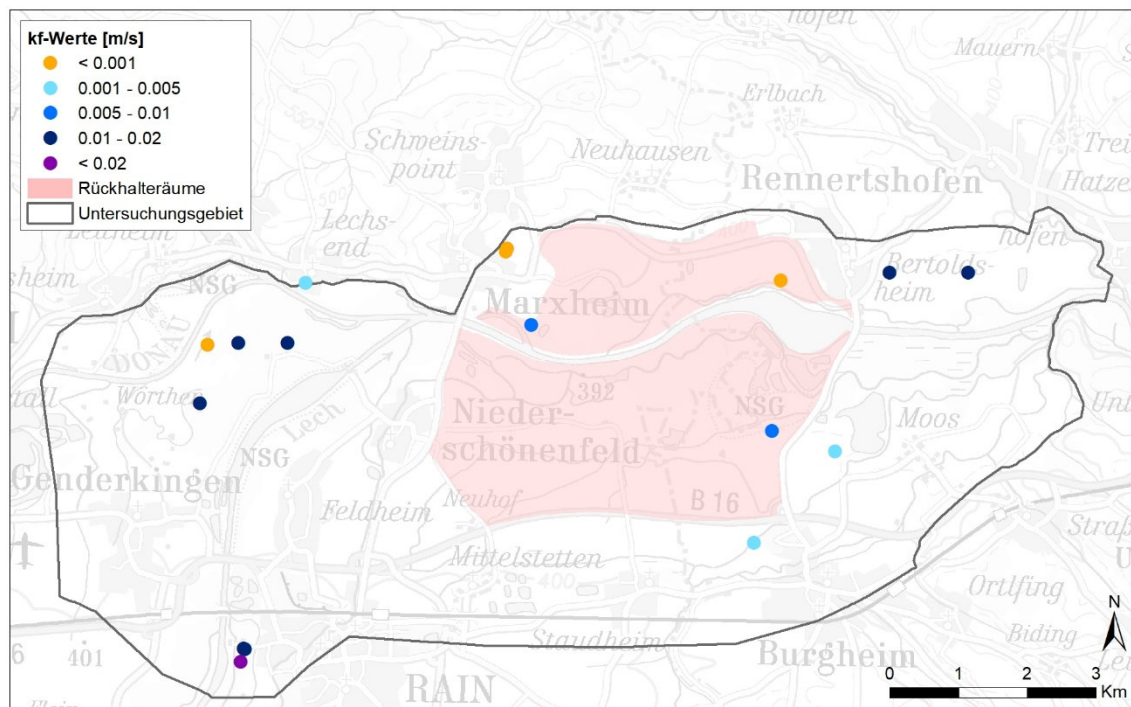


Abbildung 12: Ermittelte hydraulische Durchlässigkeiten (k_f -Werte) des quartären Grundwasserleiters in den Bohrpunkten des BIS.

Porosität	Untersuchungen zum Porenvolumen des Quartärschotters im Gebiet Genderkingen zeigten Werte zwischen 17 und 29% mit Mittelwerten von 20 – 21% [2]. Bei der Grundwassermodellierung werden folgende Parameter verwendet:
Spezifischer Speicherkoeffizient	Änderung des gespeicherten Wasservolumens im Kontrollvolumen bei Änderung der Druckhöhe bzw. der Wasserspiegelhöhe um eine Einheit. Bei gespannten Verhältnissen entspricht der spezifische Speicherkoeffizient der Kompressibilität von Wasser und Gestein und ist sehr klein ($\sim 10^{-5}$). Bei freiem Wasserspiegel entspricht der Speicherkoeffizient dem nutzbaren Porenvolumen im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels. In einem heterogenen Grundwasserleiter ist dieses Porenvolumen in der Regel deutlich kleiner als das gemessene Porenvolumen. Mit der instationären Kalibrierung des Grundwassermodells wird der Speicherkoeffizient kalibriert.
Durchflusswirksame Porosität	Porenvolumen welches in einem Querschnitt des Grundwasserleiters durchflossen wird. Die durchflusswirksame Porosität wird zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit benötigt. Die durchflusswirksame Porosität ist ebenfalls deutlich kleiner als das gesamte Porenvolumen.

3.4.3 Tertiär und Jura

Bedeutung	Die Durchlässigkeiten des Tertiär und des Jura sind von Bedeutung für den Zufluss über die Quartärbasis. Angaben zu den Durchlässigkeiten finden sich in verschiedenen Studien [1][5][6][7].
-----------	--

Tertiär

Das Tertiär besteht aus einer Abfolge von sandigen und mergeligen Schichten. Die Durchlässigkeiten der einzelnen Schichten unterscheiden sich stark. Für die schichtparallele Durchlässigkeit sind die sandigen, für die vertikale Durchlässigkeit die mergeligen Schichten maßgebend. Bei Durchlässigkeitsversuchen resultierten Werte zwischen 2×10^{-5} und 5×10^{-10} m/s [1]. Dabei ist zu beachten, dass bei Bohrlochversuchen jeweils die durchlässigste Schicht innerhalb des beprobten Abschnitts maßgebend ist. Für die vertikale Durchlässigkeit des Tertiärs wird für die Überlegungen zum Zufluss über die Quartärbasis deshalb ein k_f -Wert von 1×10^{-9} m/s verwendet.

Jura

Die Gesteine des Jura sind in der Fränkischen Alb verkarstet. In den Gebieten, wo quartäre Schotter direkt auf dem Jura aufliegen, sind Karstgrundwasserleiter und quartärer Grundwasserleiter miteinander verbunden. Dies ist in Teilbereichen am Nordrand des Untersuchungsgebiet der Fall. Die aus den Angaben der BIS-Datenbank berechneten Durchlässigkeiten (Verfahren vgl. Kapitel 3.4.2) liegen zwischen 2×10^{-3} bis 1×10^{-6} m/s. Eine Übersicht der ausgewerteten Pumpversuche ist in Abbildung 13 dargestellt. In der Literatur werden Durchlässigkeiten im Bereich von 5×10^{-3} bis 5×10^{-5} m/s [1] angegeben.

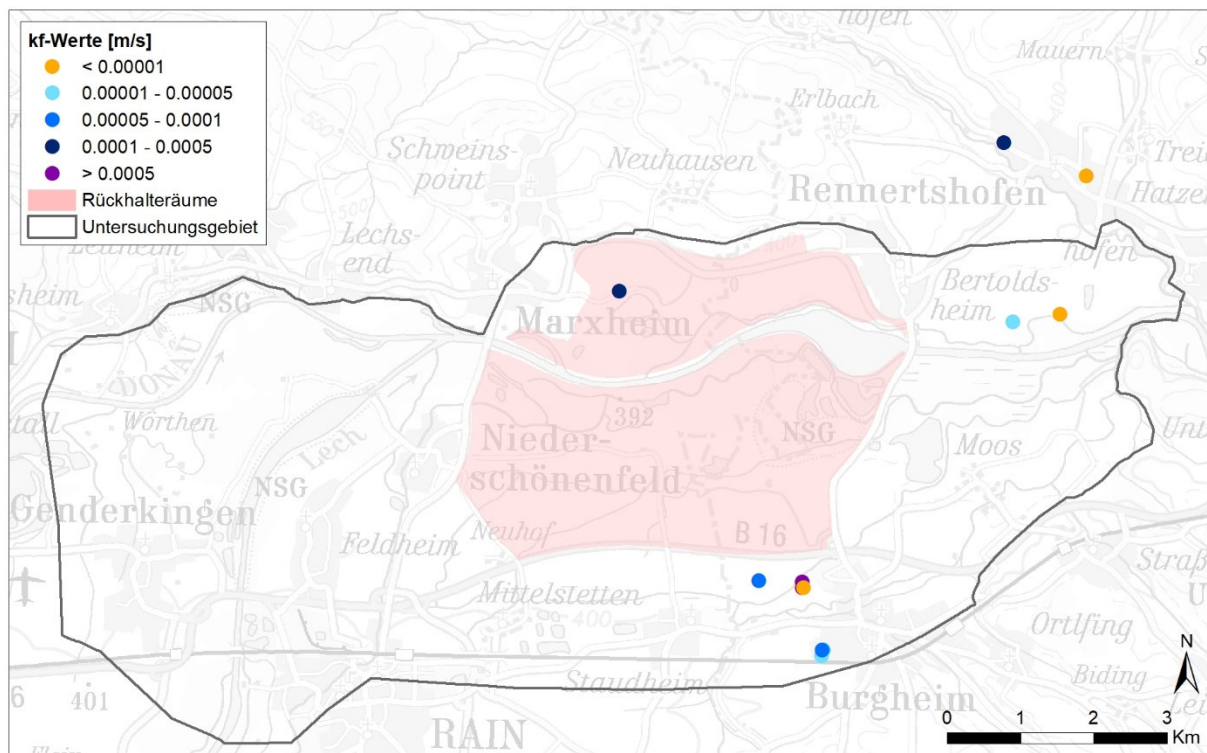


Abbildung 13: Ermittelte hydraulische Durchlässigkeiten (k_f -Werte) des Jura in den Bohrpunkten des BIS.

3.5 Grundwasserhydraulik

Quartärer
Grundwasserleiter

Aus dem Lechtal und der Hochterrasse am südlichen Talrand bei Rain strömen dem Donautal grössere Grundwassermengen zu. In den jüngeren Talschottern des Donautals strömt das Grundwasser vorwiegend in Längsrichtung des Tals. Westlich der Lechmündung wirkt die Donau als Vorfluter. Im Abschnitt zwischen der Lechmündung und der Staustufe Bertoldsheim liegt der Donaupegel über dem Grundwasserspiegel und das Grundwasser wird somit durch Donauwasser gespeist. Die Drainagegewässer, welche die Donau seitlich begleiten, wirken als Vorfluter. Unterhalb der Staustufe bis zum Oststrand bei Stepperg verengt sich der Querschnitt des Grundwasserleiters und das Grundwasser tritt in die Donau aus.

Karst-
Grundwasserleiter

Die Grundwasserpotentiale nehmen im Karstgrundwasserleiter innerhalb des Untersuchungsgebiets von Nordwesten nach Südosten ab (Abbildung 16). Entlang des nördlichen Talrandes ist das Karstwasserpotenzial höher als jenes des Schottergrundwasserleiters, es liegen somit gespannte Verhältnisse vor.

Messungen des
Grundwasserspiegels

Zur Beobachtung des Grundwasserspiegels wurden etwa 96 Bohrungen abgeteuft, in welchen regelmäßige Grundwasserspiegelmessungen vorliegen. Abbildung 15 zeigt die Messfrequenz in den Messstellen im Jahr 2017. In Abbildung 14 ist der interpolierte Grundwasserstand am 16.8.2017 dargestellt.

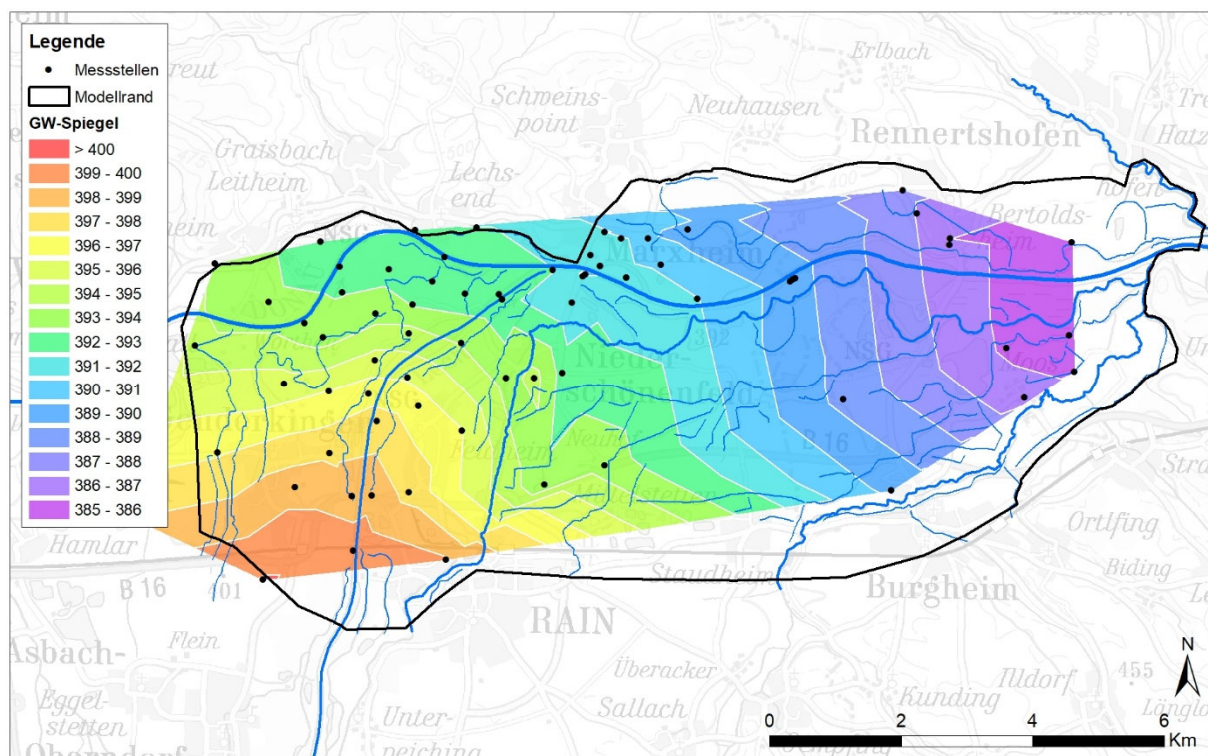


Abbildung 14:

Aus den Messungen vom 16.8.2017 linear interpolierte Grundwasserhöhengleichen im quartären Grundwasserleiter [mNN].

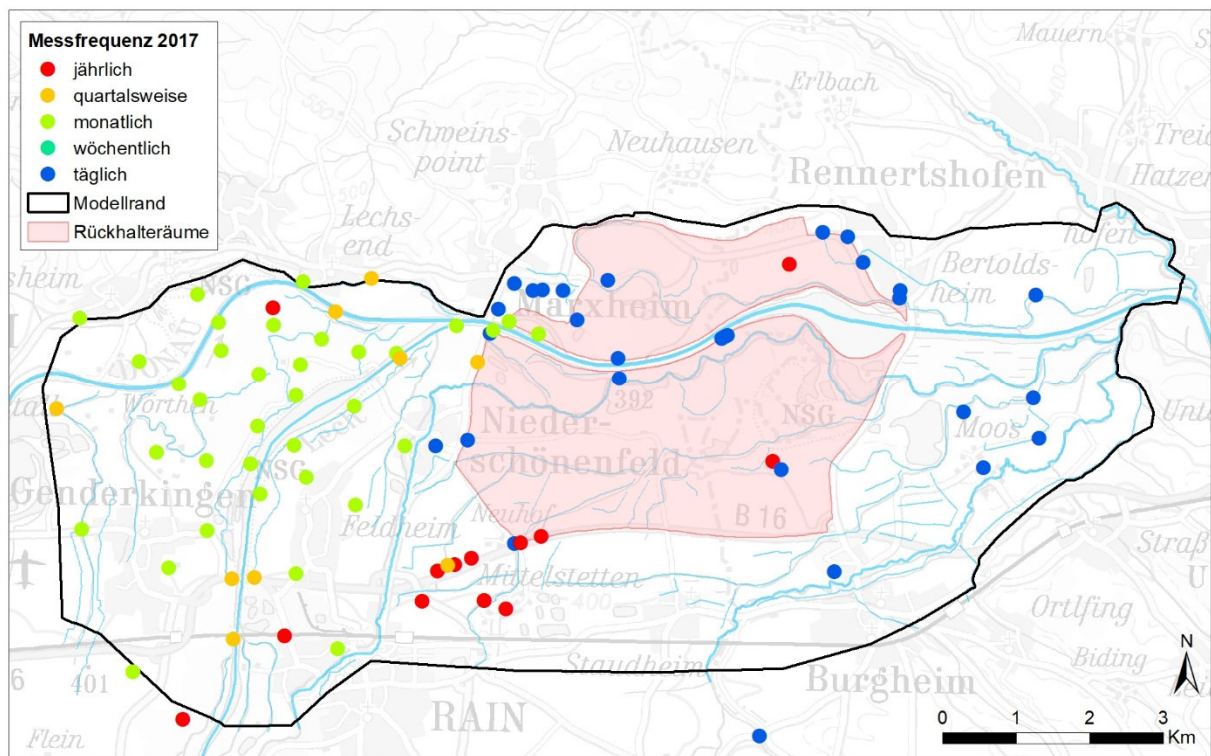


Abbildung 15: Messfrequenz der Grundwassermessstellen im Jahr 2017.

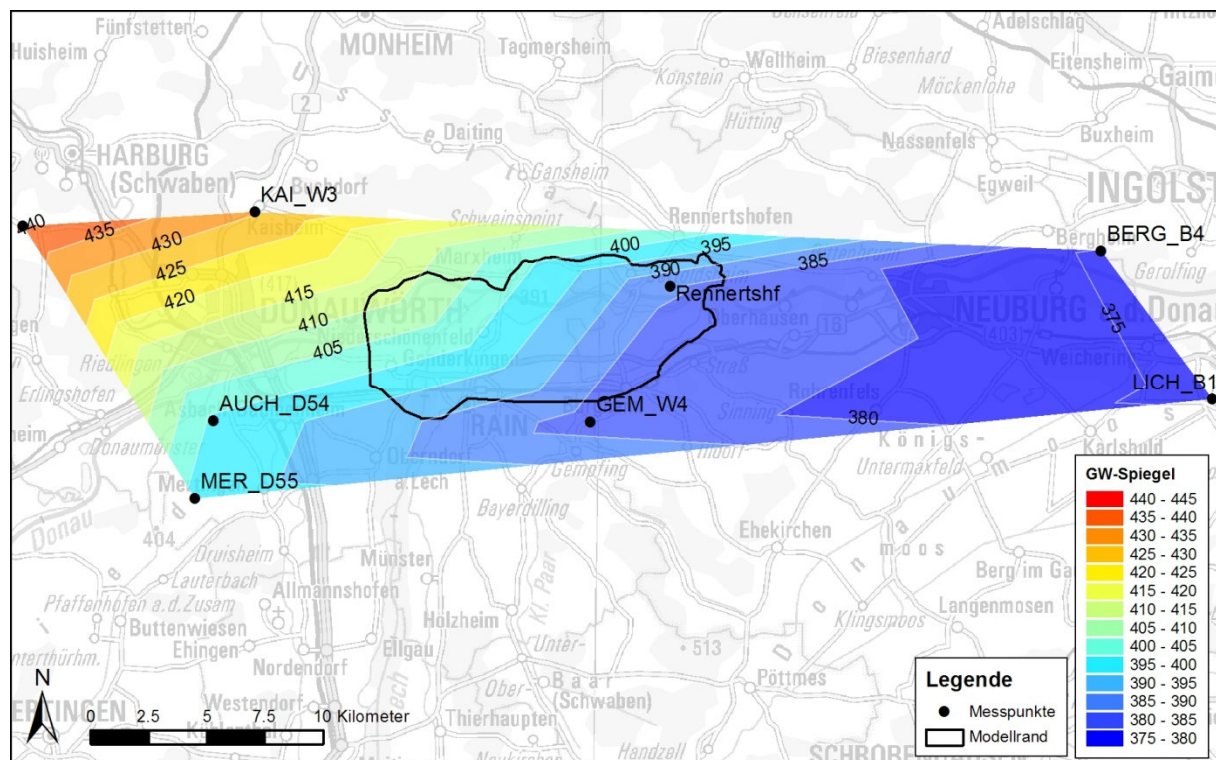


Abbildung 16: Aus den Messungen vom 16.8.2017 linear interpolierte Grundwasserhöhengleichen im Karstgrundwasserleiter (Oberjura) [mNN].

4 Modellkonzept des numerischen Modells

4.1 Abstraktion der Hydrogeologie

Modellkonzept	<p>Als Grundlage für die Abstraktion der Hydrogeologie wurde ein dreidimensionales geologisches Modell bestehend aus Deckschicht, Quartär, Tertiär und Jura erstellt.</p> <p>Das numerische Grundwassermodell wird im regionalen Maßstab mit einem horizontal - zweidimensionalen Modell nachgebildet. Das Modell umfasst den quartären Kiesgrundwasserleiter im Donautal. Die darunterliegenden Schichten des Tertiär und Weisser Jura bilden die Modellunterkante.</p> <p>Der vertikale Austausch zwischen den Grundwasserleitern des Weissen Jura und des Quartärs wird über eine Cauchy-Randbedingung unter Vorgabe des Karstwasserpotentials berücksichtigt. Der Zufluss wird auf die Bereiche mit geringmächtiger Tertiärschicht begrenzt.</p> <p>Der zweidimensionale Ansatz eignet sich auch für die Simulation von Polderszenarien. Für die vertikale Durchsickerung der Deckschichten kann eine Cauchy-Randbedingung verwendet werden. Die Unterströmung von Dichtwänden wird über den Durchlässigkeitsansatz der entsprechenden Elemente berücksichtigt. Da im hydrogeologischen Modell die dreidimensionale Geometrie erfasst ist, kann jederzeit auch ein dreidimensionales numerisches Modell erzeugt werden.</p>
Topografie	<p>Die Oberkante des Modells wird durch die Topografie gebildet. Die Topografie wurde dem aktuellen digitalen Geländemodell (Befliegung 2013 bis 2014) entnommen. Das Geländemodell weist eine Auflösung von 1 m auf. Die Genauigkeit in vertikaler Richtung beträgt ± 20 cm [8].</p>
Randbereiche	<p>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.</p>
Modelloberfläche	<p>Die Oberfläche des Modells wird als Sickerfläche vorgegeben. Bei Ansteigen des Grundwasserleiters über die Modelloberfläche wechselt an der betreffenden Stelle die Randbedingung zu einer Leakage-Randbedingung und das überschüssige Wasser verlässt das Modell.</p> <p>An Stellen mit artesisch gespanntem Grundwasser wird der Leakagewert der Sickerfläche als gering angenommen. Es werden zeitlich variable Speicherkoeffizienten verwendet: Solange der Wasserspiegel unter der Deckschicht liegt, wird die effektive Porosität als Speicherkoeffizient verwendet, wenn der Wasserspiegel die Deckschicht erreicht, kommt ein gespannter Speicherkoeffizient zum Einsatz.</p>

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 17).

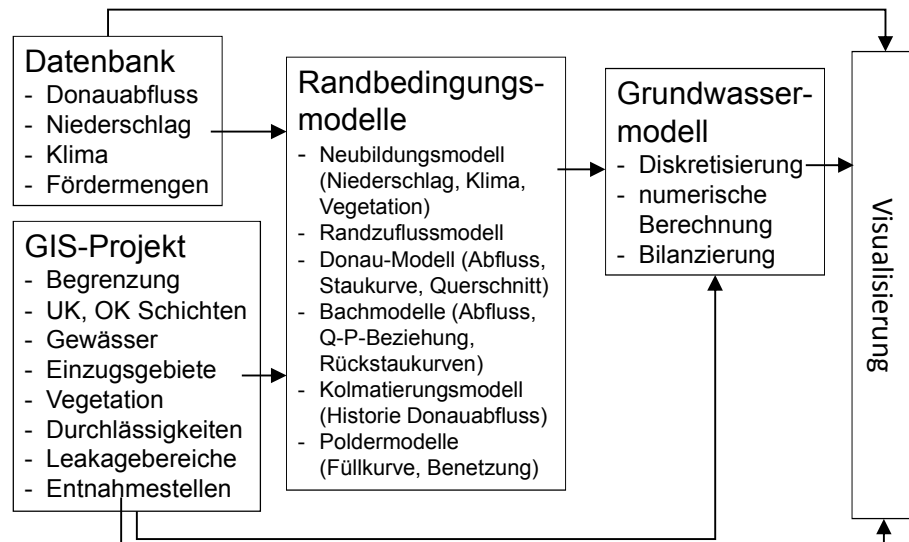


Abbildung 17: Trennung von konzeptionellem Modell und numerischem Modell.

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 weitgehend automatisch erzeugt. Dies ermöglicht es, über Sensitivitätsstudien mit geringem Aufwand die Auswirkungen verschiedener Modellannahmen zu untersuchen.

4.2 Modellraum und Bilanzraum

Abgrenzung

Der Modellraum umfasst den Bereich des Donautals zwischen Donauwörth und Steppberg. Die zwei zu untersuchenden Standorte des Flutpolders Bertoldsheim (Varianten Nord und Süd) liegen damit in genügendem Abstand zum westlichen und östlichen Modellrand. Nördlich reicht der Umgriff des Flutpolders zwischen Marxheim und Bertoldsheim bis nahe an den Modellrand. Da der Grundwasserleiter dort an praktisch undurchlässige Tertiärschichten anschliesst, ist eine Erweiterung nach Norden nicht sinnvoll. Der gewählte Modellumgriff zusammen mit dem geplanten Flutpolder ist in Abbildung 18 dargestellt. Der Bilanzraum wird im vorliegenden Fall gleich dem Modellraum gewählt.

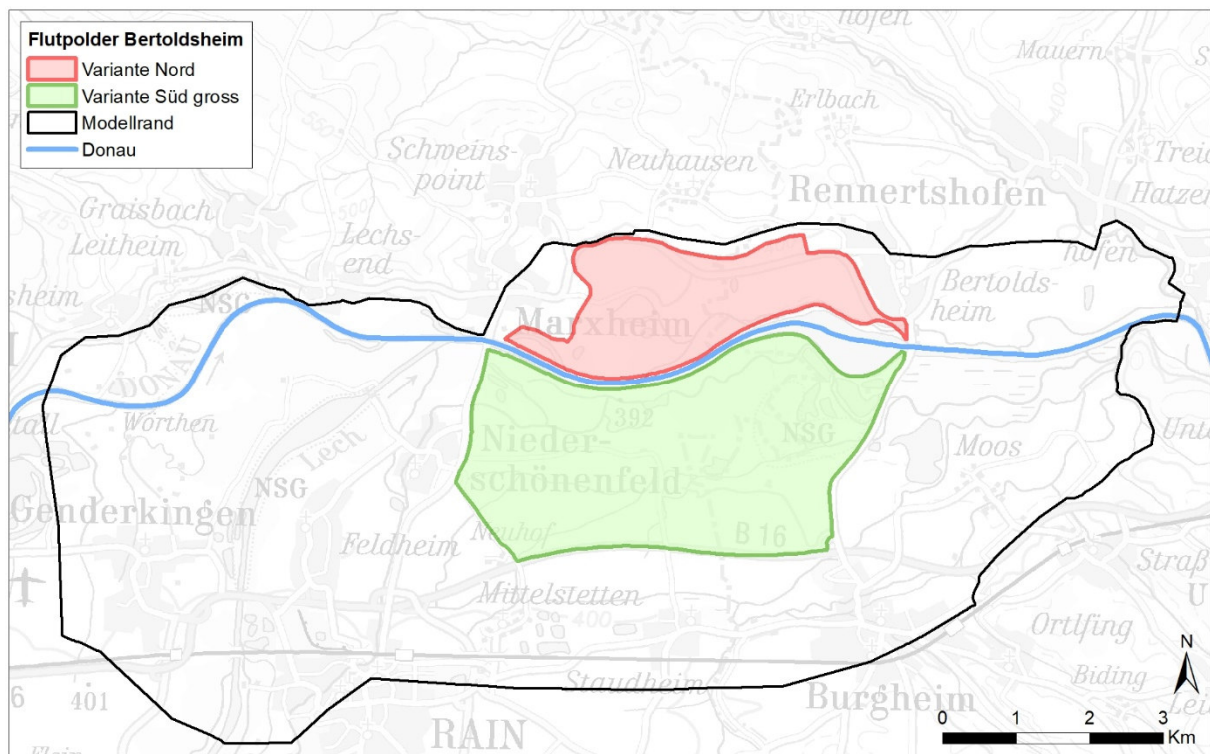


Abbildung 18: Modellraum und Lageplan des Flutpolders Bertoldsheim.

4.3 Seitlicher Modellrand

Die im Modell gewählten Randbedingungen am seitlichen Modellrand sind in Abbildung 19 abgebildet. Im Folgenden werden die angenommenen Modellränder begründet.

Nordrand

Die quartären Schotter werden nördlich des Donautals durch die Karstgebiete der Fränkischen Alb sowie durch die Trümmersmassen des Rieskraters begrenzt. Das Grundwassermodell wird deshalb an dieser Stelle begrenzt. Auf Wunsch des WWA wurde der Modellrand um die Bebauung der Gemeinden Marxheim und Bertoldsheim erweitert, auch wenn dort nicht eigentliche Grundwasserleiter vorhanden sind (vgl. Abbildung 20).

Entlang des nördlichen Modellrandes ist der vertikale Zustrom von Karstgrundwasser aus dem Weissen Jura vorherrschend. Zudem sind kleinere Zuflüsse von Grundwasser aus den direkt an das Modell anschließenden Talhängen sowie aus dem quartären Grundwasserleiter der Ussel bei Rennertshofen zu berücksichtigen.

Als Randbedingung (RB) im numerischen Modell wird der seitliche Zufluss über den Nordrand mit einer Zufluss-Randbedingung (RB 2. Art) modelliert. Die angewendeten Methoden zur Bestimmung des Seitenzuflusses sowie die räumliche und zeitliche Verteilung des Zuflusses auf den Modellrand werden im Kapitel 5 erläutert.

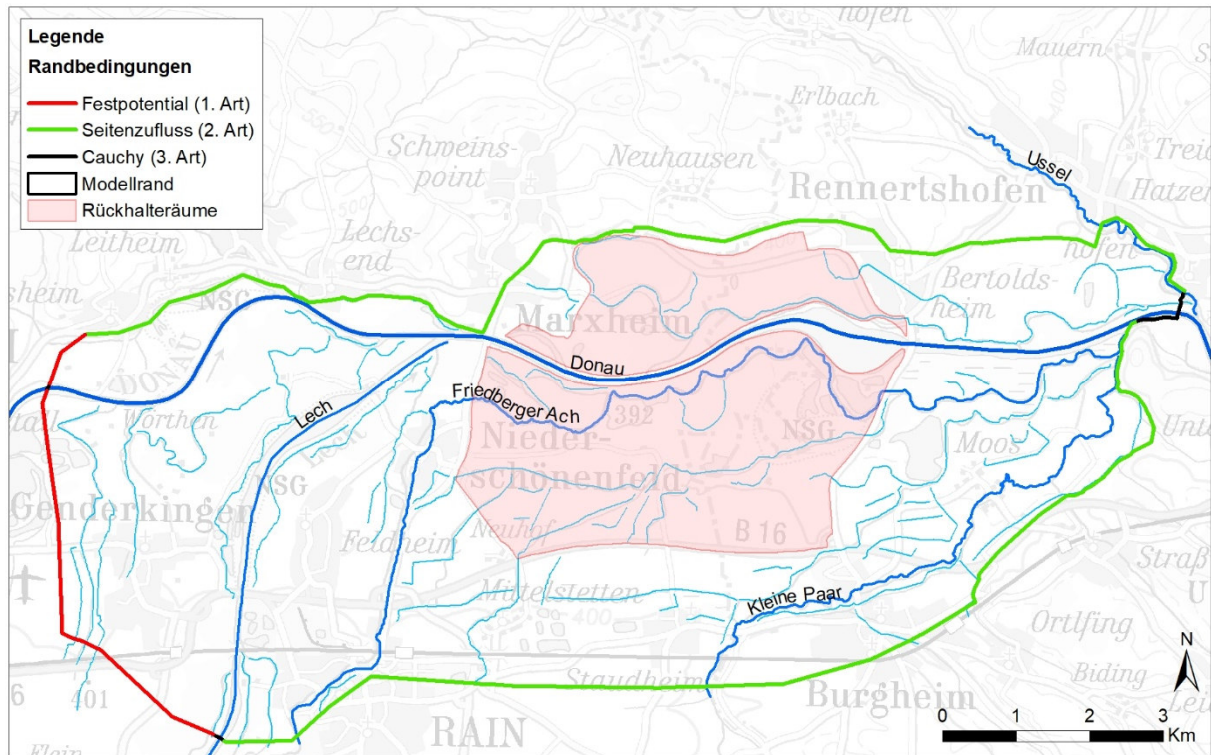


Abbildung 19: Seitliche Randbedingungen für das numerische Modell.

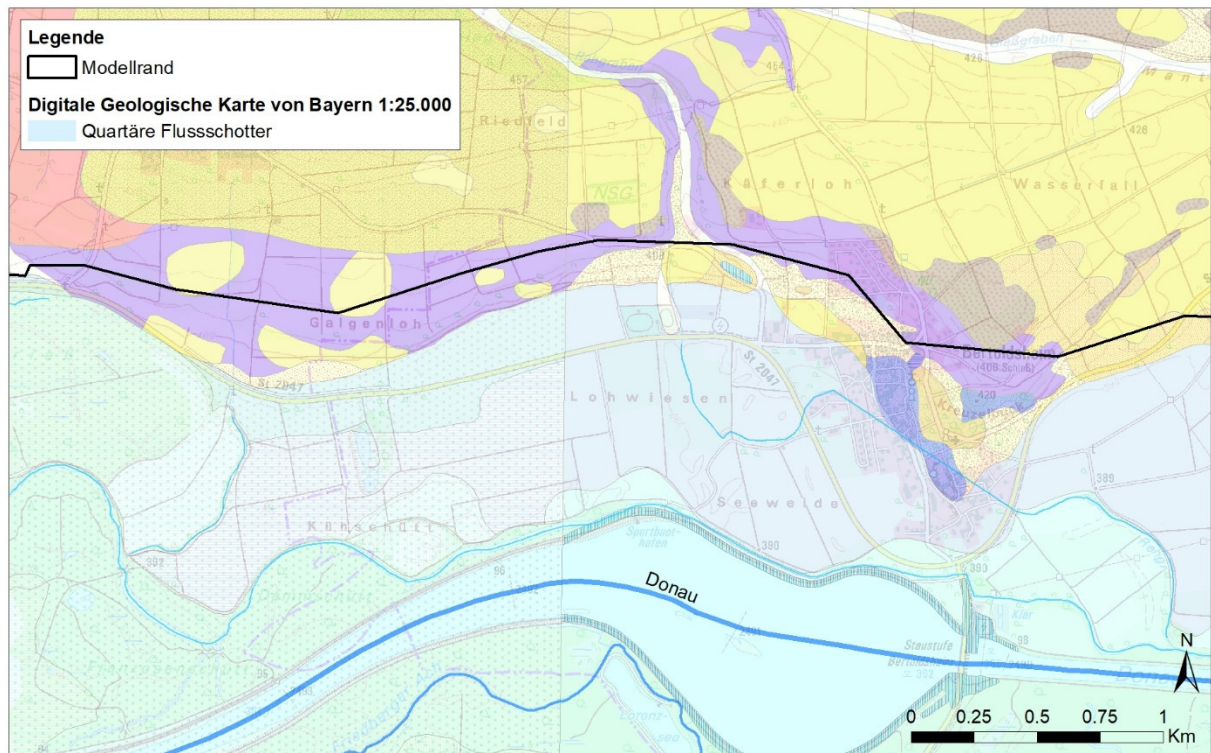


Abbildung 20: Ausschnitt aus der Geologischen Karte von Bayern 1:25'000 mit dem Modellrand im Bereich Bertoldsheim.

Ostrand

Am Ostrand bei Stepperg verengt sich der Querschnitt des Grundwasserleiters und das Grundwasser tritt in der Engstelle in die Donau aus. Der Ostrand wird daher im südlichen Teil als Cauchy-Randbedingung (3. Art) betrachtet. Als Wasserspiegelhöhe wird der Pegel der Donau vorgegeben. Im nördlichen Teil des Ostrands wird vorläufig kein Seitenzufluss vorgegeben (RB 2. Art mit Zufluss = 0). Über den Modellrand zufließendes Wasser wird in diesem Bereich durch die Ussel drainiert, sofern deren Sohlendurchlässigkeit genügend gross ist. Die Elementreihe östlich der Ussel wird lediglich für den Fall benötigt, dass die Sohlendurchlässigkeit klein ist.

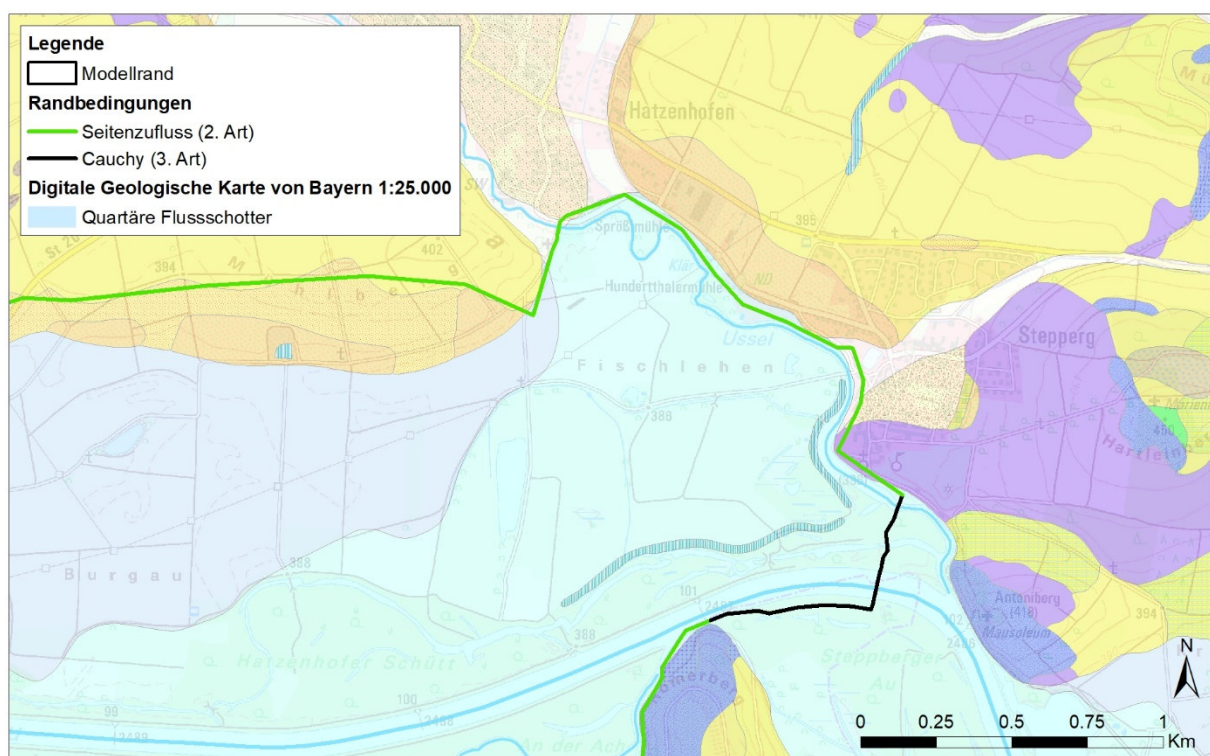


Abbildung 21: Ausschnitt aus der Geologischen Karte von Bayern 1:25'000 am Ostrand des Modells im Bereich Stepperg.

Südrand

Im Süden werden die quartären Schotter des Donautals durch die quartäre Hochterrasse zwischen Rain und Burgheim, sowie den Talrand der angrenzenden Tertiärhügel begrenzt. Ein Grundwasserzstrom in das Modellgebiet ist über die quartären Grundwasserleiter der seitlich zuströmenden Gewässer und der Hochterrasse, sowie aus den direkt an das Modell anschließenden Talhängen möglich. Der südliche Modellrand wird deshalb mit einer Zufluss-Randbedingung versehen.

Westrand

Der Westrand wurde über den Lech hinaus nach Westen gesetzt, damit der Einfluss der Randbedingung auf das Untersuchungsgebiet mit dem Flutpolder vernachlässigt werden kann. Das Grundwasser

strömt hier generell von Süden parallel zum Lech der Donau zu und schwenkt in Donaunähe in Richtung Osten.

Im Modell wird der Zufluss über den Westrand mit einer Fixpotentialrandbedingung (RB 1. Art) berücksichtigt. Damit wird eine höhere numerische Stabilität erreicht. Die Höhe des Fixpotentials wird aus den gemessenen Piezometerhöhen der Messstellen AI41, Ge46, Ge48 und G01 (vgl. Abbildung 22) abgeleitet.

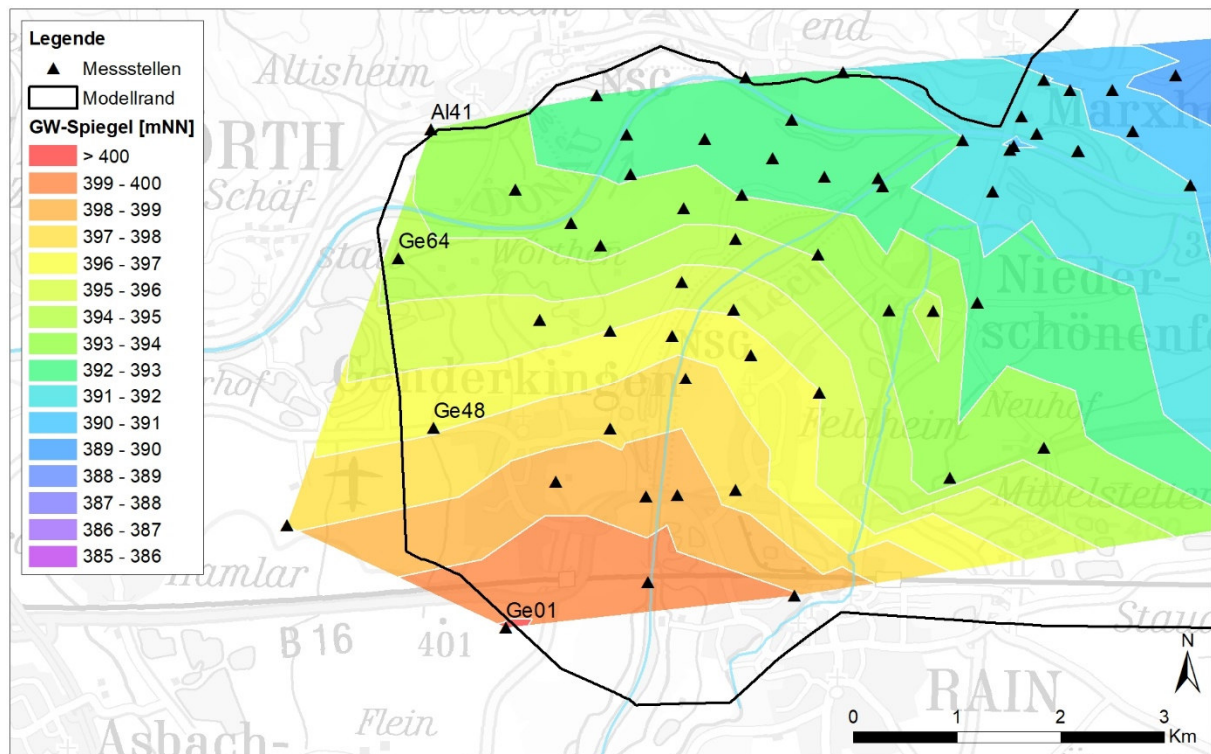


Abbildung 22: Aus den Messungen vom 16.8.2017 linear interpolierte Grundwasserhöhengleichen am Westrand des Modells.

5 Randbedingungen

5.1 Gewässer

Cauchy-Randbedingung

Zur Quantifizierung des Wasseraustauschs zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser wird im Grundwassermodell eine Cauchy-Randbedingung (Randbedingung 3. Art) 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 vorgegeben:

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

Q: Zugegebene oder entnommene Wassermenge [m³/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].

Leakage

Die eingesetzte Cauchy-Randbedingung reduziert die komplexen Vorgänge des Wasseraustauschs zwischen den Oberflächengewässern und Grundwasser auf die treibende Wasserspiegeldifferenz und einen einzigen Parameter, den Leakagewert. Der Leakagewert bildet insbesondere die benetzte Fläche und die Durchlässigkeit der Gerinnesohle ab. Bei Drainagegerinnen wird der Leakagewert für die Infiltration zu Null gesetzt, da dort nur Exfiltration auftritt.

Anfangswerte

Als Anfangswert der Leakage wird bei Drainagegewässern ein Wert von 1 m/d eingesetzt. Dies entspricht einem Gewässer mit 3 m Breite und einer 0.3 m dicken Kolmationsschicht mit einer Durchlässigkeit von 1×10^{-6} m/s. Bei der Donau unterscheidet sich der Leakagewert zwischen den eingestauten und den frei fließenden Abschnitten. Während in den Stauräumen der Leakagewert klein (Anfangswert ebenfalls 1 m/d) ist, wird er in den frei fließenden Abschnitten entsprechend der größeren Gerinnebreite etwa 100-mal höher sein als in den Drainagegerinnen.

5.1.1 Höhenlage der Wasseroberfläche

Gewässernetz

Die im numerischen Grundwassermodell berücksichtigten Fließgewässer sind in Abbildung 23 dargestellt. Noch kleinere Drainagegerinne können vernachlässigt werden.

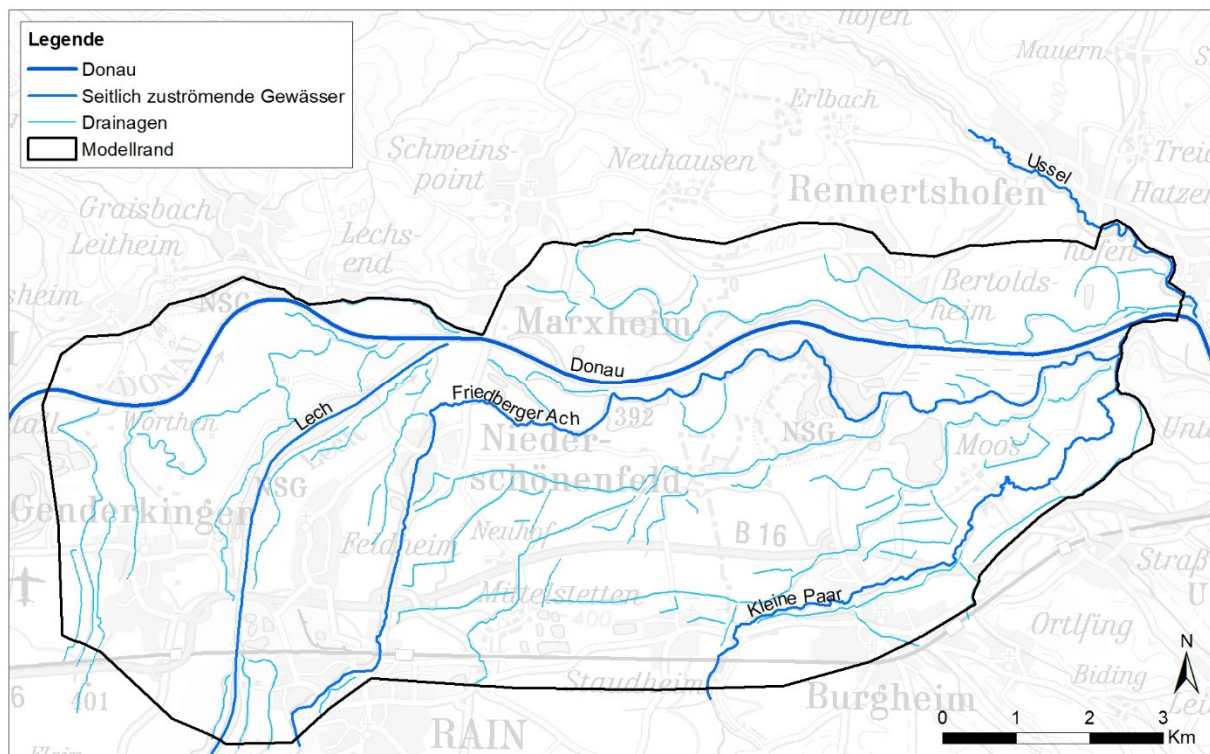


Abbildung 23: Im numerischen Grundwassermodell berücksichtigte Fließgewässer.

Während der betrachteten Hochwasserereignisse werden die Wasserspiegelhöhen der Oberflächengewässer aus dem hydraulischen Modell übernommen.

Hydraulische Modelle

Die hydraulischen Modelle können aufgrund ihrer langen Rechenzeiten nur kurze Zeitabschnitte umfassen. Im Grundwassermodell sind bei Hochwasserereignissen jedoch Vor- und Nachlaufzeiten zu berücksichtigen. Für diese Zeiträume, sowie für die Kalibrierung bei Mittel- und Niederwasserständen werden im hydraulischen Modell Abfluss-Pegel-Beziehungen der wichtigsten Gewässer hergeleitet.

Das hydraulische Modell deckt nicht die gesamte Fläche des Grundwassermodells ab (Abbildung 24). Zudem sind die Drainagegerinne, welche im Grundwassermodell eine große Rolle spielen, teilweise im hydraulischen Modell nicht im Detail berücksichtigt. Die im hydraulischen Modell nicht enthaltenen Wasserspiegelhöhen werden deshalb mit anderen Methoden berechnet.

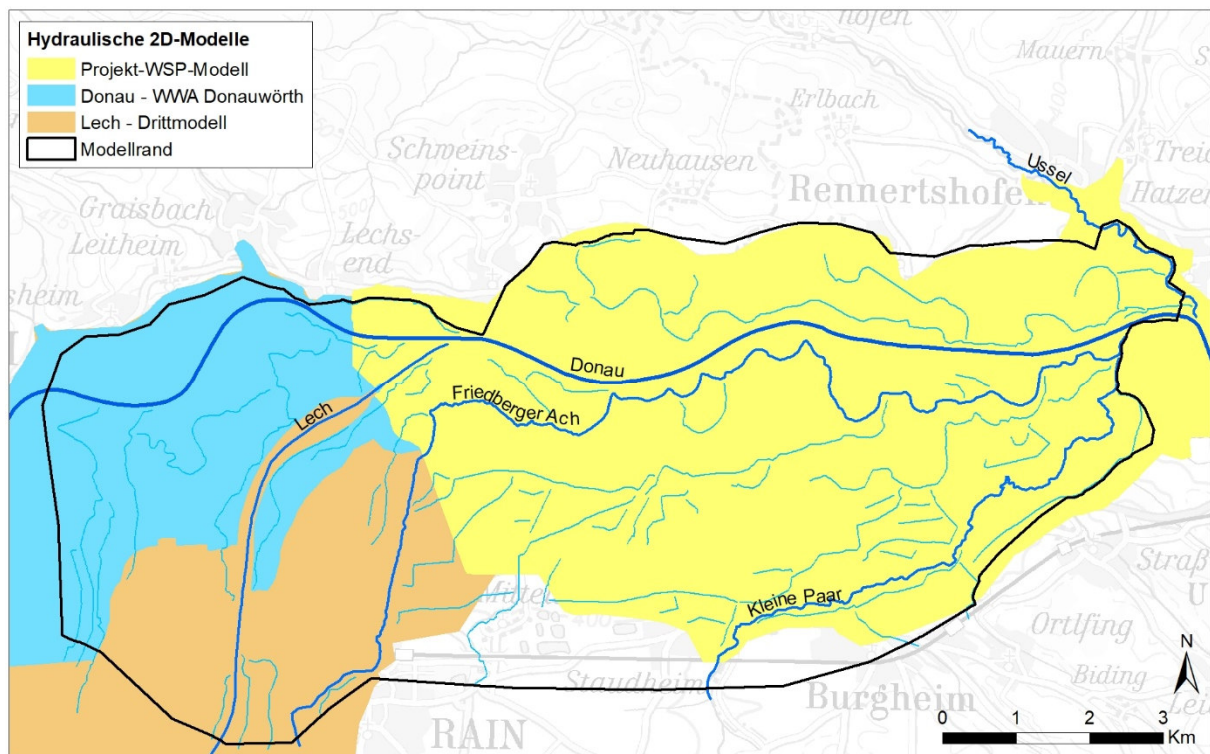


Abbildung 24: Abdeckung des Modellgebiets durch das hydraulische 2D-Modell.

Zur ergänzenden Ermittlung der im Modell vorzugegebenen Oberflächengewässer-Wasserspiegel in den nicht durch das hydraulische Modell abgedeckten Flächen (blaue, braune und weiße Flächen in Abbildung 24), wird folgendes Vorgehen gewählt:

- | | |
|-----------------|---|
| Donau | Für die Fließstrecke der Donau westlich des hydraulischen Modells (blaue Fläche) liegen Abfluss-Pegel-Beziehungen aus dem bestehenden Modell des WWA Donauwörth vor. Diese werden für die Berechnungen übernommen. |
| Lech | Aus dem bestehenden hydraulischen 2D-Modell der Lech werden in einem Abstand von 200 m Querprofile der Gewässersohle abgegriffen. In diesen Querprofilen werden die Abfluss-Pegel-Beziehungen in einem hydraulischen 1D-Modell mit HEC-RAS berechnet. Zwischen den Profilen wird der Wasserspiegel linear interpoliert. |
| Friedberger Ach | Für die Friedberger Ach werden die Abfluss-Pegel-Beziehungen im Projekt-Wasserspiegel-Modell ermittelt. Das Modell wird in diesem Bereich gegenüber der Abbildung 24 erweitert. Im Teilabschnitt zwischen dem Gewässerpegel Mx37 und der Mündung werden die Wasserspiegel der Friedberger Ach aus den Messwerten übernommen. Zwischen den messpunkten wird der Wasserspiegel linear interpoliert. |
| Kleine Paar | Für den Gewässerabschnitt ausserhalb des hydraulischen 2D-Modells bis zum südlichen Modellrand, wird die Wasserspiegellage, ausgehend vom am weitesten im Oberstrom gelegenen Modellquer- |

schnitt des hydraulischen Modells parallel zum Gefälle des DGM extrapoliert.

Zeitabhängig berücksichtigte Gewässer

Abflussmessungen

Die in Abbildung 23 aufgeführten seitlich zum Modellgebiet zuströmenden Gewässer werden im Grundwassermodell mit zeitabhängigen Wasserständen vorgegeben. Die zur Bestimmung der Wasserspiegel verwendeten Abflussmessstellen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Für die Friedberger Ach und die Kleine Paar liegen keine Abflussmessungen vor. Die benötigten Abflussganglinien werden daher aus Niederschlag-Abfluss-Modellen (siehe Kapitel 5.2, N-A-Modell) generiert.

Tabelle 1:

Verwendete Abflussganglinien.

Gewässer	Abflussganglinie
Donau	10039802 Donau, Donauwörth
Lech	12006000 Lech, Augsburg
Friedberger Ach	N-A-Modell
Kleine Paar	N-A-Modell
Ussel	13191030 Ussel, Rennertshofen

Drainagen

Für die im Grundwassermodell mit zeitlich konstantem Wasserspiegel berücksichtigten Drainagegerinne (Abbildung 23) werden die Wasserspiegelhöhen aus dem Digitalen Geländemodell (DGM) bestimmt. Das DGM ist für das gesamte Modellgebiet in einer Auflösung von 1x1 m vorhanden. Allerdings weisen die darin abgebildeten Wasserspiegel verfahrensbedingt kleinräumige Schwankungen auf (Abbildung 25). Durch geeignete Mittelungsmethoden (zentriertes gleitendes Mittel entlang der Gewässerachse) können diese Schwankungen jedoch ausgeglichen werden.

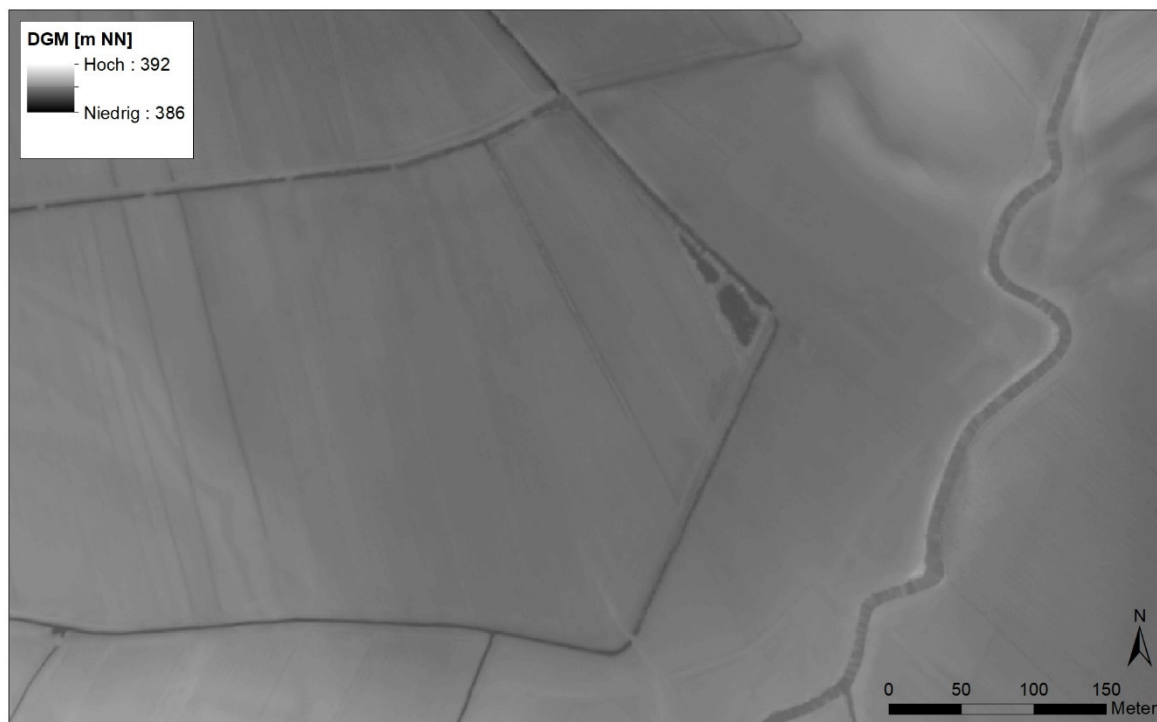


Abbildung 25: Ausschnitt aus dem digitalen Geländemodell.

5.2 Niederschlag-Abfluss-Modell

5.2.1 Methodik

Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Für die Friedberger Ach und die Kleine Paar liegen keine Abflussmessungen vor. Die zur Berechnung der Cauchy-Randbedingung benötigten Abflussganglinien dieser Gewässer werden daher mittels Niederschlag-Abfluss-Modellen generiert. Als Methode wird das deterministische Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) [14] verwendet. LARSIM ermöglicht eine prozess- und flächendetaillierte Simulation der wesentlichen Komponenten des Wasserkreislaufs in variabler zeitlicher Auflösung. Das Modellschema der Wasserhaushaltsmodellierung in LARSIM ist in Abbildung 26 dargestellt.

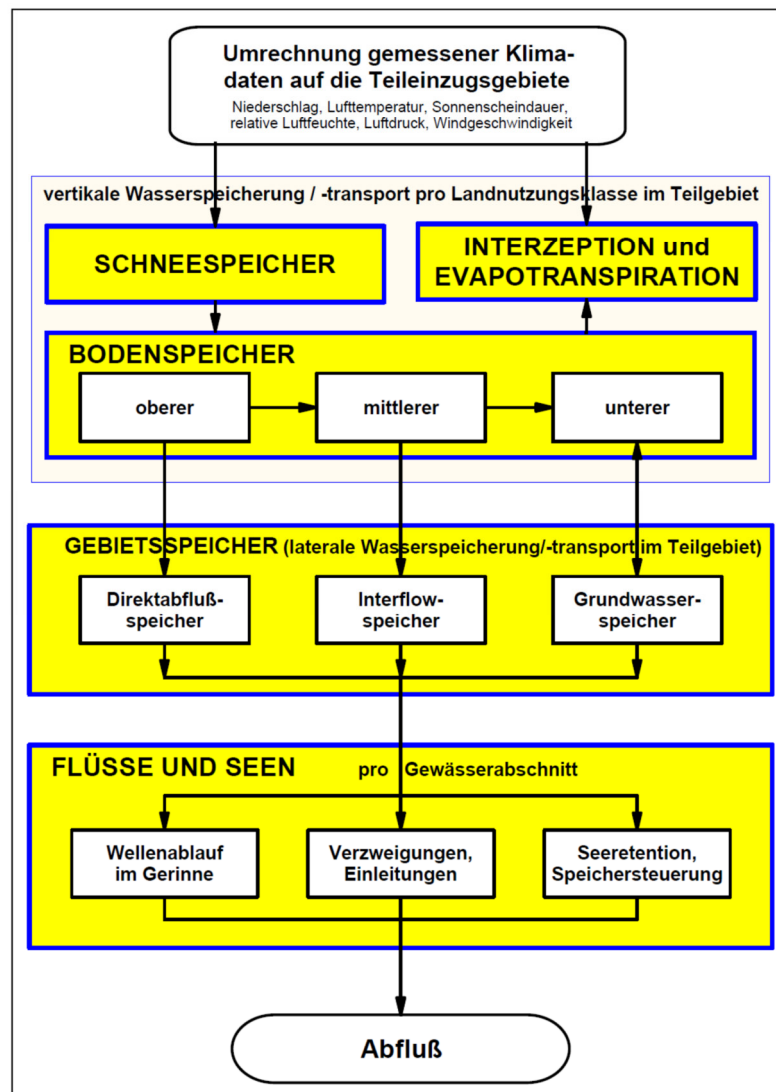


Abbildung 26: Modellschema der Wasserhaushaltsmodellierung in LARSIM [10].

Einzugsgebiete Die Einzugsgebiete (EZG) der Friedberger Ach und der Kleinen Paar wurden anhand der amtlichen Gewässer-Einzugsgebiete des LfU bestimmt. Abbildung 27 zeigt die Einzugsgebiete der Friedberger Ach (unten rechts) und der Kleinen Paar (unten links) zusammen mit dem Modellrand des Grundwassermodells.

Gebietsdaten Wenn ein neues LARSIM Modell für ein Einzugsgebiet erstellt wird, müssen zunächst die Gebietsdaten (tape12) ermittelt und für die Nutzung in LARSIM aufbereitet werden. Die Gebietsdaten umfassen die Aufteilung des Flussgebiets in Teilgebiete (TGB), die Fliessvernetzung zwischen den TGB, die Parametrisierung der Landnutzungs-Boden-Kompartimente und die Parametrisierung der Abflusskonzentration.

5.2.2 Gewässernetz

Teilgebiete	<p>Die Flächenaufteilung in Teilgebiete kann entweder über reale hydrologische Teileinzugsgebiete oder über eine Rasterung vorgenommen werden. Im vorliegenden Fall wurde eine Rasterung vorgenommen.</p> <p>Für das Einzugsgebiet der Friedberger Ach enthält das LARSIM Modell eine rasterorientierte Flächenaufteilung von 1.0 km x 1.0 km. Das Einzugsgebiet der Kleinen Paar wurde in ein Raster mit einer Rasterweite von 0.5 km x 0.5 km unterteilt. Die Rastergeometrie orientiert sich am Gauß-Krüger-Koordinatensystem. Die Rasterkanten liegen parallel zu den Rechts- und Hochwerten. Nur Rasterzellen die zu mehr als 50% im Einzugsgebiet liegen werden berücksichtigt. Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen die Flächenaufteilung der Einzugsgebiete der Friedberger Ach und der Kleinen Paar.</p>
Fliessvernetzung	<p>Die Fliessvernetzung erfolgt über eine Verschneidung der Teilgebietsflächen mit dem Gewässernetz. Das Gewässernetz wurde aus dem Digitalen Geländemodell mit 50 m Gitterweite (DGM 50 m) abgeleitet. Dazu wurde in einem ersten Schritt das DGM 50 m auf die Raster-Auflösung der entsprechenden Flächenaufteilung in LARSIM vergrößert. In einem nächsten Schritt wurden im DGM vorhandene Senken gefüllt, wodurch verhindert wird, dass an diesen Stellen die Fliessrichtung unterbrochen wird. Anschliessend wurde die Fliessrichtung bestimmt. Dabei wurde mittels des D8-Algorithmus [21] ein Raster der Fliessrichtung von jeder Zelle in die acht umgebenen Zellen errechnet. Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen die Fliessvernetzungen zwischen den TGB. Die Fliessvernetzungen wurden mit dem natürlichen Gewässerfliessnetz verglichen und manuell korrigiert.</p>
Gerinneigenschaften	<p>Zusätzlich werden für jedes TGB Angaben zur Gerinnegeometrie (Gerinnetiefe- und breite) benötigt. Diese Informationen wurden anhand von Ortsbegehungen und einer Auswertung der Orthofotos ermittelt.</p>

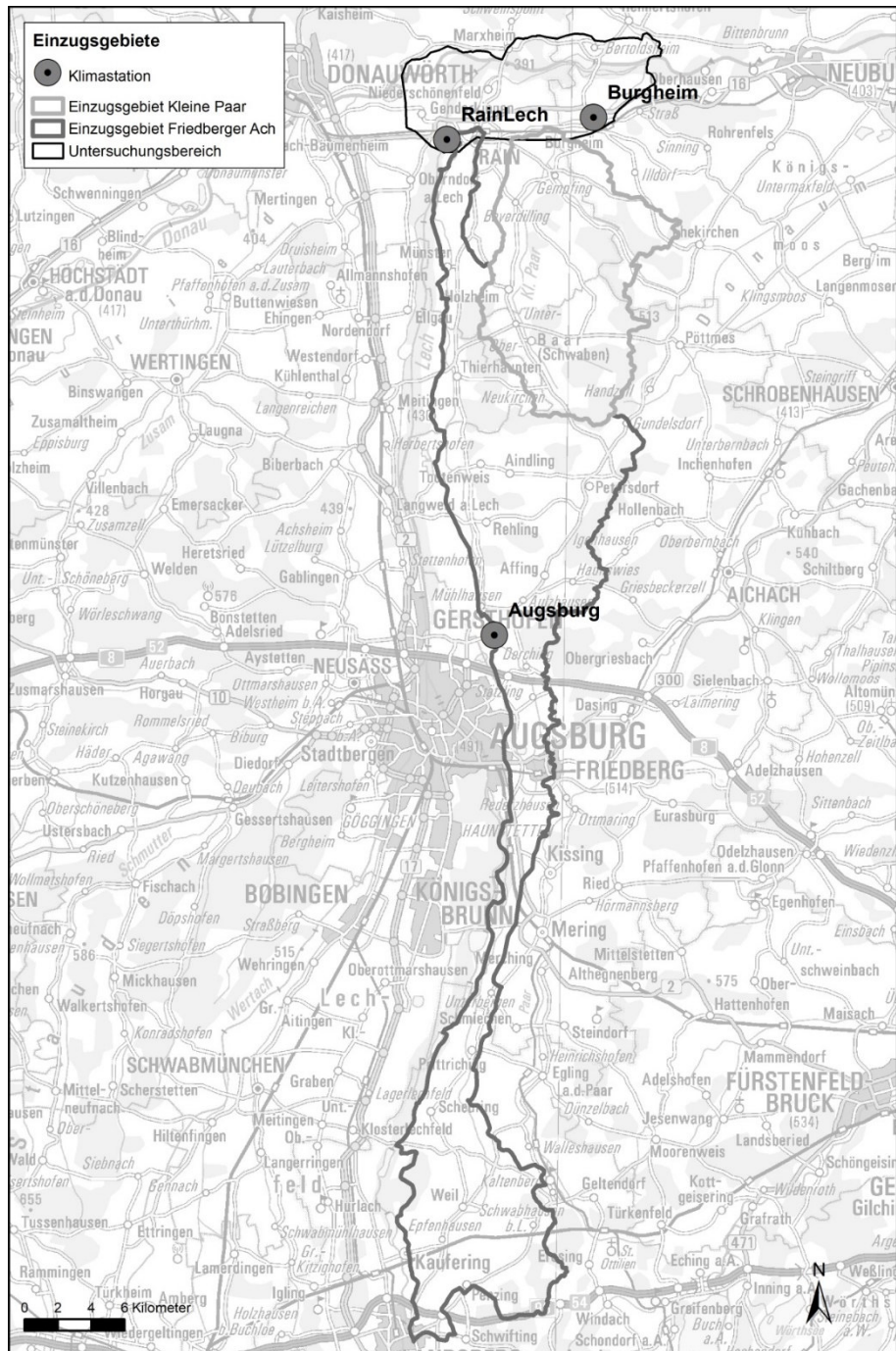


Abbildung 27: Einzugsgebiete der Friedberger Ach und der Kleinen Paar.

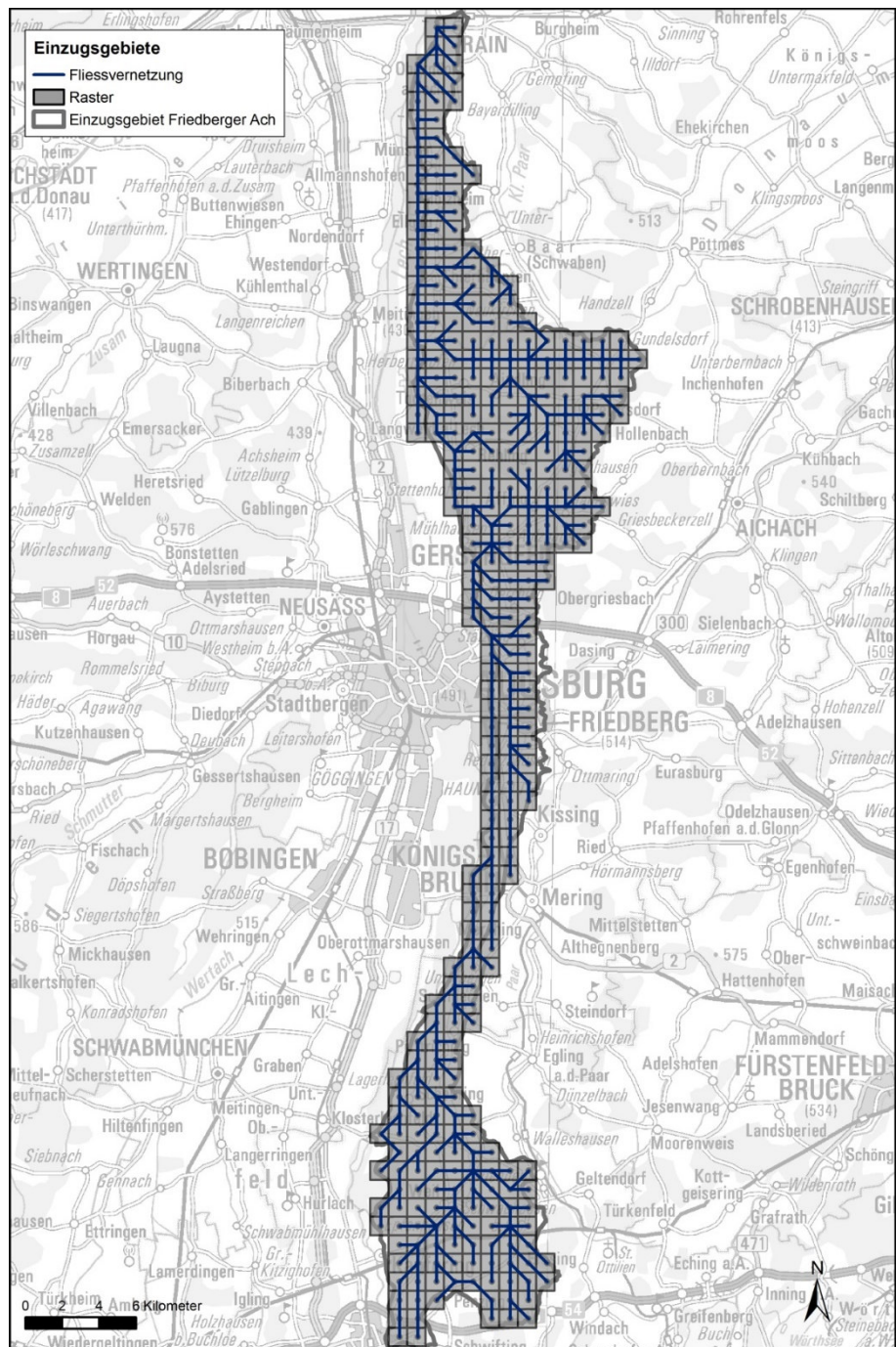


Abbildung 28:

Flächenaufteilung des Einzugsgebiets der Friedberger Ach und Fließvernetzung zwischen den Teileinzugsgebieten.

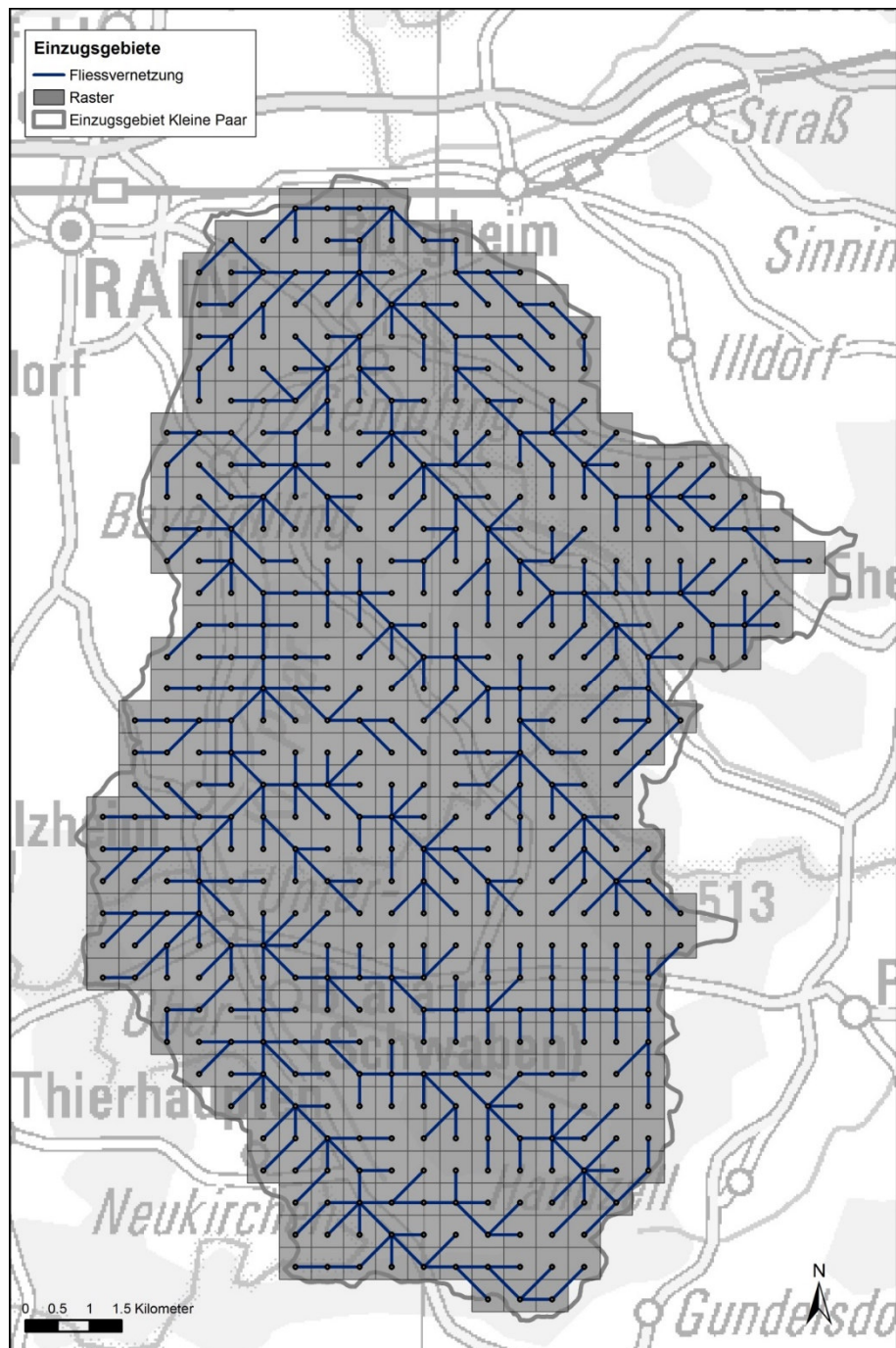


Abbildung 29: Flächenaufteilung des Einzugsgebiets der Kleinen Paar und Fließvernetzung zwischen den Teileinzugsgebieten.

5.2.3 Klimatische Wasserbilanz

Landnutzung

In der Gebietsdatei sind ebenfalls die prozentualen Anteile der Landnutzungsklassen pro TGB und die mittlere nutzbare Feldkapazität pro Landnutzungsklasse und TGB enthalten.

Für die Landnutzungsklasse wurden zunächst die vorhandenen Landnutzungsdaten gemäss CORINE Landnutzung des Umwelt Bun-

desamts (CLC) [15] den 16 verschiedenen LARSIM Landnutzungs-klassen (Tabelle 2) zugeteilt (vgl. Tabelle 3 und Abbildung 30). Anschliessend wurden die prozentualen Anteile der Landnutzungs-klassen pro TGB errechnet und in die Gebietsdatei geschrieben. In den beiden EZG dominieren die Klassen Landwirtschaft und Wald (Tabelle 4).

Tabelle 2: Landnutzungsklassen LARSIM.

LARSIM Landnutzungs-klasse	Beschreibung
1	Siedlung, dicht
2	Siedlung, locker
3	Versiegelt
4	Acker
5	Weinbau
6	Fels
7	Brachflächen
8	Unbewachsener Boden
9	Grünland, intensiv.
10	Feuchtflächen
11	Grünland, extensiv.
12	Baumbestand locker
13	Nadelwald
14	Laubwald
15	Mischwald
16	Wasser

Tabelle 3: CORINE Land Cover und die Zuordnung zur LARSIM Landnutzungsklassen.

CORINE Land Cover	CORINE Beschreibung	LARSIM Landnutzungsklasse
111	Durchgängig städtische Prägung	1
112	Nicht durchgängig städtische Prägung	2
121	Industrie und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen	1
122	Straßen-, Eisenbahnnetze und funktionell zugeordnete Flächen	3
123	Hafengebiete	3
124	Flughäfen	3
131	Abbauflächen	7
132	Brachflächen	7
133	Unbewachsener Boden	7
141	Grünland, intensiv.	9
142	Sport- und Freizeitanlagen	9
211	Nicht bewässertes Ackerland	4
221	Weinbauflächen	5
222	Obst- und Beerenobstbestände	12
231	Wiesen und Weiden	11
242	Komplexe Parzellenstruktur	4
243	Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe	4
311	Laubwälder	14
312	Nadelwälder	13
313	Mischwälder	15
321	Natürliches Grünland	11
322	Heiden und Moorheiden	11
324	Wald-Strauch-Übergangsstadien	12
331	Strände, Dünen und Sandflächen	7
332	Felsen ohne Vegetation	6
333	Flächen mit spärlicher Vegetation	12
334	Brandflächen	8
335	Gletscher und Dauerschneegebiete	10
411	Sümpfe	10
412	Torfmoore	10
421	Salzwiesen	10
423	In der Gezeitenzone liegende Flächen	16
511	Gewässerläufe	16
512	Wasserflächen	16
521	Lagunen	16
522	Mündungsgebiete	16
523	Meere und Ozeane	16

Tabelle 4: Anteil der dominierenden Landnutzung.

	EZG Friedberger Ach	EZG Kleine Paar
Landwirtschaft	61%	56%
Wald	19%	27%

Feldkapazität

Die Landnutzung und der Bodentyp bestimmen die nutzbare Feldkapazität. Um die nutzbare Feldkapazität zu ermitteln, wurden die Bodenspeicherdaten des LfU Bayern als Referenz verwendet, welche die Beziehung zwischen Feldkapazität, Landnutzung und Bodentyp enthalten. Die vorhandenen Bodentypdaten gemäss LfU Bayern sind in Abbildung 31 dargestellt. Für jedes TGB wurden den Landnutzungen die dazugehörigen Bodentypen zugeordnet und die Feldkapazität ermittelt. Die Mittelwerte der Feldkapazität in den Einzugsgebieten der Friedberger Ach und der Kleinen Paar betragen ca. 140 mm resp. 160 mm.

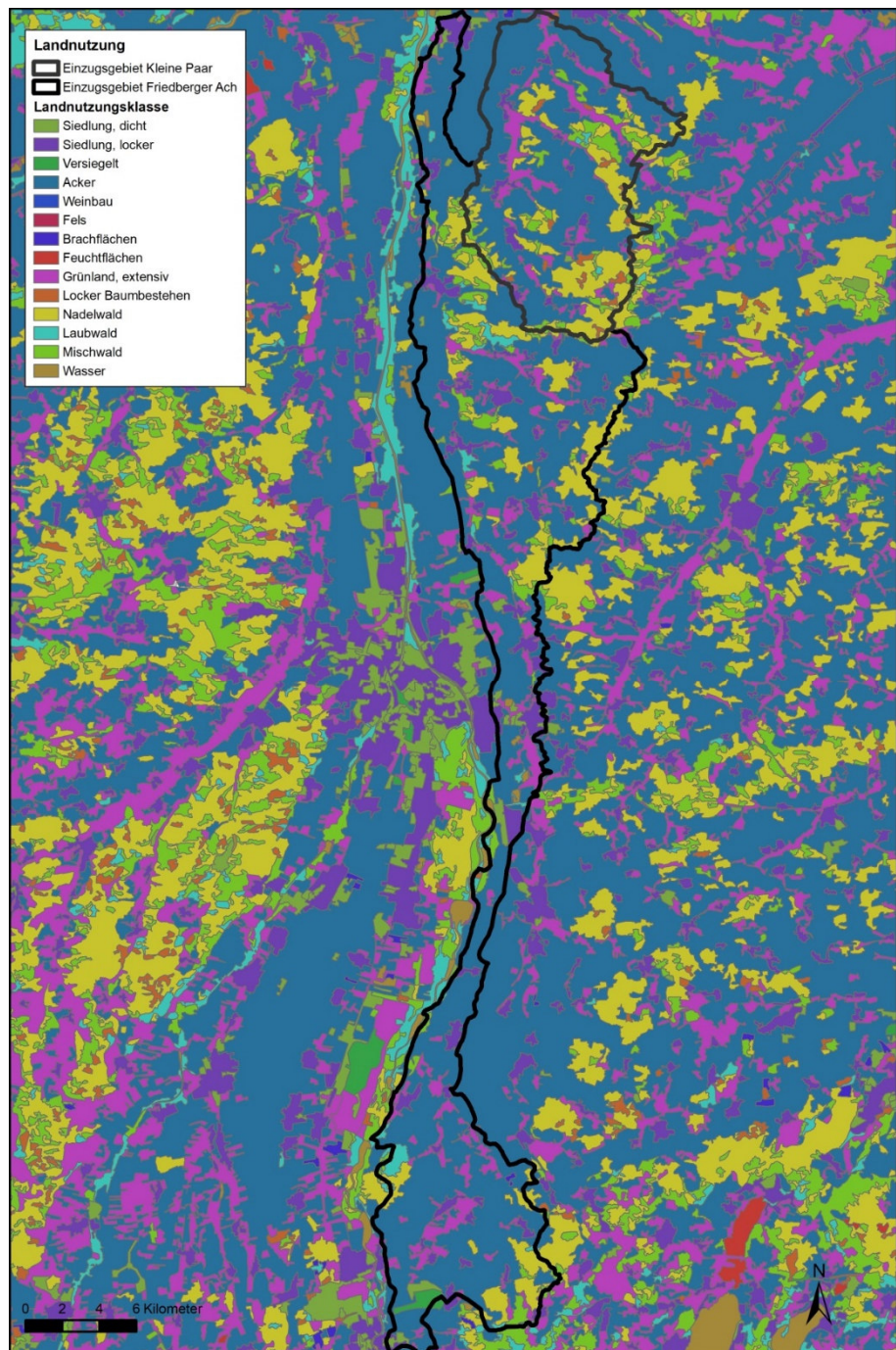


Abbildung 30: In LARSIM zugeordnete Landnutzungs-klassen.

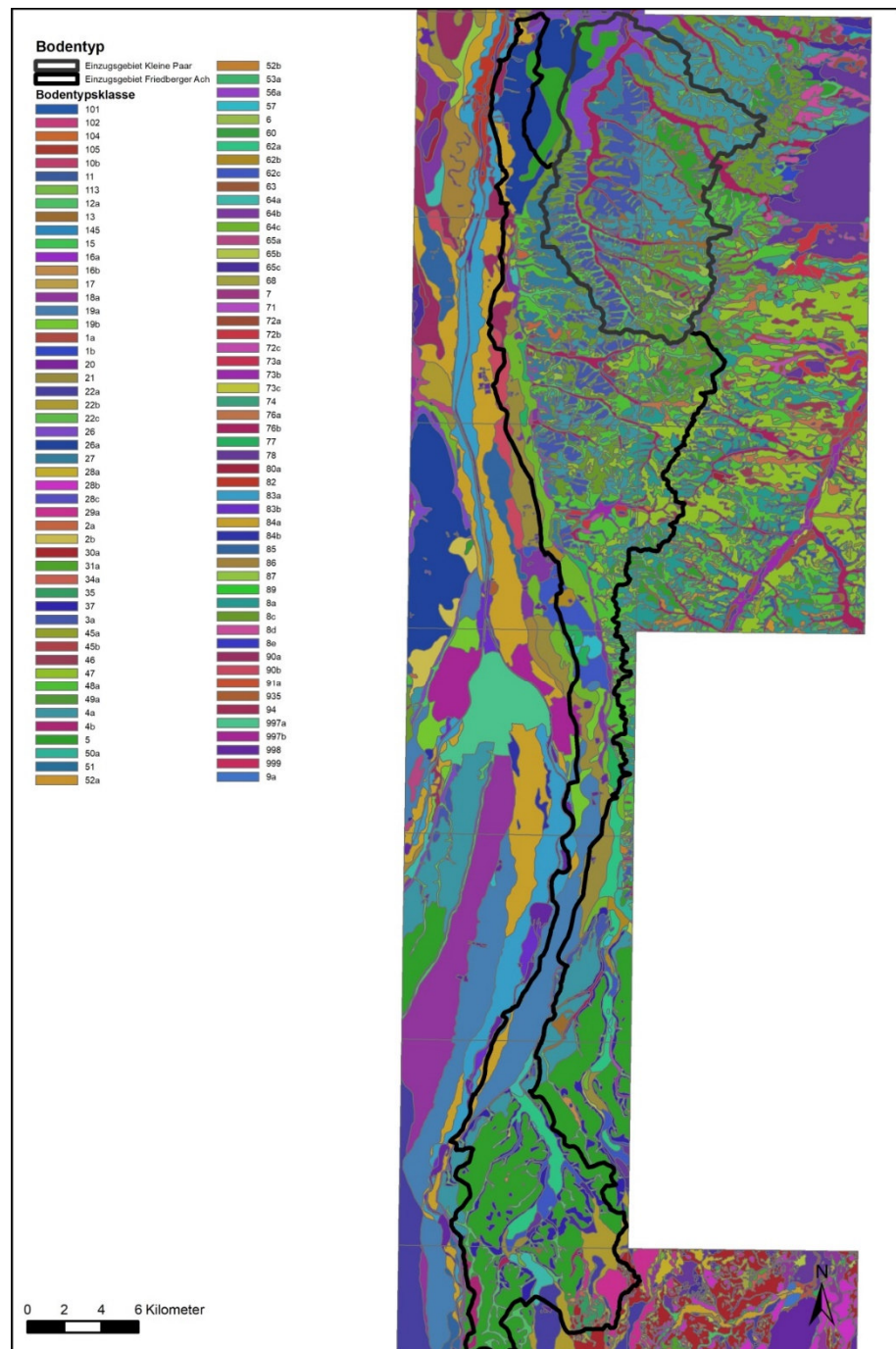


Abbildung 31: Bodentypen gemäss LfU Bayern [22].

Klimadaten

In LARSIM werden folgende Klimadaten als Input benötigt (vgl. Tabelle 5): Niederschlag, mittlere Tagestemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit. Für die Berechnungen wurden die Zeitreihen der Klimastationen Rain Lech, Burgheim und Augsburg verwendet. Die Lage der Messstellen ist in Abbildung 27 dargestellt. Zur Berechnung der örtlichen Verteilung der Klimadaten im Modellierungsgebiet wurde eine Interpolation nach der inversen quadratischen Distanz verwendet. Für eine detaillierte Be-

schreibung dieser Methode wird auf die LARSIM Modellbeschreibung verwiesen [14].

Tabelle 5: Für LARSIM benötigte meteorologische Zeitreihen.

Messgrösse	Einheit	Dateneigenschaft
Niederschlag	mm	Summenwert pro Zeitschritt
Lufttemperatur	°C	Mittelwert pro Zeitschritt
rel. Luftfeuchtigkeit bzw. Taupunkttemperatur	% °C	Mittelwert pro Zeitschritt Mittelwert pro Zeitschritt
Windgeschwindigkeit	m/s	Mittelwert pro Zeitschritt
Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung	h / min W/m ²	Summenwert pro Zeitschritt Mittelwert pro Zeitschritt
Luftdruck	hPa	Mittelwert pro Zeitschritt

- Schneefall** Die Speicherung von Niederschlag als Schnee und die Schneeschmelze haben insbesondere im Frühjahr einen Einfluss auf den jahreszeitlichen Gang des Abflusses sowie auf die Bodenfeuchte und die Abflussbildung. Zur Berücksichtigung des Schneefalls wurde in LARSIM ein Modul, welches einem erweiterten Knauf-Verfahren [23] entspricht, verwendet.
- Evapotranspiration** Zur Berechnung der Evapotranspiration wurde die Methode nach Penman-Monteith (FAO 56 [16]) verwendet.

5.2.4 Bauwerke

- Friedberger Ach und Edenhauser Bach** Die im Untersuchungsgebiet der Friedberger Ach vorliegenden Wehre und Hochwasserrückhaltebecken wurden in LARSIM berücksichtigt. Der Bericht von Dr. Blasy - Dr. Øverland (2005) [12] enthält eine detaillierte Beschreibung der Abflussaufteilung und Betriebsregime der Ausleitungen und Verzweigungen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Bauwerke beschrieben. Abbildung 32 zeigt die Abflussaufteilung am Edenhauser Bach und an der Friedberger Ach. Soweit nicht anders erwähnt, stammen die Angaben zur Abflussaufteilung aus Dr. Blasy - Dr. Øverland (2005) [12].

- Der Abfluss in der Friedberger Ach oberhalb der Ortschaft Thierhaupten verbleibt bei maximal 2.5 m³/s. Der darüber hinaus gehende Abfluss wird über den Flutkanal in die Altnet abgeleitet, welche schliesslich in den Lech mündet. Der Flutkanal wurde in den 1930-iger Jahren zur Ableitung der Hochwasser in der Friedberger Ach in die Altnet errichtet.
- Durch das Hochwasserrückhaltebecken (HRB) am Edenhauser Bach werden Hochwasserereignisse mit einer ca. 20- jährlichen

Wiederkehrdauer zurückgehalten. Über ein Drosselbauwerk wird der Abfluss des Edenhäuser Bachs auf $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$ begrenzt. Die Wassermengen aus der Hochwasserentlastung des Hochwasserrückhaltebeckens sowie der Friedberger Ach werden in den Flutkanal und die Altnet abgeleitet und fließen schließlich dem Lech zu. Das HRB wurde im August 2016 eingeweiht.

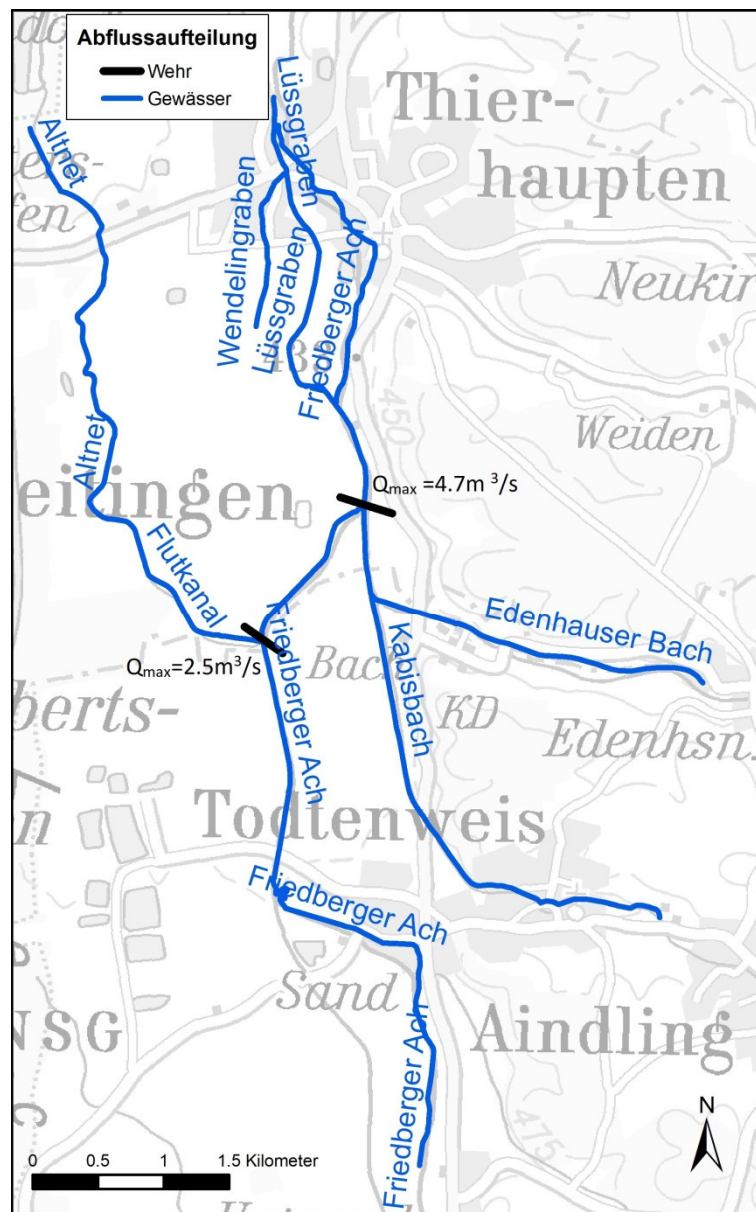


Abbildung 32: Abflussaufteilung der Friedberger Ach und des Edenhäuser Bachs.

5.2.5 Anfangsbedingungen und Kalibrierung

Parameter	<p>Grundsätzlich sollte die Kalibrierung eines LARISM Modells anhand von Abflussmessungen durchgeführt werden. Von der Friedberger Ach und der Kleinen Paar liegen jedoch keine Abflussmessungen vor. Anhaltspunkte für die Kalibrierung liefern lediglich die bei der Begehung im Jahr 2018 geschätzten Abflüsse sowie die in anderen Modellen berechneten Hochwasserabflüsse. Deshalb wurde keine eigentliche Kalibrierung durchgeführt, sondern lediglich die Modellparameter so angepasst, dass keine Widersprüche zu vorhandenen Modellen entstehen. In einem LARSIM Modell können die folgenden Parameter angepasst werden:</p> <ul style="list-style-type: none">- EQB: Eichgrösse für die Rückhaltegrösse des Basisabflusses- EQI: Eichgrösse für die Rückhaltegrösse des Direktabflusses- EQD2: Eichgrösse für die Rückhaltegrösse des Oberflächenabflusses- A2: Aufteilungsrate für Direkt- und Oberflächenabfluss- β: Faktor Drainageindex tiefer Bodenspeicher- BSF: Parameter b der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion.
Landschaftsformen	<p>Wie in Dr. Blasy- Dr. Øverland (2005) [12] angegeben, werden im Einzugsgebiet der Friedberger Ach zwei Landschaftsformen unterschieden (vgl. Abbildung 33). Für die flachen Gelände im Westen der Friedberger Ach besteht der Untergrund aus Schotter und ist damit durchlässig. Für die Gewässer, die rechtsseitig der Friedberger Ach zufließen (z.B. Edenhauser Bach), dominiert das Hügelland und der Boden ist weniger durchlässig. Aus diesem Grund wurden für die zwei Landschaftsformen unterschiedliche Parameter gewählt. Im Vergleich mit demjenigen der Friedberger Ach ist das Einzugsgebiet der Kleinen Paar etwas kleiner. Bei der Kalibrierung wurde das ganze Einzugsgebiet der Kleinen Paar als eine Einheit behandelt.</p>
Anfangszustand	<p>Werden Niederschlagsereignisse zur Vorhersage von Hochwasserabflüssen verwendet, ist das Modell stark vom gewählten Anfangszustand abhängig. Gemäß DVWK (1984) [11] sollte der Anfangswert der Bodenfeuchte über der mittleren Bodenfeuchte liegen. Im Modell wurde als Anfangszustand für die Bodenfeuchte ein Wert von 80 mm verwendet.</p>

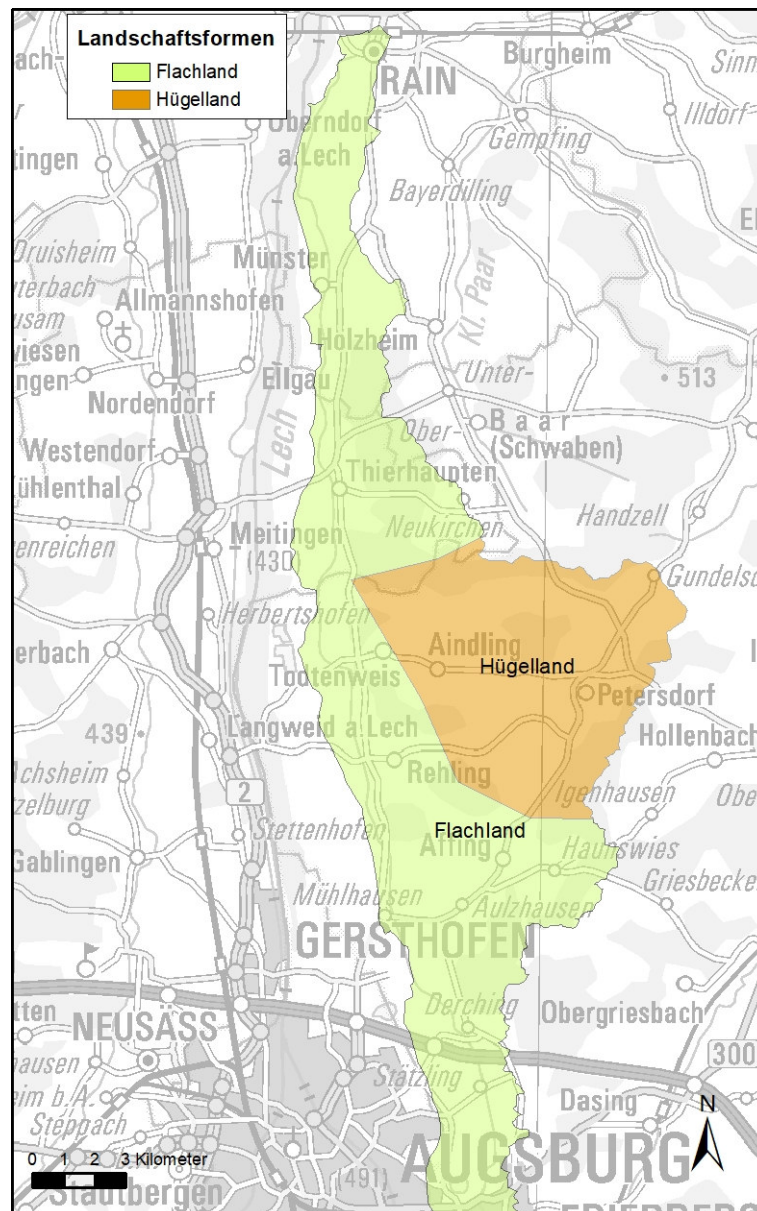


Abbildung 33: Landschaftsformen: Flachland im Westen der Friedberger Ach und Hügelland im Osten der Friedberger Ach.

Friedberger Ach

In Dr. Blasy- Dr. Øverland (2005) [12] wurden die HQ100 für den E-denhauser Bach und die Friedberger Ach vor der Wehranlage 1 unter der Annahme ermittelt, dass ein 100-jährliches Niederschlagsereignis ein HQ100 in den beiden Gewässern verursacht. Die Modellparameter wurden so angepasst, dass mit der in Dr. Blasy- Dr. Øverland (2005) [12] vorgeschlagenen Niederschlagsmenge und -dauer das entsprechende HQ100 von $14.1 \text{ m}^3/\text{s}$ resultiert.

Kleine Paar

Für das Einzugsgebiet der Kleinen Paar liegt eine Prognose des HQ100 beim LfU Bayern vor ($\text{HQ100} = 42.0 \text{ m}^3/\text{s}$). Das 100-jährliche Niederschlagsereignis wurde gemäss der Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsge-

bieten von DVWK (1984) [11] ermittelt. Anschließend wurde das Modell der Kleinen Paar gegen das HQ100 des LfU kalibriert.

5.2.6 Resultate

Parameter

Tabelle 6 enthält die aus der Anpassung resultierenden LARSIM Modellparameter. Für die Teilgebiete der Friedberger Ach vor der Wehranlage 1 und nördlich von Thierhaupten (Flachland in Abbildung 33) wurden die Rückhalteparameter (EQB, EQI, EQD und EQD2) mit Werten entsprechend einer relativ langsamen Gebietsreaktion verwendet. Für die Teilgebiete des Edenhauser Bachs und der Kleinen Paar wurden die Rückhalteparameter mit Werten aus dem relativ schnellen Bereich angesetzt, da davon auszugehen ist, dass im hügeligen Gebiet eine schnellere Abflusskonzentration stattfindet.

Der Schwellenwert A2 teilt den Direktabfluss in eine schnellere und eine langsamere Komponente auf. Für das Teilgebiet im Edenhauser Bach wurde ein Schwellenwert von $A2 = 0.8$ gewählt. In den anderen Gebieten wurde ein A2 von 1.0 verwendet. Die Parameter β und BSF sind massgebend für den Basisabfluss. Die beiden Parameter wurden so gewählt, dass der Basisabfluss etwa einem Wert entspricht, der vergleichbar mit der Abflussschätzung bei der Ortsbegehung ist.

Tabelle 6: Verwendete LARSIM-Modellparameter.

Parameter	Friedberger Ach*	Edenhauser Bach	Kleine Paar
EQB	40000	5000	5000
EQI	10000	500	1500
EQD	2000	300	400
EQD2	900	50	180
A2	1.0	0.8	1.0
β	0.002	0.002	0.002
BSF	0.15	0.15	0.15

*Vor der Wehranlage 1 und nördlich von Thierhaupten.

Abflussganglinien

Nach der Anpassung wurden mit den resultierenden Modellparametern langjährigen Simulationen durchgeführt. Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen die simulierten Abflüsse der Friedberger Ach bzw. der Kleinen Paar für den Zeitraum von 2013 bis 2017. Da für die Kalibrierung und Validierung der Modelle keine Abflussmessungen vorliegen, sind keine Angaben zu der Modellgenauigkeit möglich. Es wird daher empfohlen, an geeigneten Stellen Abflussmessstellen einzurichten, um das Modell anhand der Messungen überprüfen zu können.

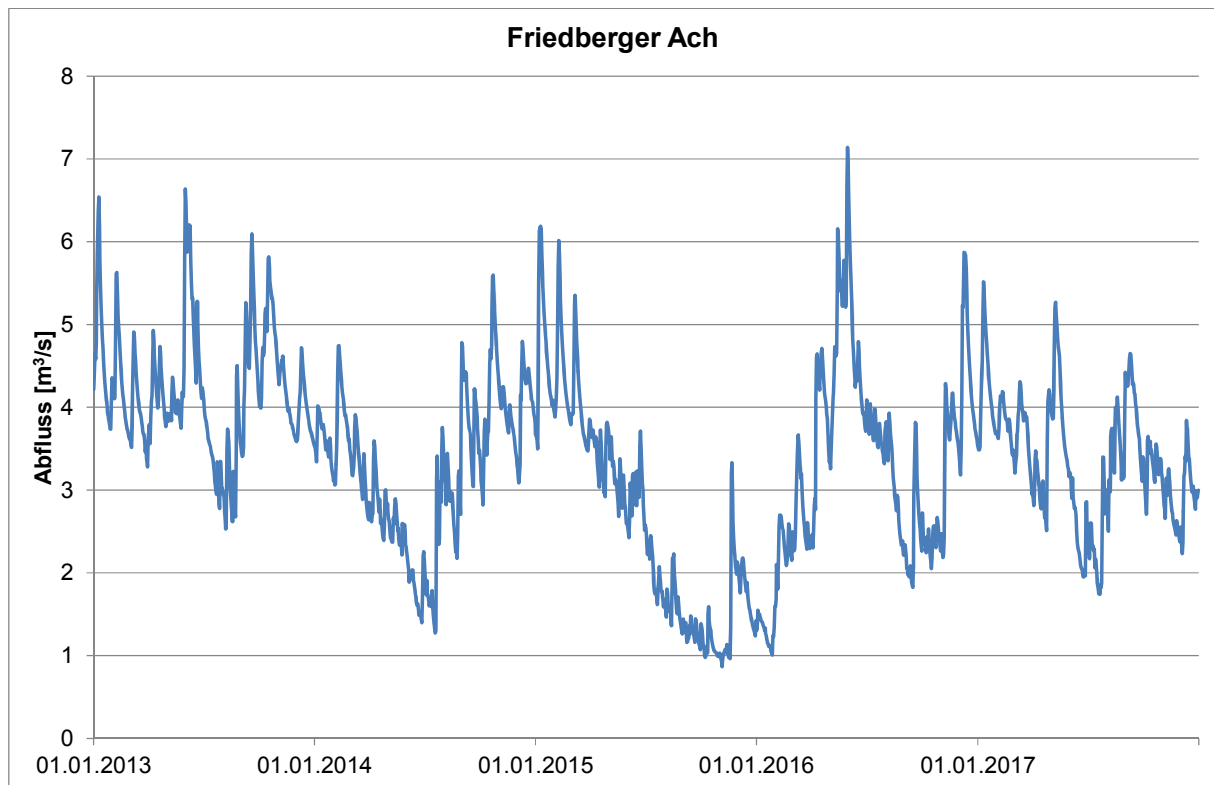


Abbildung 34: Berechnete Abflussganglinie der Friedberger Ach.

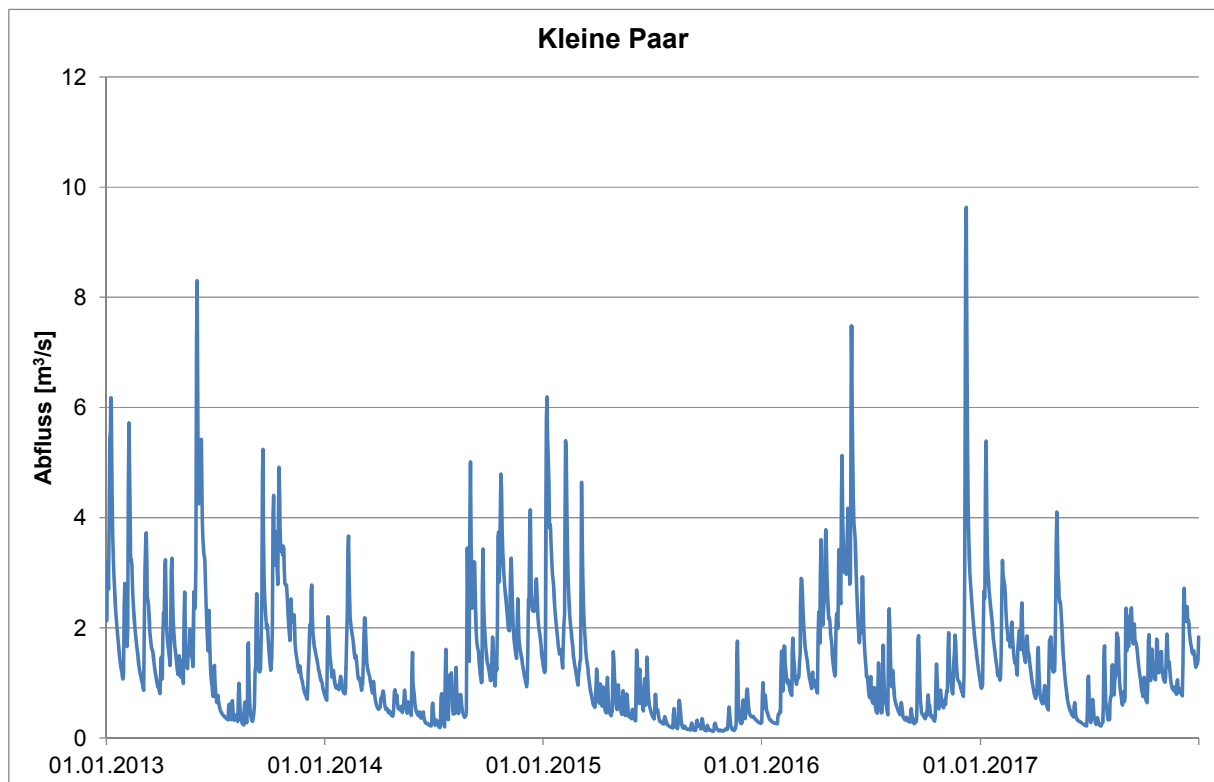


Abbildung 35: Berechnete Abflussganglinie der Kleinen Paar.

Vergleich mit Pegelmessungen

Entlang der Friedberger Ach sind innerhalb des Modellgebiets drei Pegel-Messstellen (vgl. Abbildung 36: Mx37, Mx24b, und Bth15) vorhanden. Aus den simulierten Abflussganglinien wurden an diesen Stellen über Abfluss-Pegel-Beziehungen die Pegelganglinien berechnet und mit den gemessenen Flusspegeln verglichen (Abbildung 37). Die Abfluss-Pegel-Beziehungen wurden nach Strickler-Manning bestimmt.

Der Vergleich zeigt, dass die Messwerte im Vergleich zu den berechneten Pegeln viel kleinere Schwankungen aufweisen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Friedberger Ach im entsprechenden Flussabschnitt stark durch den Austausch mit dem Grundwasser beeinflusst wird. Die hohen Wasserstände im Stauraum der Donau verursachen eine zeitlich konstante Infiltration von der Donau ins Grundwasser. Dies führt zu einer zeitlich konstanten Exfiltration von Grundwasser in die Friedberger Ach. Ein solcher Austausch zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser wird in LARSIM nicht berücksichtigt.

Folgerungen

Bei der Umsetzung in ein numerisches Modell wird deshalb die Wasserspiegelhöhe der Friedberger Ach im Abschnitt zwischen dem Pegel Mx37 und der Mündung aus den Messwerten übernommen.



Abbildung 36: Pegel-Messstellen an Oberflächengewässern im Modellgebiet.

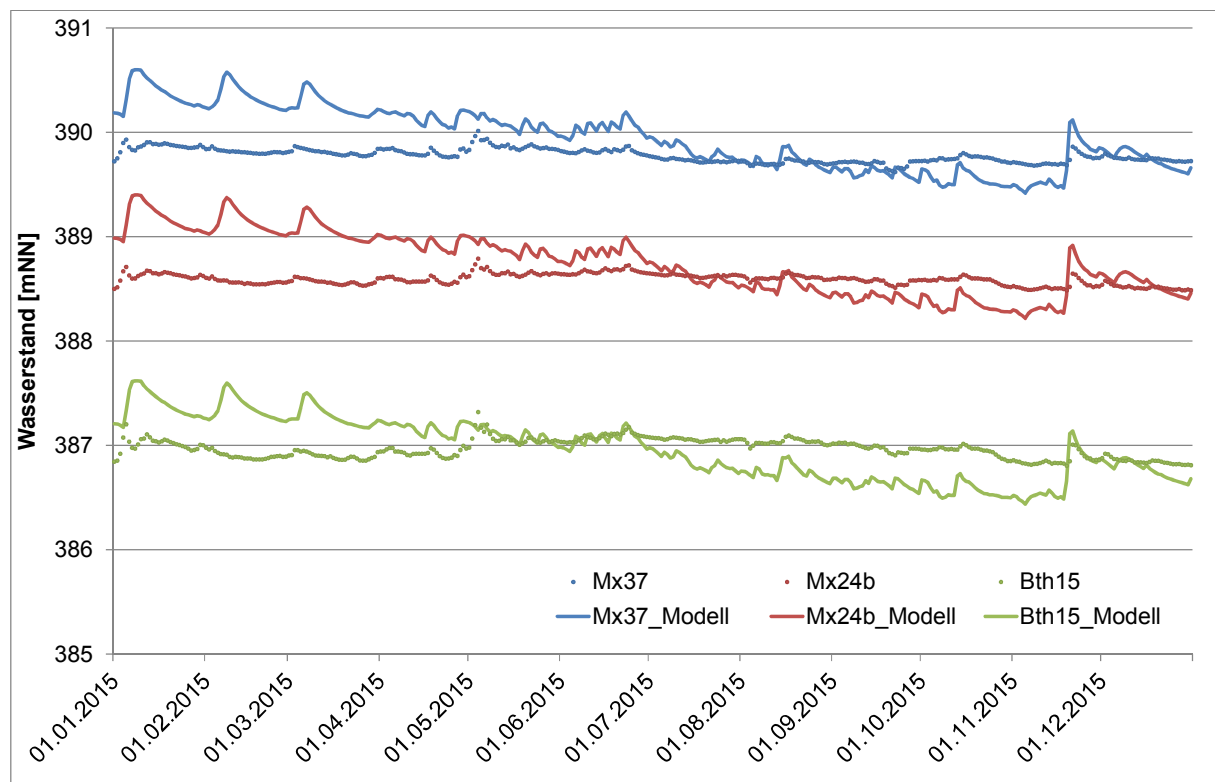


Abbildung 37: Berechnete und gemessene Pegelganglinien der Messstellen Mx37, Mx24b und Bth15.

5.2.7 Hochwasserprognose

HQ100 am
Modellrand

Für das Flutpolder Projekt werden die Hochwasserabflüsse an den Modellrändern des Grundwassermodells benötigt. Für die Friedberger Ach wurde das HQ100 am Modellrand beim Ziegelmoosgraben mit Hilfe des LARSIM Modells ermittelt. Dazu wurden zuerst mit LARSIM die Abflüsse von 1988 bis 2017 simuliert, wobei angenommen wurde, dass die Bauwerke (Wehranlage und Rückhaltebecken) während des ganzen Zeitraums in Betrieb sind. Anschließend wurde eine statistische Analyse der simulierten Abflüsse mit einer Log-Normalverteilung für extreme Ereignisse durchgeführt. Die jährlichen maximalen Abflüsse wurden in einer Log-Transformation der Wiederkehrperiode aufgezeichnet (Abbildung 38). Daraus resultiert für die Friedberger Ach ab Ziegelmoosgraben ein HQ100 von ca. $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abbildung 38). Andere Verteilungen nach Weibull oder Gumbel ergeben vergleichbare Ergebnisse.

Für die Kleine Paar wird am Modellrand das HQ100 von $42.0 \text{ m}^3/\text{s}$ des LfU verwendet.

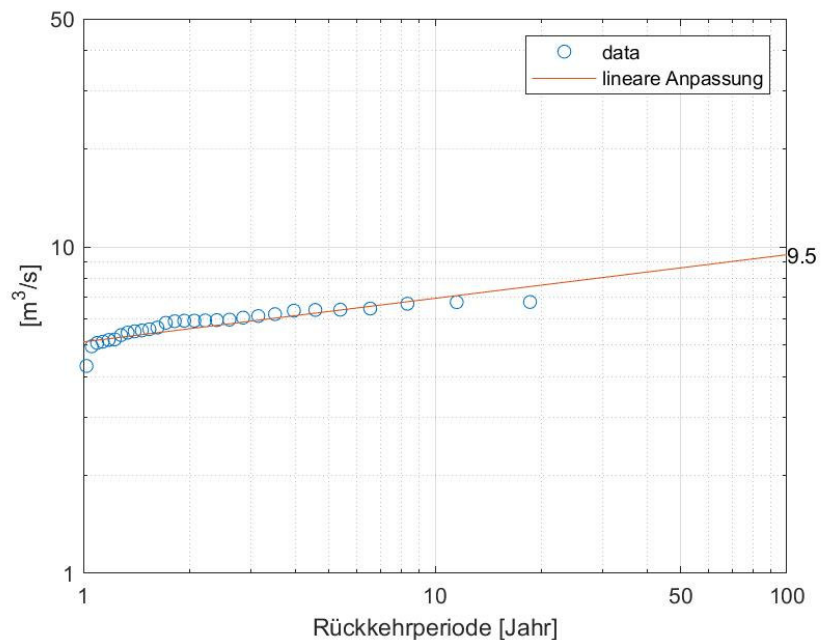


Abbildung 38: Berechnete Jährlichkeiten der Hochwasserabflüsse an der Friedberger Ach beim Ziegelmoosgraben (Log-Normalverteilung).

5.3 Neubildung durch Niederschlag

Hydrologische
Wasserbilanz

Die Grundwasserneubildung wurde aus der hydrologischen Wasserbilanz berechnet. 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

Bilanzgebiet

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 direkt messbare Größe. Alle übrigen Glieder der Gleichung müssen modelliert werden.

Klimadaten

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.

Das Modellgebiet wurde in ein 1Km x 1Km-Raster (Abbildung 39) unterteilt. Im Modellgebiet stehen die Klimadaten der Messstelle 200035 Burgheim sowie die Niederschlagsdaten der beiden Messstellen 90597 Rain und 200035 Burgheim zur Verfügung (Abbildung 39). Für jedes Raster wurde der Einflussfaktor der beiden Niederschlagsstationen in Abhängigkeit von der Distanz ermittelt.

Vegetation

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Vegetation wurden fünf Zonen unterschieden (Abbildung 39):

- Wald
- Siedlung
- Landwirtschaft
- Landwirtschaft mit Bewässerung
- Seefläche

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 aus dem Bericht zur Bodennutzung der landwirtschaftlichen Betriebe in Bayern 2010 des Bayerischen Landesamts für Statistik und Datenverarbeitung [9] hergeleitet (Abbildung 40).

Evapotranspiration, Oberflächenabfluss

Zur Berechnung der Evapotranspiration wurde die Methode nach Penman-Monteith (FAO 56 [16]) verwendet. Für den Oberflächenabfluss auf unversiegeltem Gebiet wird die SCS curve number method eingesetzt [17]. Zur Berücksichtigung des Oberflächenabflusses auf versiegelten Flächen wird die Grundwasserneubildung nur für den unversiegelten Flächenanteil berechnet und anschließend durch die Gesamtfläche dividiert.

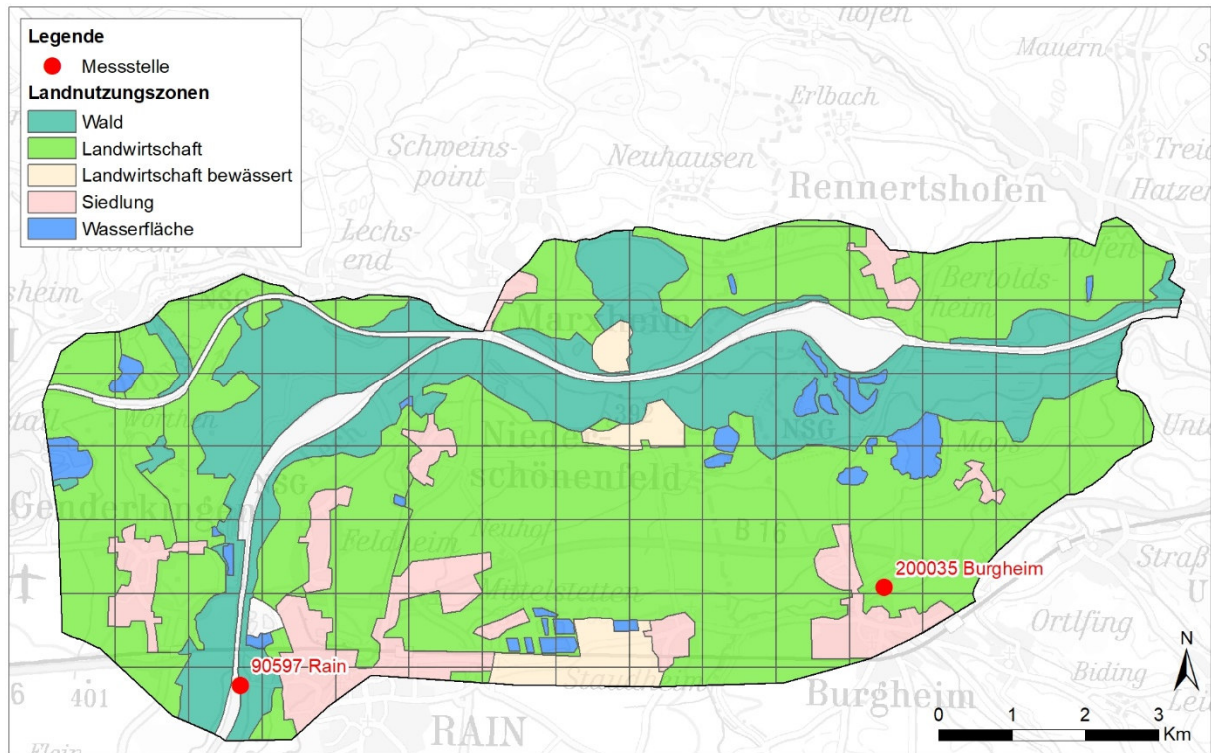


Abbildung 39: Landnutzungszonen zur Berechnung der Evapotranspiration.

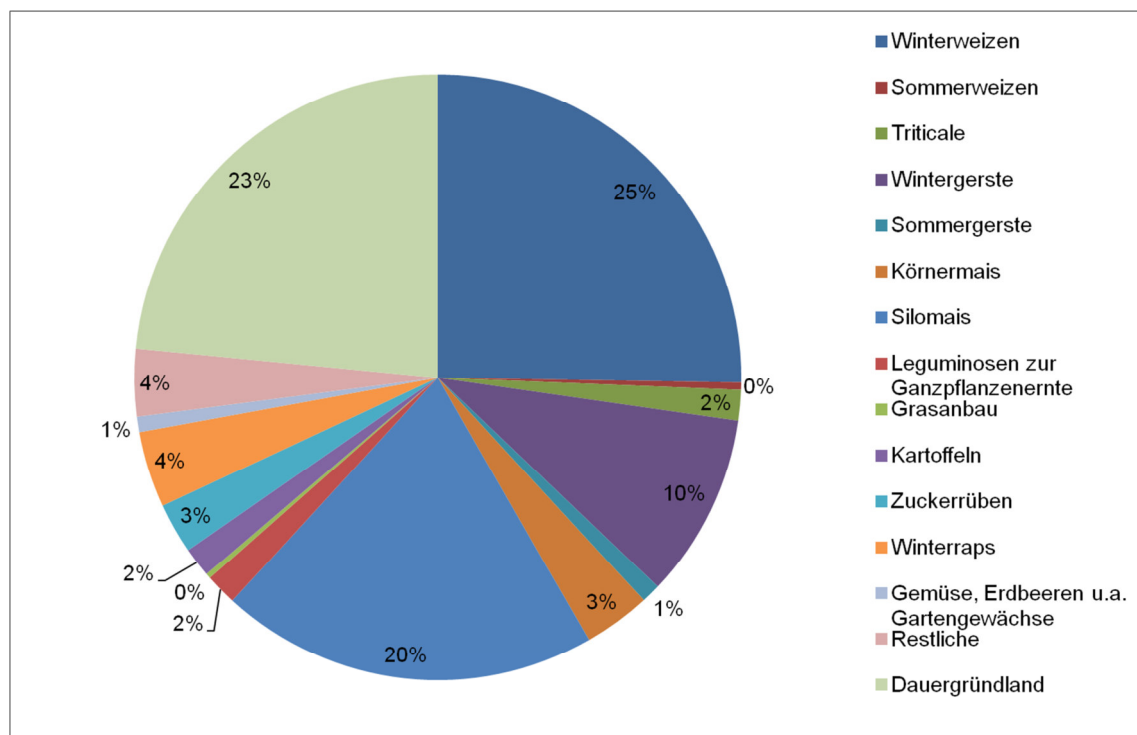


Abbildung 40: Nutzung der Landwirtschaftsflächen innerhalb des Modellgebiets.

Tabelle 7: Anteile der Anbauprodukte an den Vegetationszonen.

Anteile	Wald	Siedlung	Landwirtschaft
Wiese, Feldränder [%]		40	26
Wald [%]	100	25	
Wintergetreide [%]			34
Mais [%]			24
Übrige (vor allem Hackfrüchte) [%]			16
Versiegelt [%]		35	

Grundwasser-
neubildung

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 [18]:

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

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

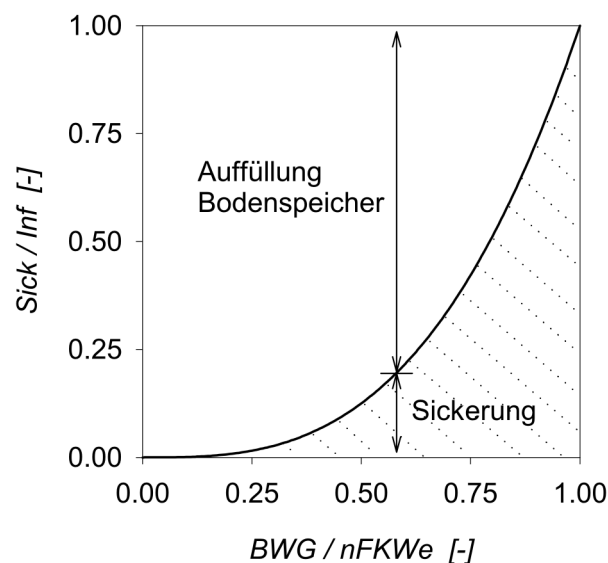


Abbildung 41: Grundwasserneubildung in Funktion der Auffüllung des Bodenspeichers (aus Armbruster, 2002 [18]).

Bodenspeicher	Zur Berechnung der Grundwasserneubildung wird eine Schätzung des pflanzenverfügbaren Bodenspeichers benötigt. Für die Berechnung der Grundwasserneubildung im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde als Bodenspeicher die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum gemäss LfU Bayern in Abhängigkeit von der CORINE Landnutzung [15] vorgegeben.
Bewässerung	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 30 bis 60 mm.
Resultate	Die resultierenden Grundwasserneubildungsraten (Mittelwert der Jahre 1990 bis 2017) sind in Abbildung 42 dargestellt.

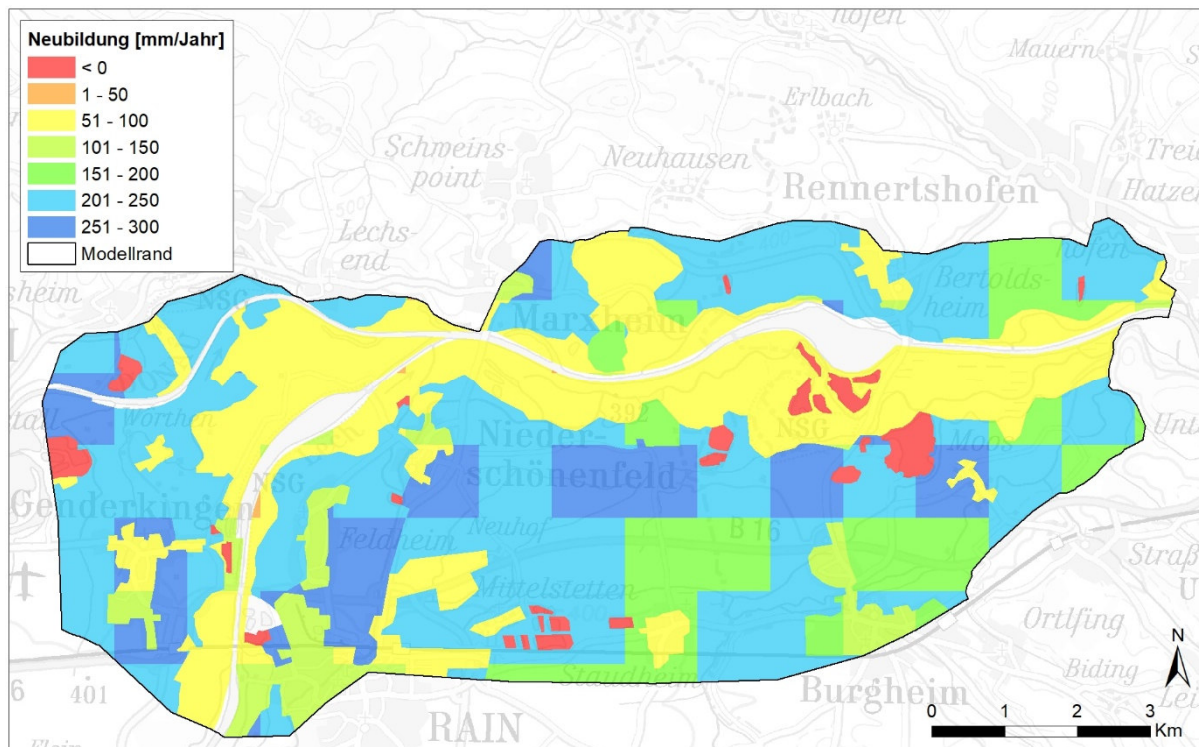


Abbildung 42: Berechnete mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1990 – 2017.

5.4 Seitliche Zuflüsse

5.4.1 Direkt in das Modellgebiet entwässernde Gebiete

Methode	Für die Bestimmung des Seitenzuflusses aus angrenzenden Einzugsgebieten wurden am Nord- und Südrand des Modells die Bereiche ausgeschieden, aus welchen versickertes Niederschlagswasser direkt in das Modellgebiet gelangen kann (Abbildung 43). Die Berechnung der Grundwasserneubildung erfolgt aus der hydrologischen
---------	---

Wasserbilanz. Gebiete, aus welchen der infiltrierte Niederschlag zuerst in ein Oberflächengewässer und erst mit diesem in das Modellgebiet gelangt, wurden nicht berücksichtigt. Der Zustrom aus Seitengewässern mit Begleitgrundwasserstrom wird in Kapitel 5.4.2 getrennt berücksichtigt.

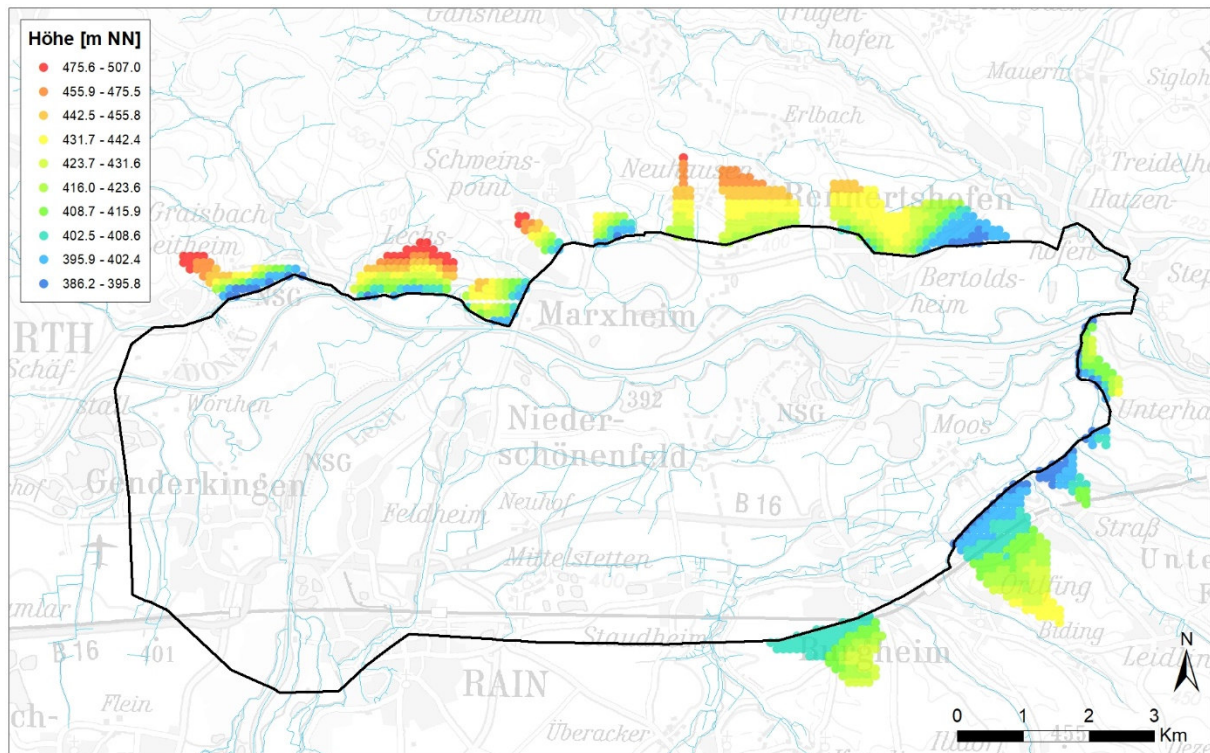


Abbildung 43: Einzugsbereiche, aus welchen unterirdische Zuflüsse zum Modellgebiet zu erwarten sind.

Hydrologische Wasserbilanz

Die hydrologische Wasserbilanz in den Einzugsbereichen wurde aus den Klimadaten nach FAO 56 [16] 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 44). 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.

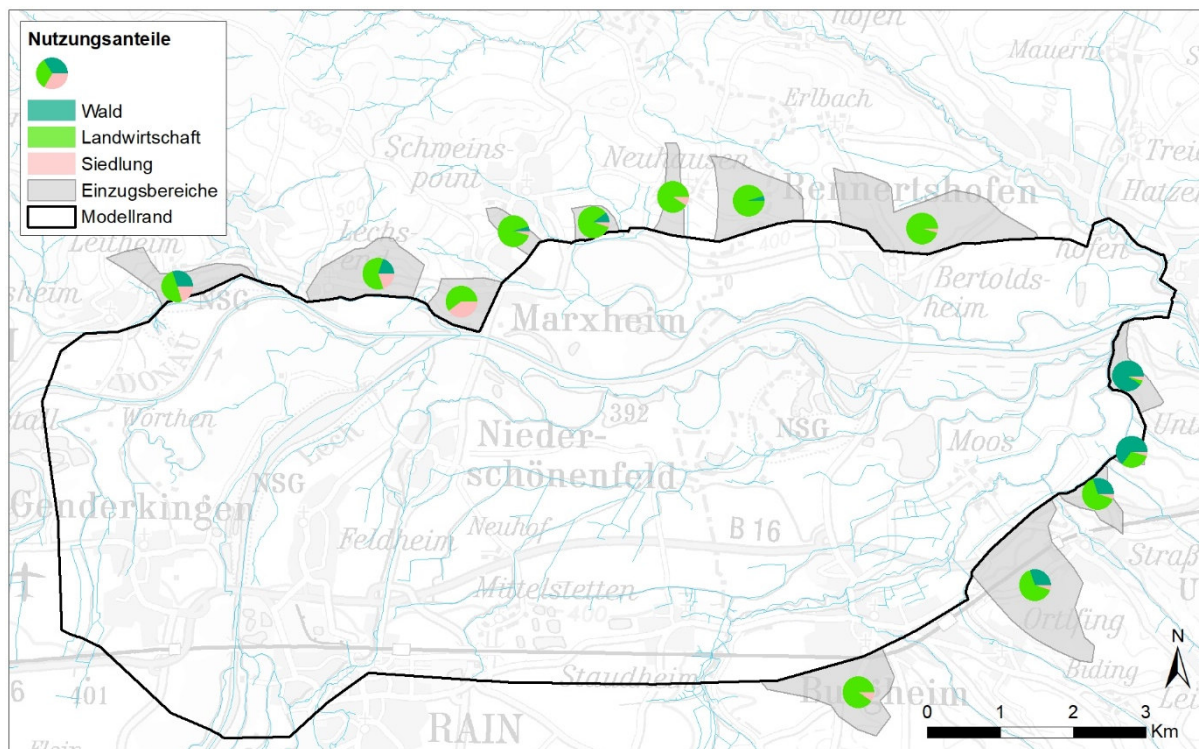


Abbildung 44: Landnutzung in den seitlichen Einzugsbereichen

Oberflächenabfluss Die resultierende Abflusskomponente R_g wurde nach Döll & Fiedler [19] 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 46). Die Berechnung wurde in einem Gitternetz von 100×100 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 : Relieffaktor

f_t : Faktor Bodentyp

f_h : Faktor Hydrogeologie

f_{pg} : Faktor Frostboden

Abbildung 45 zeigt eine Übersicht über das Verfahren nach Döll und Fiedler [19]. In Tabelle 8 ist der empirisch bestimmte Einflussfaktor der Hangneigung aufgelistet.

Tabelle 8: Faktor für in Funktion der Hangneigung (nach Döll und Fiedler 2008).

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

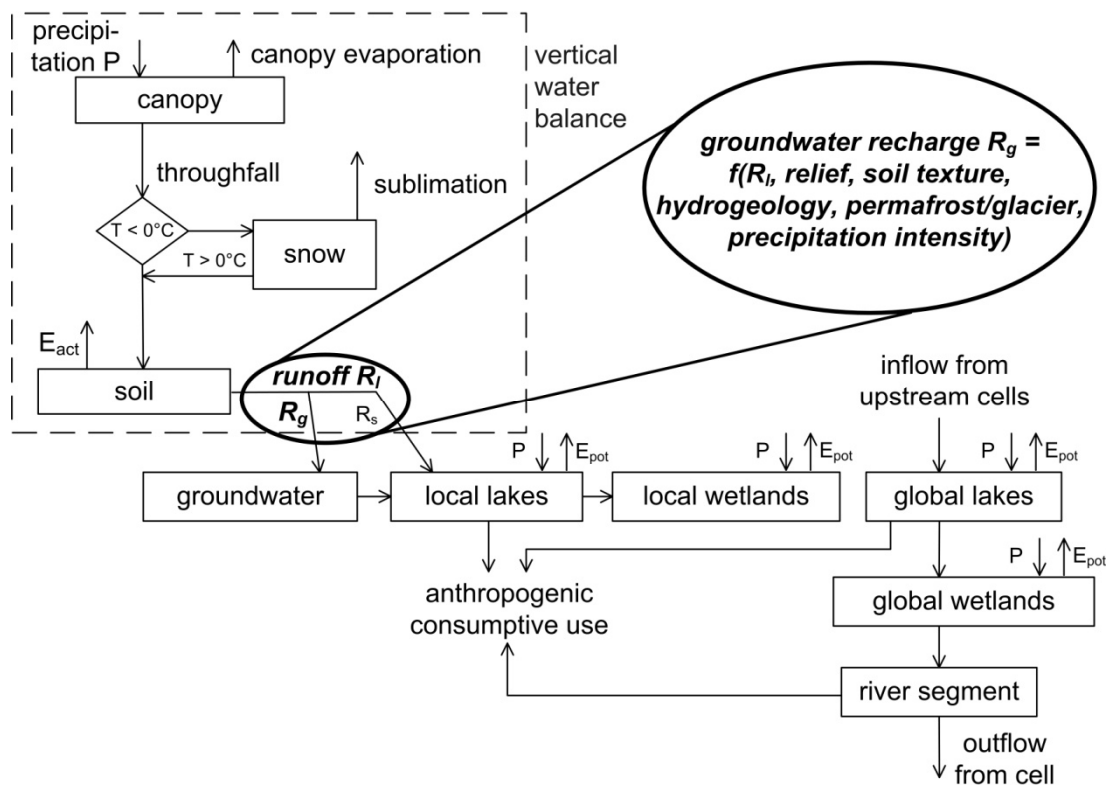


Abbildung 45: Aufteilung der Abflusskomponente auf Direktabfluss und Grundwasserneubildung nach Döll und Fiedler 2008.

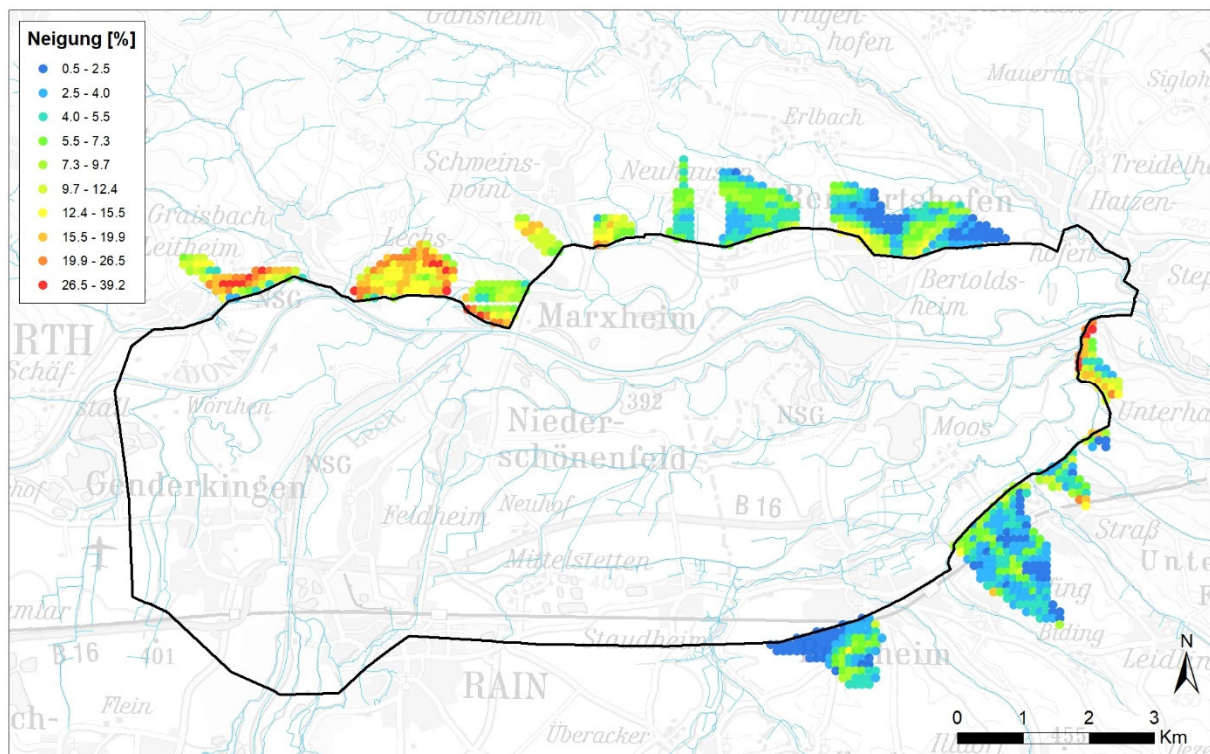


Abbildung 46: Hangneigung in den Einzugsbereichen.

5.4.2 Zustrom aus grundwasserführenden Schotter

Seitentäler	An den Talrändern reichen die grundwasserführenden Schotter einzelner Fließgewässer bis in die Seitentäler über das Modellgebiet hinaus (Abbildung 47).
Methode	<p>Der unterirdische Zustrom in den quartären Grundwasserleiter über den Modellrand wird für jeden Begleitgrundwasserstrom der Seitengewässer anhand des Darcy-Gesetzes berechnet:</p> $Q = A \cdot k_f \cdot I$ <p>Q: Randzufluss im quartären Grundwasserleiter [m³/s] A: Durchflossene Querschnittfläche des Grundwasserleiters [m²] k_f: Hydraulische Leitfähigkeit [m/s] I: Potentialgefälle des Grundwasserleiters [-].</p>
Grundlagen	Zur Bestimmung der durchflossenen Querschnittfläche (A) wird eine Rechteckfläche mit Höhe und Breite entsprechend der gesättigten Grundwassermächtigkeit (M) resp. der Seitenlänge des Modellrandabschnitts (L) angenommen. Die Grundwassermächtigkeit wurde dazu anhand der BIS-Daten angesetzt.

Die hydraulische Leitfähigkeit (k_f) wurde für alle Täler zu 2×10^{-3} m/s angenommen. Dieser Wert wurde aus den Resultaten von Pumpversuchen der Firma Dehner in Rain übernommen [24]. Die Pumpversuche sind repräsentativ für den Bereich von Rain. Von den übrigen Seitentälern sind keine Pumpversuche bekannt, in der Gesamtbilanz sind diese Zuflüsse jedoch unbedeutend.

Das Potentialgefälle (I) wurde je nach Datenlage aus unterschiedlichen Quellen hergeleitet. Lagen Messungen des Grundwasserspiegels in geeigneter räumlicher Auflösung vor, wurde der Gradient direkt aus den Messwerten bestimmt. Andernfalls wurde der Gradient aus den großflächig interpolierten Grundwasserhöhengleichungen der Hydrogeologischen Karte des Bayerischen Landesamts für Umwelt im Maßstab 1:500'000 entnommen.

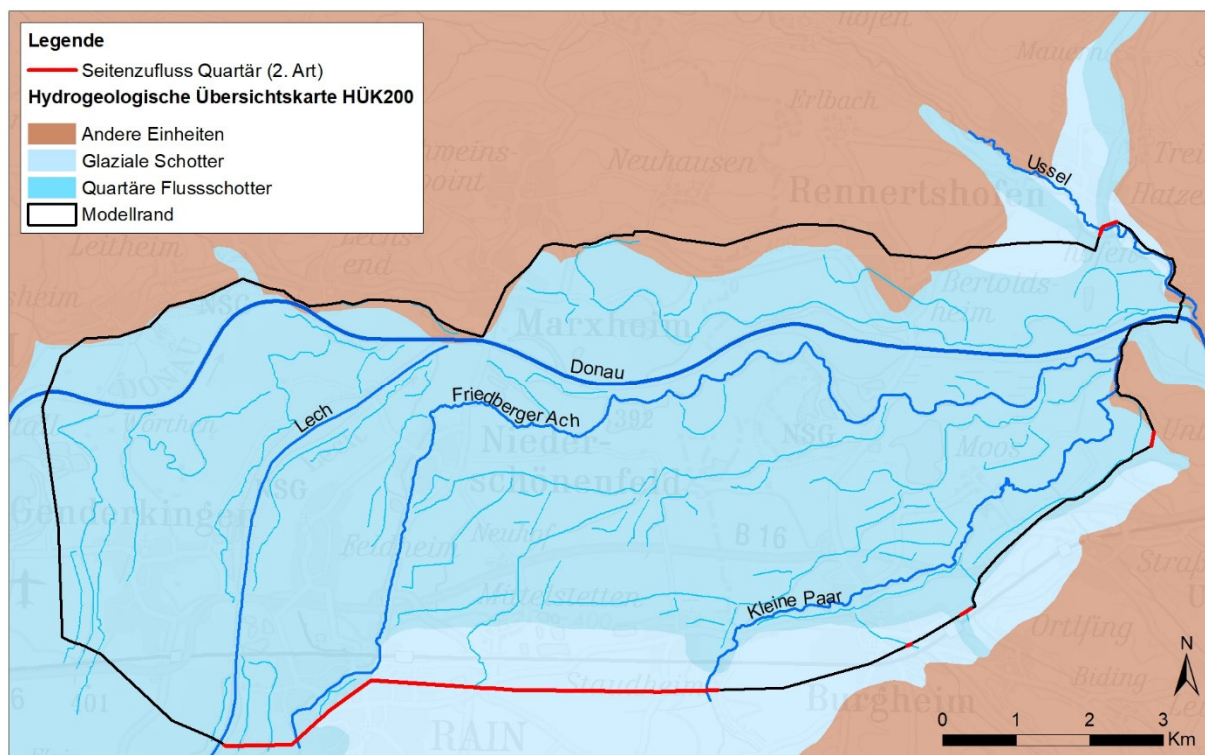


Abbildung 47: Zuströmbereiche aus quartären Grundwasserleitern (rote Linienstücke) und Ausdehnung der Quartären Schotter gemäss der Hydrogeologischen Übersichtskarte von Deutschland 1:200'000.

Resultate Die resultierenden Randzuflüsse aus den quartären Grundwasserleitern mit den für die Berechnung verwendeten Parametern sind in Tabelle 9 aufgeführt. Der Zufluss aus der Hochterrasse zwischen Rain und Burgheim bildet den grössten Bilanzanteil. Bei der Modellkalibrierung sollte die Sensitivität auf diesen Zufluss deshalb untersucht werden.

Tabelle 9: Berechneter Zustrom in den quartären Grundwasserleitern der Seitentäler und der Hochterrasse Rain.

Zustromgebiet	M [m]	L [m]	kf [m/s]	I [‰]	Q [Mio. m ³ /a]
Lech	6,0	630	$2 \cdot 10^{-3}$	3,0	0,72
Hochterrasse Rain	8,0	6'410	$2 \cdot 10^{-3}$	2,5	8,09
Kleine Paar	3,0	320	$2 \cdot 10^{-3}$	2,5	0,15
Leitenbach	3,0	60	$2 \cdot 10^{-3}$	2,5	0,03
Vohbach	3,0	170	$2 \cdot 10^{-3}$	2,5	0,08
Schwarzgraben	3,0	190	$2 \cdot 10^{-3}$	2,5	0,09
Ussel / Sprösselbach	3,5	340	$2 \cdot 10^{-3}$	2,5	0,19

5.4.3 Grundwasserzustrom aus dem Karst

Situation	In der Fränkischen Alb, nördlich des Modellgebietes, schließen die verkarsteten Kalkgesteine des Oberjura an der Oberfläche auf. Die Gesteine tauchen in süd-südöstlicher Richtung unter die tertiären Sedimente der Molasse ab. Entlang des nördlichen Modellrandes sind die Gesteine des Oberjura in direktem Kontakt zum Schottergrundwasserleiter, resp. sind von diesem nur durch eine geringmächtige Tertiärschicht getrennt. Die Druckhöhen im Karst sind in diesem Bereich höher als im Schotter. Es ist deshalb zu erwarten, dass am Nordrand des Modells ein Zustrom von Karstgrundwasser stattfindet.
Karstpotential	Abbildung 48 zeigt die Grundwasserpotentiale im Tiefbrunnen Rennertshofen im Vergleich zur nahegelegenen Quartärmessstelle HA_2. In der Messstelle des Tiefbrunnens Rennertshofen wird der Grundwasserstand monatlich gemessen, in der Messstelle HA_2 ist ein Logger installiert. Die Darstellung zeigt, dass das Grundwasserpotential im Oberjura mit wenigen Ausnahmen etwa 50 cm höher ist als im quartären Schotter.
Berücksichtigung im Modell	Der Karstwasserzufluss wird im Modell in den Bereichen, in welchen der Oberjura nur durch eine geringmächtige Tertiärschicht vom Grundwasserleiter getrennt ist, über eine Cauchy-Randbedingung berücksichtigt. Der Leakagewert wird aus der Mächtigkeit der Tertiärschicht und der Durchlässigkeit des Tertiärs berechnet. Da zur Durchlässigkeit der Tertiärschicht eine grosse Unsicherheit besteht, muss dieser Wert in einer Sensitivitätsuntersuchung variiert werden.

Da die Unsicherheit zur Tertiärdurchlässigkeit gross ist, soll bei der Kalibrierung die Sensitivität des Modells auf diesen Parameter untersucht werden.

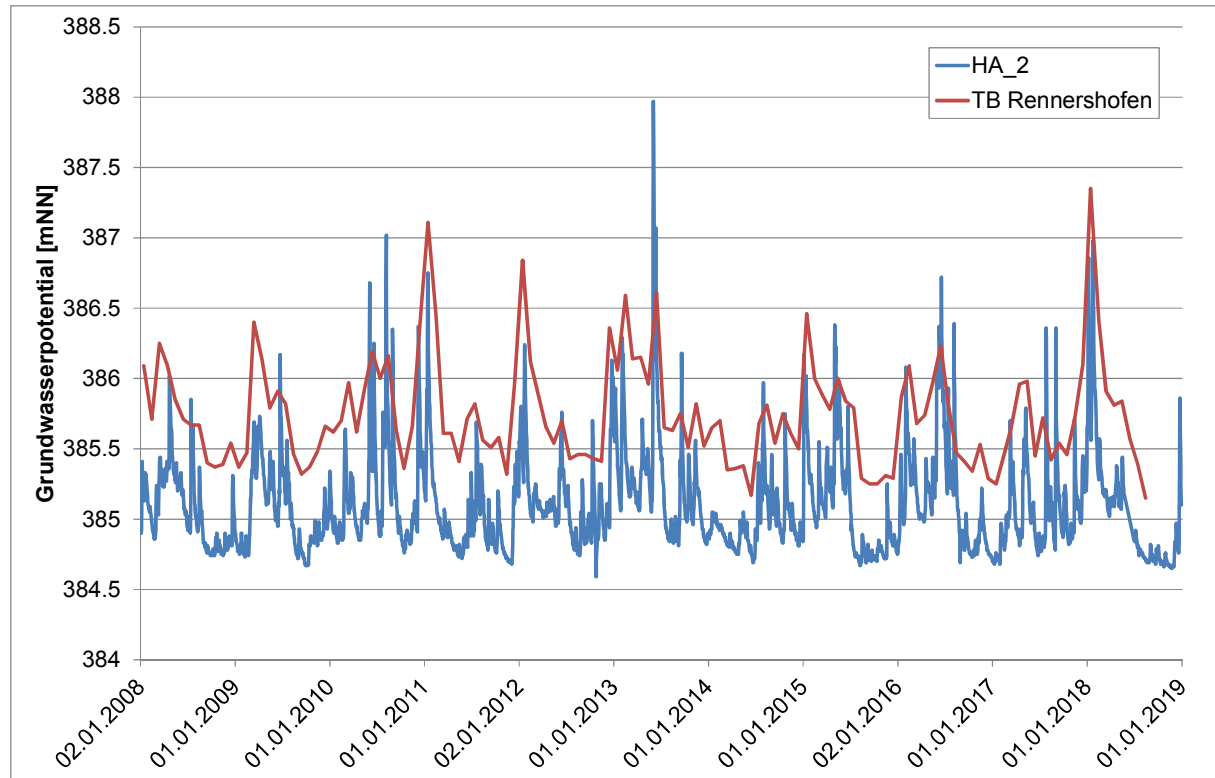


Abbildung 48: Grundwasserpotentiale im Tiefbrunnen Rennertshofen (Oberjura) und in der nahegelegenen Quartärmessstelle HA_2.

5.5 Überflutungsflächen

Bei Hochwasserereignissen der Donau werden Donaunahe Gebiete überflutet. Im Grundwassermodell werden Überflutungsflächen mit einer Cauchy-Randbedingung berücksichtigt. Für den Leakagewert wird aus der Deckschichtdurchlässigkeit und deren Mächtigkeit ein Ausgangswert errechnet. Mit der Kalibrierung am Hochwasserereignis 2013 kann der Leakagewert anschließend enger eingegrenzt werden. Für dieses Hochwasserereignis liegt eine hydraulische Berechnung der Überflutungshöhe vor. Die Lage des Wasserspiegels und die von der Randbedingung betroffenen Modellknoten werden aus den Resultaten des hydraulischen Modells übernommen.

5.6 Grundwasserentnahmen

Datengrundlage

Im Modell werden insgesamt 19 Grundwasser-Entnahmestellen berücksichtigt. Die Brunnen zur landwirtschaftlichen Bewässerung werden bereits bei der Berechnung der Grundwasserneubildung berück-

sichtig. Der Wissensstand über die Fördermengen ist unterschiedlich. Von einigen Entnahmestellen sind nur Jahresfördermengen bekannt, teilweise liegen jedoch auf Tageswerte vor.

Modellvorgaben

Im Modell werden die Fördermengen als Tageswerte vorgegeben. Sind die Tagesfördermengen bekannt, so werden diese im Modell vorgegeben. Ist die Jahresfördermenge bekannt, so wird sie durch die Anzahl der Tage des Jahres geteilt.

In Tabelle 10 sind die Entnahmemengen der im Modell berücksichtigten Entnahmestellen für die Jahre 2010 bis 2015 zusammengestellt. Abbildung 49 zeigt die Lage der Brunnen im Modellgebiet.

Tabelle 10: Fördermengen aus dem quartären Grundwasserleiter im Modellgebiet [m³/Jahr].

Brunnen	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Burgheim, FB 1	0	0	0	0	0	0
Burgheim, FB 2	0	0	0	0	0	0
Burgheim, FB 3	0	0	0	0	0	0
Dehner GmbH & Co.	0	0	0	0	0	0
Rain-Südzucker Br. 1	2055	2946	8114	3624	3011	5033
Rain-Südzucker Br. 2	2055	2946	8114	3624	3011	5033
Rain-Südzucker Br. 3	2055	2946	8114	3624	3011	5033
Rain-Südzucker Br. 4	2055	2946	8114	3624	3011	5033
Rain-Südzucker Br. 5	2055	2946	8114	3624	3011	5033
Rain-Südzucker Br. 6	2055	2946	8114	3624	3011	5033
Rain Brunnen 5	51067	45337	48784	55261	57900	70390
Rain Brunnen 6	431926	427123	457123	454243	456411	527330
Rain Brunnen 7	438204	424794	459927	459108	460991	533703
Donaust. Bertolds. Br. 1	4986	4986	5000	4986	4986	4986
Donaust. Bertolds. Br. 2	0	0	0	0	0	0
HZ-Brunnen I	10262015	8110151	12864669	11712676	10902040	12622395
HZ-Brunnen II	7919179	9818562	8848912	8255785	10381141	12163667
HZ-Brunnen III	6044708	8573440	6024994	6672380	7188932	7198778
Br. 7-8 (8)	170802	162688	173466	187979	167203	156308
Summe	25335217	27584754	28931559	27824164	29637671	33307757

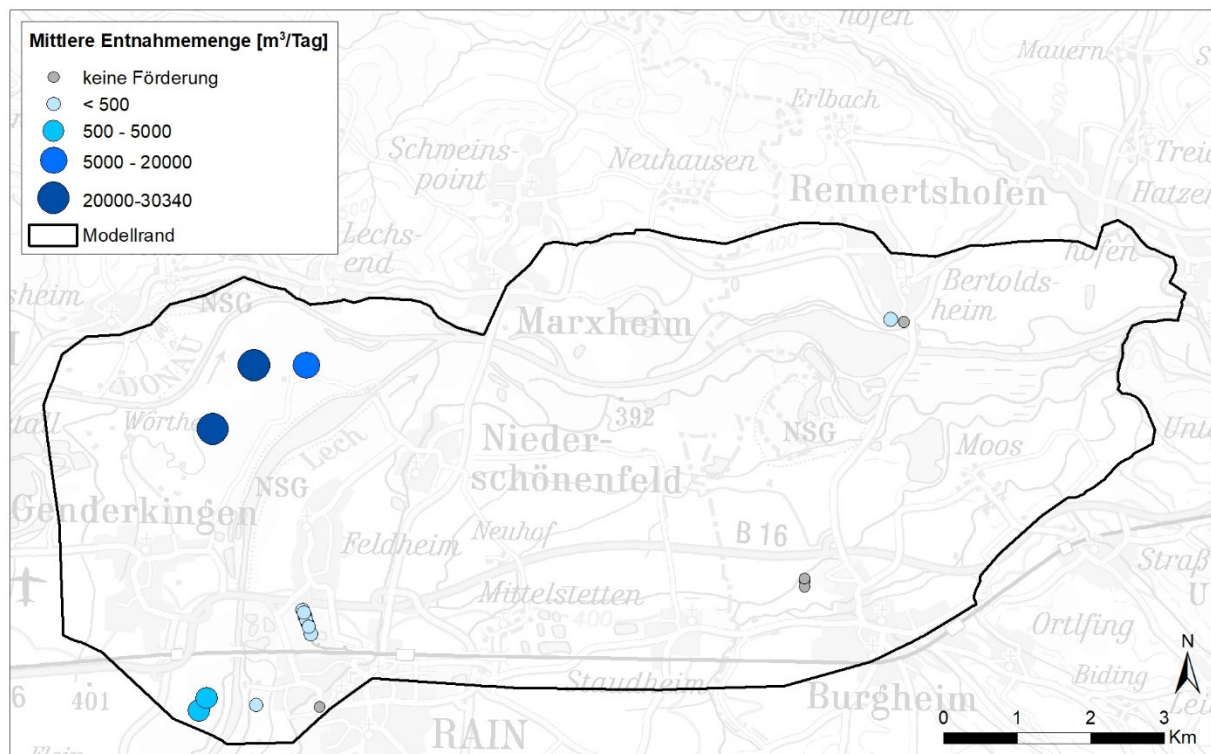


Abbildung 49: Im Modell berücksichtigte Brunnen mit der mittleren Entnahme für die Jahre 2010 bis 2015.

5.7 Bauwerke

Dichtwände

Beim Bau der Staustufe Bertoldsheim sowie der Staustufe Feldheim am Lech wurden die neu errichteten Dämme im Bereich der Staustufen mit Dichtwänden versehen. Dadurch wird in den Bereichen mit großem Gefälle vom Stauwasserspiegel zum Grundwasserspiegel der Zustrom zum Grundwasser vermindert. Die Dichtwände müssen im Grundwassermodell mit Elementen kleiner Durchlässigkeit berücksichtigt werden. Die den Elementen zugeordneten Durchlässigkeitswerte sind abhängig von der Netzfeinheit und können deshalb erst beim Modellaufbau festgelegt werden. Abbildung 50 zeigt die Lage der Dichtwände.

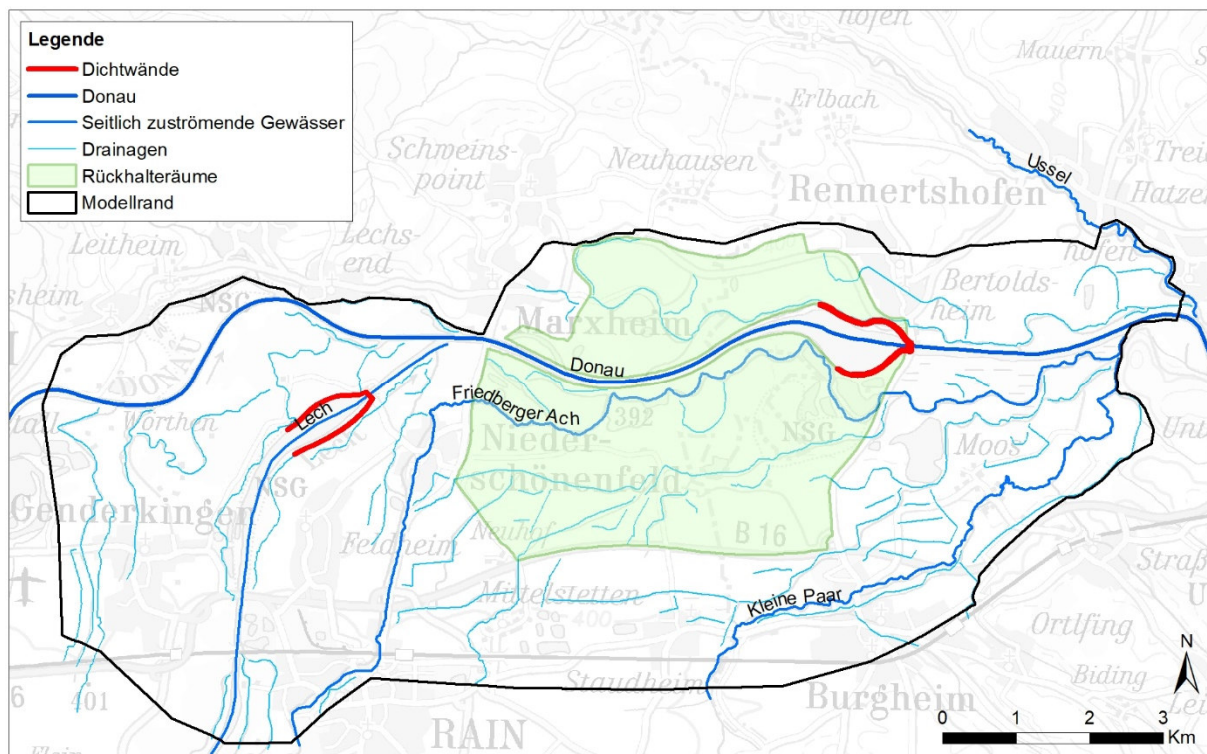


Abbildung 50: Dichtwände im Modellgebiet.

6 Vorläufige Wasserbilanz

Bilanzzeitraum	Für die Wasserbilanz wurde das hydrologische Jahr 2017 (01.11.2016 – 31.10.2017) ausgewählt. Der Jahresniederschlag entsprach in diesem Jahr etwa dem Mittelwert der hydrologischen Jahre 1997 bis 2017 (Abbildung 51). Der Donauabfluss war in diesem Jahr im Vergleich zum Mittelwert hingegen etwas tief (Abbildung 52).
Wasserbilanz	<p>Die nach Kapitel 5 für das hydrologische Jahr 2017 bestimmten Bilanzgrößen des quartären Grundwasserleiters sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Nicht in der Bilanz enthalten sind die Infiltration und Exfiltration aus den Oberflächengewässern sowie der Karstzufluss.</p> <p>Die In- und Exfiltration aus grösseren Gewässern ist nicht messbar, da sie klein ist im Vergleich zum Gesamtabfluss. Bei Drainagegewässern lässt sich die Exfiltration über Abflussmessungen messen. Eine Messung ist im Rahmen der Stichtagsmessung vorgesehen.</p>

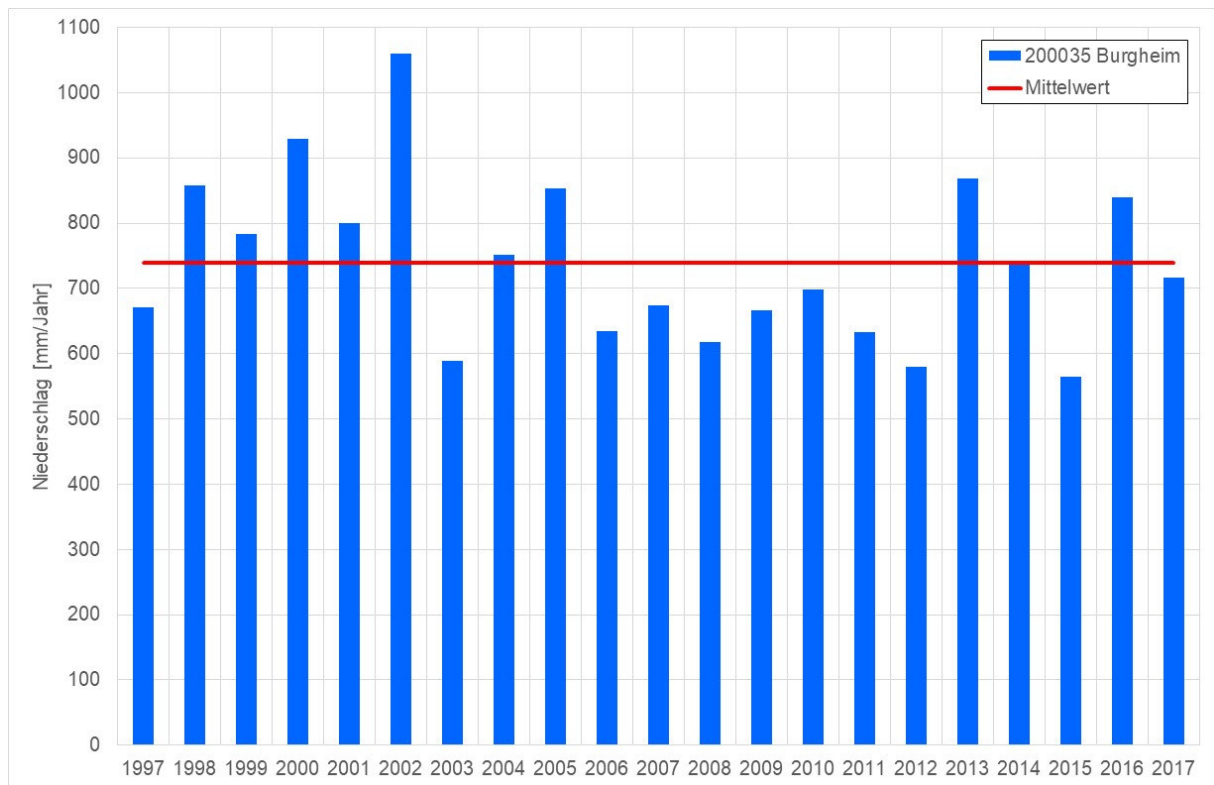


Abbildung 51: Gemessener Jahresniederschlag in der Messstelle 200035 Burgheim für die hydrologischen Jahre 1997 – 2017.

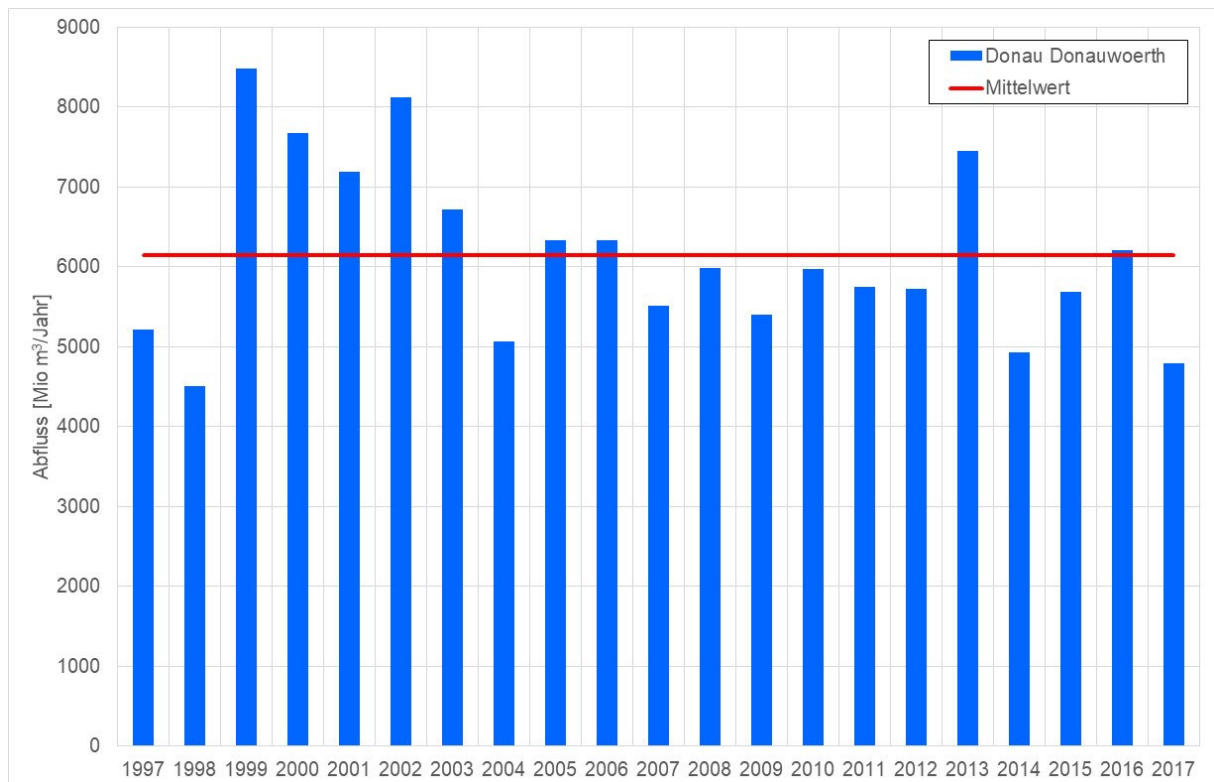


Abbildung 52: Abfluss der Donau bei Donauwörth in den hydrologischen Jahren 1997 – 2017.

Karstzufluss

Eine Bestimmung der Karstzuflüsse aus dem Chemismus des Grundwassers ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich. Die Grundwässer aus dem Karst und dem quartären Schotter unterscheiden sich nur wenig (Abbildung 53 und Abbildung 54). Eine Berechnung des Karstzuflusses aus dem Mischverhältnis wäre nur bei deutlich unterschiedlichem Chemismus möglich.

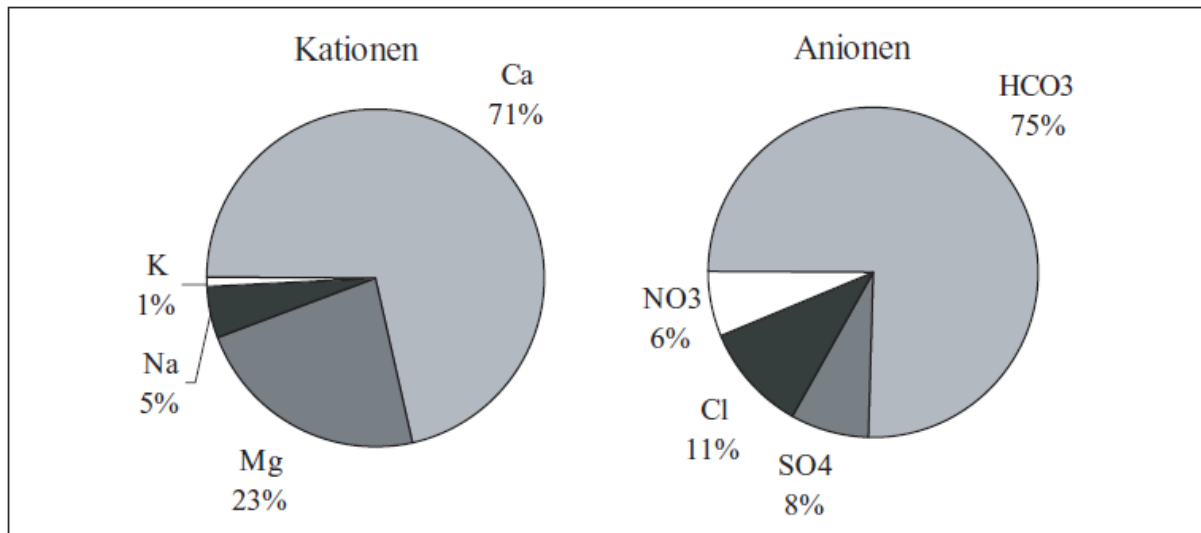


Abbildung 53: Prozentuale Verteilung der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Karst (Quelle: Erläuterungen zur hydrogeologischen Karte 1:100'000 Planungsregion 10 Ingolstadt)

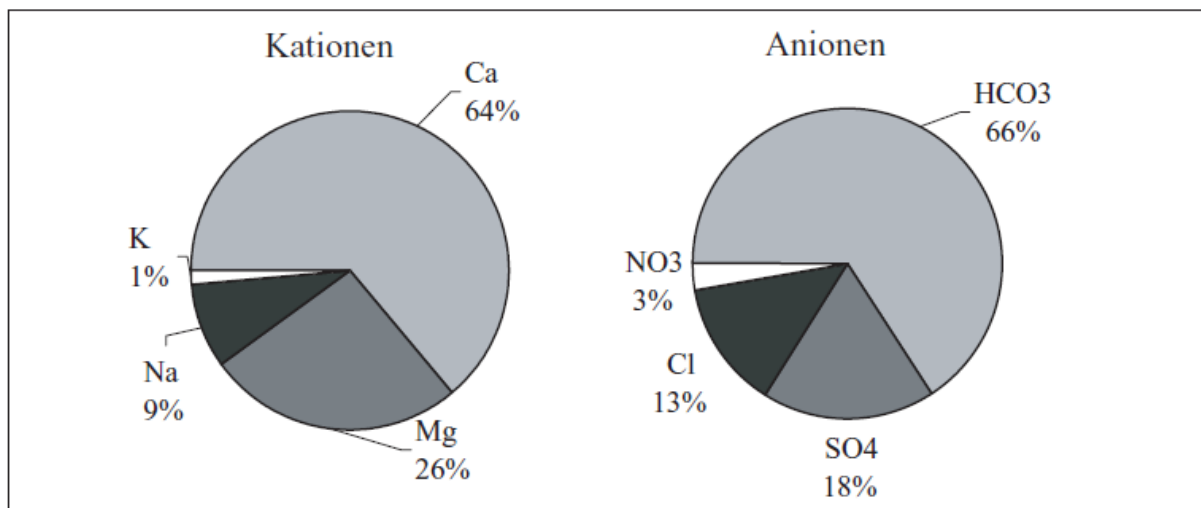


Abbildung 54: Prozentuale Verteilung der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den quartären Schottern (Quelle: Erläuterungen zur hydrogeologischen Karte 1:100'000 Planungsregion 10 Ingolstadt).

Tabelle 11 zeigt einen Auszug aus den veröffentlichten Trinkwasserwerten der Wasserversorgungen aus den Tiefbrunnen Rennertshofen und Burgheim, sowie den Quartärbrunnen Rain. Mit Ausnahme der Na- und Cl-Werte zeigen sich kaum Unterschiede. Die hohen Na- und Cl-Werte im quartären Grundwasser sind wohl hauptsächlich anthropogen verursacht und dürften sich lokal deutlich unterscheiden.

Tabelle 11:

Chemismus des Trinkwassers nach TrinkwV 2001
(<https://www.rennertshofen.de/>, <https://www.burgheimer-gruppe.de/>,
<https://www.rain.de>)

Parameter	Rennertshofen	Burgheim]	Rain
Ca	94	64	70
Mg	23	26	19.6
Na	3.7	2.4	12.8
K	1.4	1.6	1.9
SO4	19	17	25.5
Cl	12	1.6	18.8

Tabelle 12:

Wasserbilanz des quartären Grundwasserleiters für das hydrologische Jahr 2017.

Messgröße	Zustrom [Mio. m ³]	Abstrom [Mio. m ³]
Neubildung	8.5	
Seitenzufluss	0.1	
Seitenzufluss Quartärleiter	9.4	
Fördermengen		27.6

7 Vorgehen bei der Kalibrierung

Methode	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.
Automatisches Verfahren	Für die Kalibrierung wird die Software „PEST“ eingesetzt [20]. PEST beruht auf dem Gauß-Marquardt-Levenberg-Algorithmus. Dieser Algorithmus sucht das lokale Minimum einer Zielwertfunktion. Er eignet sich besonders für Fälle, in denen die möglichen Parameterkombinationen bereits durch bestehende Vorkenntnisse eingegrenzt wurden. Als Zielfunktion der Kalibrierung wird die Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung aller Messungen verwendet. PEST erlaubt sowohl die Verwendung der „pilot point“-, als auch der Zonierungsmethode. Bei der „pilot point“-Methode wählt das Programm die Grenzen der Durchlässigkeitszonen selber, bei der Zonierungsmethode werden sie vorgegeben. Für das geplante Modell eignet sich die Zonierungsmethode besser, da entlang der Terrassenkante bekannte Zonengrenzen existieren. Zudem sollen auch die Leakagewerte der Gewässer in die Kalibrierung einbezogen werden.
Manuelle Kalibrierung	Vorgängig zur Kalibrierung mit PEST wird mit Hilfe von Sensitivitätsrechnungen eine erste manuelle Kalibrierung vorgenommen. Damit werden mögliche Zonierungen getestet und die Ausgangswerte der Parameter für die automatische Kalibrierung bestimmt. Nach der automatischen Kalibrierung wird nochmals eine manuelle Kalibrierung durchgeführt, welche das Gewicht neben der Minimierung der Abweichungen auch auf die gute Abbildung des zeitlichen Verhaltens legt. Sofern aus der automatischen Kalibrierung auf kleinem Raum hohe Durchlässigkeitsunterschiede resultieren, werden diese bei der manuellen Kalibrierung nochmals hinterfragt. Damit kann die physikalische Plausibilität verbessert werden.
Fixierung von Parametern	Eine gute Übereinstimmung von Modellresultaten und Messwerten kann meistens mit verschiedenen Parameterkombinationen erzielt werden, da nie alle Parameter voneinander unabhängig sind. 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.

Beim geplanten Modell werden folgende Parameter vorerst fest vorgeschrieben:

- Grundwasserneubildung,
- Seitenzuflüsse von den Talrändern,
- Karstzuflüsse.

Bei der Kalibrierung werden folgende Parameter variiert:

- Durchlässigkeitswerte des Untergrundes,
- Sohldurchlässigkeiten der Gewässer (Leakage),
- Porosität im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels.

Da Karstzuflüsse und Durchlässigkeiten voneinander abhängige Parameter sind (siehe oben), kann gleichzeitig nur einer der Parameter variiert werden. Karstzufluss tritt vor allem nördlich der Donau auf. Resultieren aus der Kalibrierung bei vorgegebenem Karstzufluss nördlich und südlich der Donau deutlich unterschiedene Schotterdurchlässigkeiten, so ist dies ein Hinweis darauf, dass der Karstzufluss angepasst werden muss.

Instationäre Kalibrierung

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. Es ist deshalb empfehlenswert, die Kalibrierung an einem Zeitraum durchzuführen, welcher sowohl Hochwasserereignisse wie auch Nieder- und Mittelwasserstände umfasst. Geeignete Jahre für die Kalibrierung sind die Jahre 2013 und 2017. Im Jahr 2013 fand ein Hochwasserereignis statt, bei welchem die Donau über die Ufer getreten ist. Im Jahr 2017 liegen bereits die Messungen der neuen Pegel des WWA Ingolstadt vor. In Abbildung 55 sind die gemessenen Abflussganglinien der Donau für die Jahre 2013 und 2017 der Messstelle 10039802 Donauwörth dargestellt.

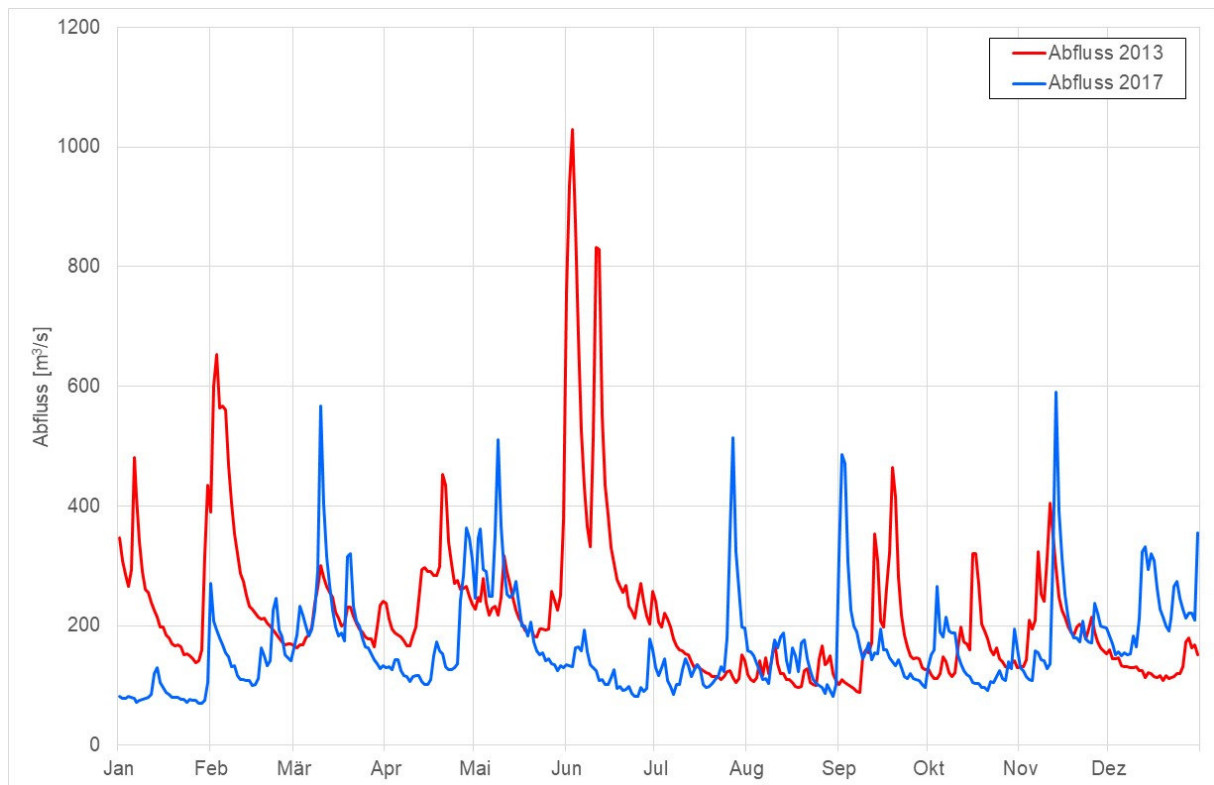


Abbildung 55: Gemessener Donauabfluss der Jahre 2013 und 2017 in der Messtelle 10039802 Donau, Donauwörth.

8 Zusammenfassung, Empfehlungen

Zusammenfassung	<p>Entlang der Donau sollen gesteuerte Flutpoldern erstellt werden. Der Flutpolder Bertoldsheim ist einer der möglichen Flutpolderstandorte. Für die Quantifizierung des Einflusses des Polders auf die Grundwasserverhältnisse wird ein Grundwassermodell erstellt.</p> <p>Der vorliegende Bericht fasst die Datenlage im Januar 2019 zusammen und beschreibt den Aufbau des hydrogeologischen Modells. Das hydrogeologische Modell ist dreidimensional und umfasst die Deckschicht, den quartären Grundwasserleiter, die tertiären Molassesedimente und den Karstgrundwasserleiter des Weissen Jura. Mit Ausnahme von Teilbereichen entlang des nördlichen Modellrandes wird der Karstgrundwasserleiter durch die schlecht durchlässigen Molasseschichten vom quartären Grundwasserleiter getrennt.</p> <p>Das hydrogeologische Modell wird in ein zweidimensionales numerisches Modell des quartären Grundwasserleiters umgesetzt. Der Zufluss von Karstwasser aus dem Karstgrundwasserleiter wird durch eine Cauchy-Randbedingung berücksichtigt.</p> <p>Die Ränder des Grundwassermodells wurden so gewählt, dass möglichst eindeutige Randbedingungen gewählt werden können. Die Verfahren zur Berechnung der Randbedingungen im Innern und am Außenrand des Modells wurden dargelegt.</p> <p>Anhand der festgelegten Verfahren wurde die Wasserbilanz für das hydrologische Jahr 2017 errechnet. Nicht in der Bilanz enthalten sind die Infiltration und Exfiltration aus den Oberflächengewässern sowie der Karstzufluss. Diese Größen werden erst im Rahmen der Kalibrierung des Modells quantifiziert.</p>
Empfehlungen	<p>Der Grundwasserhaushalt im Modellgebiet wird stark durch den Austausch mit den grösseren Oberflächengewässern (Donau, Lech, Friedberger Ach, Kleine Paar, Ussel) beeinflusst. Für die Friedberger Ach und die Kleine Paar liegen keine Abflussmessungen vor. Die benötigten Abflussganglinien werden bisher aus Niederschlag-Abfluss-Modellen bestimmt. Diese sind jedoch mit grossen Unsicherheiten behaftet. Es wird daher empfohlen an der Friedberger Ach und der Kleinen Paar Abflussmessstellen einzurichten.</p>

9 Literatur

- [1] Karlsruher Institut für Technologie KIT (2016): Abschlussbericht Karststudie – Erstellung eines hydrogeologischen Konzeptmodells inkl. Grundwasserbilanzierung.
- [2] kup (2007): Grundwassermodell Genderkingen/Oberndorf. Numerisches Grundwassermodell. Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, Stuttgart im Auftrag des Zweckverbands Wasserversorgung Fränkischer Wirtschaftsraum (WFW). Bericht vom März 2007.
- [3] Prinz H., Strauss R. (2010): Ingenieurgeologie. Springer.
- [4] Hölting, B. (1996): Hydrogeologie. Ferdinand Emke Verlag Stuttgart.
- [5] Udluft P. (2000): Das Grundwasser im schwäbischen Donautal. Schriftenreihe der Bayerischen Sand- und Kiesindustrie, Heft 11/2000.
- [6] Emmert M., Haakh F., Lang U., Schloz W. (2000): Das numerische Grundwassermodell für das Donauried. LW-Schriftenreihe 2000, Heft 19, S. 15-23, Stuttgart.
- [7] Nusch, S., Gmünder, C., Traber, D. (2013): Hydrogeologische Daten der Tiefenaquifere als Grundlage für die hydrogeologischen Modelle SGT Etappe 2. Nagra NAB 13-43. Nagra, Wettingen.
- [8] Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (2016), Geländemodell DGM 1.
<http://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/gelaende.html>.
- [9] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2010): Bodennutzung der landwirtschaftlichen Betriebe in Bayern 2010, Totalerhebung. Herausgegeben im Oktober 2014.
- [10] Brahmer, G. (2009): Operationelle Wasserhaushaltsmodellierung zur Hochwasservorhersage in Hessen. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLUG). Jahresbericht 2009 des HLUG, Wiesbaden, S. 55-61.
- [11] DVWK (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese.

- [12] Dr. Blasy- Dr. Øverland (2005): Hochwasserschutz Thierhaupten N-A-Modell Friedberger Ach.
- [13] Haag, I. und Luce, A. (2008): The integrated water balance and water temperature model LARSIM-WT. Hydrological Processes 22, Nr. 7.
- [14] LARSIM-Entwicklergemeinschaft - Hochwasserzentralen LUBW, BLfU, LfU RP, HLNUG, BAFU (2017): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Stand: 05.12.2018.
- [15] Umwelt Bundesamt (2018): CORINE Land Cover – CLC.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten/corine-land-cover-clc>. Zugriff am 06.09.2018.
- [16] Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. (2006): Crop Evapotranspiration. *FAO Irrigation and Drainage Paper No 56*.
- [17] Mockus V. (1972): Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 10*.
- [18] Volker Armbruster (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 17.
- [19] P. Döll and K. Fiedler (2008): Global-scale modeling of groundwater recharge, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 863–885, 200.
- [20] Doherty J. (2004): PEST – Model-Independent Parameter Estimation. Watermark Numerical Computing.
- [21] Jenson, S. K. und J. O. Domingue. (1988): "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593–1600.
- [22] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017), Digitale Übersichtsbo-denkarte von Bayern im Maßstab 1:25000 (ÜBK25).
- [23] Knauf, D. (1980): Die Berechnung des Abflusses aus einer Schneedecke. In: DVWK (Hrsg.) (1980): Analyse und Berechnung oberirdischer Abflüsse. DVWK-Schriften, Heft 46, 95-135. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Bonn.
- [24] Dehner Gartencenter (2017): Grundwassernutzung zu Kühlzwecken, Dokumentation des ausgeführten Pumpversuches. Bericht HPC AG.