

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

Grundwasser – Hydrogeologisches Modell

Bericht

Anlage 5.1

1	Aufgabenstellung	6
1.1	Veranlassung, Ziel	6
1.2	Glossar	6
1.2.1	Begriffe	6
1.2.2	Abkürzungen	7
2	Daten	8
2.1	Datengrundlagen.....	8
2.2	Bewertung.....	10
3	Hydrogeologisches Modell	10
3.1	Hydrogeologische Übersicht.....	10
3.2	Datenaufbereitung und Vorgehen.....	12
3.3	Hydrostratigraphische Einheiten.....	13
3.3.1	Deckschichten	13
3.3.2	Quartär	17
3.3.3	Tertiär	18
3.3.4	Oberjura.....	20
3.4	Geohydraulische Kennwerte	20
3.4.1	Deckschicht	20
3.4.2	Quartär	21
3.4.3	Tertiär und Jura	24
3.5	Grundwasserhydraulik.....	24
4	Modellkonzept des numerischen Modells	27
4.1	Abstraktion der Hydrogeologie	27

4.1.1	Modellkonzept.....	27
4.1.2	Topografie	28
4.1.3	Randbereiche	28
4.1.4	Modelloberfläche	28
4.1.5	Struktur.....	28
4.1.6	Flexibilität.....	29
4.2	Modellraum und Bilanzraum.....	29
4.3	Randbedingungen.....	33
4.3.1	Grundwasserneubildung	33
4.3.2	Zustrom im quartären Grundwasserleiter	45
4.3.3	Grundwasserzustrom aus dem Karst	46
4.3.4	Austausch mit Oberflächengewässern	52
4.3.5	Überflutungsflächen	58
4.3.6	Grundwasserentnahmen.....	58
4.3.7	Bauwerke.....	60
4.4	Vorläufige Wasserbilanz.....	61
4.5	Vorgehen bei der Kalibrierung.....	64
4.5.1	Methode.....	64
4.5.2	Fixierung von Parametern.....	65
4.5.3	Kalibrierungszeiträume	66
5	Zusammenfassung, Empfehlungen	72
5.1	Zusammenfassung.....	72
5.2	Empfehlung.....	73
6	Literatur.....	73

Anlagenverzeichnis

5.1.1	Deckschichtmächtigkeit
5.1.2	Unterkante Quartär
5.1.3	Tertiärmächtigkeit
5.1.4	kf-Werte und Dichtwände
5.1.5	Interpolierte Grundwasserhöhengleichungen im quartären Grundwasserleiter
5.1.6	Berechnete mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1994 - 2015
5.1.7	Randbedingungen und Leakage-Bereiche
5.1.8	Einzugsbereiche und Zufluss aus den seitlichen Einzugsgebieten
5.1.9	Beweissicherungskonzept

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Querschnitt durch das Donautal im Bereich von Leipheim. 20-fach überhöht.	11
Abbildung 2:	Querschnitt durch das Donautal im Bereich von Helmeringen. 20-fach überhöht.	11
Abbildung 3:	Für die Interpolation der Deckschichtbasis verwendete Bohr- und Hilfspunkte.	14
Abbildung 4:	Interpolierte Unterkante der Deckschicht.	15
Abbildung 5:	Berechnete Deckschichtmächtigkeit im Bereich Leipheim.	15
Abbildung 6:	Berechnete Deckschichtmächtigkeit im Bereich Helmeringen.	16
Abbildung 7:	Berechnete Deckschichtmächtigkeit im Bereich Neugeschüttwörth... ..	16
Abbildung 8:	Für die Interpolation der Quartärbasis verwendete Bohr- und Hilfspunkte.	17
Abbildung 9:	Höhengleichen der resultierenden Quartärbasis.	18
Abbildung 10:	Für die Interpolation der Tertiärbasis verwendete Bohrpunkte.	19
Abbildung 11:	Höhengleichen der resultierenden Tertiärbasis.	19
Abbildung 12:	Mächtigkeit der Tertiärschichten.	20
Abbildung 13:	Klassierung der Deckschichtdurchlässigkeit aufgrund der Materialbeschreibung nach DIN.	21
Abbildung 14:	Ermittelte hydraulische Durchlässigkeiten (k_f -Werte) des quartären Grundwasserleiters in den Bohrpunkten des BIS.	22
Abbildung 15:	Histogramm der Durchlässigkeiten (k_f -Werte) des quartären Grundwasserleiters in den im BIS enthaltenen Pumpversuchen.	23
Abbildung 16:	Aus den Messungen vom 19.12.2015 interpolierte Grundwasserhöhengleichen im quartären Grundwasserleiter.	25
Abbildung 17:	Höhengleichen des Grundwasserpotentials im Karstgrundwasserleiter (aus der Karststudie Donauried [6])	26
Abbildung 18:	Messfrequenz der Grundwassermessstellen im Jahr 1999.	26
Abbildung 19:	Messfrequenz der Grundwassermessstellen im Jahr 2015.	27
Abbildung 20:	Trennung von konzeptionellem Modell und numerischem Modell.	29
Abbildung 21:	Modellraum und geplante Rückhalteräume.	30
Abbildung 22:	Aus den Messungen vom 02.11.2015 linear interpolierte Grundwasserhöhengleichen am Ostrand des Modells.	31
Abbildung 23:	Randbedingungen für das numerische Modell und Begrenzung der quartären Schotter gemäß der hydrogeologischen Übersichtskarte von Deutschland 1: 2000'000 (HÜK200).	32
Abbildung 24:	Aus den Messungen vom 19.12.2015 linear interpolierte Grundwasserhöhengleichen am Westrand des Modells.	33
Abbildung 25:	Verwendete Klimastationen und zugeordnete Modellbereiche.	34
Abbildung 26:	Verwendete Niederschlagsmessstellen und zugeordnete Modellbereiche.	35

Abbildung 27:	Landnutzungszonen zur Berechnung der Evapotranspiration.....	36
Abbildung 28:	Nutzung der Landwirtschaftsflächen innerhalb des Modellgebiets.....	36
Abbildung 29:	Grundwasserneubildung in Funktion der Auffüllung des Bodenspeichers (aus Armbruster, 2002 [13]).	38
Abbildung 30:	Berechnete mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1994 - 2015	39
Abbildung 31:	Mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1971 – 2000 gemäß der hydrogeologischen Karte 1:500.000 des LfU Bayern.....	39
Abbildung 32:	Einzugsbereiche, aus welchen unterirdische Zuflüsse zum Modellgebiet zu erwarten sind.	41
Abbildung 33:	Landnutzung in den seitlichen Einzugsbereichen	42
Abbildung 34:	Aufteilung der Abflusskomponente auf Direktabfluss und Grundwasserneubildung nach Döll und Fiedler 2008.	43
Abbildung 35:	Hangneigung in den Einzugsbereichen.	44
Abbildung 36:	Ausdehnung der Quartären Schotter gemäss der Hydrogeologischen Übersichtskarte von Deutschland 1:200'000.....	45
Abbildung 37:	Lage der in Abbildung 38 dargestellten Messstellen.....	47
Abbildung 38:	Potenziale im Karst- und im Schottergrundwasserleiter.....	47
Abbildung 39:	Einzugsgebiete der Flüsse, welche das Karstgebiet entwässern.....	49
Abbildung 40:	Jährliche Abflussmengen der Blau, Brenz und Egau	51
Abbildung 41:	Im numerischen Grundwassermodell berücksichtigte Fließgewässer.	53
Abbildung 42:	Abdeckung des Modellgebiets durch hydraulische 2D-Modelle.	54
Abbildung 43:	Ausschnitt aus dem digitalen Geländemodell.	58
Abbildung 44:	Im Modell berücksichtigte Entnahmestellen. Die Symbolgröße wurde entsprechend der mittleren Entnahme der Jahre 2010 bis 2015 dargestellt.....	60
Abbildung 45:	Dichtwände im Modellgebiet.....	61
Abbildung 46:	Abfluss der Donau bei Donauwörth in den hydrologischen Jahren 1995 - 2015.....	62
Abbildung 47:	Nach Penman-Monteith aus den Klimadaten von Günzburg berechnete Grundwasserneubildung über Grasland in den hydrologischen Jahren 1995 - 2015	63
Abbildung 48:	Abflussganglinie der Donau zwischen 1994 und 2015 (Quelle LfU)...	67
Abbildung 49:	Ganglinie des Donauabflusses während dem Hochwasser 1999.	68
Abbildung 50:	Ganglinie des Donauabflusses während des Hochwassers 2013.....	68
Abbildung 51:	Lage der Messstelle RIED beim Rückhalteraum Leipheim	69
Abbildung 52:	Messwerte des Grundwasserspiegels in der Messstelle RIED während des Hochwassers 1999.	69
Abbildung 53:	Messwerte des Grundwasserspiegels in der Messstelle RIED während des Hochwassers 2013.	70
Abbildung 54:	Donauabfluss bei Donauwörth (Quelle LfU).....	71

Abbildung 55:	Ganglinie des Donauabflusses während einer Periode mit etwa mittlerem Donauabfluss im Jahr 2015	71
Abbildung 56:	Messwerte des Grundwasserspiegels in der Messstelle RIED während einer Periode mit etwa mittlerem Donauabfluss im Jahr 2015.	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anteile der Anbauprodukte an den Vegetationszonen.	37
Tabelle 2:	Faktor für in Funktion der Hangneigung (nach Döll und Fiedler 2008).	43
Tabelle 3:	Berechneter Zustrom in den quartären Grundwasserleitern der Seitentäler.	46
Tabelle 4:	Klimatische Wasserbilanz des hydrologischen Jahres 2007 für das Einzugsgebiet des Karstgrundwasserleiters.	50
Tabelle 5:	Nach Süden gerichtete Abflüsse	51
Tabelle 6:	Verwendete Abflussganglinien	57
Tabelle 7:	Fördermengen aus dem quartären Grundwasserleiter im Modellgebiet im Mio. m ³ /Jahr	59
Tabelle 8:	Wasserbilanz der Oberflächengewässer	64
Tabelle 9:	Wasserbilanz des quartären Grundwasserleiters.....	64

1 Aufgabenstellung

1.1 Veranlassung, Ziel

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

Zur Prognose der Auswirkungen von Rückhalteräumen auf den Grundwasserspiegel wurde ein numerisches Grundwassermodell des Donautals zwischen Iller und Lech aufgebaut.

Der vorliegende Bericht fasst die vorhandene Datengrundlage zusammen und beschreibt den Aufbau des hydrogeologischen Modells. Das hydrogeologische Modell umfasst einerseits die Strukturierung des Raumes in hydrogeologische Einheiten, andererseits die Konzepte zur Umsetzung in ein numerisches Modell.

Das Vorgehen beim Aufbau des hydrogeologischen Modells richtet sich nach den Leitfäden der FH-DGG [1] und der SDGG [2]. Die Bearbeitungstiefe ist auf die Anforderungen des Raumordnungsverfahrens ausgerichtet.

1.2 Glossar

1.2.1 Begriffe

Rückhalteraum: Für die Erstellung eines Rückhalterausms vorgesehene Fläche. Die effektive Fläche des Rückhalterausms kann in der weiteren Planung abweichen.

Quartärer Grundwasserleiter: Der quartäre Grundwasserleiter umfasst die im Quartär abgelagerten Schotter. Nach unten wird der Grundwasserleiter durch ebenfalls im Quartär abgelagerte Feinsande und Schluffe oder durch die darunterliegenden Schichten des Tertiär oder Schichten aus Kreide und Jura abgegrenzt. Nach oben wird der Grundwasserleiter durch die meist gering durchlässigen Deckschichten begrenzt.

Auswirkungen des Vorhabens: Im Rahmen des Raumordnungsverfahrens sind die Auswirkungen des Vorhabens zu quantifizieren. Dabei sind bzgl. der Grundwasser-

situation die Auswirkungen sowohl während der Flutung der Rückhalteräume, als auch im ungefluteten Zustand darzustellen.

Mittlere Verhältnisse: Zustand mit mittleren Abflüssen in den Gewässern, mittleren Grundwasserständen, mittleren Grundwasserentnahmen und mittlerer Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Da dieser Zustand räumlich nicht überall gleichzeitig erfüllt ist, handelt es sich nicht um einen physikalischen Zustand.

1.2.2 Abkürzungen

BIS	Bodeninformationssystem Bayern
LEW	LEW Wasserkraft GmbH
DWD	Deutscher Wetterdienst
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LUBW	Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
LW	Zweckverband Landeswasserversorgung Baden-Württemberg
MDK	Mittleren Donaukraftwerke AG
mNN	Höhenangabe nach DHHN 12
ODK	Obere Donaukraftwerke AG
WFW	Zweckverband Wasserversorgung Fränkischer Wirtschaftsraum

2 Daten

2.1 Datengrundlagen

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

Daten zu den geologischen Strukturen und deren Parametrisierung

- Schichtenverzeichnisse aus der BIS-Datenbank des Landesamts für Umwelt.
- Auszug aus der BIS-Datenbank
- Vom WWA Donauwörth zusammengestellte Karte der Kiesabbauflächen, teilweise mit Angaben zu den Abbautiefen.
- Bohrprofile und Materialbeschreibungen aus Gutachten zur Kiesausbeutung
- Schichtflächen und Durchlässigkeitsbeiwerte des Grundwassermodells Genderkingen
- Schichtflächen und Durchlässigkeitsbeiwerte des Grundwassermodells Donauried
- Digitales Höhenmodell im 1m Raster
- Lage und Regelprofile von Dichtwänden der Stauhaltungen der Oberen Donaukraftwerke AG (ODK) und der Mittleren Donaukraftwerke AG (MDK)
- Lage und Regelprofile von Dichtwänden der Staustufe Feldheim (Lech), der Staustufe Böfinger Halde (Donau bei Ulm) und verschiedener Deichsanierungen
- Bohrprofile aus dem Hochwasserschutzprojekt Kohlplatte der Gemeinde Leipheim
- Bohrprofile aus verschiedenen Gutachten zur Kiesausbeutung
- Bohrprofile vom Bau der Autobahn A8, Abschnitt westlich Riedheim
- Bohrprofile aus dem Archiv der LEW
- Bohrprofile von 13, im Jahr 2017 im Auftrag des WWA abgeteufte Kernbohrungen
- Bohrprofile von 60, im Jahr 2017 im Auftrag des WWA durchgeführten Rammkernsondierungen zur Erkundung der Deckschicht
- Korngrößenbestimmung und Durchlässigkeitsversuche an 15 Proben der Deckschicht
- 15 Doppelringinfiltrometerversuche zur in situ Bestimmung der Deckschichtdurchlässigkeit

Daten zur Lage des Grundwasserspiegels

- Grundwasserspiegel in Messstellen der LEW
- Grundwasserspiegel in Messstellen der Landeswasserversorgung Stuttgart
- Grundwasserspiegel in Messstellen des WFW
- Grundwasserspiegeldaten des LfU
- Grundwasserspiegeldaten des Landesmessnetzes
- Messdaten der Beweissicherung im Rahmen der Nauausleitung in das Leipheimer Moos
- Verschiedene Messdaten aus Gutachten zur Trinkwassergewinnung und Kiesausbeutung
- Schreibpegeldaten des Hochwassers 1999 aus dem Archiv der LEW
- Loggerdaten aus dem Sondermessnetz des WWA

Daten zu den klimatischen Bedingungen

- Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (Stationen Neu-Ulm, Ulm, Senden, Nersingen, Günzburg, Hermaringen, Niederstotzingen, Gundelfingen, Dillingen, Glött, Fristingen, Finningen, Blindheim, Stillnau, Aislingen, Bissingen Kläranlage, Donauwörth, Kaisheim, Ostweiler, Wertingen, Mertingen, Ellgau, Rain, Hagenheim, Stötten)
- Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern (Stationen Frauenriedhausen und Weissingen)
- Klimadaten des Gewässerkundlichen Dienstes des LfU (Stationen Burgheim, Neuhof)

Nutzungsdaten

- Vektorkarte des Freistaats Bayern
- Nutzungskarte nach Corinne 2000 des LUBW
- Bodennutzung der landwirtschaftlichen Betriebe in Bayern 2010. Erhebung des Landesamts für Statistik
- Vom WWA Donauwörth zusammengestellte Liste der Entnahmebrunnen, mit Entnahmerechten und aktuellen Entnahmemengen der größeren Entnahmen.
- Monatliche Entnahmemengen der LW des Zeitraums 1994 - 2015
- Tägliche Entnahmemengen der ZWFW des Zeitraums 1994 - 2015

Gewässerdaten

- Gewässernetz des LfU Bayern
- Pegel und Abflussmengen des Hochwassernachrichtendienstes Bayern von den Gewässern Donau, Iller, Illerkanal, Roth, Günz, Mindel, Kammel, Brenz, Egau, Wörnitz, Zusam, Schmutter, Kessel und Lech
- Abflussmessungen der Blau der Jahre 2005 bis 2016 (LUBW)

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

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst den Donauabschnitt zwischen Iller und Lech mit einer Länge von etwa 80 km. Die Flusslandschaft zwischen Neu-Ulm und Donauwörth wird auch als Donauried bezeichnet. Die frühere Moorlandschaft wurde durch die Donaukorrektur im 19. Jahrhundert nutzbar gemacht. Zwischen 1953 (Böfinger Halde) und 1984 (Kraftwerk Donauwörth) wurden insgesamt 11 Staustufen zur Nutzung der Wasserkraft errichtet [18]. An das Talgebiet schließt sich nördlich die Schwäbische Alb an, südlich wird es durch die Ausläufer des Molassehügellandes begrenzt. Das nordwestlich von Donauwörth gelegene Nördlinger Ries begrenzt die Schwäbische Alb nach Norden.

Geologie

Die Geologie des Untersuchungsgebietes wurde in verschiedenen Untersuchungen beschrieben [5][6][7]. In [6] findet sich folgende Übersicht: „Der geologische Aufbau des Untersuchungsgebiets ist geprägt durch das Einfallen der Oberjura-Schichten nach Süd-Südosten und dem Abtauchen unter die keilförmigen, nach Süden hin mächtiger werdenden, oligozänen bis miozänen Sedimente des voralpinen Molassebeckens. Überlagert werden die Einheiten der Molasse im Bereich des Donautals durch fluviale und glazifluviale Donaukiese. Das Donautal folgt über weite Strecken in etwa der Grenze zwischen Schwäbischer Alb und Molassebecken.“ Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt durch das Donautal im Bereich des Rückhalteraus Leipheim, Abbildung 2 zeigt einen Querschnitt im Bereich des Rückhalteraus Helmeringen.

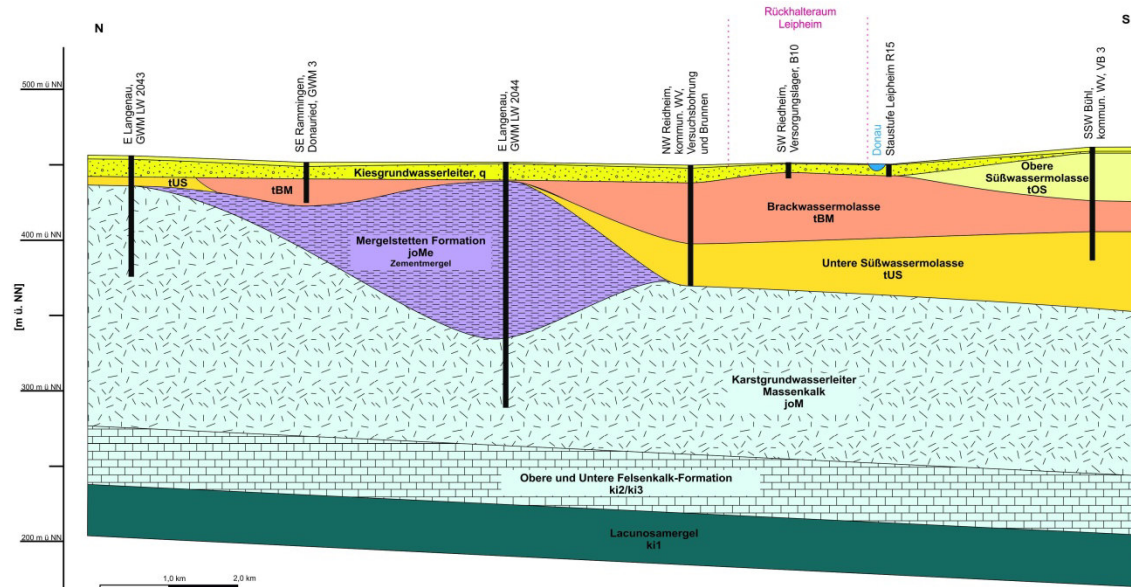


Abbildung 1: Querschnitt durch das Donautal im Bereich von Leipheim. 20-fach überhöht.

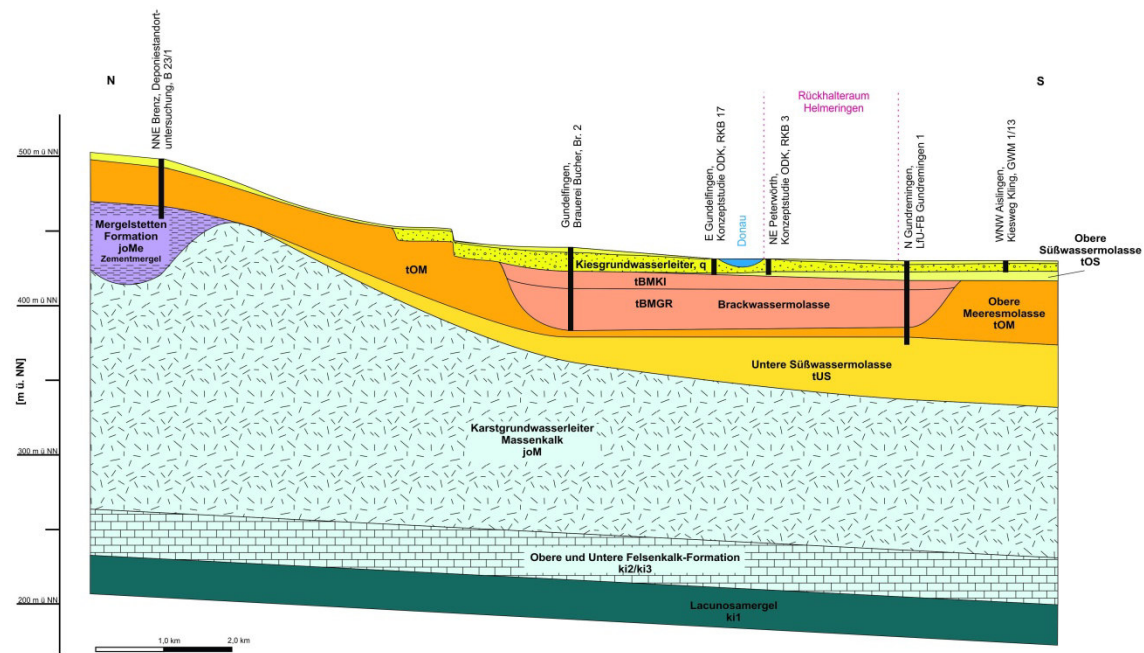


Abbildung 2: Querschnitt durch das Donautal im Bereich von Helmeringen. 20-fach überhöht.

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 nördlichen 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 liegt für das Donauried nach zahlreichen Pumpversuchen bei überwiegend 1×10^{-3} bis 1×10^{-2} m/s.

Tertiäre Molasse

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.

Oberjura

Die karbonatischen Ablagerungen des Oberen Jura (Malm) 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. Im nördlichen Randbereich des Donautals wird die jurassische Albtafel von tertiären Sedimenten, deren Mächtigkeit nach Südosten keilförmig zunimmt, überlagert.

Der Malm 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% [6] aus. Im nördlichen Donauried erfolgt eine Einspeisung von Karstgrundwasser in den quartären Kiesgrundwasserleiter

3.2 Datenaufbereitung und Vorgehen

Als Datengrundlage für das hydrogeologische Modell wurden insbesondere die Schichtenverzeichnisse aus dem BIS des Bayerischen Landesamtes für Umwelt verwendet. Insgesamt wurden rund vier Tausend Schichtenverzeichnisse ausgewertet.

Folgende Schichtgrenzen wurden in eine Tabelle übertragen:

- Geländeoberkante
- Unterkante Auffüllung
- Unterkante Deckschicht
- Oberkante Grundwasserleiter Quartär
- Unterkante Quartär
- Oberkante Tertiär
- Unterkante Tertiär
- Oberkante übrige Schichten (Jura / Kreide)
- Endteufe

Bei der jeweils unter dem Quartär liegenden Schicht (z.B. Tertiär oder Jura / Kreide) ist ihre Oberkante identisch mit der Unterkante des Quartärs.

Die BIS-Daten wurden um die Daten der Quartärbasis aus dem Grundwassermodell Genderkingen [9] sowie die Daten zur Quartär- und Tertiärbasis aus dem Bilanz- und Bewirtschaftungsmodell Donauried der Landeswasserversorgung Stuttgart ergänzt. Es wurden jeweils die Schichtgrenzen an den verwendeten Stützstellen ausgelesen.

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.

3.3 Hydrostratigraphische Einheiten

3.3.1 Deckschichten

Insgesamt wurde in rund 2.150 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).

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.
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.

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. In Abbildung 5 bis Abbildung 7 sind Ausschnitte der berechneten Deckschichtmächtigkeit in den Bereichen der geplanten gesteuerten Rückhalteräume dargestellt. Eine Darstellung des gesamten Untersuchungsgebietes befindet sich in der Anlage 5.1.1.

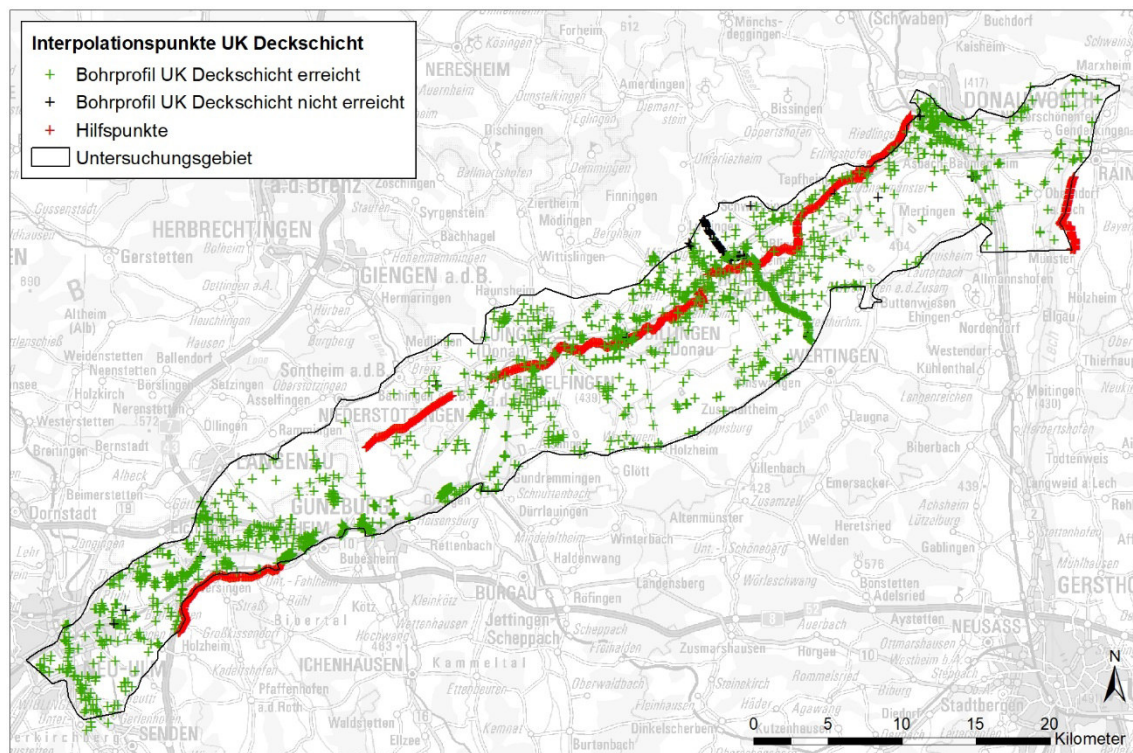


Abbildung 3: Für die Interpolation der Deckschichtbasis verwendete Bohr- und Hilfspunkte.

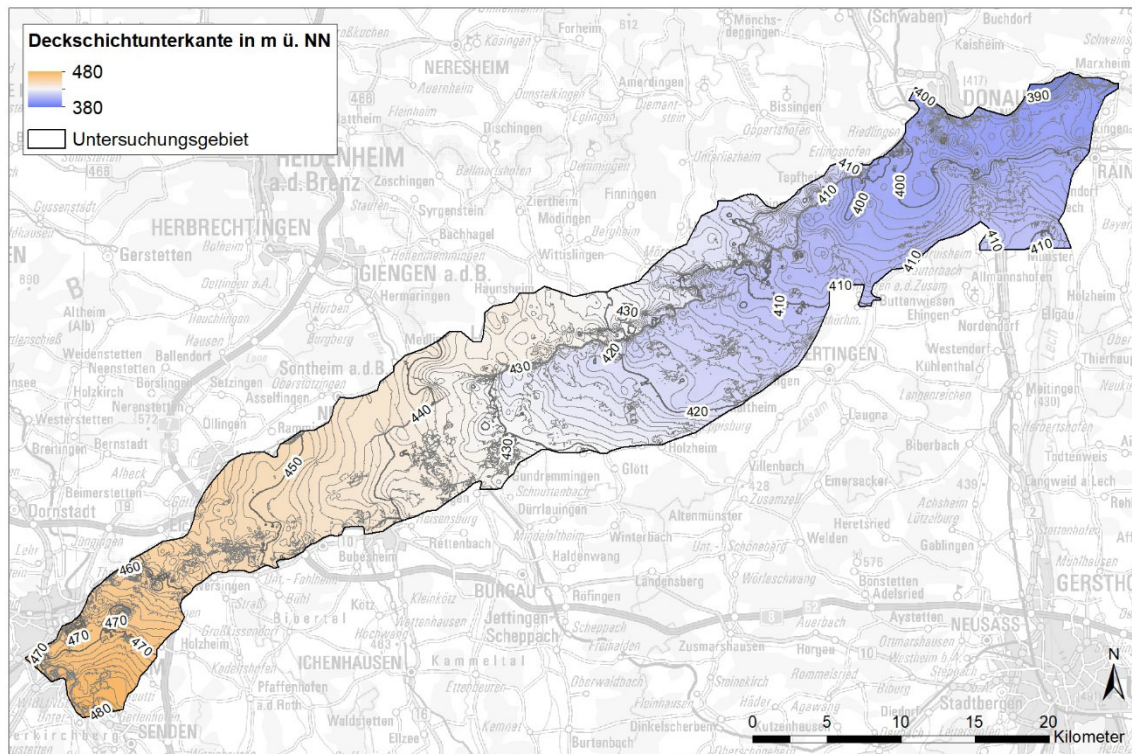


Abbildung 4: Interpolierte Unterseite der Deckschicht.

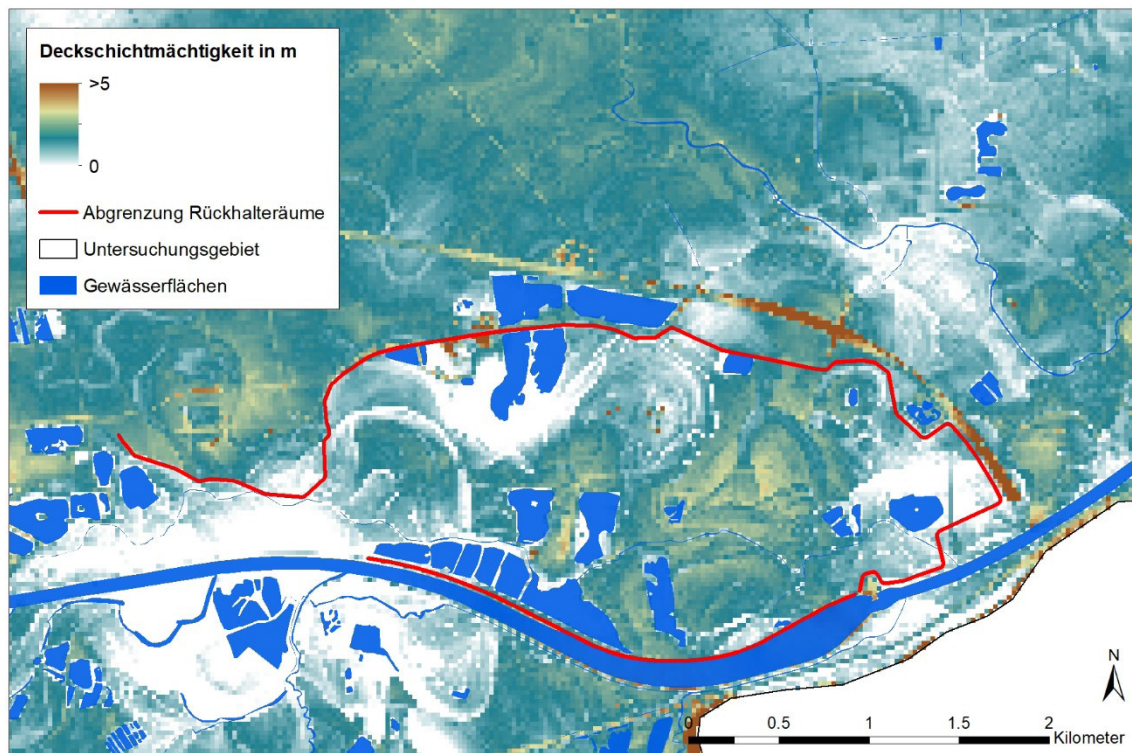


Abbildung 5: Berechnete Deckschichtmächtigkeit im Bereich Leipheim.

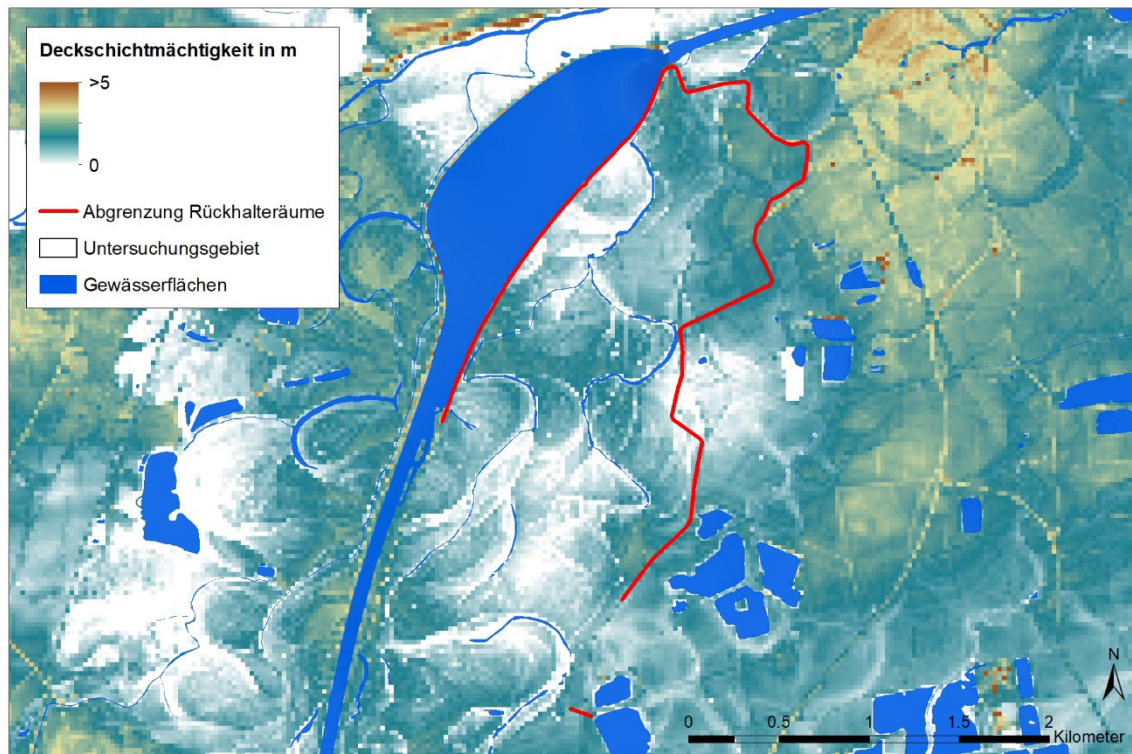


Abbildung 6: Berechnete Deckschichtmächtigkeit im Bereich Helmeringen.

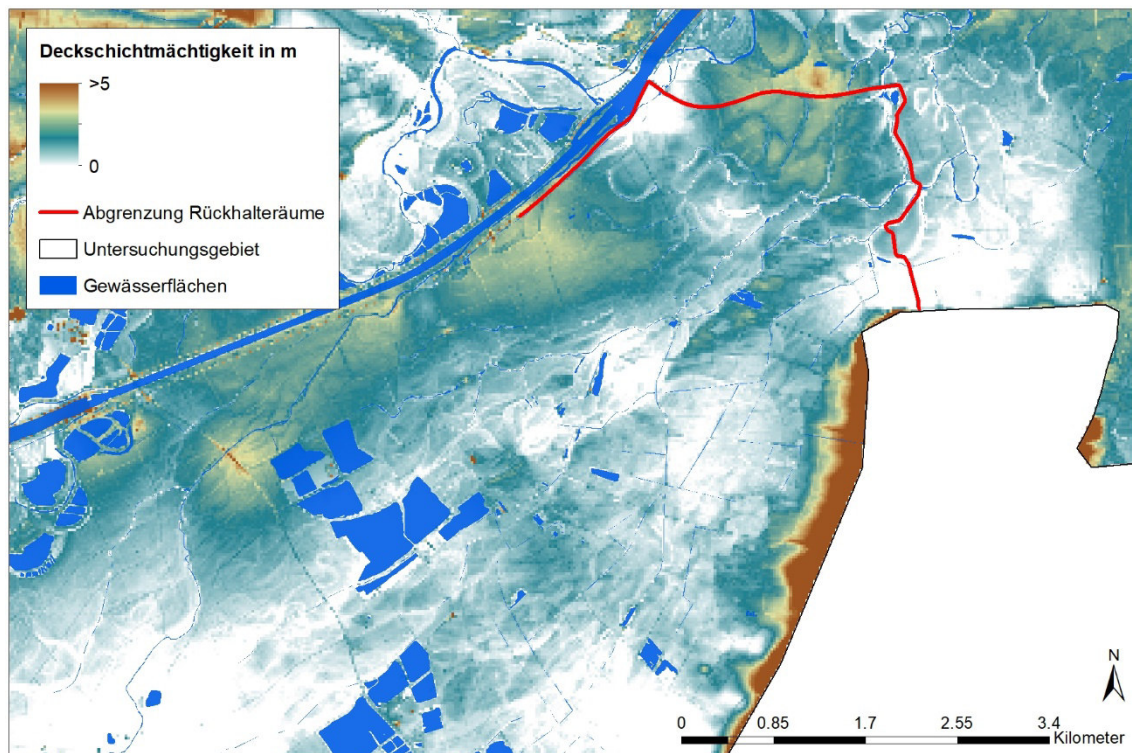


Abbildung 7: Berechnete Deckschichtmächtigkeit im Bereich Neugeschüttwörth.

3.3.2 Quartär

Insgesamt wurde in rund 1.700 Bohrprofilen die Unterkante des Quartärs erbohrt. Bohrungen, welche die Unterkante des Quartärs nicht erreichen, wurden mit einer Maximum-Bedingung in der Interpolation berücksichtigt. (Abbildung 8).

Die Quartären Schotter können im Untersuchungsgebiet in zwei Teilbereiche unterteilt werden. Im Donautalboden befinden sich die Niederterrassenschotter der Würm-Kaltzeit. In Richtung des nördlichen 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.

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. Die verwendeten Bohrpunkte und Hilfspunkte sind in Abbildung 8 dargestellt. Als Interpolationsverfahren wurde die Kriging-Methode verwendet. Abbildung 9 zeigt die resultierende Quartärbasis. Eine detailliertere Darstellung befindet sich in Anlage 5.1.2.

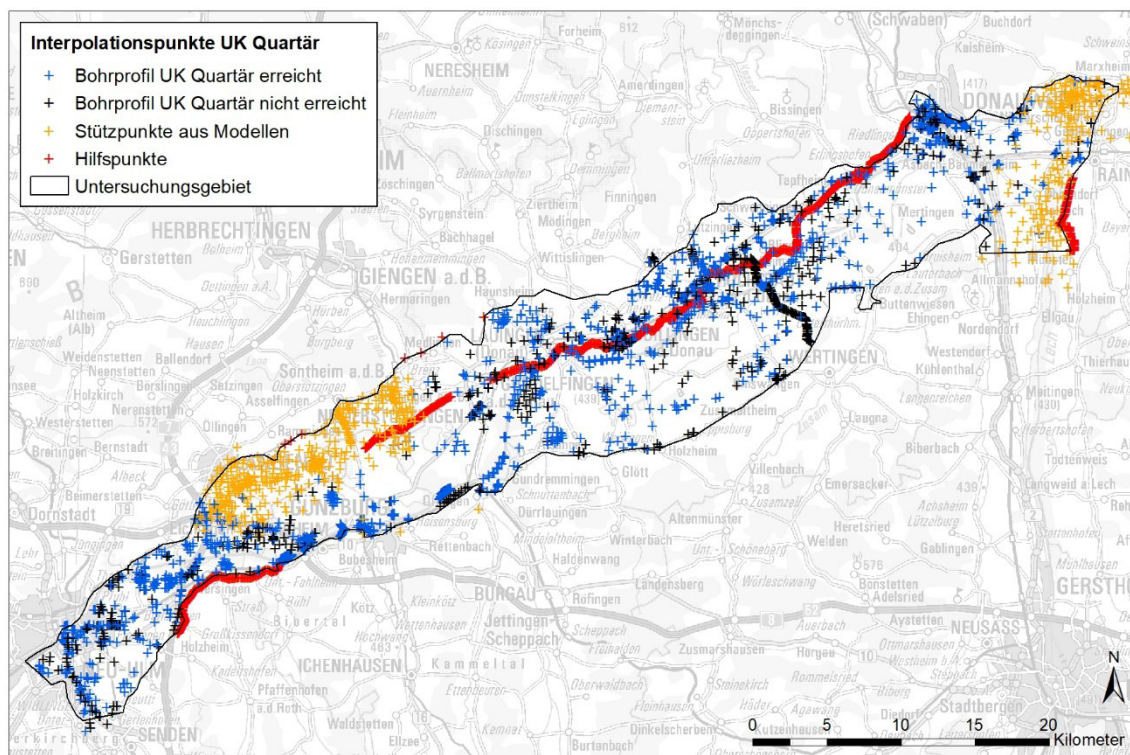


Abbildung 8: Für die Interpolation der Quartärbasis verwendete Bohr- und Hilfspunkte.

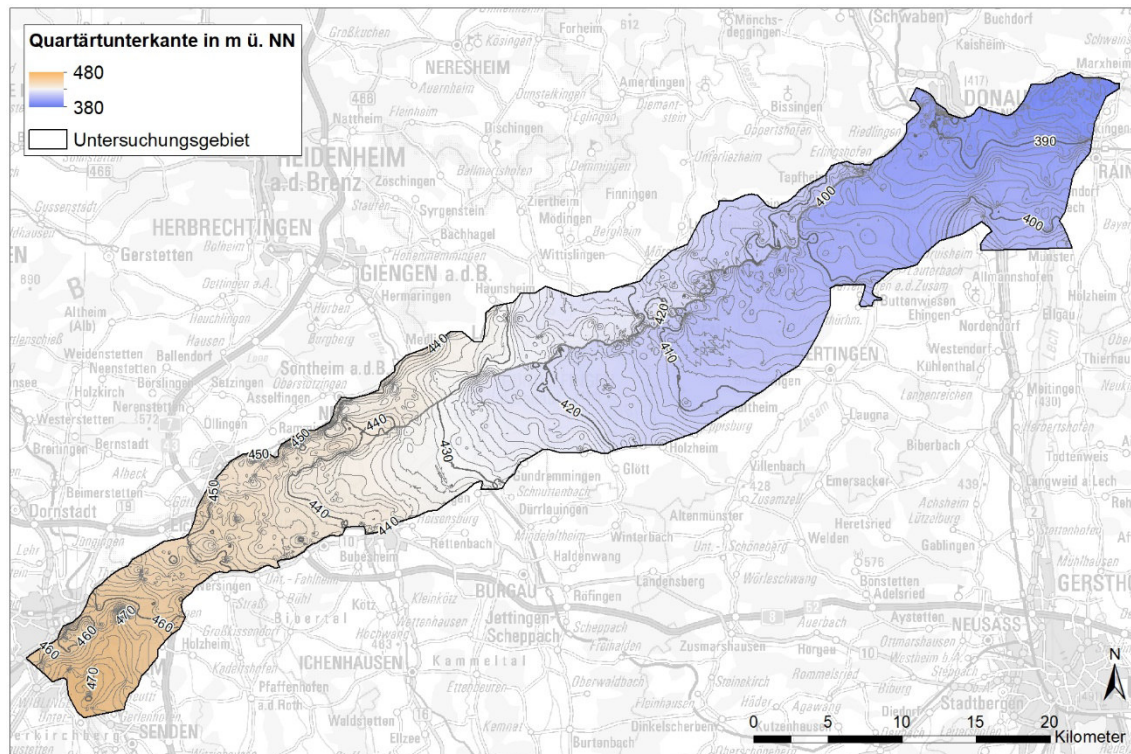


Abbildung 9: Höhengleichen der resultierenden Quartärbasis.

3.3.3 Tertiär

Bei der Interpolation der Tertiäruntersicht wurden neben den rund 100 Bohrungen mit Endteufe unter der Tertiärbasis folgende Bohrungen als Maximum-/Minimum-Bedingung mit einbezogen:

- Bohrungen, welche zwar bis in das Tertiär reichen, die Untersicht des Tertiärs aber nicht erreichen, werden mit einer Maximum-Bedingung berücksichtigt, d.h. die interpolierte Fläche darf nicht oberhalb der Endteufe der Bohrung liegen.
- Bohrungen, in welchen die Schichtgrenze des Tertiärs nicht auftritt (kein Tertiär nachgewiesen), die Endteufe jedoch bis in die darunterliegende Schicht (Jura / Kreide) reicht, werden mit einer Minimum-Bedingung berücksichtigt. d.h. die interpolierte Fläche darf nicht unterhalb der Oberkante Jura / Kreide liegen.

Die Interpolation der Untersicht des Tertiärs erfolgte mit der Kriging-Methode. Die resultierende Tertiärbasis ist in Abbildung 11 dargestellt.

Für die vertikale Zuströmung von Grundwasser aus dem darunterliegenden Malmkarst ist die Mächtigkeit der Tertiärschicht von Bedeutung. Die aus der Differenz von Quartärbasis und Tertiärbasis berechnete Tertiärmächtigkeit ist in Abbildung 12 dargestellt. Eine detailliertere Darstellung befindet sich in Anlage 5.1.3.

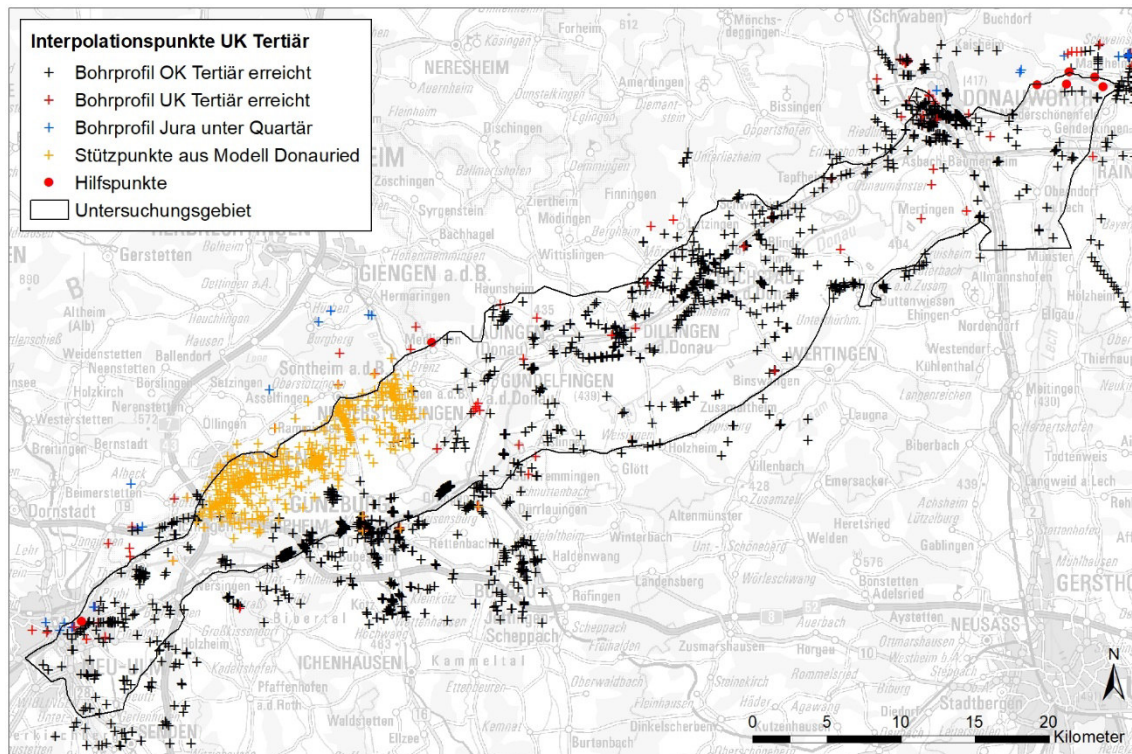


Abbildung 10: Für die Interpolation der Tertiärbasis verwendete Bohrpunkte.

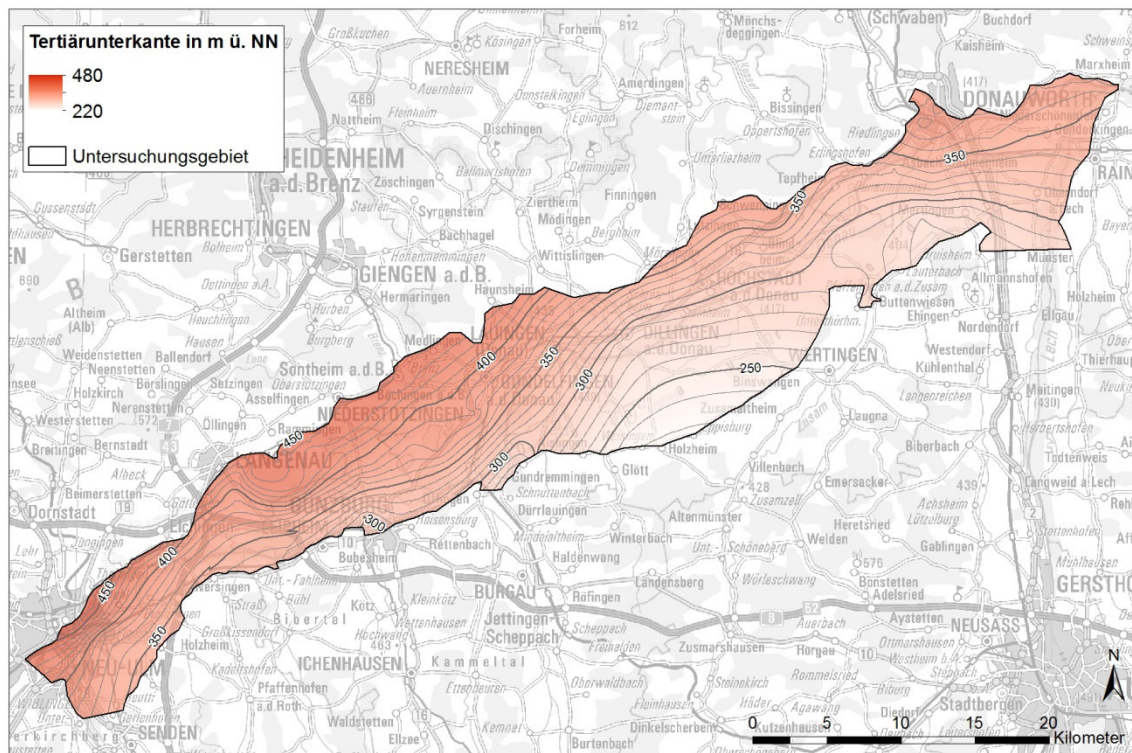


Abbildung 11: Höhengleichen der resultierenden Tertiärbasis.

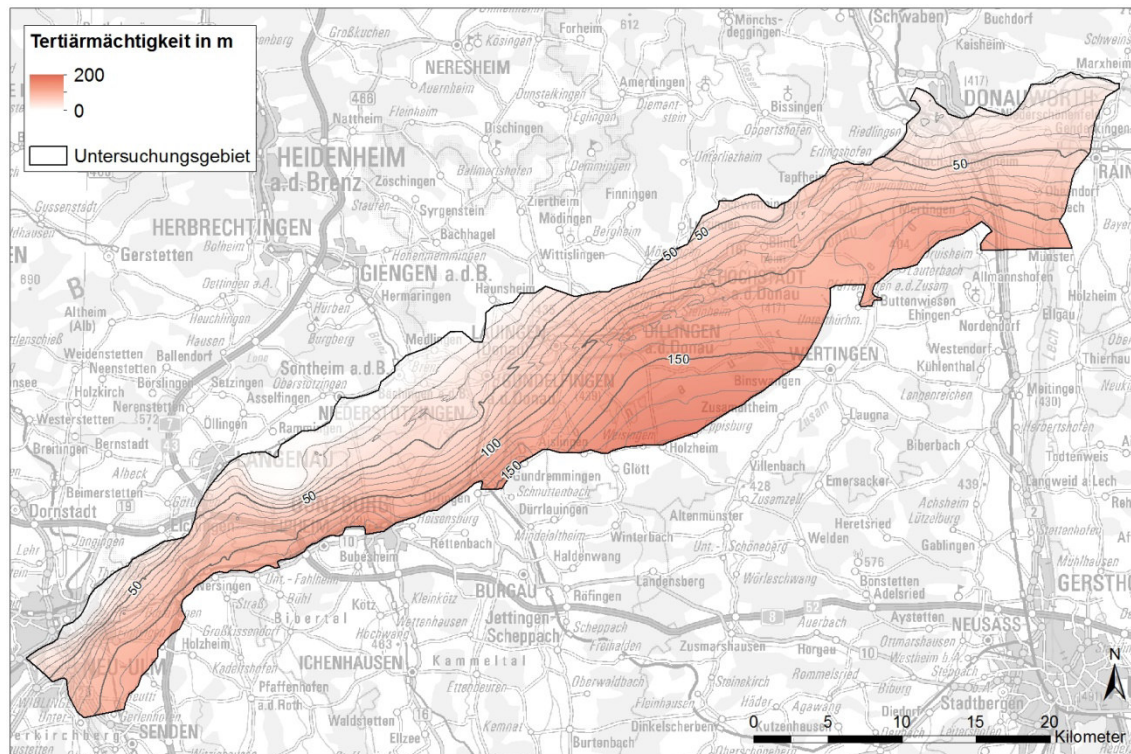


Abbildung 12: Mächtigkeit der Tertiärschichten

3.3.4 Oberjura

Unter dem Tertiär liegen Schichten des Oberjura. 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

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. Aufgrund dieser Definition können die Deckschichten als schwach bis sehr schwach durchlässig be-

zeichnet werden. Die Zuordnung von kf-Werten erfolgte gemäss Prinz, Strauss [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

Abbildung 13 zeigt die Klassierung der Deckschichtdurchlässigkeiten. Es ist keine örtliche Unterscheidung feststellbar.

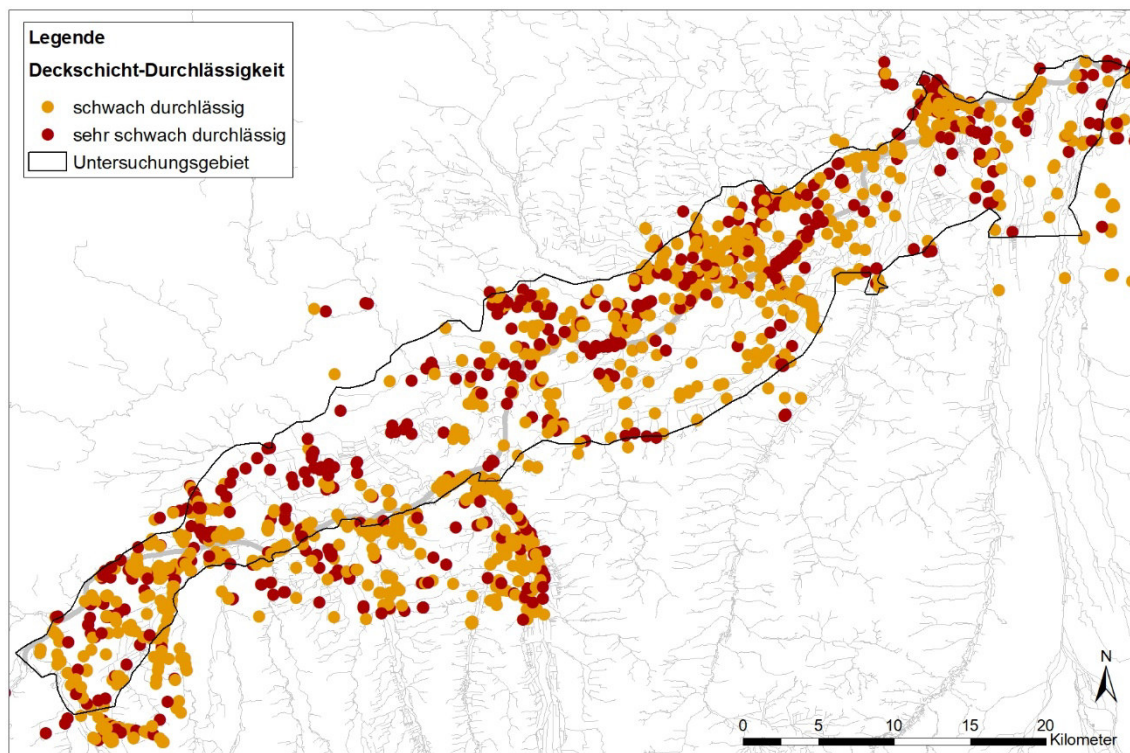


Abbildung 13: Klassierung der Deckschichtdurchlässigkeit aufgrund der Materialbeschreibung nach DIN.

3.4.2 Quartär

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. In diesem Fall kann aus den Angaben der BIS-Datenbank 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 14 dargestellt. Da keine genaueren Dokumentationen der Versuche vorliegen, handelt es sich um grobe Schätzwerte. In Abbildung 15 sind die Durchlässigkeiten in einem Histogramm dargestellt. In der Klasse von 1 – 5 x 10⁻³ m/s befinden sich die meisten Werte.

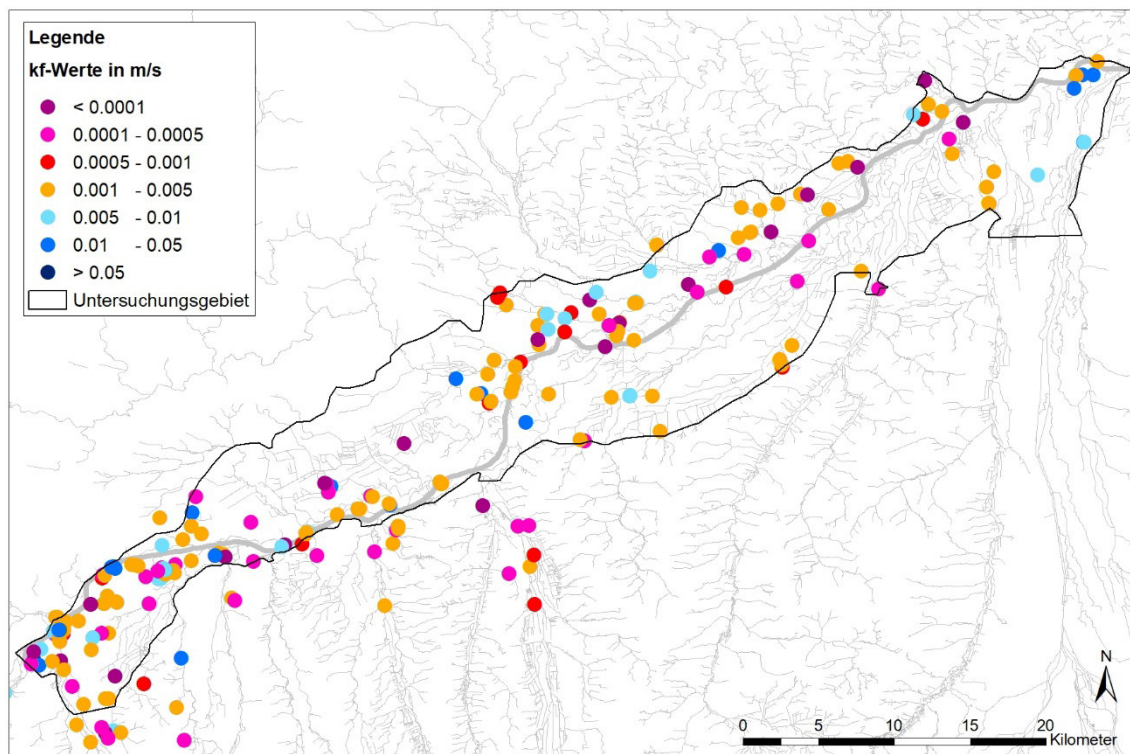


Abbildung 14: Ermittelte hydraulische Durchlässigkeiten (k_f-Werte) des quartären Grundwasserleiters in den Bohrpunkten des BIS.

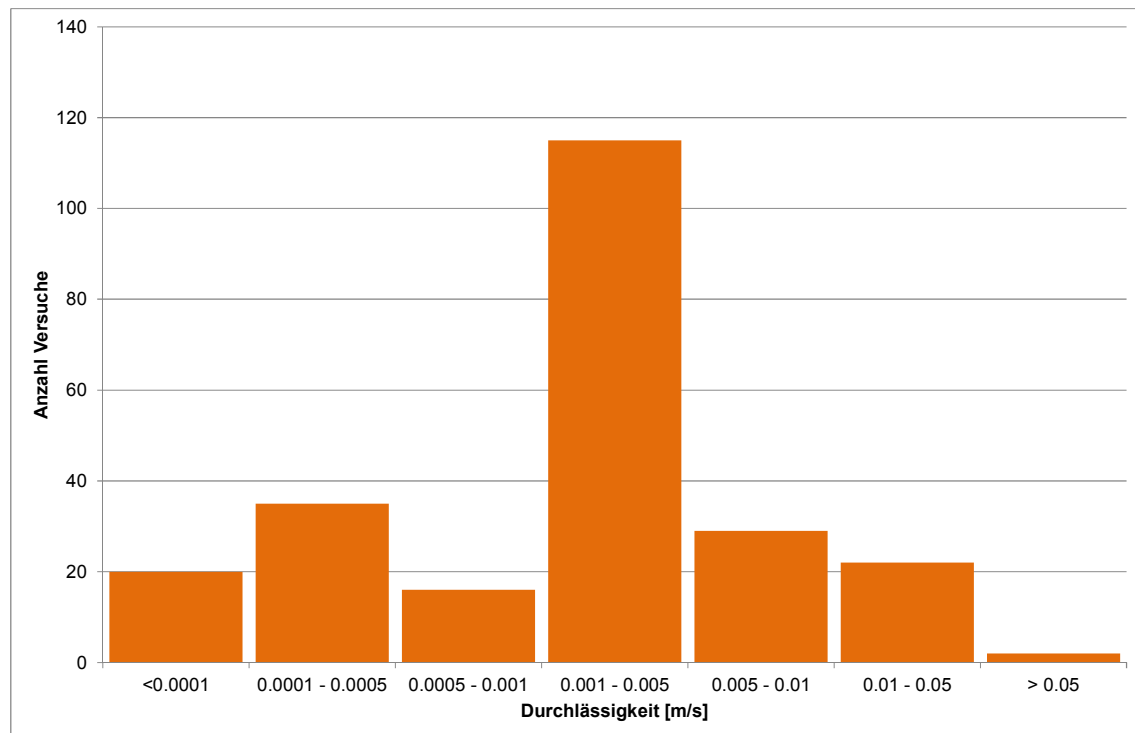


Abbildung 15: Histogramm der Durchlässigkeiten (k_f -Werte) des quartären Grundwasserleiters in den im BIS enthaltenen Pumpversuchen

Porosität

Untersuchungen zum Porenvolumen des Quartärschotters zeigten Werte zwischen 17 und 29% mit Mittelwerten von 20 – 21% [9]. 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

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 [5][6][7][8].

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 [6]. 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 kf-Wert von 1×10^{-9} m/s verwendet.

Die Gesteine des Jura sind in der schwäbischen Alb verkarstet. Die Durchlässigkeiten liegen im Bereich von 5×10^{-3} bis 5×10^{-5} m/s [6]. In den Gebieten, wo quartäre Schotter direkt auf dem Jura aufliegen, sind Karstgrundwasserleiter und quartärer Grundwasserleiter miteinander verbunden.

3.5 Grundwasserhydraulik

Quartärer Grundwasserleiter

In den jüngeren Talschottern des Donautals strömt das Grundwasser vorwiegend in Längsrichtung des Tals. Die Donau und die Drainagegewässer, welche die Donau seitlich begleiten, wirken als Vorfluter. Dies zeigt sich in den Strömungsgradienten von den Talrändern hin zur Donau (Abbildung 16). Im Bereich der Hochterrassenkante zwischen Langenau und Sontheim ist die Fließrichtung zum Teil auch nach Süden gerichtet. Hier tritt das Grundwasser des nördlichen Talrandes je nach Höhenlage der Tertiärbasis in Form von Schichtquellen oder als Vernässung des Terrassenfußes in die jüngeren Talschotter über. Das Grundwasser der Hochterrasse wird zusätzlich durch Karstgrundwasser gespeist. Aus den Tälern der Iller und des Lech strömen dem Donautal ebenfalls größere Grundwassermengen zu.

In Teilbereichen des Donaurieds ist das Grundwasser des Kiesgrundwasserleiters unter schluffigen, im zentralen Niedermoorbereich auch unter tonigen Deckschichten zeitweise oder permanent gespannt. Dadurch ist der Wasserhaushalt im Torf bereichsweise vom Grundwasser im Kiesgrundwasserleiter getrennt.

Karstgrundwasserleiter

Die Grundwasserpotentiale nehmen im Karstgrundwasserleiter von Nordwesten nach Südosten ab ([6], Abbildung 17). 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 750 Bohrungen abgeteuft. Insbesondere die Messstellen der BEW, LW und des WFW decken einen großen Teil des Talbereiches ab. In etwa 400 Messstellen liegen regelmäßig Grundwasserspiegelmessungen vor. Abbildung 18 zeigt die Messfrequenzen im Jahr 1999, Abbildung 19 die Messfrequenzen im Jahr 2015. Abbildung 16 und Anlage 4.1.4 zeigen den interpolierten Grundwasserstand am 19.12.2015. Die Grundwasserspiegel des Jahres 2016 liegen noch nicht vollständig vor.

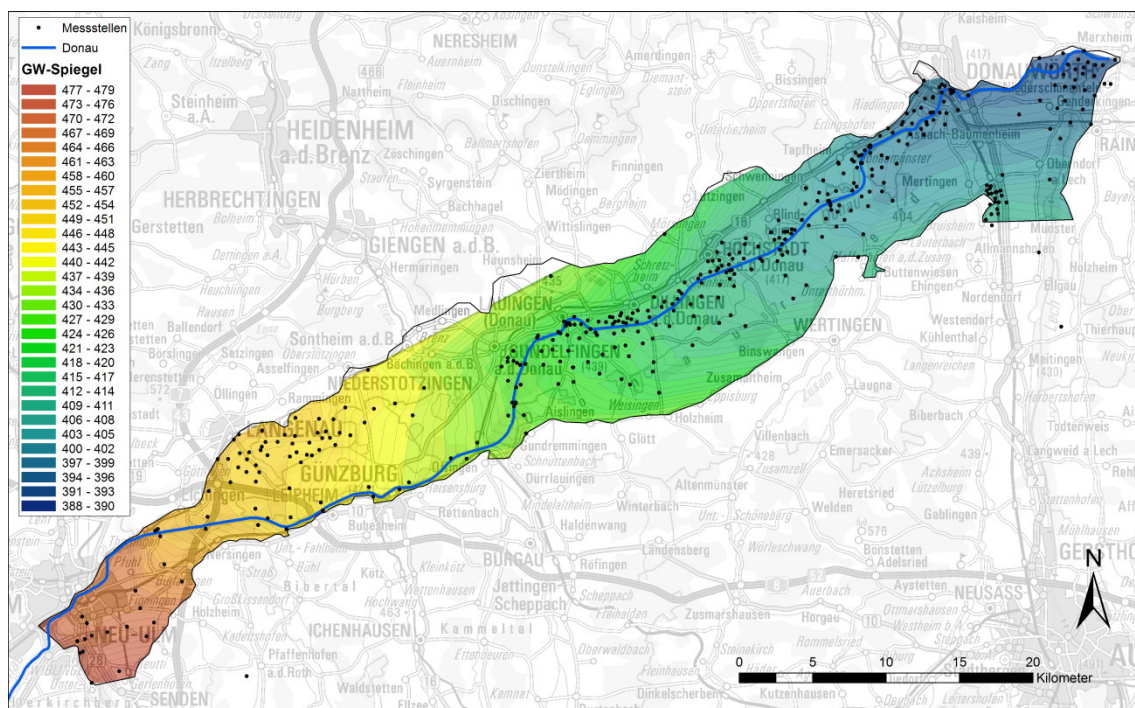


Abbildung 16: Aus den Messungen vom 19.12.2015 interpolierte Grundwasserhöhen-
gleichungen im quartären Grundwasserleiter

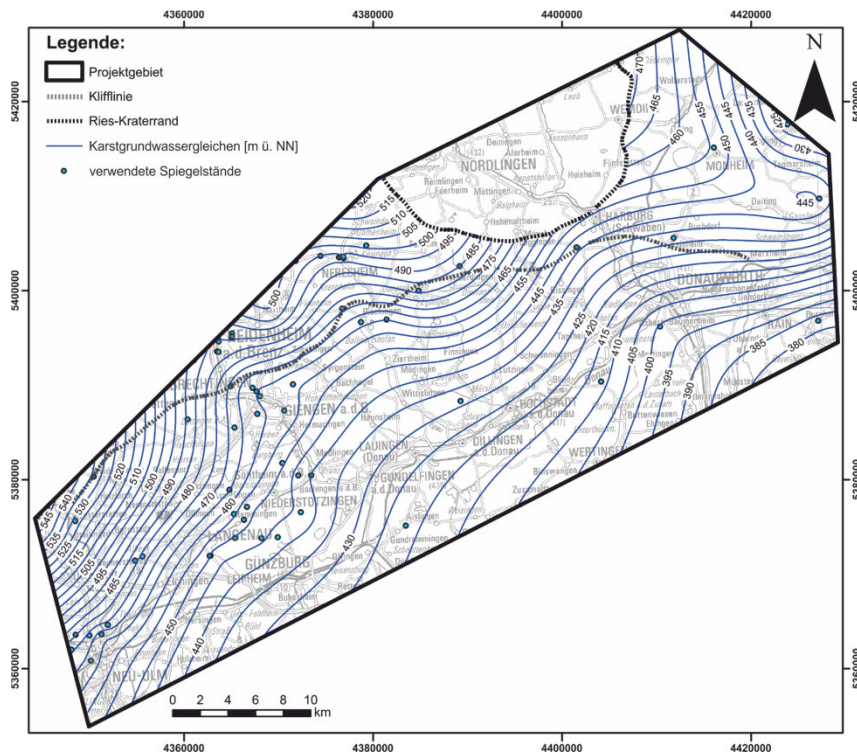


Abbildung 17: Höhengleichen des Grundwasserpotentials im Karstgrundwasserleiter
(aus der Karststudie Donauried [6])

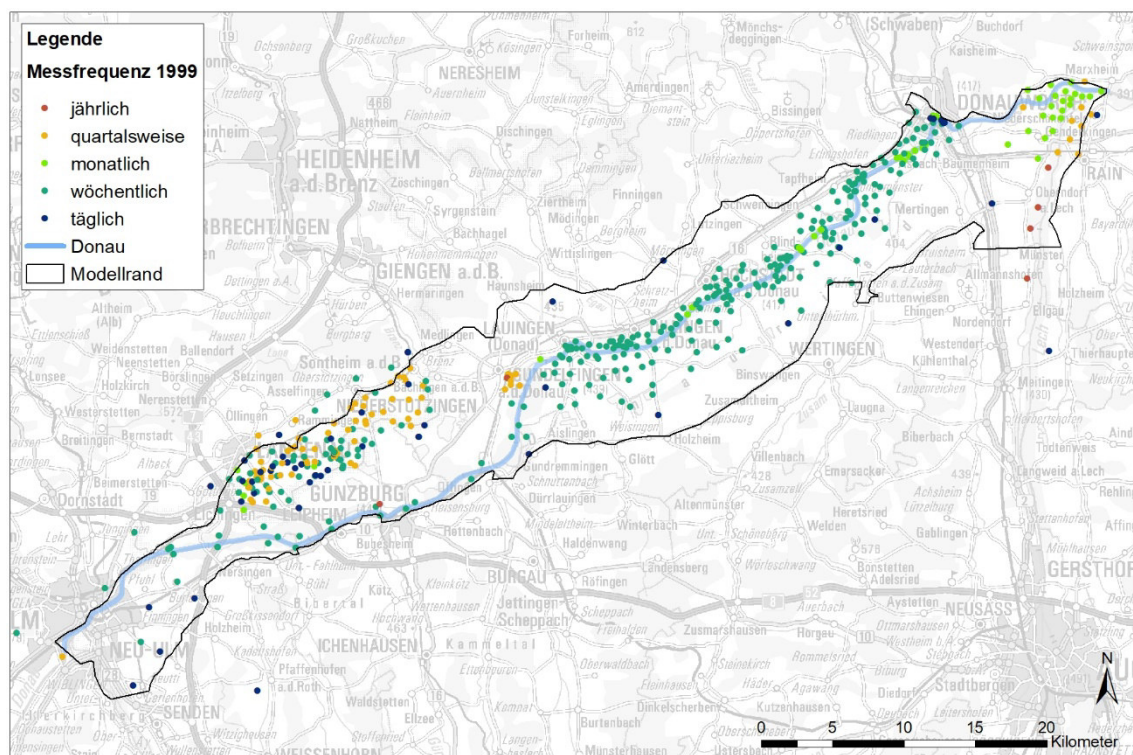


Abbildung 18: Messfrequenz der Grundwassermessstellen im Jahr 1999

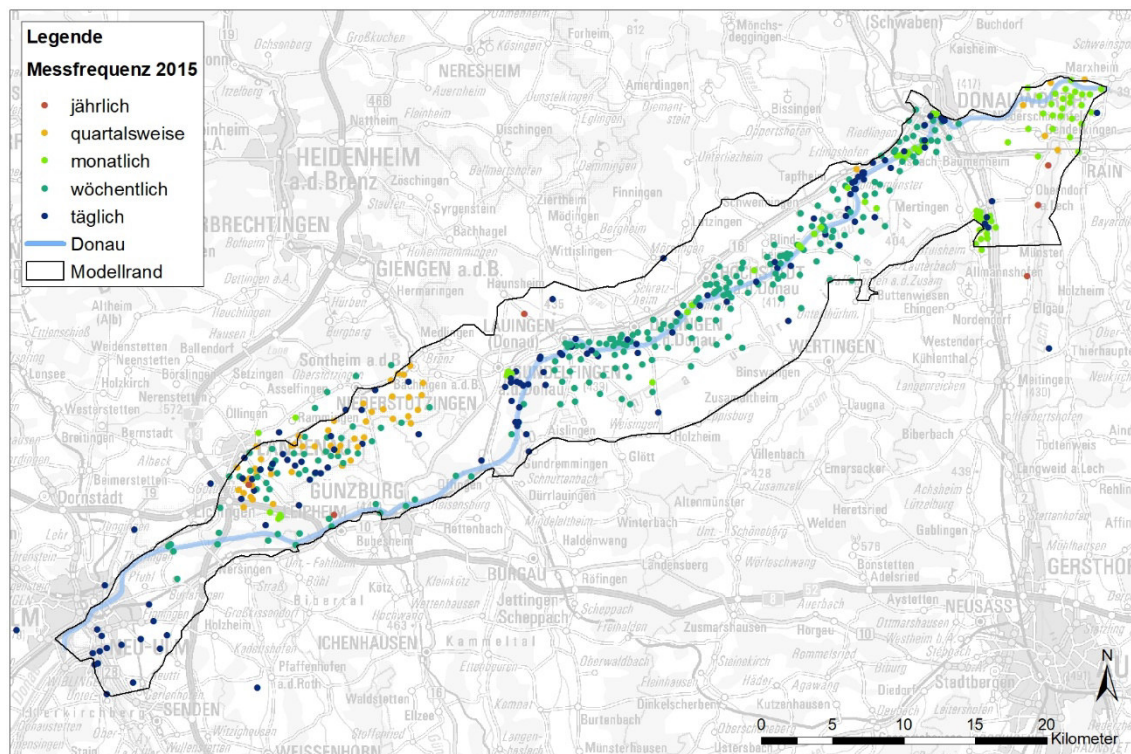


Abbildung 19: Messfrequenz der Grundwassermessstellen im Jahr 2015

4 Modellkonzept des numerischen Modells

4.1 Abstraktion der Hydrogeologie

4.1.1 Modellkonzept

Als Grundlage für die Abstraktion der Hydrogeologie wurde ein dreidimensionales geologisches Modell bestehend aus Deckschicht, Quartär, Tertiär und Jura / Kreide erstellt.

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 Oberjura bilden die Modellunterkante.

Zur genaueren Untersuchung des vertikalen Austausches zwischen den Grundwasserleitern des Juras und des Quartärs wird in einer Vorstudie ein vereinfachtes numerisches dreidimensionales Modell erstellt. Aufgrund der daraus gewonnenen Erkenntnisse wird geprüft, ob der zweidimensionale Ansatz gerechtfertigt ist.

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.

4.1.2 Topografie

Die Oberkante des Modells wird durch die Topografie gebildet. Die Topografie wurde dem aktuellen digitalen Geländemodell (Befliegung 2011 bis 2014, siehe auch Anlage 4.1) entnommen. Das Geländemodell weist eine Auflösung von 1 m auf. Die Genauigkeit in vertikaler Richtung beträgt ± 20 cm [10].

4.1.3 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.

4.1.4 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 Leakage-Randbedingung und das überschüssige Wasser verlässt das Modell.

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.

4.1.5 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 20).

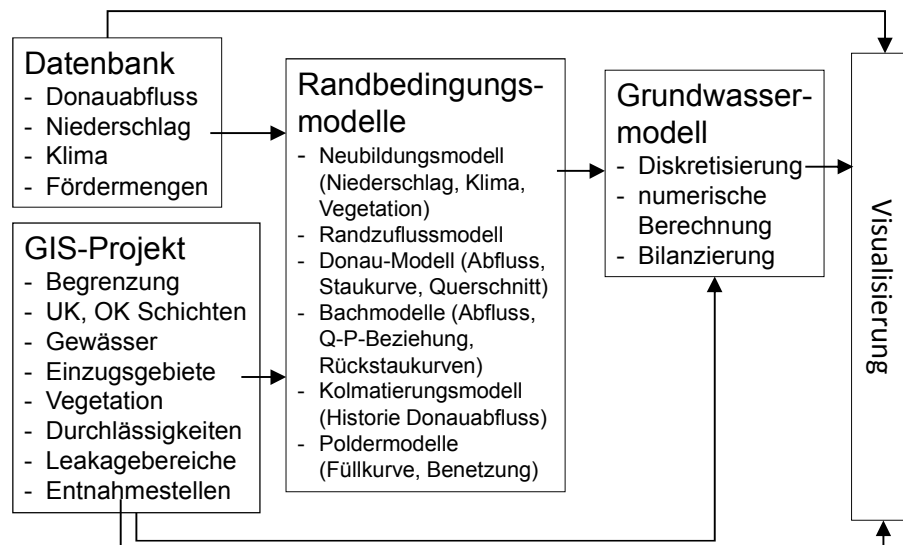


Abbildung 20: Trennung von konzeptionellem Modell und numerischem Modell.

4.1.6 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

Der Modellraum umfasst den Bereich des Donautals zwischen Neu-Ulm und Donauwörth. Die drei geplanten Rückhalteräume Leipheim, Helmeringen und Neugeschüttwörth liegen damit in genügendem Abstand zum westlichen und östlichen Modellrand. Südlich reichen die Umgriffe der Rückhalteräume Leipheim und Neugeschüttwörth bis nahe an den Modellrand, wobei bei Leipheim die Donau zwischen Rückhalteraum und Modellrand liegt. Die fünf weiteren Rückhalteräume, welche zwischen Dillingen und Donauwörth geplant sind, befinden sich ebenfalls genug weit vom Modellrand entfernt. Der gewählte Modellumgriff zusammen mit den geplanten Rückhalteräumen ist in Abbildung 21 dargestellt. Der Bilanzraum wird im vorliegenden Fall gleich dem Modellraum gewählt.

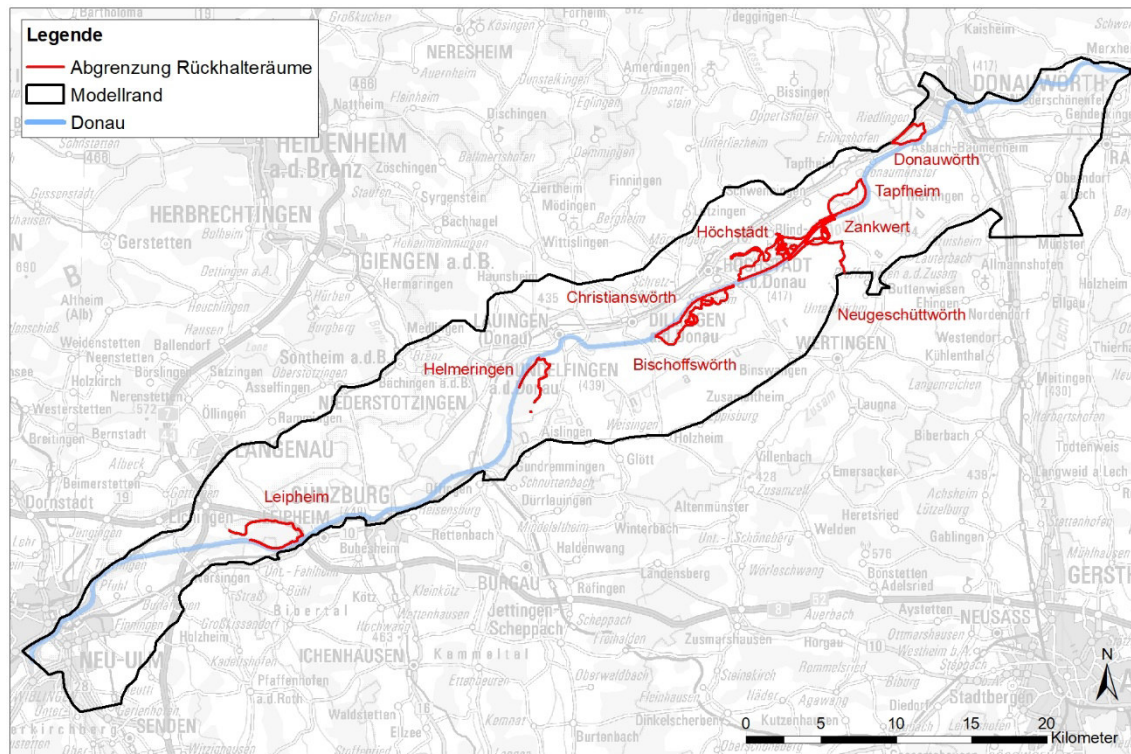


Abbildung 21: Modellraum und geplante Rückhalteräume.

Im Folgenden werden die angenommenen Modellränder begründet.

Nordrand

Die quartären Schotter werden nördlich des Donautals durch die Karstgebiete der Schwäbischen und Fränkischen Alb sowie durch die Trümmernmassen des Nördlinger Rieses begrenzt (Abbildung 23). Das Grundwassermodell wird deshalb an dieser Stelle begrenzt.

Über den nördlichen Modellrand ist der Zustrom von Grundwasser aus dem Malmkarst vorherrschend. Zudem sind kleinere Zuflüsse von Grundwasser aus den direkt an das Modell anschließenden Talhängen sowie aus den quartären Grundwasserleitern der Blau bei Neu-Ulm und der Würnitz bei Donauwörth 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 unter Kapitel 4.3 erläutert.

Ostrand

Am Ostrand strömt das Grundwasser von Süden nach Norden parallel zum Lech der Donau zu (Abbildung 22). In Donaunähe verschwenkt die Strömung in Richtung Osten. Als Begrenzung in östlicher Richtung wurde der Talrand der Hochterrasse bei der Gemeinde Rain gewählt. Nahe der Donau ist ein Abstrom von Grundwasser über den Modellrand möglich.

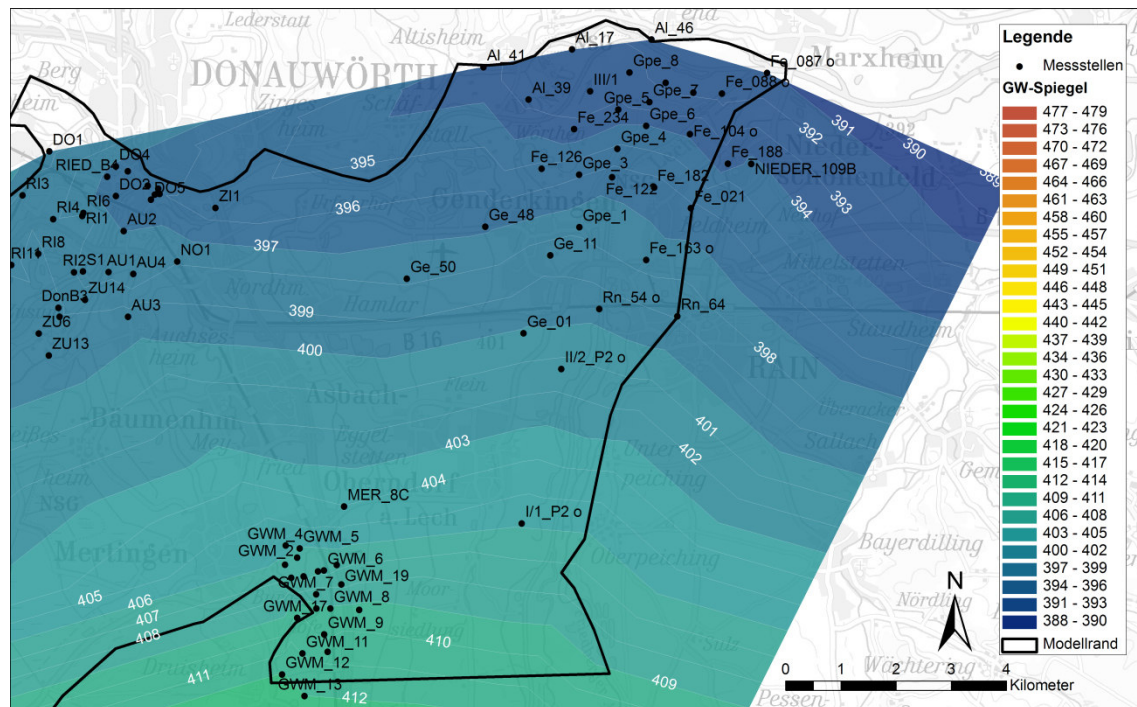


Abbildung 22: Aus den Messungen vom 02.11.2015 linear interpolierte Grundwasserhöhengleichen am Ostrand des Modells.

Der Ostrand wird im südlichen Teil als Stromlinie d.h. undurchlässiger Rand betrachtet. Im Bereich der Donau wird der Abstrom über den Modellrand mit einem Festpotentialrand (RB 1. Art) modelliert. An den Randknoten werden dort die täglichen Messungen des Grundwasserspiegels in der Messstelle Niederschönenfeld 109B vorgegeben.

Südrand

Im Süden werden die quartären Schotter durch den Talrand des angrenzenden Molassehügellandes begrenzt (Abbildung 23).

Ein Grundwasserzustrom in das Modellgebiet ist über die quartären Grundwasserleiter der seitlich zuströmenden Gewässer und aus den direkt an das Modell anschließenden

Talhängen möglich. Der südliche Modellrand wird deshalb mit einer Zufluss-Randbedingung versehen.

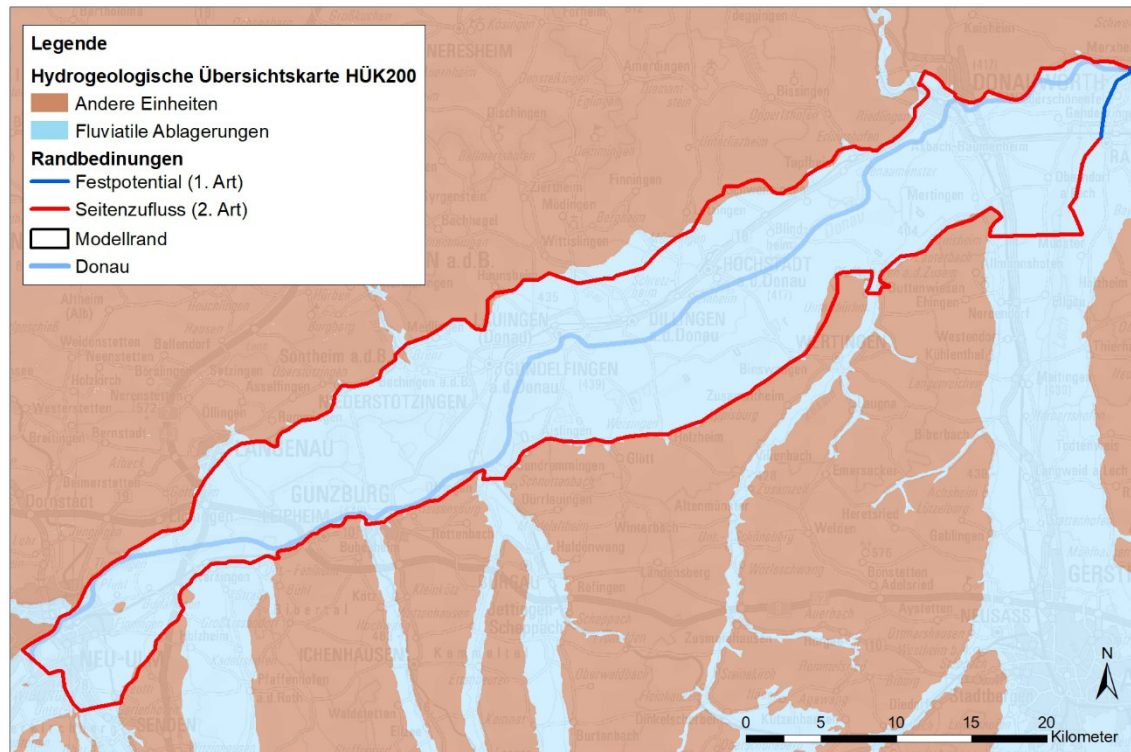


Abbildung 23: Randbedingungen für das numerische Modell und Begrenzung der quar-
tären Schotter gemäß der hydrogeologischen Übersichtskarte von
Deutschland 1: 2000'000 (HÜK200).

Westrand

Am Westrand wird das Modell durch die beiden Grundwasserleiter des Donautals und des Illertals begrenzt. Aus den interpolierten Grundwasserspiegelmessungen (Abbildung 24) geht hervor, dass dem Modellgebiet aus beiden Tälern Grundwasser zuströmt. Im Modell wird der Zufluss aus dem Donautal mit einer Zuflussrandbedingung (RB 2. Art) berücksichtigt. Im Illertal existiert eine Messstelle mit kontinuierlicher Erfassung der Grundwasserstände (GERL_B3). Die Messwerte dieser Messstelle werden für eine Fixpotentialrandbedingung (RB 1. Art) im Illertal verwendet. Damit wird eine höhere numerische Stabilität erreicht.

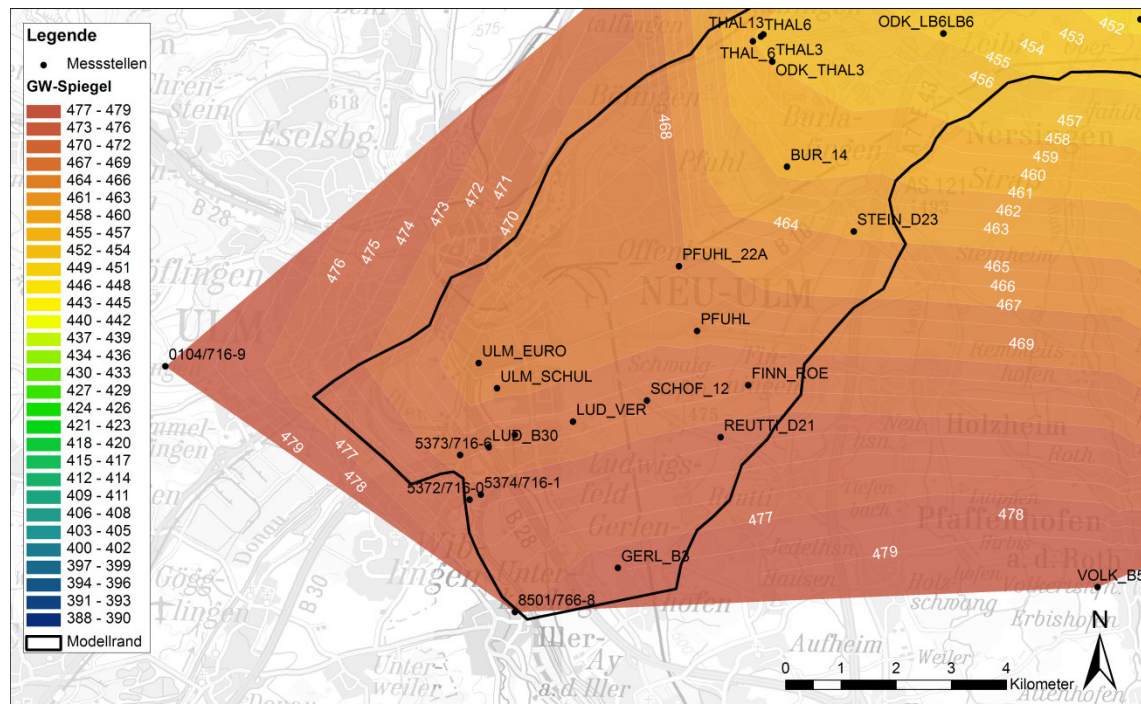


Abbildung 24: Aus den Messungen vom 19.12.2015 linear interpolierte Grundwasserhöhengleichen am Westrand des Modells

4.3 Randbedingungen

4.3.1 Grundwasserneubildung

4.3.1.1 Im Innern des Modellgebiets

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

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 Nieder-

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

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.

Zur Unterscheidung der klimatischen Bedingungen wurde das Modellgebiet in drei Klimazonen (Abbildung 25) sowie 13 Niederschlagszonen (Abbildung 26) unterteilt, welche den Einflussbereichen der vorhandenen Klimastationen resp. Niederschlagsmessstellen entsprechen. Die Einteilung der Niederschlagszonen erfolgte in einer ersten Näherung mit der Methode der Thyssen-Polygone und wurde anschließend von Hand angepasst.

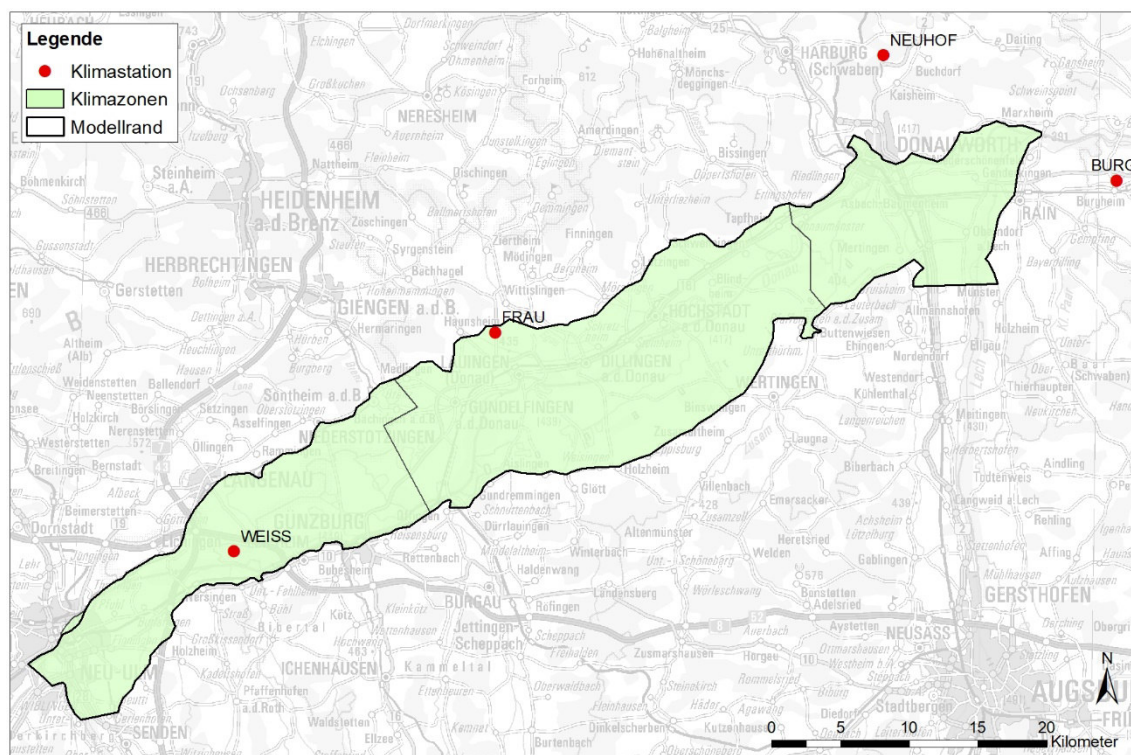


Abbildung 25: Verwendete Klimastationen und zugeordnete Modellbereiche.

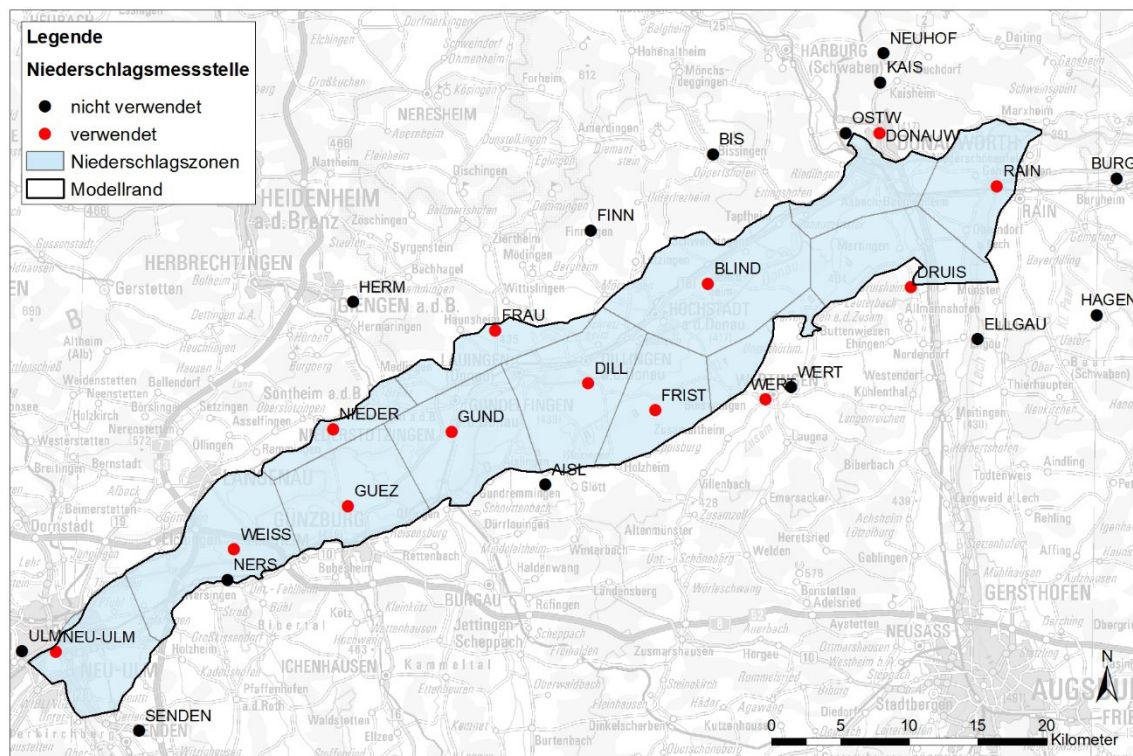


Abbildung 26: Verwendete Niederschlagsmessstellen und zugeordnete Modellbereiche.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Vegetation wurden fünf Zonen unterschieden (Abbildung 27):

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

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 [14] hergeleitet (Abbildung 28).

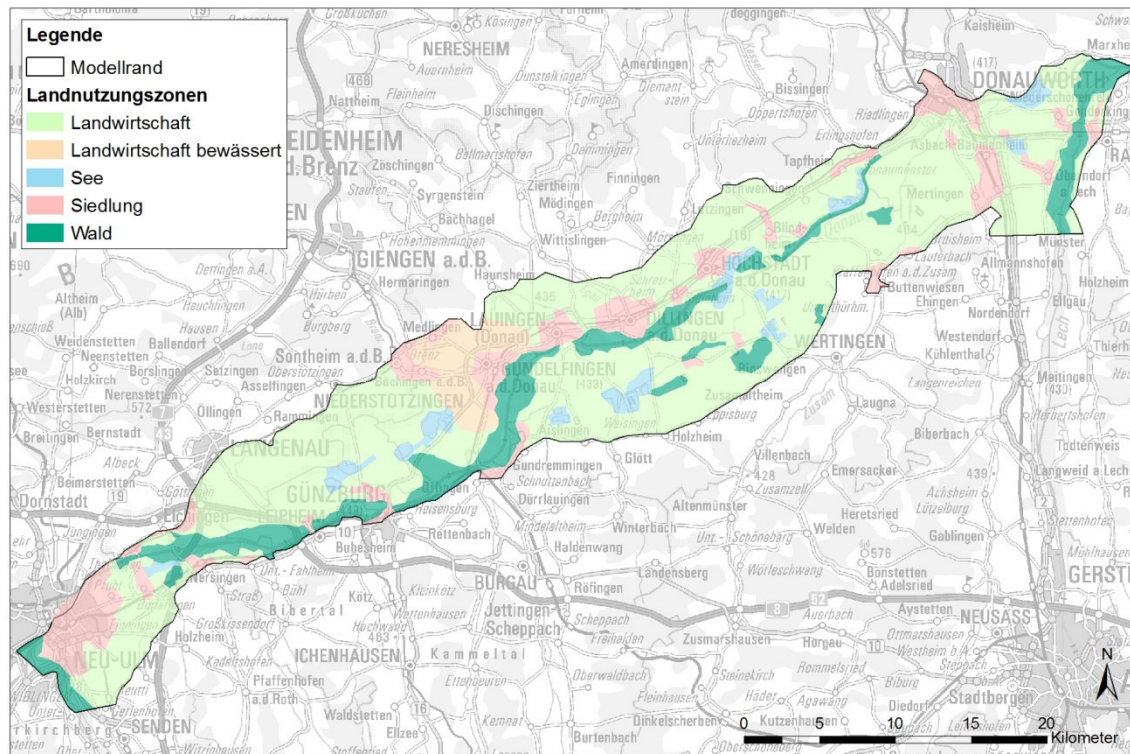


Abbildung 27: Landnutzungszonen zur Berechnung der Evapotranspiration.

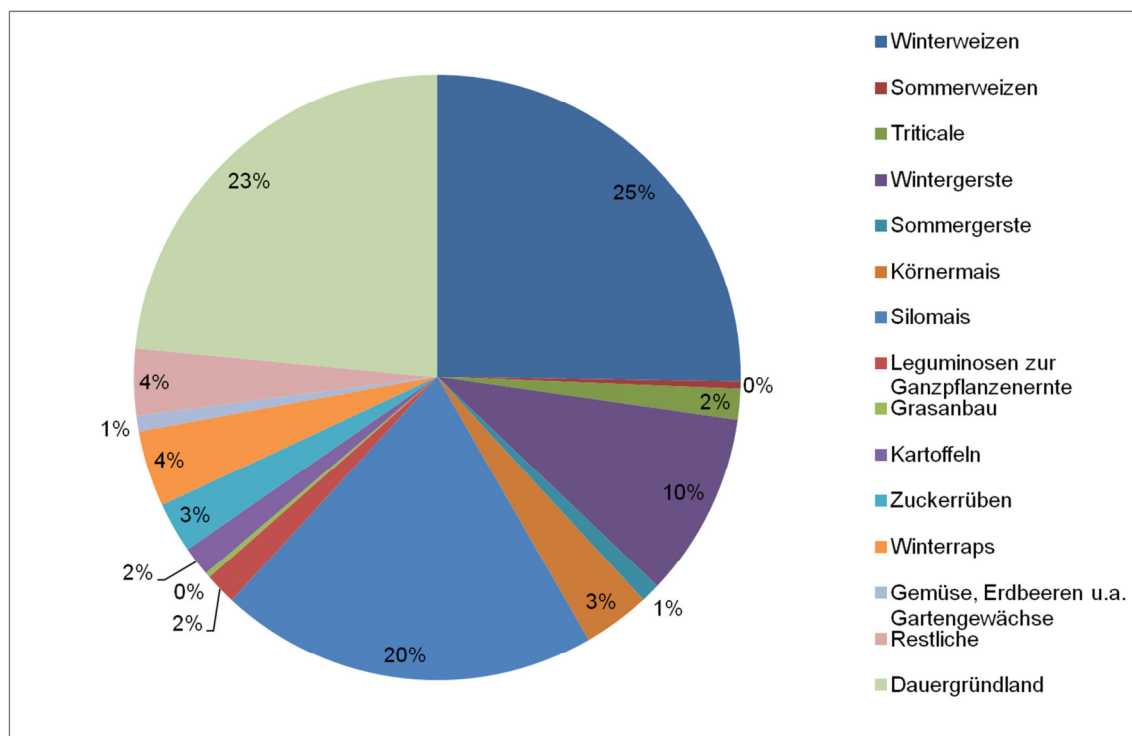


Abbildung 28: Nutzung der Landwirtschaftsflächen innerhalb des Modellgebiets.

Tabelle 1: 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	

Zur Berechnung der Evapotranspiration wurde die Methode nach Penman-Monteith (FAO 56, [11]) verwendet. Für den Oberflächenabfluss auf unversiegeltem Gebiet wird die SCS curve number method eingesetzt [12]. Zur Berücksichtigung des Oberflächenabflusses auf versiegelten Flächen wird die Grundwasserneubildung nur für den unversiegelten Flächenanteil berechnet und anschließend durch die Gesamtfläche dividiert.

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 [13]:

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

Sick: Sickerung (Grundwasserneubildung)

Inf: Infiltrierendes Wasser

BWG: aktueller Bodenwassergehalt

nFKWe: pflanzenverfügbare Bodenspeicher

BETA: Exponent, welcher die Form der Funktion beschreibt

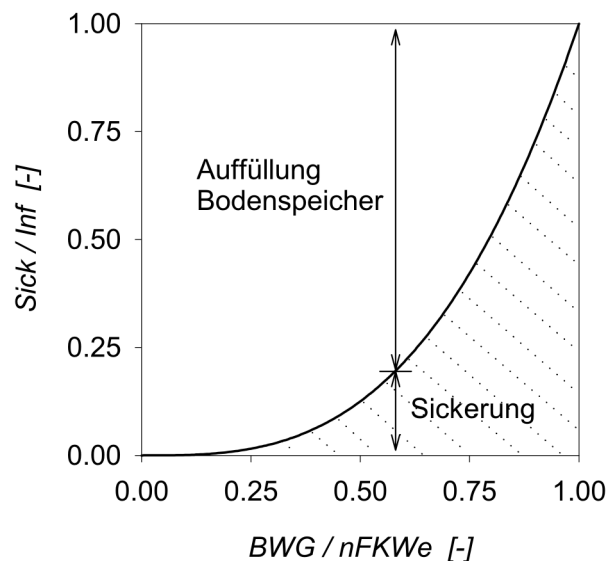


Abbildung 29: Grundwasserneubildung in Funktion der Auffüllung des Bodenspeichers
(aus Armbruster, 2002 [13]).

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 Lehm Böden verwendet [14]. Für die Berechnung der Grundwasserneubildung im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde ein Bodenspeicher von 140 mm vorgegeben.

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 40 bis 60 mm.

Die resultierenden Grundwasserneubildungsraten (Mittelwert der Jahre 1994 bis 2015) sind in Abbildung 30 dargestellt. 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.

Zur Überprüfung der errechneten Grundwasserneubildung wird in Abbildung 31 ein Ausschnitt aus der Grundwasserneubildungskarte des Landesamts für Umwelt dargestellt. Die Zonen sind in dieser Karte etwas feiner aufgelöst. Die Neubildungsraten sind im größten Teil des Modellgebiets gleich hoch wie die errechneten. Im Donauried sind die Werte des LfU bis etwa 100 mm/a tiefer.

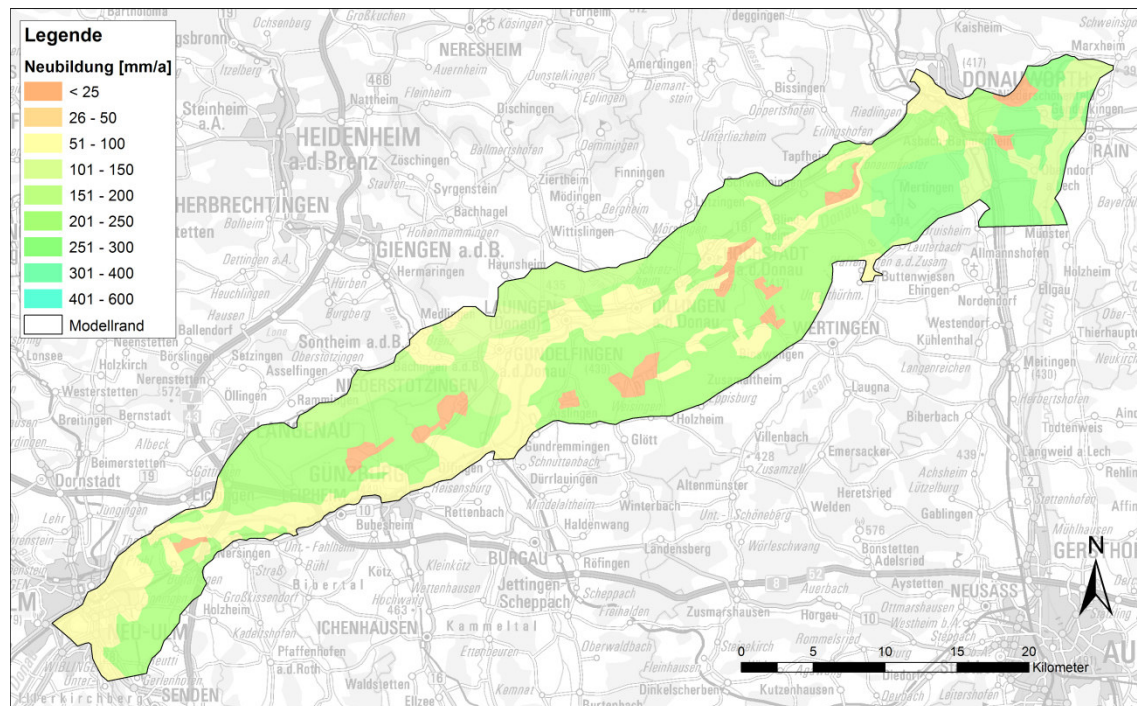


Abbildung 30: Berechnete mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1994 - 2015

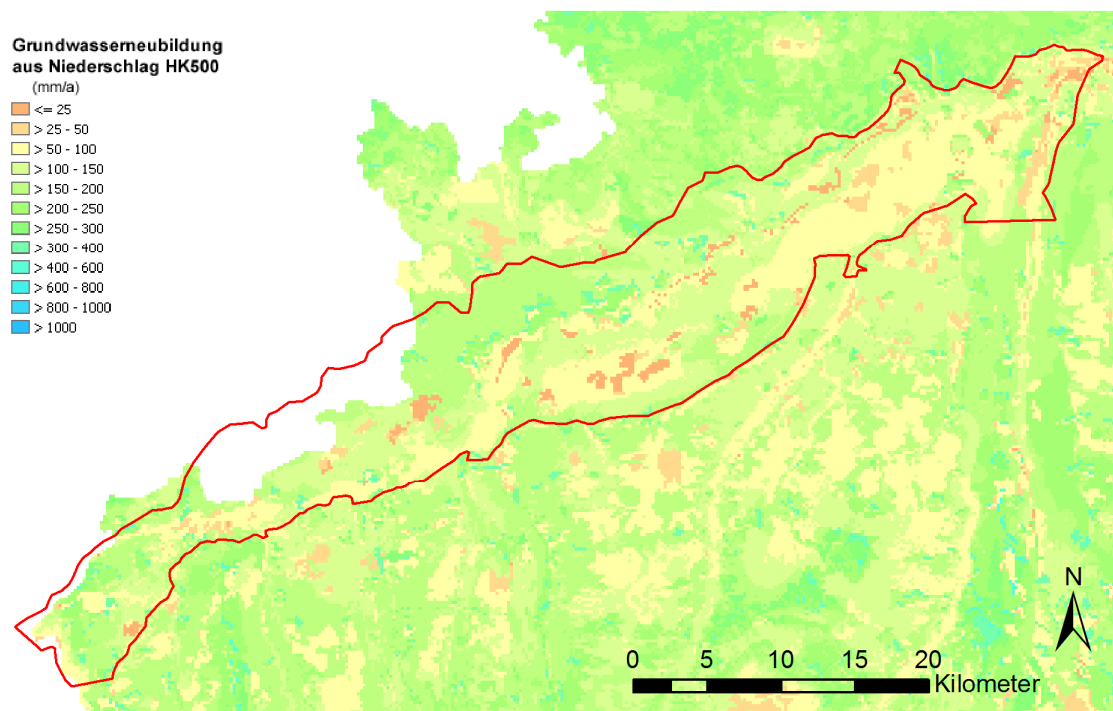


Abbildung 31: Mittlere Grundwasserneubildung der Jahre 1971 – 2000 gemäß der hydrogeologischen Karte 1:500.000 des LfU Bayern

Die Unterschiede zwischen den Resultaten des LfU und jenen der Projektbearbeiter sind durch folgende unterschiedliche Ansätze bedingt:

- Zur Abtrennung des Oberflächenabflusses wird im LfU-Modell die Sickerwassermenge mit einem, aus dem Basisabfluss verschiedener Einzugsgebiete in Bayern ermittelten, Base-Flow-Index (BFI) multipliziert. Der BFI behandelt einen Anteil des Grundwassers, welcher durch Gewässer drainiert wird, als Oberflächenabfluss. Der BFI erhält einen besonders tiefen Wert, wenn die Gewässernetzdichte groß ist, wie dies in den drainierten Gebieten des Donaurieds der Fall ist. Im Grundwassermodell werden jedoch die Drainagen als Randbedingungen behandelt und die Exfiltration wird errechnet. Die Ermittlung des Oberflächenabflusses über die SCS curve number Methode ist deshalb zweckmässiger.
- Die Methode des LfU berücksichtigt in Gebieten mit feinkörnigen Böden und kleinem Flurabstand den kapillaren Wiederaufstieg des Grundwassers. Da die Böden des Donaurieds als feinkörnig eingestuft werden ist dort der kapillare Wiederaufstieg gross.

Im gewählten Ansatz ist der kapillare Wiederaufstieg nicht berücksichtigt. Es soll deshalb im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse genauer untersucht werden.

4.3.1.2 In den seitlichen Einzugsgebieten

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 32). Die Berechnung der Grundwasserneubildung erfolgt aus der hydrologischen Wasserbilanz. Gebiete, aus welchen der infiltrierte Niederschlag zuerst in ein Oberflächen-gewässer und erst mit diesem in das Modellgebiet gelangt, wurden nicht berücksichtigt. Der Zustrom aus Seitengewässern mit Begleitgrundwasserstrom wird in Kapitel 0 getrennt berücksichtigt.

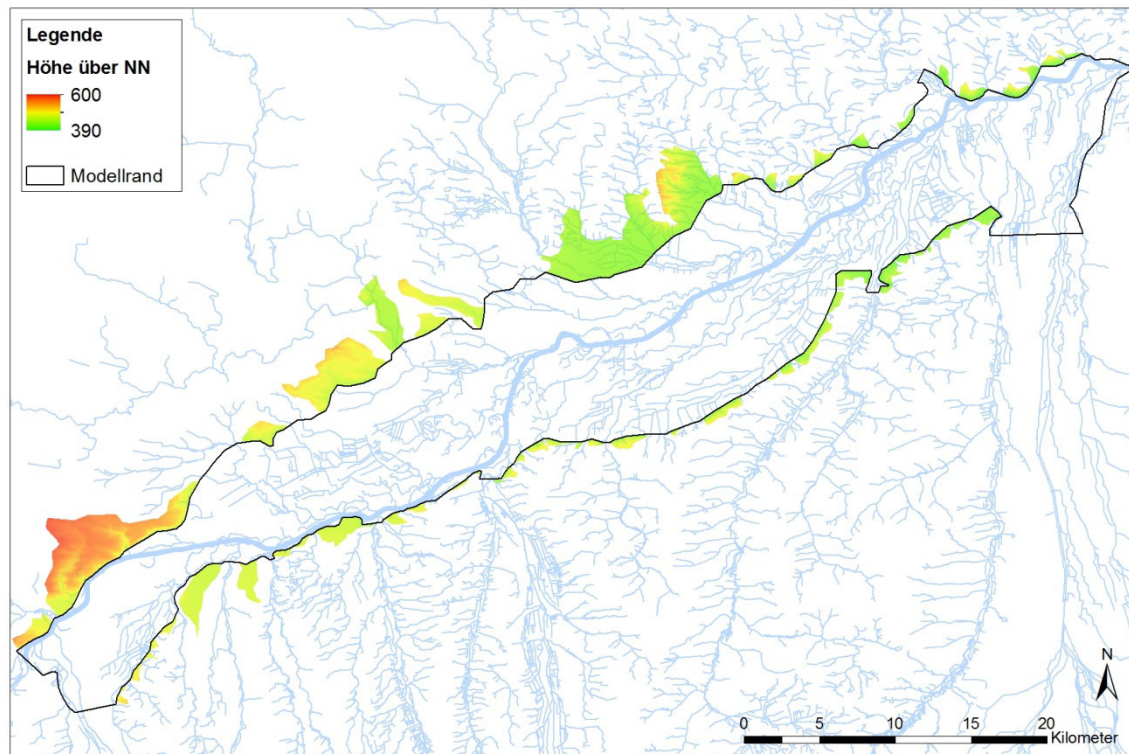


Abbildung 32: Einzugsbereiche, aus welchen unterirdische Zuflüsse zum Modellgebiet zu erwarten sind.

Die hydrologische Wasserbilanz in den Einzugsbereichen wurde aus den Klimadaten nach FAO 56 [11] 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 33). 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.

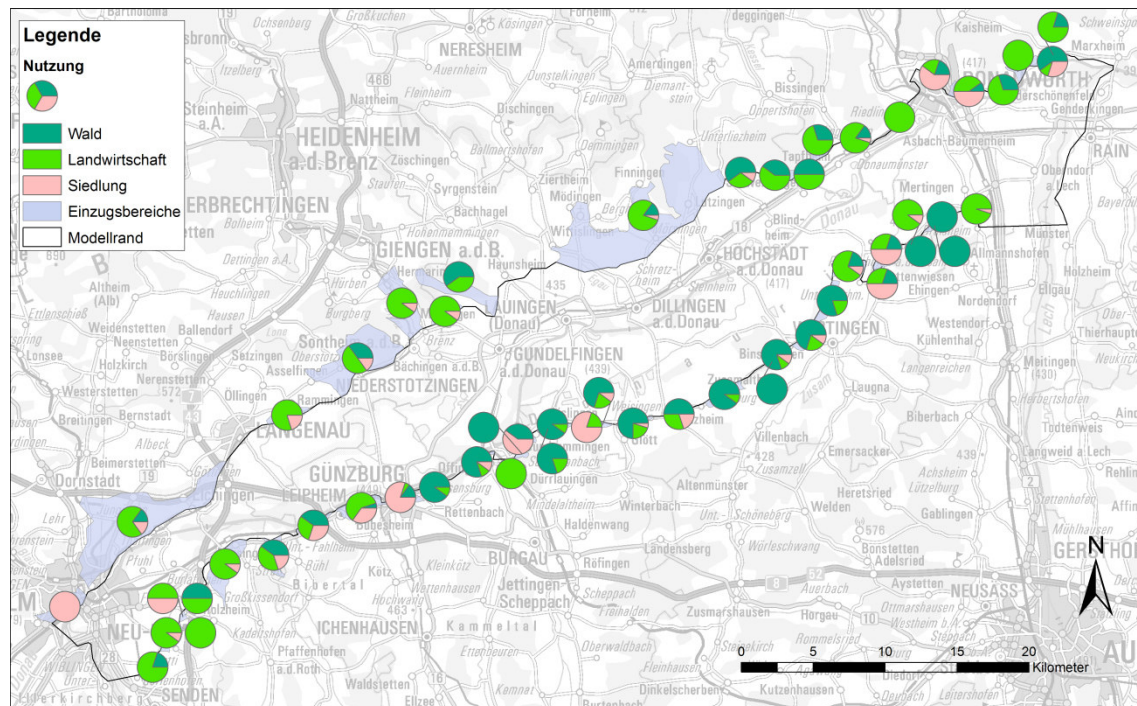


Abbildung 33: Landnutzung in den seitlichen Einzugsbereichen

Die resultierende Abflusskomponente R_g wurde nach Döll & Fiedler [15] 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 35). 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 : Relieffaktor

f_t : Faktor Bodentyp

f_h : Faktor Hydrogeologie

f_{pg} : Faktor Frostboden

Abbildung 34 zeigt eine Übersicht über das Verfahren nach Döll und Fiedler [15]. In Tabelle 2 ist der empirisch bestimmte Einflussfaktor der Hangneigung aufgelistet.

Tabelle 2: Faktor für in Funktion der Hangneigung (nach Döll und Fiedler 2008).

Klasse	Neigung [%]	Faktor f_r
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

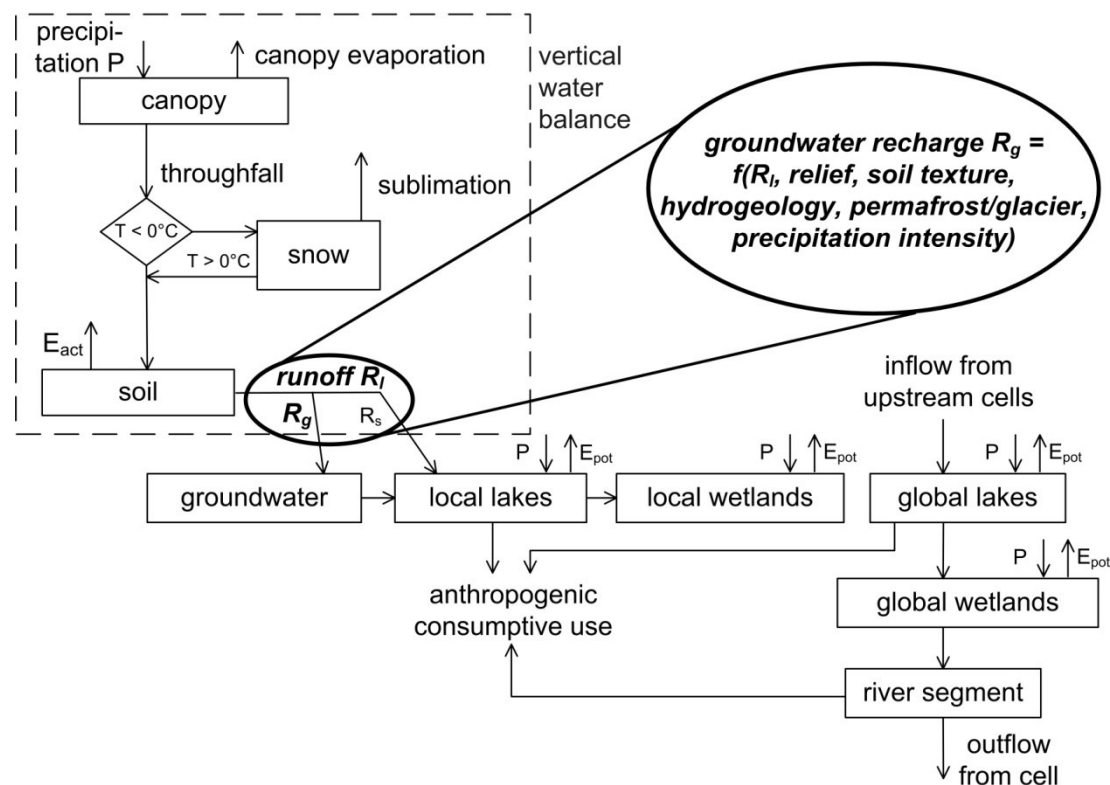


Abbildung 34: Aufteilung der Abflusskomponente auf Direktabfluss und Grundwasserneubildung nach Döll und Fiedler 2008.

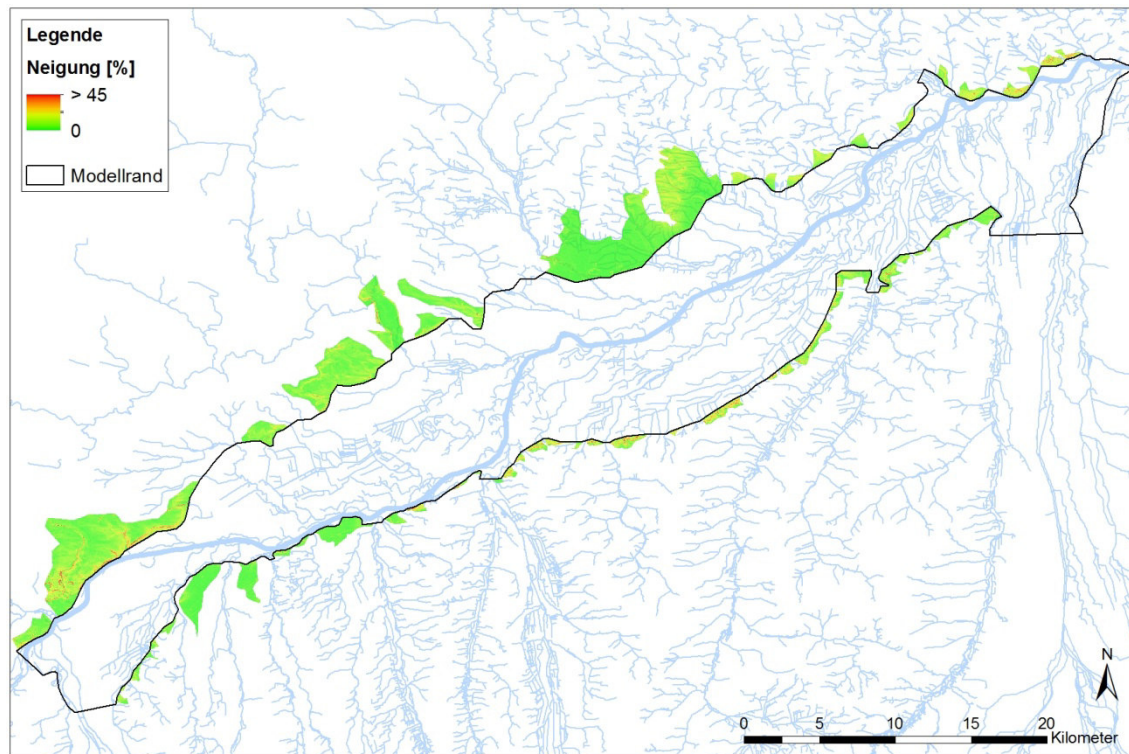


Abbildung 35: Hangneigung in den Einzugsbereichen.

4.3.2 Zustrom im quartären Grundwasserleiter

An den Talrändern reichen die grundwasserführenden Schotter einzelner Fließgewässer bis weit in die Seitentäler über das Modellgebiet hinaus (Abbildung 36).

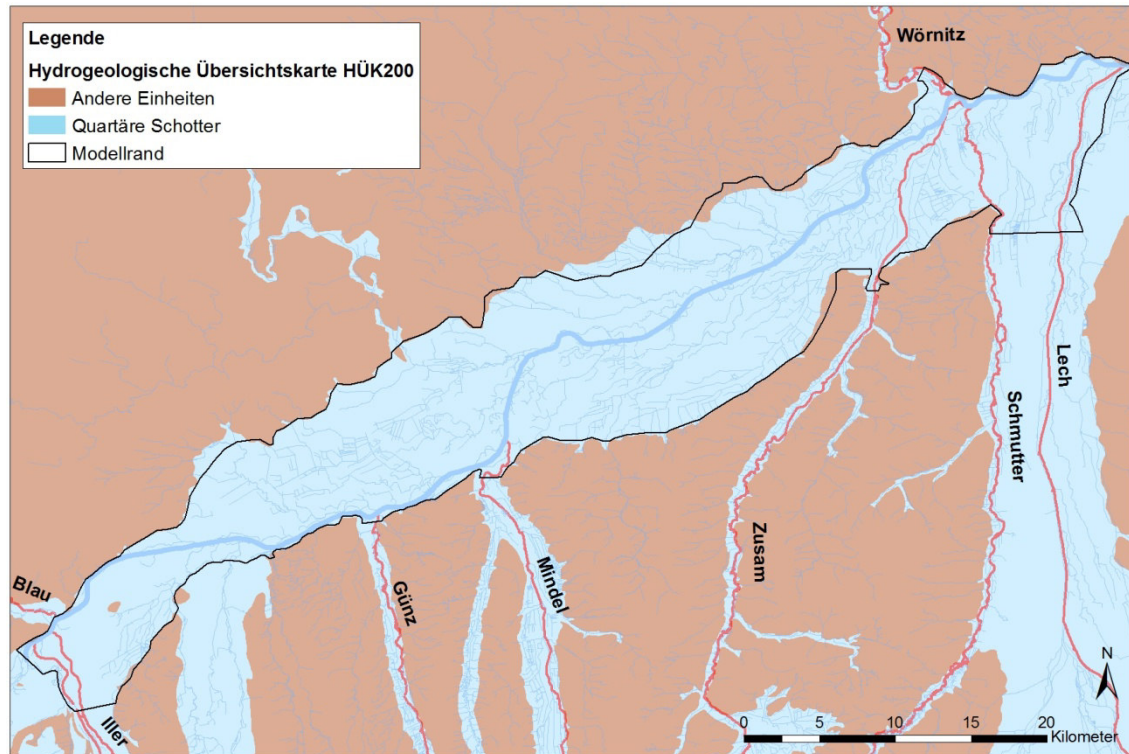


Abbildung 36: Ausdehnung der Quartären Schotter gemäss der Hydrogeologischen Übersichtskarte von Deutschland 1:200'000.

Der unterirdische Zustrom in den quartären Grundwasserleiter über den Modellrand wird für jeden Begleitgrundwasserstrom der Seitengewässer anhand des Darcy-Gesetzes berechnet:

$$Q = A \cdot k_f \cdot I$$

Q: Randzufluss im quartären Grundwasserleiter [m³/s]

A: Durchflossene Querschnittfläche des Grundwasserleiters [m²]

k_f: Hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

I: Potentialgefälle des Grundwasserleiters [-].

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 entspricht etwa dem Mittelwert der in quartären Schottern gemessenen Durchlässigkeiten gemäß BIS-Datenbank.

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.

Die resultierenden Randzuflüsse aus den quartären Grundwasserleitern mit den für die Berechnung verwendeten Parametern sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Berechneter Zustrom in den quartären Grundwasserleitern der Seitentäler.

Seitentäl nach Gewässer	M [m]	L [m]	k_f [m/s]	I [‰]	Q [Mio. m ³ /a]
Donau	8,8	2 380	$2 \cdot 10^{-3}$	2.5	3,27
Iller / Illerkanal	12,0	2 750	$2 \cdot 10^{-3}$	1.8	3,75
Günz	1,9	1 260	$2 \cdot 10^{-3}$	2.8	0,42
Mindel	4,0	1 450	$2 \cdot 10^{-3}$	2.8	1,04
Zusam	5,1	740	$2 \cdot 10^{-3}$	0.7	0.23
Lech / Schmutter	9,0	6 120	$2 \cdot 10^{-3}$	2.3	7,96
Wörnitz	3,0	980	$2 \cdot 10^{-3}$	0.8	0,15
Blau	7,3	520	$2 \cdot 10^{-3}$	6.1	1,45

4.3.3 Grundwasserzustrom aus dem Karst

Situation

In der Schwäbischen Alb, nördlich des Modellgebietes, schließen die verkarsteten Kalkgesteine des Oberjura an der Oberfläche auf. Die Gesteine tauchen mit einer Neigung von $1-2^\circ$ in süd-südöstlicher Richtung unter die tertiären Sedimente der Molasse ab [6]. 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 ca. 2-3 m höher als im Schotter Abbildung 38. Es ist deshalb zu erwarten, dass am Nordrand des Modells ein vertikaler Zustrom von Karstgrundwasser stattfindet.

Teilweise wird das Karstgrundwasser auch bereits nördlich des Modellrands in den Schotter austreten und dem Modell seitlich zuströmen.

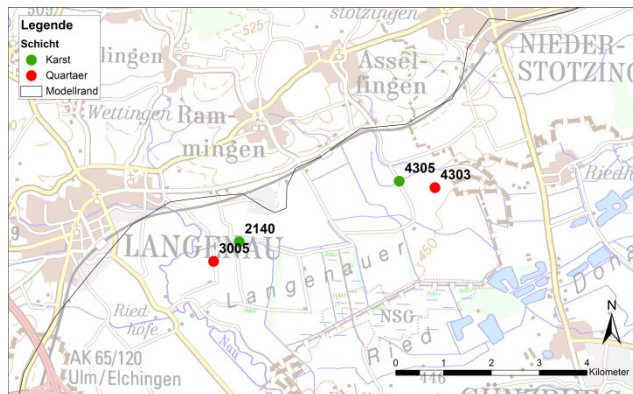


Abbildung 37: Lage der in Abbildung 38 dargestellten Messstellen

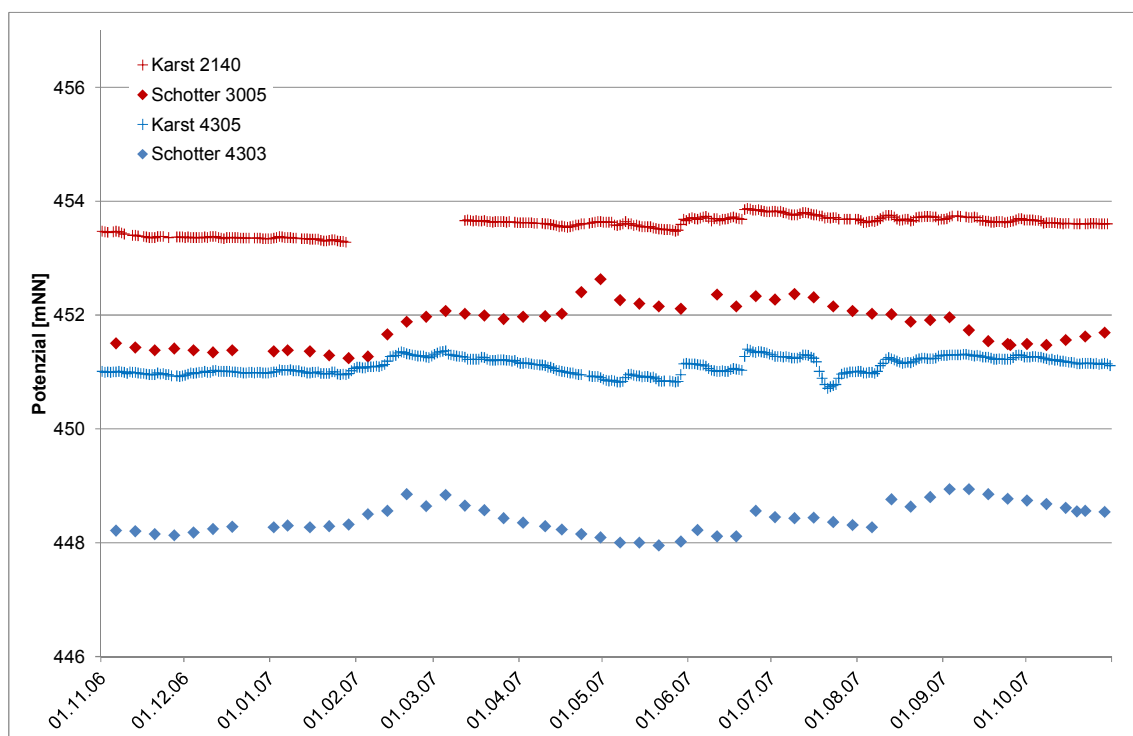


Abbildung 38: Potenziale im Karst- und im Schottergrundwasserleiter

Bestehende Untersuchungen

Zur Bilanz des Karstwasserzuflusses wurden bereits mehrere Untersuchungen durchgeführt:

In einem Modell, welches die Universität Würzburg im Jahr 1999 im Auftrag des bayerischen Industrieverbandes Steine und Erden erstellt hat („Modell Udluft“) [5] wird die Karstwassermenge aufgrund der klimatischen Wasserbilanz errechnet. Für das gesamte Modellgebiet, welches den gleichen Talabschnitt umfasst, wie das geplante Grundwassermodell, wurde ein Karstzufluss von etwa 350 Mio. m³/Jahr errechnet.

Im Jahr 2016 erstellte das Karlsruher Institut für Technologie die „Karststudie Donauried“ [6]. Das Betrachtungsgebiet umfasst etwa den gleichen Talabschnitt wie das geplante Modell. Der Karstzufluss wird aus einem Anteil seitlich zuströmenden Wasser und einer Grundwasserneubildung im aufgeschlossenen Oberjura aufsummiert. Für die Berechnung des Randzustroms wird dem Karstgrundwasserleiter eine Durchlässigkeit von 5×10^{-4} m/s zugeordnet. Die gesamte, aus Norden und Westen zuströmende Karstwassermenge wird zu 655 Mio. m³/Jahr geschätzt. Dem stehen ein Abstrom nach Süden und Osten von 150 Mio. m³/Jahr und Entnahmen und Quellschüttungen von 75 Mio. m³/Jahr gegenüber. Insgesamt wird der Zustrom zum Schottergrundwasserleiter auf 430 Mio. m³/Jahr geschätzt.

Die Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH erstellt im Auftrag der Landeswasserversorgung Stuttgart ein dreidimensionales numerisches Grundwassermodell des Donaurieds („Modell Donauried“) [7]. Dieses Modell umfasst nur den Teilbereich zwischen Böfingen und Sondheim, d.h. etwa einen Drittel der betrachteten Tallänge der übrigen Modelle. Das Modell weist einen Karstwasserzufluss von 47 bis 55 Mio. m³/Jahr aus (aktueller Kalibrierungsstand).

Vorgehen für das geplante Modell

Für das geplante Modell wird ebenfalls eine Abschätzung des Karstwasserzuflusses benötigt. Dabei muss einerseits der Zustrom aus der Schwäbischen Alb, andererseits der Abstrom nach Süden und Osten abgeleitet werden. Dazu wird folgendes Vorgehen gewählt:

Der Zustrom von Norden wird über eine klimatische Wasserbilanz im Einzugsgebiet des Karstgrundwasserleiters errechnet, der Abstrom nach Süden wird aus dem Potentialgradienten und der Transmissivität des Karstgrundwasserleiters abgeschätzt. Die Zugabe des resultierenden Karstzuflusses zum geplanten Modell erfolgt entlang des nördlichen Modellrandes. Im übrigen Modellgebiet wird der Austausch zwischen

Karstgrundwasserleiter und quartärem Grundwasserleiter durch die dazwischenliegende mächtige Molasse verhindert.

Abbildung 39 zeigt die Einzugsgebiete der Flüsse, welche das Karstgebiet nördlich des Modells entwässern. Zusätzlich ist in der Darstellung das Gebiet, in welchem der Oberjura aufgeschlossen ist, blau hinterlegt. Da die Schichten des Oberjura nach Südosten geneigt sind, ist damit zu rechnen, dass auch das Wasser, welches nördlich der Wasserscheide in den Karst eindringt, nach Süden entwässert. Ein Teil der Einzugsgebiete ist jedoch mit Tertiär überdeckt. In diesen Bereichen wird der Niederschlag nicht bis zum Karst gelangen, sondern über die Gewässer abgeführt.

Über den gesamten Einzugsbereich, welcher die Einzugsgebiete der Flüsse und den nördlich davon liegenden Karst umfasst, wird eine klimatische Wasserbilanz erstellt. Dazu wird das gleiche Verfahren eingesetzt wie für die übrigen seitlichen Einzugsgebiete (Kapitel 4.3.1.2). Die Evapotranspiration wird nach Penman-Monteith bestimmt, der Anteil des Oberflächenabflusses nach Döll unter Berücksichtigung der Hangneigung. Im Unterschied zu oben beschriebenem Verfahren werden jedoch folgende Annahmen getroffen:

- In Gebieten mit aufgeschlossenem Tertiär findet keine Karstwasserneubildung statt.
- In Gebieten mit aufgeschlossenem Oberjura wird angenommen, dass die berechnete Neubildung vollständig in den Karstgrundwasserleiter gelangt.

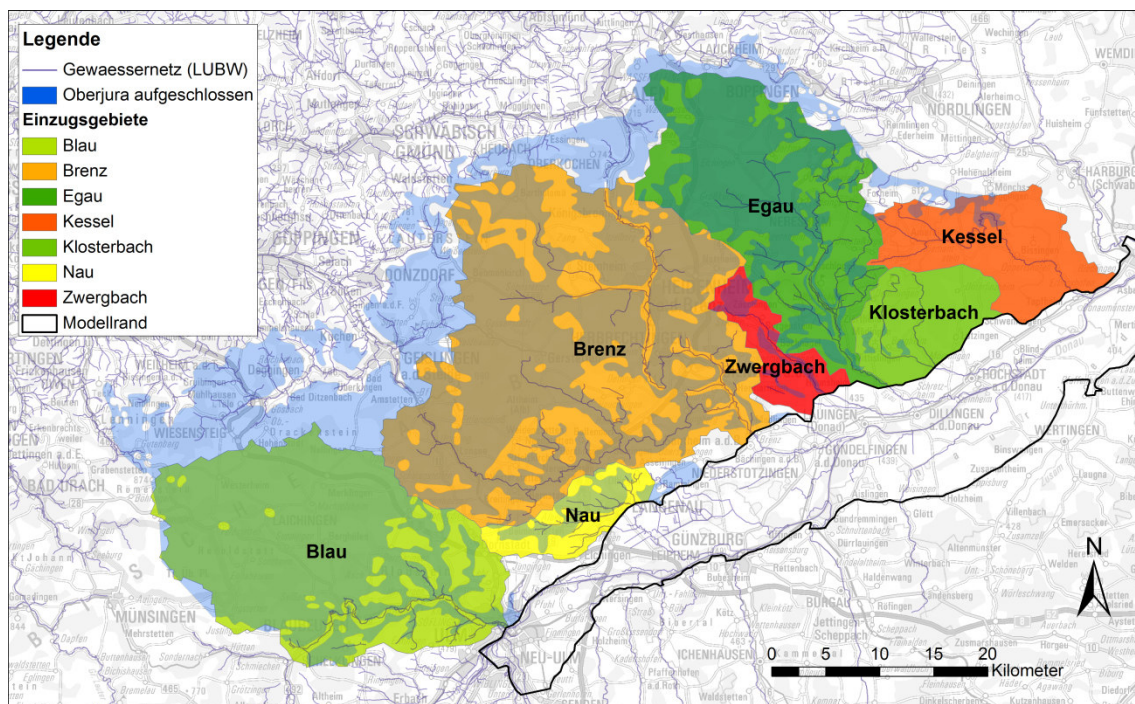


Abbildung 39: Einzugsgebiete der Flüsse, welche das Karstgebiet entwässern.

Für die Wasserbilanz wurde das hydrologische Jahr 2007 gewählt, weil in diesem die Abflussmengen aus dem betrachteten Gebiet am nächsten bei den Mittelwerten liegen. Für die Berechnung der Evapotranspiration wurden die Daten der Klimastation Stötten des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Die Station befindet sich in der Schwäbischen Alb auf einer Höhe von 730 mNN und repräsentiert deshalb das Klima im Einzugsbereich. Tabelle 4 zeigt die resultierende klimatische Wasserbilanz für das Einzugsgebiet des Karstgrundwasserleiters im hydrologischen Jahr 2007.

Tabelle 4: Klimatische Wasserbilanz des hydrologischen Jahres 2007 für das Einzugsgebiet des Karstgrundwasserleiters.

	Zustrom [Mio. m ³]	Abstrom [Mio. m ³]
Niederschlag	2670	
Evapotranspiration		1800
Abfluss nach Süden berechnet		485
Abfluss nach Norden		75
Karstneubildung		310
Summe	2670	2670

Plausibilitätsprüfung anhand der Abflüsse

Die klimatische Wasserbilanz kann anhand der gemessenen Abflüsse aus dem Einzugsgebiet überprüft werden. Tabelle 5 zeigt die Abflüsse der zur Donau hin entwässernden Gewässer. Für die Abflüsse Nau, Zwergbach, Klosterbach und Kessel liegen keine Messwerte vor. Die gesamte Fläche ihrer Einzugsgebiete liegt zwischen jenen der Egau und der Blau. Aufgrund der Charakteristik mit einem hohen Anteil an aufgeschlossenem Tertiär wird angenommen, dass der summierte Abfluss deutlich grösser ist als jener der Egau. Gemäss den Angaben der Regierung von Schwaben [16] sind die Abflüsse von Kessel und Klosterbach zusammen trotz 1.4 mal kleinerem Einzugsgebiet um den Faktor 1.2 höher sind als jene der Egau. Es wird deshalb angenommen, dass Nau, Zwergbach, Klosterbach und Kessel insgesamt einen Abfluss von 1.5-mal dem Egau-Abfluss aufweisen.

Insgesamt beträgt der Abfluss aller Gewässer im hydrologischen Jahr 2007 455 Mio. m³. Die gemessenen Abflüsse stimmen gut mit den aus der klimatischen Wasserbilanz ermittelten Abflüssen von 485 Mio. m³ überein. Die für die klimatische Wasserbilanz getroffenen Annahmen zur Aufteilung in Karstneubildung und Oberflächenabfluss werden damit bestätigt.

Tabelle 5: Nach Süden gerichtete Abflüsse

Gewässer	Abfluss [Mio. m ³]	Quelle
Blau	140	Messung LUBW
Brenz	186	Messung LfU
Egau	52	Messung LfU
Nau, Zwergbach, Klosterbach, Kessel	77	Geschätzt aufgrund Einzugsgebietsgrösse
Summe	455	

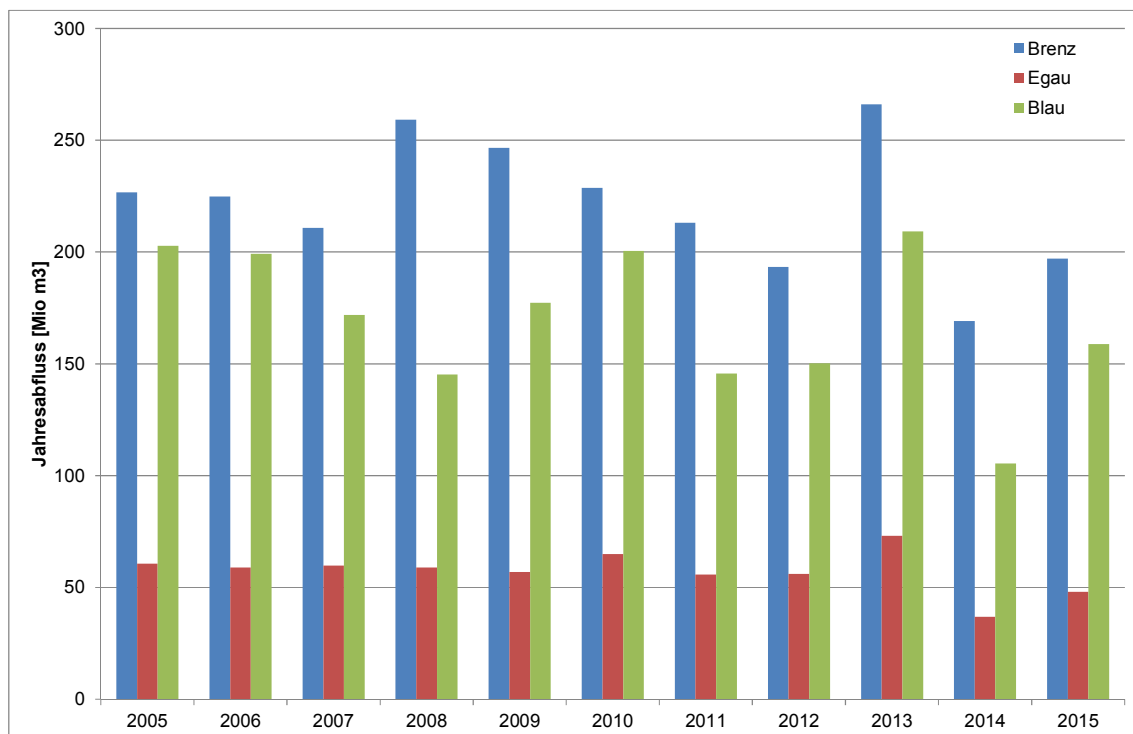


Abbildung 40: Jährliche Abflussmengen der Blau, Brenz und Egau

Karstabflüsse nach Süden

Aufgrund des Potentialgefälles im Karstgrundwasserleiter nach Südosten ist ein Abfluss von Karstgrundwasser nach Süden zu erwarten. Dieser kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$Q = k_f \cdot I \cdot F$$

k_f : Durchlässigkeit des Karstgrundwasserleiters

I : Potentialgradient

F : Durchströmte Fläche

Für die Variablen werden folgende Werte aus der Karststudie [6] verwendet:

k_f : 5×10^{-4} m/s

I : 0.13 %

F : Produkt aus 175 m Mächtigkeit und 60 km Tallänge.

Aus dieser Berechnung resultiert ein Karstabfluss von 215 Mio. m³/Jahr. Diese Zahl ist mit einer erheblichen Unsicherheit behaftet, da die Durchlässigkeit des Karstgrundwasserleiters in diesem großen Maßstab kaum bekannt ist.

Im Grundwassermodell werden folgende alternative Ansätze für den Karstzufluss gewählt:

- Berücksichtigung über einen zeitlich variablen Zufluss am Nordrand des Modells
- Berücksichtigung über Cauchy-Randbedingungen: Vorgegeben wird das zeitlich variable Potenzial im Karstgrundwasserleiter. Der Leakagefaktor wird aus einer zu kalibrierenden Tertiärdurchlässigkeit und der im geologischen Modell ermittelten Tertiärmächtigkeit berechnet.

Im Rahmen von Sensitivitätsuntersuchungen sollen die beiden Ansätze, sowie verschiedene resultierende Karstzuflüsse miteinander verglichen werden.

Anschließend wird das am besten geeignete Vorgehen gewählt.

4.3.4 Austausch mit Oberflächengewässern

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].

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.

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 25-mal höher sein als in den Drainagegerinnen.

4.3.4.1 Höhenlage der Wasseroberfläche

Die im numerischen Grundwassermodell berücksichtigten Fließgewässer sind in Abbildung 41 dargestellt. Kleine Drainagegerinne können vernachlässigt werden.

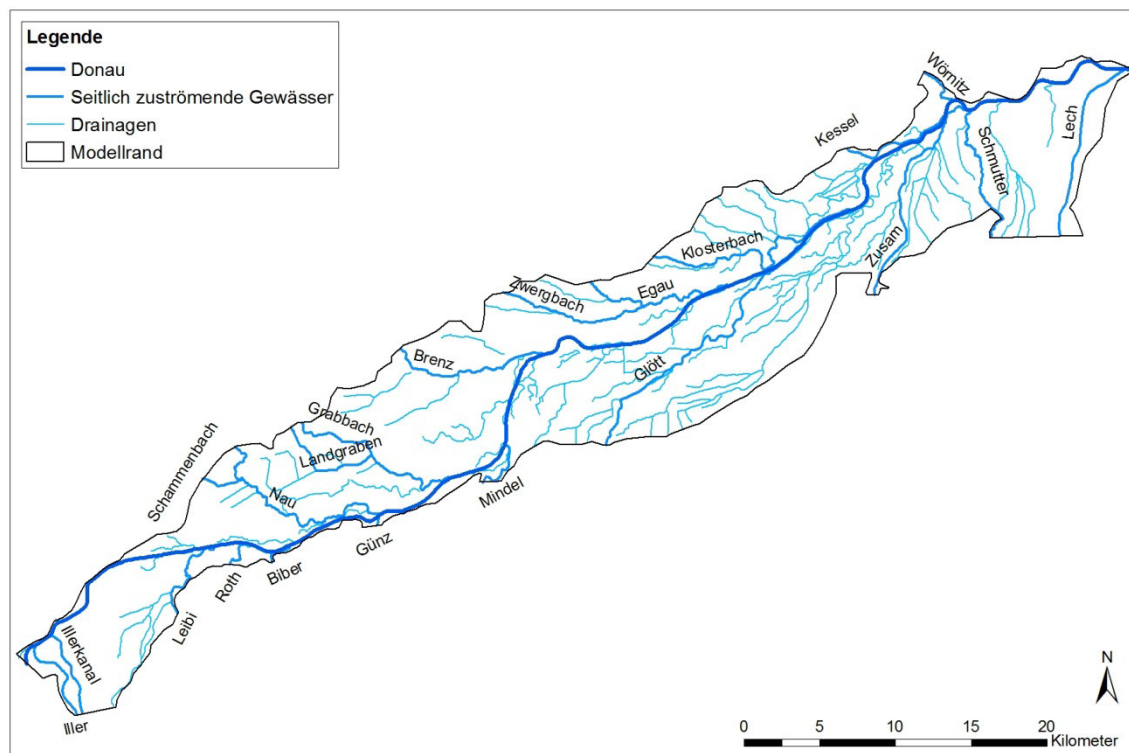


Abbildung 41: Im numerischen Grundwassermodell berücksichtigte Fließgewässer.

Die Wasserspiegelhöhen der Oberflächengewässer werden grundsätzlich im hydraulischen Modell berechnet (nähere Ausführungen siehe Anlage 4.1). Dies gilt auch für Überschwemmungsflächen während der betrachteten Hochwasserereignisse.

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 die Kalibrierung des Mittelwasserzustandes werden im hydraulischen Modell Abfluss-Pegel-Beziehungen der wichtigsten Gewässer hergeleitet.

Das hydraulische Modell deckt nicht die gesamte Fläche des Grundwassermodells ab (Abbildung 42). Zudem sind die Drainagegerinne, welche im Grundwassermodell eine große Rolle spielen, teilweise im hydraulischen Modell nicht im Detail berücksichtigt. Die im hydraulischen Modell nicht enthalten Wasserspiegelhöhen werden deshalb mit anderen Methoden berechnet.

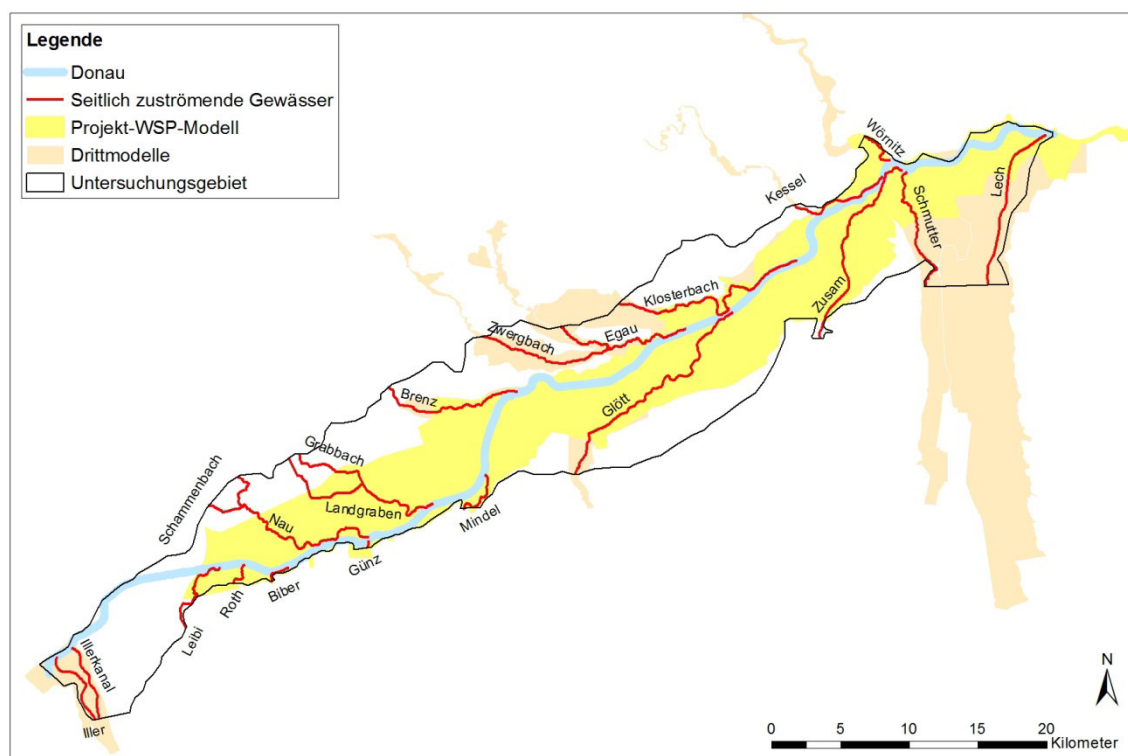


Abbildung 42: Abdeckung des Modellgebiets durch hydraulische 2D-Modelle.

Zur ergänzenden Ermittlung der im Modell vorgegebenen Oberflächengewässer-Wasserspiegel in den nicht durch das hydraulische Modell abgedeckten Flächen (braune und weisse Flächen in Abbildung 42), wird folgendes Vorgehen gewählt:

- In Gewässern, von welchen ein hydraulisches 2D-Modell existiert, werden in einem Abstand von 200 m Querprofile abgegriffen. In diesen Querprofilen werden die Abfluss-Pegel-Beziehungen aus der Schätzformel nach Manning-Strickler berechnet. Zwischen den Profilen wird der Wasserspiegel linear interpoliert. Diese Methode wird für folgende Gewässer eingesetzt: Iller, Illerkanal, Schmutter, Lech, Egau, Brenz, Klosterbach, Zwergbach, Donau Ulm bis Staustufe Oberelchingen.
- Bei Gewässerabschnitten, von welchen kein hydraulisches 2D-Modell existiert, wird die Wasserspiegellage, ausgehend vom am weitesten oberstrom gelegenen Modellquerschnitt des jeweiligen hydraulischen Modells parallel zum Gefälle des DGM extrapoliert. Diese Methode wird für die Leibi, Nau, Landgraben, Brenz und Zusam eingesetzt
- Bei den übrigen Gewässern ausserhalb des hydraulischen Modells (vor allem Drainagen) werden die Wasserspiegel als zeitlich konstant betrachtet.

Zeitabhängig berücksichtigte Gewässer

Die in Abbildung 42 aufgeführten seitlich zum Modellgebiet zuströmenden Gewässer werden im Grundwassermodell mit zeitabhängigen Wasserständen vorgegeben. Die zur Bestimmung der Wasserspiegel verwendeten Abflussmessstellen sind in

Tabelle 6 zusammengestellt.

Für Gewässer ohne Abflussmessstelle werden die benötigten Abflussganglinien durch eine Übertragung von gemessenen Abflussganglinien an beobachteten Gewässern auf unbeobachtete Gewässer, unter Berücksichtigung der Einzugsgebietsgrösse und der Niederschlagsdaten, generiert.

Tabelle 6: Verwendete Abflussganglinien

Gewässer	Abflussganglinie
Donau	10026301 Donau, Neu-Ulm 10032009 Donau, Günzburg 10035801 Donau, Dillingen 10039802 Donau, Donauwörth
Iller	11405000 Iller, Wiblingen
Illerkanal	11498000 Illerkanal, Gerlenhofen
Roth	11548007 Roth, Roth
Günz	10000153 Günz, Waldstetten
Mindel	11609000 Mindel, Offingen
Zusam	11924007 Zusam, Pfaffenhofen
Schmutter	11946000 Schmutter, Druisheim
Lech	12006000 Lech, Augsburg
Wörnitz	11809009 Wörnitz, Harburg
Egau	11744005 Egau, Wittislingen
Brenz	11723504 Brenz, Bächingen
Leibi	Herleitung aus Roth-Abfluss
Biber	Herleitung aus Roth-Abfluss
Glött	Herleitung aus Zusam-Abfluss
Kessel	Herleitung aus Egau-Abfluss
Klosterbach	Herleitung aus Egau-Abfluss
Nau	Herleitung aus Egau-Abfluss
Zwergbach	Herleitung aus Egau-Abfluss
Landgraben	Herleitung aus Egau-Abfluss

Drainagen

Für die im Grundwassermodell mit zeitlich konstantem Wasserspiegel berücksichtigten Drainagegerinne (Abbildung 41) werden die Wasserspiegelhöhen aus dem 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 43). Durch geeignete Mittelungsmethoden (zentriertes gleitendes Mittel entlang der Gewässerachse) können diese Schwankungen jedoch ausgeglichen werden.

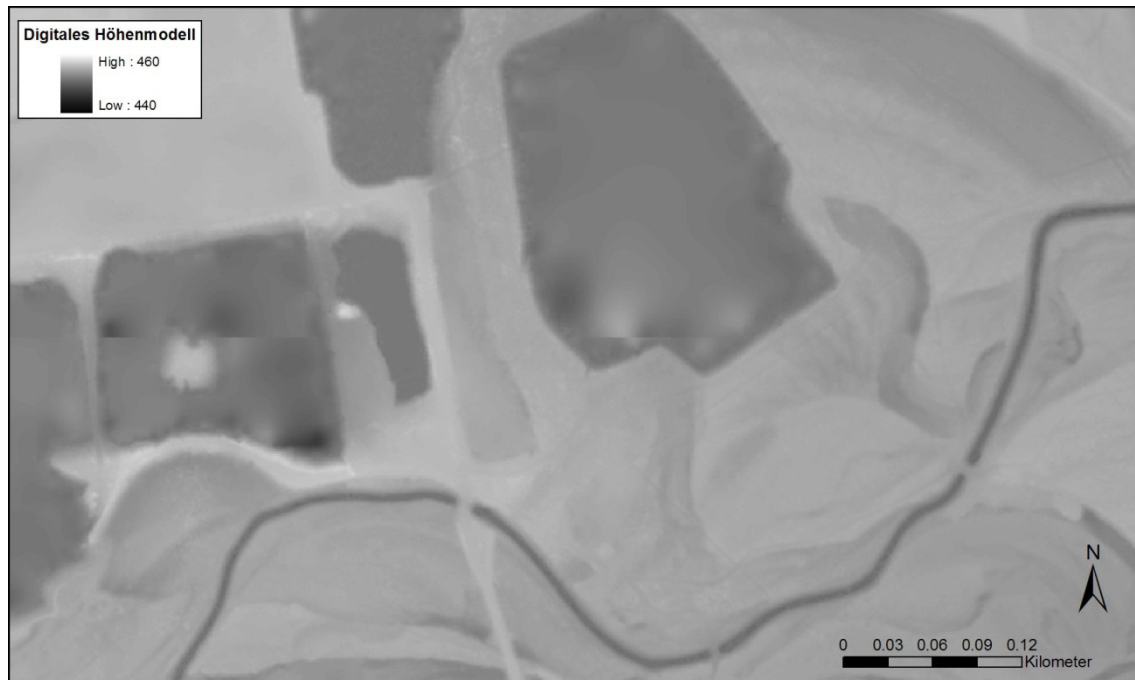


Abbildung 43: Ausschnitt aus dem digitalen Geländemodell.

4.3.5 Überflutungsflächen

Bei Hochwasserereignissen der Donau fließt die Donau an mehreren definierten Überlaufstrecken in den „Riedstrom“. Die Überflutungsflächen sind vollständig im hydraulischen 2d-Modell enthalten. Der Zeitraum der Überflutung wird durch das hydraulische Modell ebenfalls abgedeckt. Im Grundwassermodell werden Überflutungsflächen mit einer Cauchy-Randbedingung berücksichtigt. Die Lage des Wasserspiegels und die von der Randbedingung betroffenen Modellknoten werden aus den Resultaten des hydraulischen Modells übernommen. Für den Leakagewert wird aus der Deckschichtdurchlässigkeit und deren Mächtigkeit ein Ausgangswert errechnet. Mit der Kalibrierung an einem Hochwasserereignis kann der Leakagewert anschließend enger eingegrenzt werden.

4.3.6 Grundwasserentnahmen

Im Modell berücksichtigt werden alle Grundwasserentnahmen im Modellgebiet mit einem Wasserrecht von mehr als 36'500 m³/Jahr, bei denen keine Wasserrückgabe besteht. Damit sind etwa 99% der gesamten Grundwasserentnahme im Modell berücksichtigt. Die Brunnen zur landwirtschaftlichen Bewässerung werden bereits bei der Berechnung der Grundwasserneubildung berücksichtigt. Insgesamt werden somit rund 150 Grundwasser-Entnahmestellen in das Modell übernommen. Der Wissensstand über die Fördermengen ist sehr unterschiedlich. Von einigen Entnahmestellen sind nur

Jahresfördermengen oder nur die konzessionierten Entnahmemengen gemäß Wasserrecht bekannt. Die Landeswasserversorgung Stuttgart und der Zweckverband Wasserversorgung fränkischer Wirtschaftsraum (WFW) betreiben die größten Anlagen. Hier liegen monatliche Entnahmemengen vor.

Im Modell werden die Fördermengen als Tageswerte vorgegeben. Über das nachfolgend beschriebene Verfahren werden für jede Entnahmestelle die Tageswerte abgeleitet:

- Sind die Tagesfördermengen bekannt, so werden diese im Modell vorgegeben. Sind die Monatsfördermengen bekannt, so wird die Monatsfördermenge durch die Anzahl Tage des Monats geteilt. Ist die Jahresfördermenge bekannt, so wird sie durch die Anzahl der Tage des Jahres geteilt.
- Ist keine Fördermenge bekannt, so wird ein Standardwert als Jahresförderung eingesetzt. Der Standardwert beträgt 1/2 des konzessionierten Jahreskontingentes oder das Mittel über die Jahre, in denen die Förderung bekannt ist.

In Tabelle 7 sind die Entnahmemengen der Jahre 2010 bis 2015 zusammengestellt. Etwa 95% der Fördermengen sind durch Messdaten belegt. Abbildung 44 zeigt die im Modell berücksichtigten Entnahmestellen.

Tabelle 7: Fördermengen aus dem quartären Grundwasserleiter im Modellgebiet im
Mio. m³/Jahr

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
WFW	24.2	26.5	27.7	26.6	28.5	32.0
LW Stuttgart	34.2	35.9	32.0	29.7	27.0	28.7
Rest mit Messdaten	23.4	24.8	26.0	23.7	23.5	24.0
Rest ohne Messdaten	3.8	3.4	3.6	4.6	4.6	5.1
Summe	85.5	90.6	89.4	84.6	83.6	89.7

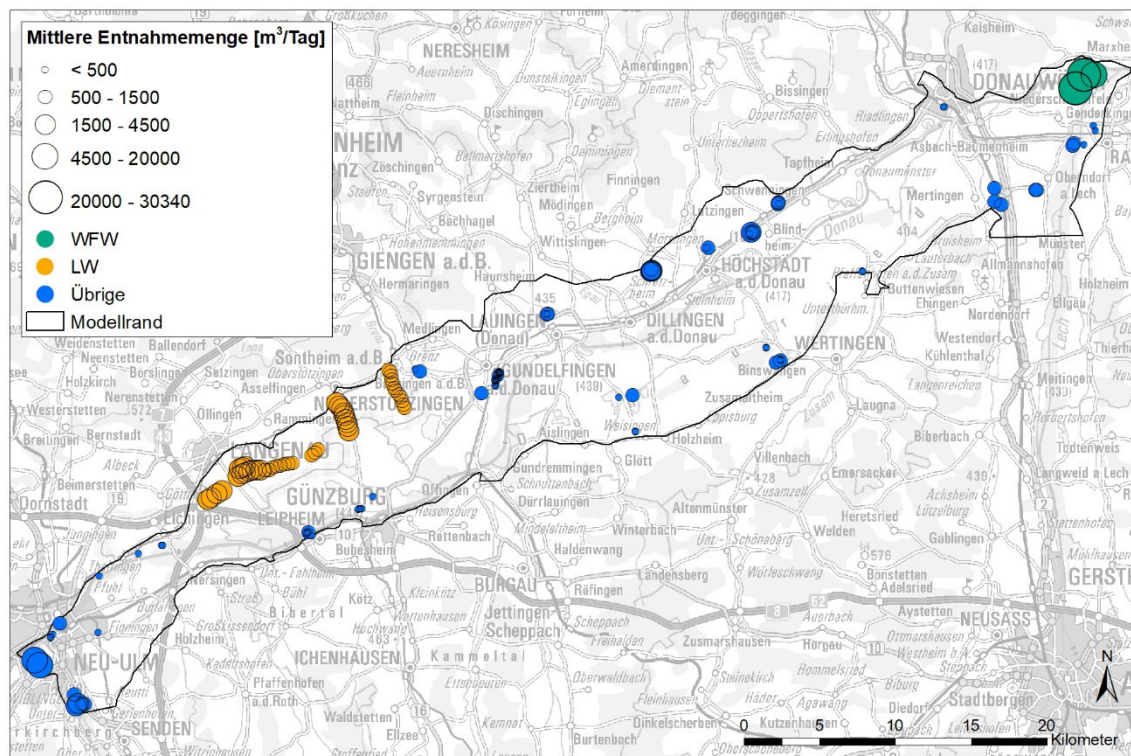


Abbildung 44: Im Modell berücksichtigte Entnahmestellen. Die Symbolgröße wurde entsprechend der mittleren Entnahme der Jahre 2010 bis 2015 dargestellt.

4.3.7 Bauwerke

Beim Bau der Staustufen 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 Netzeinheit und können deshalb erst beim Modellaufbau festgelegt werden. Abbildung 45 zeigt die Lage der Dichtwände. In der Anlage 5.1.4 befindet sich eine detailliertere Darstellung.

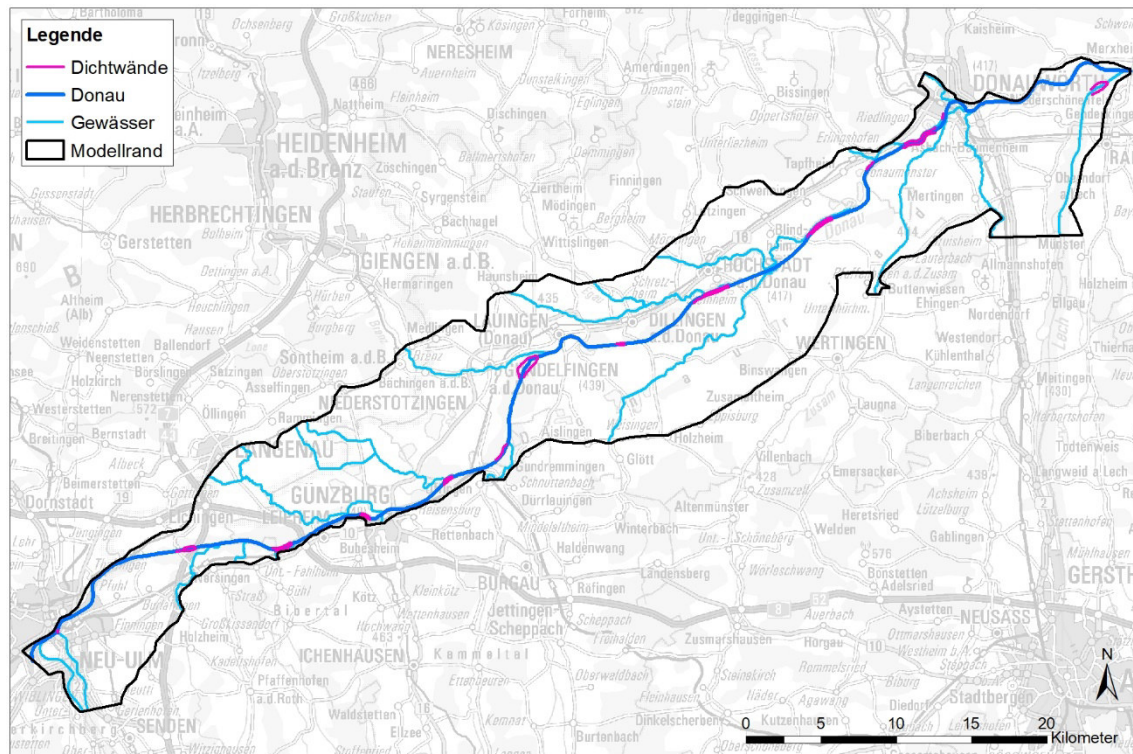


Abbildung 45: Dichtwände im Modellgebiet.

4.4 Vorläufige Wasserbilanz

Wahl des Bilanzzeitraumes

Für die Wasserbilanz wurde das hydrologische Jahr 2006 (01.11.2005 – 31.10.2006) ausgewählt. In diesem Jahr entsprechen sowohl der Donauabfluss, wie auch die Grundwasserneubildung aus Niederschlag etwa dem Mittelwert der Jahre 1995 bis 2015 (Abbildung 46, Abbildung 47).

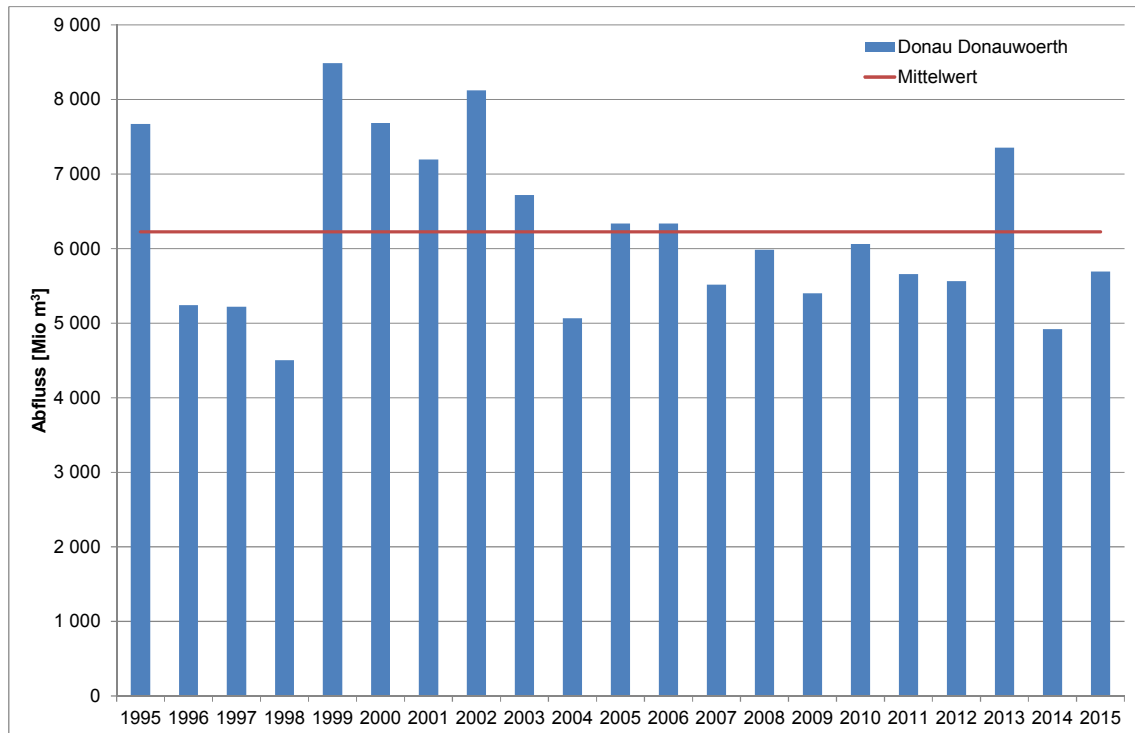


Abbildung 46: Abfluss der Donau bei Donauwörth in den hydrologischen Jahren 1995 - 2015

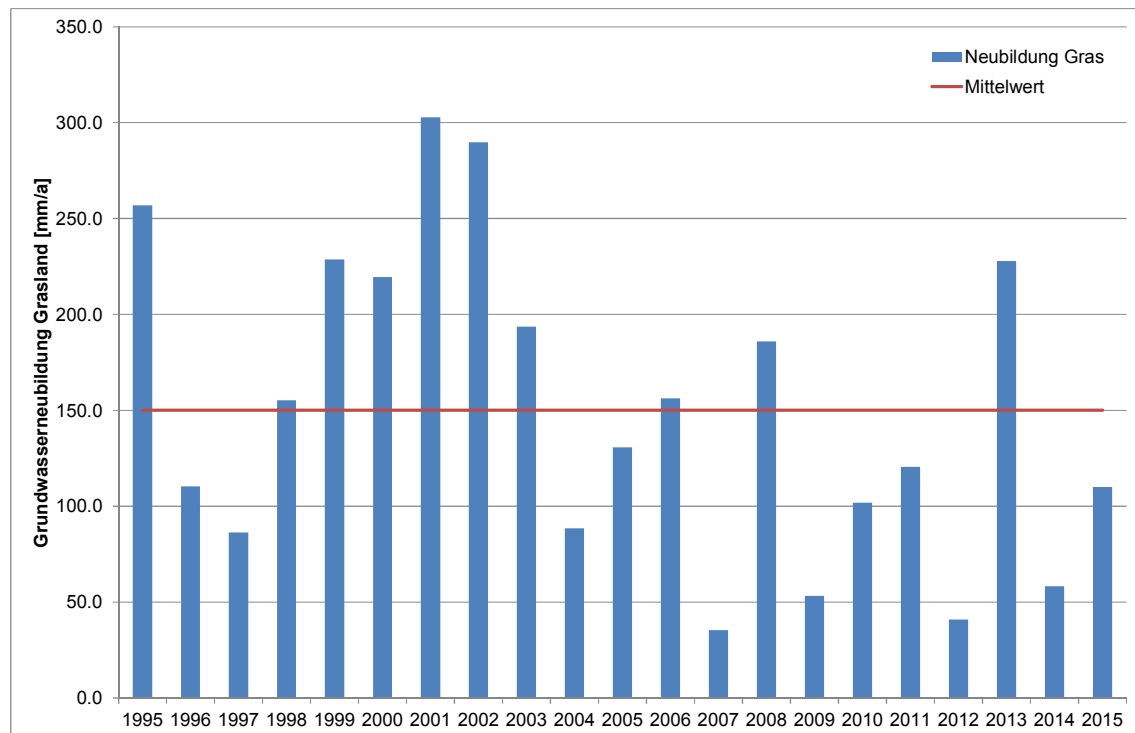


Abbildung 47: Nach Penman-Monteith aus den Klimadaten von Günzburg berechnete Grundwasserneubildung über Grasland in den hydrologischen Jahren 1995 - 2015

Wasserbilanz in den Oberflächengewässern

Bei der Bilanzierung der Grundwassermengen gibt es eine bisher nicht bestimmte Bilanzgröße, nämlich die Exfiltration von Grundwasser in die Oberflächengewässer. Die Oberflächengewässer im Modellgebiet strömen alle der Donau zu. Als erstes wurde deshalb die Wasserbilanz der Oberflächengewässer erstellt. Die Differenz zwischen zuströmendem und abströmendem Wasser entspricht der Exfiltrationsmenge. In der Bilanz ebenfalls berücksichtigt wurde die Entnahme von Donauwasser durch die LW Stuttgart und das Kernkraftwerk bei Gundremmingen. Nicht berücksichtigt wurde die Einleitung aus Kläranlagen. Da die Abflussmessstelle der Günz nur etwa 80% des gesamten Einzugsgebietes erfasst, wurden die gemessenen Abflussmengen auf das gesamte Einzugsgebiet hochskaliert.

Tabelle 8: Wasserbilanz der Oberflächengewässer

	Zustrom [Mio. m ³]	Abstrom [Mio. m ³]
Donau Donauwörth		6334.1
Donau Neu Ulm	4172.3	
Gewässer Süd	1113.8	
Gewässer Nord	936.1	
Entnahme AKW		22.1
Entnahme LW Stuttgart		34.4
Exfiltration	168.3	
Summe	6390.5	6390.5

Wasserbilanz des quartären Grundwasserleiters

Die nach Kapitel 4.3 für das hydrologische Jahr 2006 bestimmten Bilanzgrößen des quartären Grundwasserleiters sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Der Wert für die Exfiltration wurde aus der Bilanz der Oberflächengewässer übernommen. Es resultiert ein Abstromüberschuss von 10 Mio. m³.

Tabelle 9: Wasserbilanz des quartären Grundwasserleiters

	Zustrom [Mio. m ³]	Abstrom [Mio. m ³]
Neubildung Quartär	115.4	
Seitenzufluss Quartär	17.8	
Seitenzufluss Quartärleiter	18.3	
Fördermengen Quartär		85.0
Karstzufluss	312.0	
Karstabfluss Süd		215.0
Fördermengen Karst		5.0
Exfiltration		168.3
Summe	463.5	473.3

4.5 Vorgehen bei der Kalibrierung

4.5.1 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.

Für die Kalibrierung wird die Software „PEST“ eingesetzt [17]. 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.

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.

4.5.2 Fixierung von Parametern

Eine gute Übereinstimmung von Modellresultaten und Messwerten kann meistens mit verschiedenen Parameterkombinationen erzielt werden, da nie alle Parameter voneinander unabhängig sind.

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.

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
- Sohlendurchlässigkeiten der Gewässer (Leakage)
- Porosität im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels

Gelingt die Kalibrierung nicht mit der gewünschten Güte, so wird in einem zweiten Schritt der Karstzufluss variiert. Für die korrekte zeitliche Nachbildung der Grundwasserspiegelschwankungen infolge der Grundwasserneubildung kann es zudem erforderlich sein, den Bodenspeicher zu variieren.

4.5.3 Kalibrierungszeiträume

Die Auswirkungen der Rückhalteräume müssen sowohl im gefluteten, wie auch im ungefluteten Zustand quantifiziert werden. Für den ungefluteten Zustand ist noch nicht geklärt, welche Grundwasserstände für die Auswirkungen maßgebend sind. Die Kalibrierung sollte deshalb sowohl Hochwasserereignisse wie auch Nieder- und Mittelwasserstände umfassen.

Hochwasserereignisse

Abbildung 48 zeigt die Abflussganglinie der Donau bei Neu-Ulm und bei Donauwörth zwischen 1994 und 2015. In Donauwörth wurden die höchsten Abflüsse in den Jahren 1994, 1999 und 2013 gemessen. In Neu-Ulm wurden in den Jahren 1999, 2005 und 2013 die größten Hochwasserspitzen erreicht. Für die Kalibrierung und Validierung des Grundwassermodells eignen sich die beiden Hochwasserereignisse von 1999 und 2013 am besten, da sie den gesamten Donauabschnitt betrafen.

Da der Grundwasserspiegel langsamer reagiert als der Wasserspiegel in Gewässern und Überflutungsflächen wird für die Nachbildung eines Hochwasserereignisses im Grundwassermodell eine längere Zeitspanne benötigt als im hydraulischen Modell. Der für das Grundwassermodell benötigte Vor- und Nachlauf kann im hydraulischen Modell über quasi-stationäre Berechnungen abgedeckt werden.

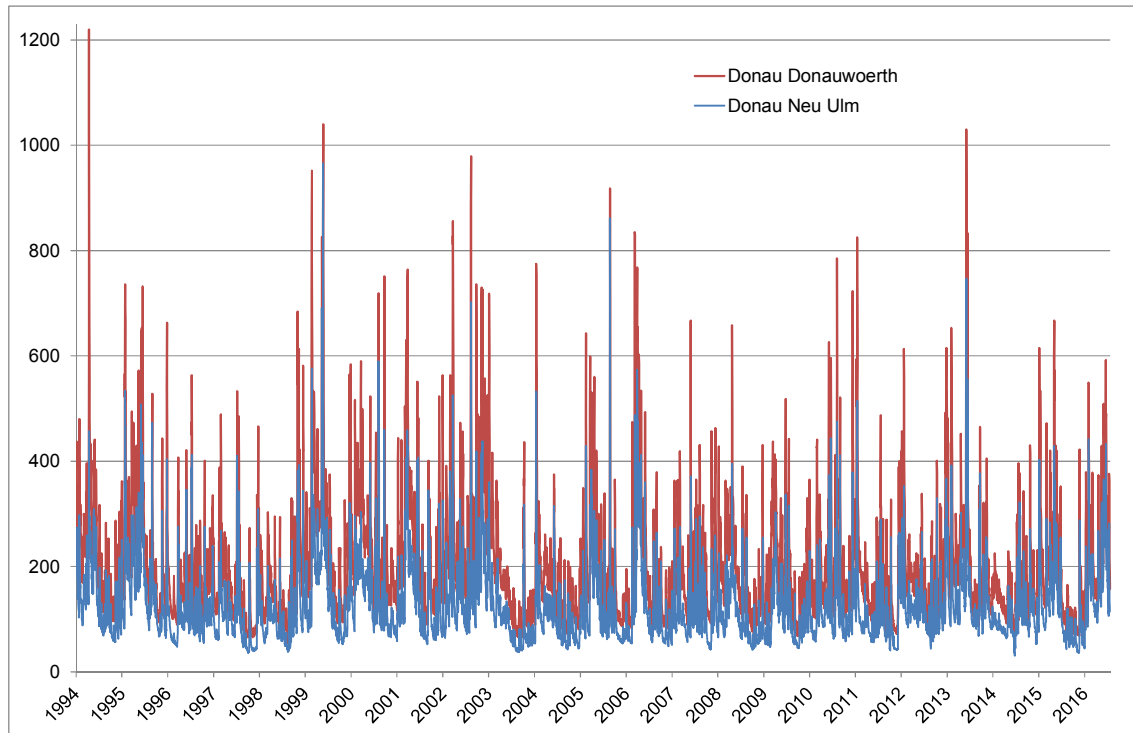


Abbildung 48: Abflussganglinie der Donau zwischen 1994 und 2015 (Quelle LfU).

Für die Kalibrierung und Validierung von Hochwasserereignissen werden die folgenden Zeiträume verwendet:

- Kalibrierung: 01.01.2013 bis 31.12.2013
- Validierung: 01.01.1999 bis 31.12.1999

In Abbildung 49 und Abbildung 50 sind die Abflussganglinien der Donau während der Hochwasserereignisse 1999 und 2013 dargestellt. Die Auswirkungen der Ereignisse auf den Grundwasserstand sind am Beispiel der Messstelle RIED bei Riedheim (Abbildung 51), nahe dem Rückhalteraum Leipheim aufgezeigt (Abbildung 52, Abbildung 53).

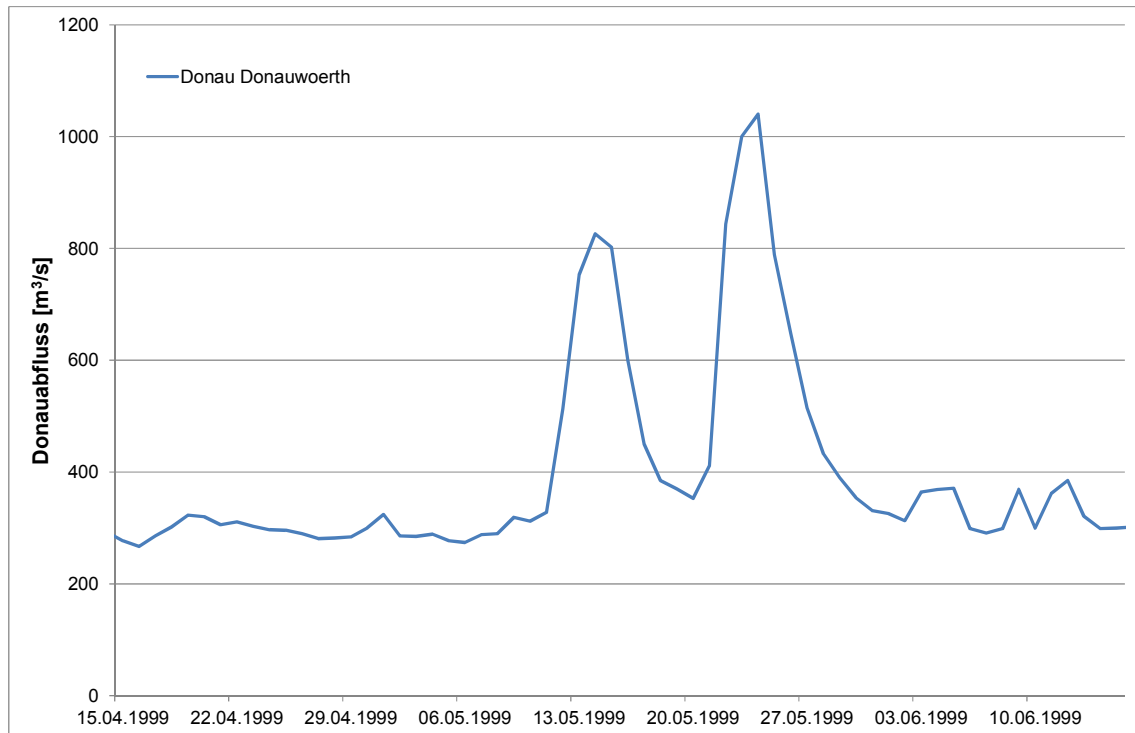


Abbildung 49: Ganglinie des Donauabflusses während dem Hochwasser 1999.

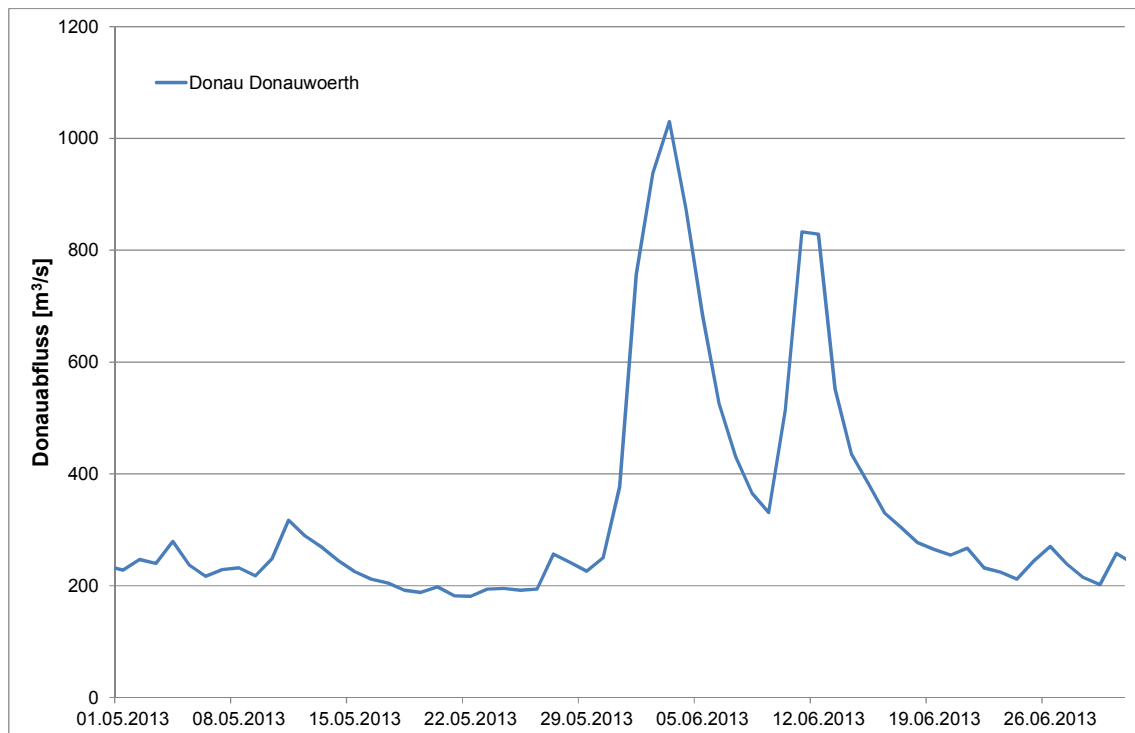


Abbildung 50: Ganglinie des Donauabflusses während des Hochwassers 2013

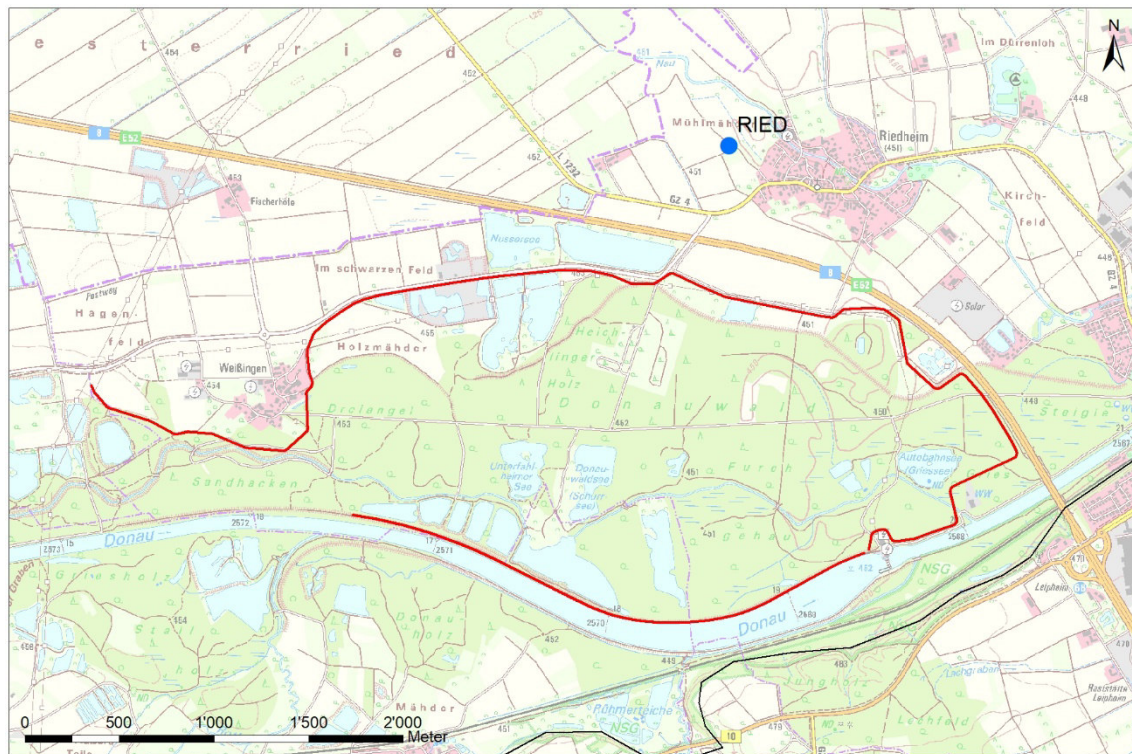


Abbildung 51: Lage der Messstelle RIED beim Rückhalteraum Leihpheim

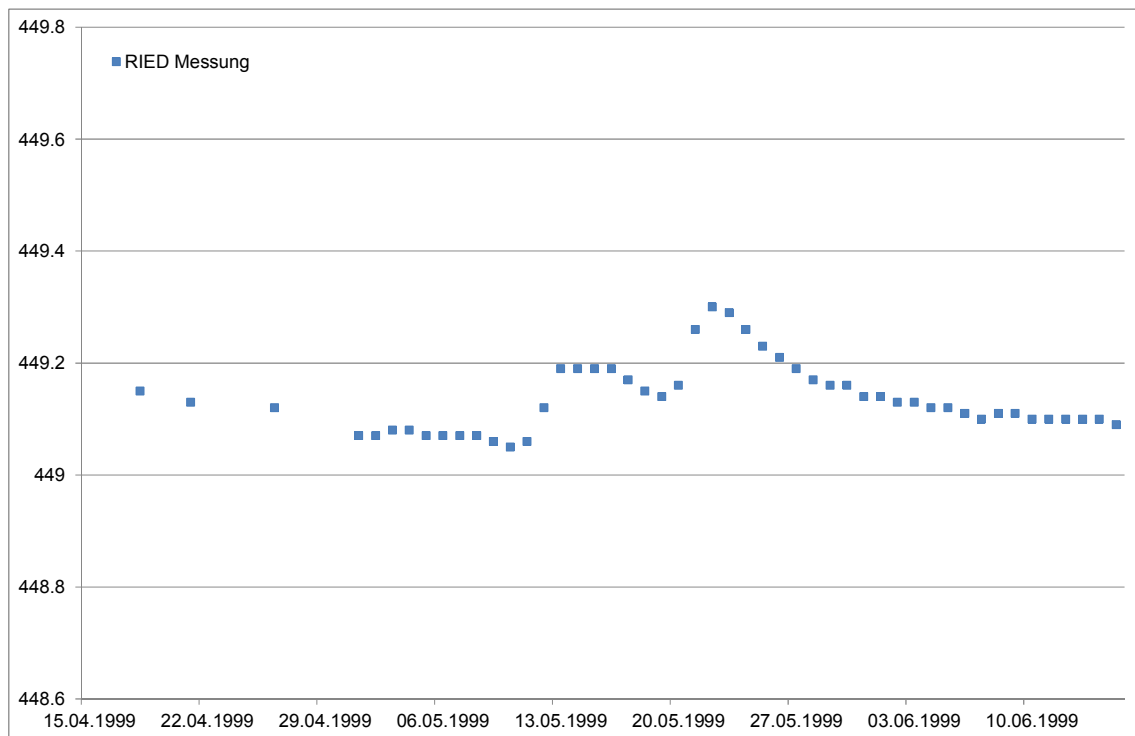


Abbildung 52: Messwerte des Grundwasserspiegels in der Messstelle RIED während des Hochwassers 1999.

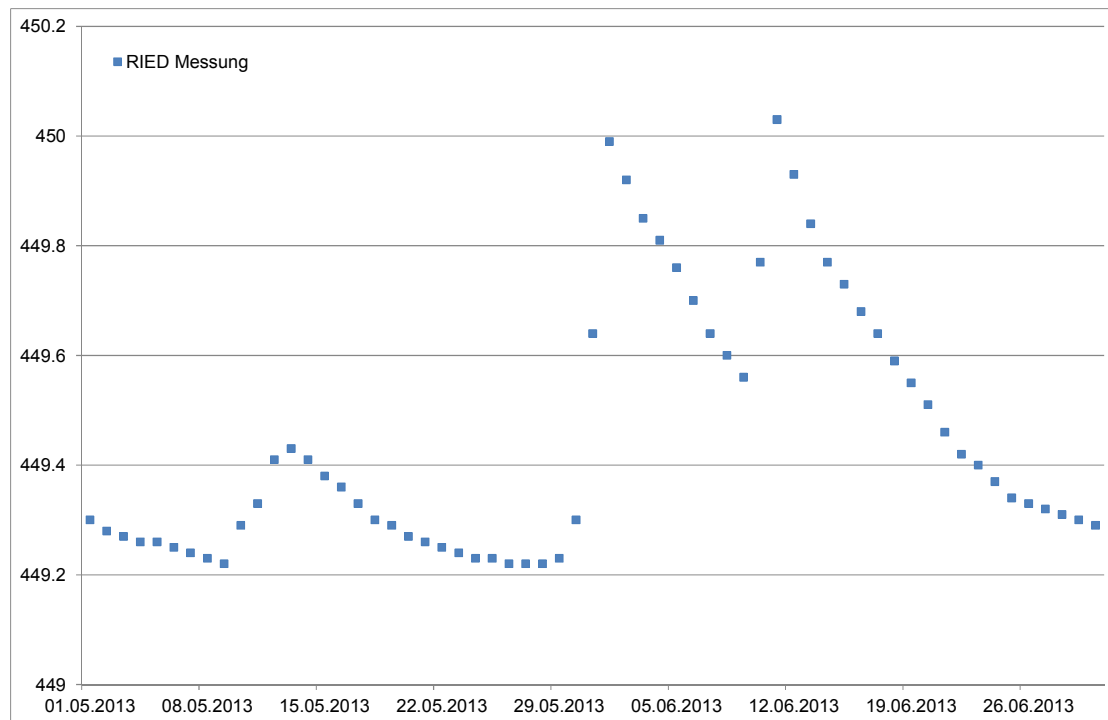


Abbildung 53: Messwerte des Grundwasserspiegels in der Messstelle RIED während des Hochwassers 2013.

Mittlere Verhältnisse

Da sich der Grundwasserspiegel dynamisch verändert und seine mittlere Höhe nicht an jeder Stelle zur gleichen Zeit erreicht, wird eine quasi stationäre Kalibrierung durchgeführt. Dazu muss ein Zeitraum gewählt werden, welcher möglichst lange in etwa mittlere Verhältnisse aufweist. Für die Kalibrierung wäre es zudem wünschenswert, einen möglichst aktuellen Zeitraum zu verwenden, da dann mehr Messdaten mit täglicher Frequenz vorliegen. Abbildung 54 zeigt den Abfluss der Donau im Zeitraum 2010 bis 2015. Geeignete Zeiträume finden sich mit Ausnahme des Jahres 2014 jeweils im Frühjahr. Es wird ein Zeitraum im Jahr 2015 ausgewählt, da dies der aktuellste Zeitraum ist, für den alle benötigten Messdaten verfügbar sind:

- Kalibrierung an mittleren Verhältnissen: 01.02.2015 bis 31.03.2015

In Abbildung 55 ist der Donauabfluss während des Kalibrierungszeitraums dargestellt. Abbildung 56 zeigt am Beispiel der Grundwassermessstelle RIED, dass sich der Grundwasserspiegel während des Kalibrierungszeitraums dynamisch verändert.

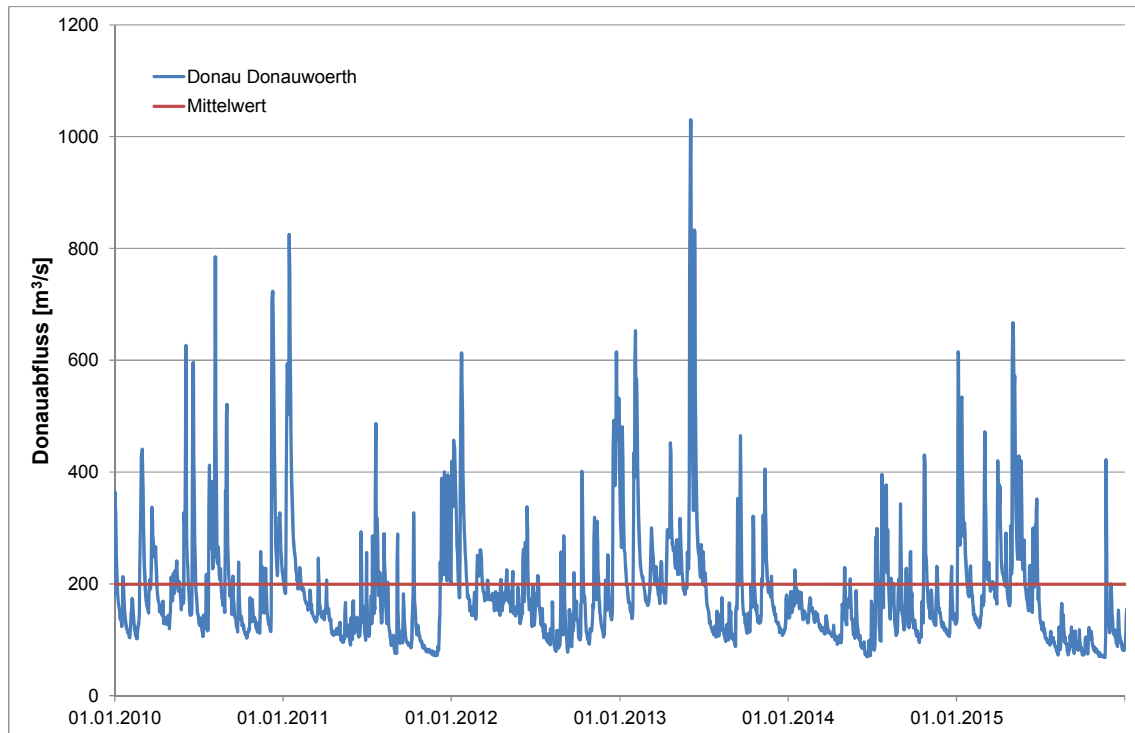


Abbildung 54: Donauabfluss bei Donauwoerth (Quelle LfU).

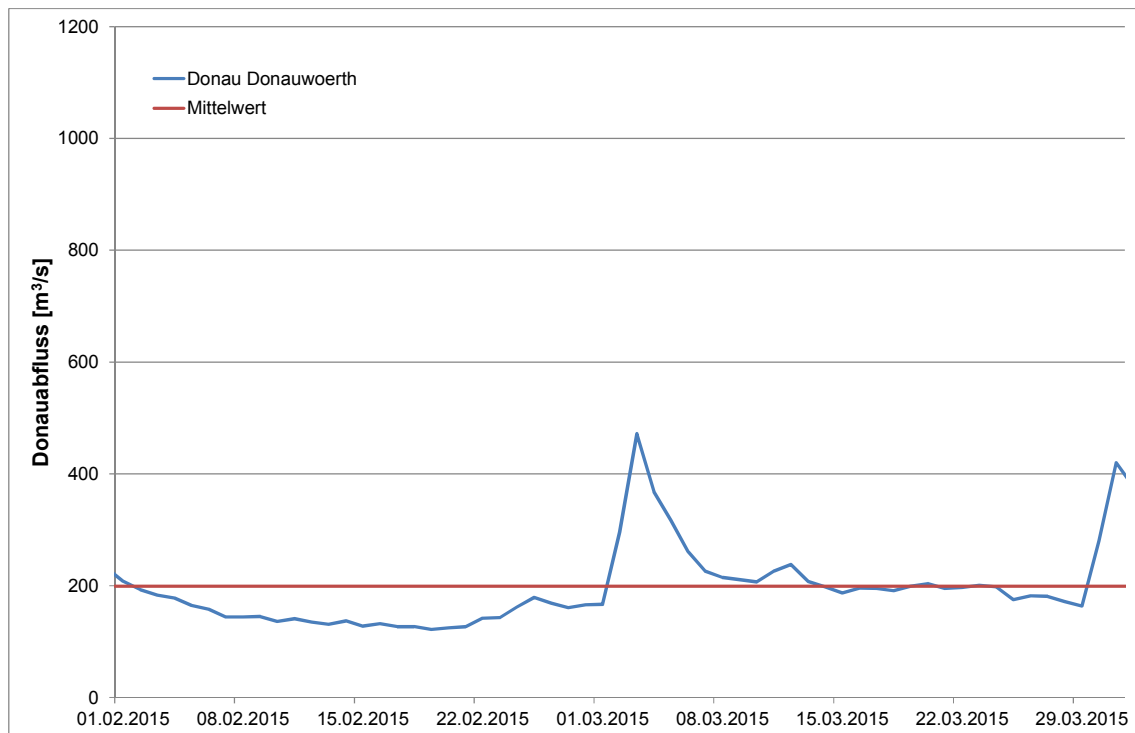


Abbildung 55: Ganglinie des Donauabflusses während einer Periode mit etwa mittlerem Donauabfluss im Jahr 2015

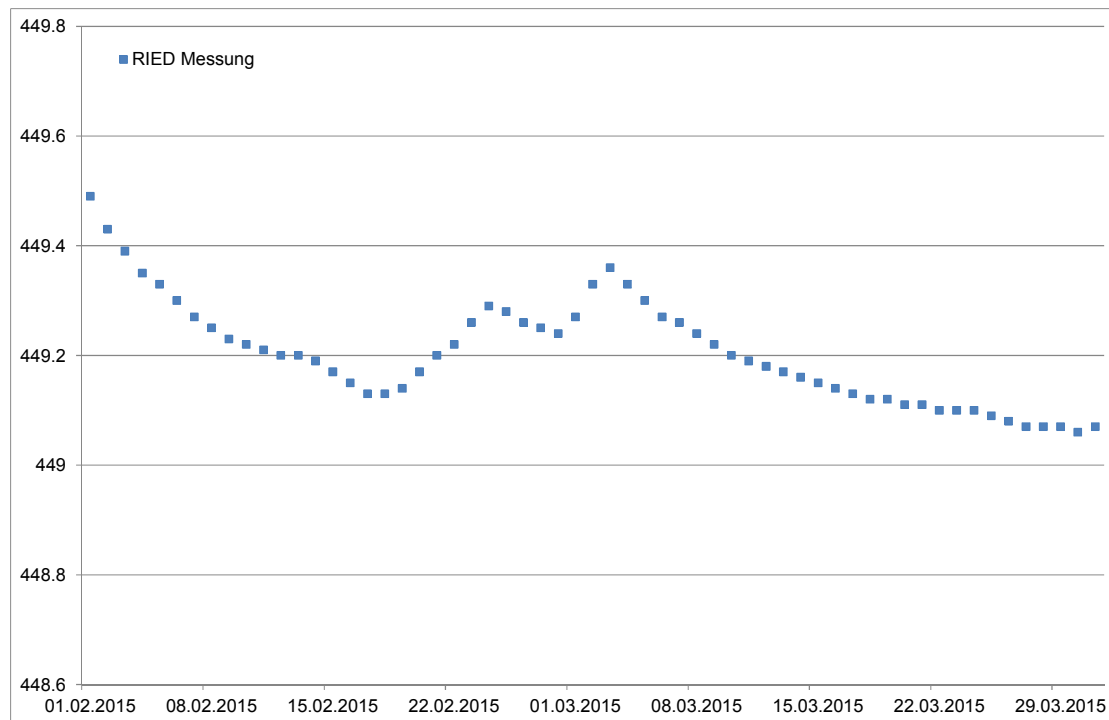


Abbildung 56: Messwerte des Grundwasserspiegels in der Messstelle RIED während einer Periode mit etwa mittlerem Donauabfluss im Jahr 2015.

5 Zusammenfassung, Empfehlungen

5.1 Zusammenfassung

An der Donau zwischen Iller und Lech sollen die Auswirkungen von insgesamt acht Rückhalteräumen untersucht werden. Dazu wird ein Grundwassermodell erstellt.

Der vorliegende Bericht fasst die Datenlage im Oktober 2016 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 Oberjura. Mit Ausnahme des nördlichen Modellrandes wird der Karstgrundwasserleiter durch die schlecht durchlässigen Molasseschichten vom quartären Grundwasserleiter getrennt.

Das hydrogeologische Modell wird in ein zweidimensionales numerisches Modell des quartären Grundwasserleiters umgesetzt. Der Zustrom von Karstwasser aus dem Karstgrundwasserleiter wird durch eine Zuflussrandbedingung berücksichtigt.

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.

Anhand der festgelegten Verfahren wurde die Wasserbilanz für das hydrologische Jahr 2006 errechnet. Die getroffenen Ansätze wurden dadurch bestätigt. Einige der Bilanzgrößen, wie etwa der Karstzufluss und –abfluss sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Diese Bilanzgrößen sollen durch die Modellkalibrierung näher bestimmt werden.

5.2 Empfehlung

Die Simultec AG hat ähnliche Modelle jeweils an zwei Zeiträume von mindesten einem Jahr Dauer kalibriert. Damit kann eine höhere Sicherheit zu den Wasserbilanzgrößen erreicht werden. Es ist zu überlegen, ob dies im Hinblick auf weitere Stufen des Verfahrens nicht auch beim vorliegenden Modell so gehandhabt werden sollte. Eine bereits nach kurzer Zeit notwendige Überarbeitung des Modells könnte das Vertrauen externer Fachspezialisten in das Modell gefährden.

6 Literatur

- [1] FH-DGG (2002): Hydrogeologische Modelle – Ein Leitfaden mit Fallbeispielen. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Heft 24.
- [2] SDGG (2010): Hydrogeologische Modelle – Bedeutung des hydrogeologischen a priori-Wissens. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 70.
- [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] Karlsruher Institut für Technologie KIT (2016): Abschlussbericht Karststudie – Erstellung eines hydrogeologischen Konzeptmodells inkl. Grundwasserbilanzierung.

- [7] Emmert M., Haakh F., Lang U., Schloz W. (2000): Das numerische Grundwassermodell für das Donauried. LW-Schriftenreihe 2000, Heft 19, S. 15-23, Stuttgart.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (2016), Geländemodell DGM 1.
<http://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/gelaende.html>
- [11] Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. (2006): Crop Evapotranspiration. *FAO Irrigation and Drainage Paper No 56*.
- [12] Mockus V. (1972): Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 10*.
- [13] Volker Armbruster (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 17.
- [14] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2010): Bodennutzung der landwirtschaftlichen Betriebe in Bayern 2010, Totalerhebung. Herausgegeben im Oktober 2014.
- [15] P. Döll and K. Fiedler (2008): Global-scale modeling of groundwater recharge, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 863–885, 2008.
- [16] Regierung von Schwaben (2003): Flüsse und Seen im Regierungsbezirk Schwaben Wasserbeschaffenheit und Gewässergüte.
- [17] Doherty J. (2004): PEST – Model-Independent Parameter Estimation. Watermark Numerical Computing
- [18] Wikipedia, Einträge zu Donauried, Böfinger Halde, ODK, MDK (06.03.2017)