

Wasserwirtschaftsamt Donauwörth



Wasserwirtschaftsamt
Donauwörth



Hochwasserschutz Burgau -Genehmigungsplanung -

Anlage 11.2

Ergänzung-Teil 2: Fortschreibung des Aufbaus und der Anpassung
des Grundwassermodells

Datenstand: 30. November 2023



BJÖRNSEN BERATENDE INGENIEURE

Björnsen Beratende Ingenieure GmbH
Standort München

Anni-Albers-Straße 7, 80807 München

Telefon +49 89 3066891-10, bce-muenchen@bjoernsen.de

März 2024, MH, WS, bur1013036

Inhaltsverzeichnis

Erläuterungsbericht

1	Vorwort: Technischer Einstieg	1
2	Vorgehensweise	1
3	Aktualisierung des numerischen Grundwassermodells	1
4	Berechnung der Grundwasserneubildung	2
5	Stationäre Modellanpassung: Mittelwert 2015-2022 (3. Anpassung)	4
5.1	Stationäre Ausgangsfall	4
5.2	Stationäre Modellanpassung	6
5.3	Stationäre Endzustand	7
6	Instationäre Modellanpassung: Zeitraum 01.01.2015 – 31.12.2022	11
6.1	Vorgabe für die Instationäre Anpassung	11
6.2	Ergebnisse Instationäre Anpassung	12
7	Sensitivität Grundwasserneubildung	14
8	Beurteilung Prognosefähigkeit	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Gemessene Grundwasserstände an Messstelle 09928 im Zeitraum 2011-2022	4
Abbildung 2	Punktwolke gemessener und berechneter Grundwasserstände – Ausgangsfall	6
Abbildung 3	Punktwolke gemessener und berechneter Grundwasserstände – Endzustand	9
Abbildung 4	Variabler nördlicher Randzustrom anhand gemessenen Grundwasserstands an Messstelle 09957	12
Abbildung 5	Tägliche und monatliche gemessene Grundwasserstände, gegenüber Monatliche berechnete Grundwasserstände	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Mittlerer Niederschlag an den Niederschlagsstationen im Modellraum	2
Tabelle 2	Statistische Auswertung des Kalibrierungslaufes - Ausgangsfall	5
Tabelle 3	Statistische Auswertung des Kalibrierungslaufes - Ausgangsfall und Endzustand	8
Tabelle 4	Grundwasserbilanz - Endzustand	10
Tabelle 5	Statistische Auswertung Sensitivitätsuntersuchung - berechnete Grundwasserneubildung	15

Anhänge

- 1 Übersicht
 - 1.1 Modellraum, Lageplan der Messstellen und Brunnen
- 2 Modellaktualisierung
 - 2.1 Aktualisierte Deckschichtunterkante – Aufschlüsse 2019/2021
 - 2.2 Aktualisierte Basis des quartären Grundwasserleiters – Aufschlüsse 2019/2021
- 3 Jährliche Grundwasserentnahmen 2015-2022
- 4 Grundwasserneubildungsberechnung WHMOD
 - 4.1 Lageplan der Klima- und Niederschlagsstationen
 - 4.2 Jahressummen Niederschläge an der Stationen Burgau und Haldenwang 2006-2022
 - 4.3 Landnutzungen WHMOD Klassifikation
 - 4.4 Nutzbare Feldkapazität 100 mm
 - 4.5 Mittlerer Flurabstand - März 2011/Dez2014
 - 4.6 Ungesättigte Zone (Bodenart)
 - 4.7 Berechnete Mittlere Grundwasserneubildung 2015-2022
 - 4.8 Berechnete Monatliche Grundwasserneubildung 2015-2022
- 5 Durchlässigkeiten der Gewässersohle (Leakage-Faktoren) - Endverteilung
- 6 Stationäre Kalibrierung 01.01.2015 – 31.12.2022
 - 6.1 Berechneter Grundwasserstand und Grundwassergleichen Ausgangsfall
 - 6.2 Berechneter Grundwasserstand und Grundwassergleichen Endzustand
- 7 Instationäre Anpassung 2015-2022, Ganglinien berechnete / gemessener Grundwasserstände
- 8 Sensitivitätsanalyse
 - 8.1 Mittlere Grundwasserneubildung 2003-2018, LfU Datensatz
 - 8.2 Stationäre Berechnung: berechnete Grundwassergleichen, stationärer Rechenlauf - WHMOD und stationärer Rechenlauf - LfU
 - 8.3 Stationäre Berechnung berechnete Grundwasserspiegeldifferenzen stationärer Rechenlauf – WHMOD zu stationärer Rechenlauf - LfU
 - 8.4 Sensitivitätsanalyse, Instationäre Berechnung, Ganglinien berechnete/ gemessene Grundwasserstände

Anhang A:

Berechnung der Grundwasserneubildung mit dem Wasserhaushaltmodell WHMOD

Verwendete Unterlagen

- [1] Wasserwirtschaftsamt Donauwörth
Hochwasserrückhaltebecken Burgau
Grundwassermodell, Teil 1: Hydrogeologisches Modell (HGM)
Augsburg, Juni 2015
Verfasser: Björnsen Beratende Ingenieure GmbH

- [2] Wasserwirtschaftsamt Donauwörth
Hochwasserrückhaltebecken Burgau
Grundwassermodell, Teil 2: Aufbau und Anpassung des Grundwassermodells
Augsburg, Mai 2015
Verfasser: Björnsen Beratende Ingenieure GmbH

- [3] Wasserwirtschaftsamt Donauwörth
Hochwasserrückhaltebecken Burgau
Grundwassermodell – Berechnung der Grundwasserneubildung mit dem Wasserhaushaltsmodell WHMOD, 2015 - 2022 (siehe auch Anhang1)
München, November 2023
Verfasser: Björnsen Beratende Ingenieure GmbH

- [4] OBERMEYER Infrastruktur GmbH & Co. KG
Geotechnischer Entwurfsbericht: Hochwasserschutz Burgau, Innenörtlichen Maßnahmen (Korrigiert)
Stand 07.09.2023
Verfasser: Dr.-Ing. Georg Ulrich - Geotechnik GmbH

- [5] OBERMEYER Infrastruktur GmbH & Co. KG
Geotechnischer Entwurfsbericht: Hochwasserschutz Burgau, Hochwasserableitung und Hochwasserrückleitung (Korrigiert)
Stand 07.09.2023
Verfasser: Dr.-Ing. Georg Ulrich - Geotechnik GmbH

- [6] Bayerische Vermessungsverwaltung
www.geodaten.bayern.de
Tatsächliche Nutzung: ALKIS
Stand 2023

- [7] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
www.umweltatlas.bayern.de
Nutzbare Feldkapazität in 100cm
Übersichtbodenkarte 1:25.000
Stand 2023

- [8] Wasserwirtschaftsamt Donauwörth
Hochwasserschutz Burgau, Berechnung Mittelwasserabfluss Mindel mit 2d-Modell,
Berechnung der bei Mittelwasserabfluss relevanten Gewässer – Mindel,
Erlenbach und Scheidgraben, Kurzdokumentation,
Neu-Ulm, März 2015
Verfasser: Obermeyer PLANEN + BERATEN GmbH
- [9] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) – Hrsg.
Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 107 (A)
Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten
Februar 2016

1 Vorwort: Technischer Einstieg

Im Juli 2010 wurde das BjörnSEN Beratende Ingenieure mit der Erstellung eines dreidimensionalen numerischen Grundwassermodells für das Hochwasserschutzprojekt in Burgau beauftragt. Zunächst wurde ein hydrogeologisches Modell für die Stadt Burgau entwickelt [1]. Anschließend wurde das numerische Grundwassermodell auf Grundlage von [1] erstellt und für den Zeitraum von März 2011 bis Dezember 2014 (stationär) sowie für das Hochwasserereignis im Jahr 2013 (instationär) kalibriert [2]. Darüber hinaus wurde das Modell für Lastfälle MQ, HQ10 und HQ100 für die Zustände Bestand und Planung des Hochwasserrückhaltebeckens genutzt. Aufgrund der Projektdauer besteht die Notwendigkeit, die geohydraulischen Grundlagendaten zu aktualisieren.

2 Vorgehensweise

Im Folgenden werden die Aktualisierung und die neue instationäre Anpassung des Grundwassermodells für die grundwasserhydraulischen Untersuchungen im Rahmen des Hochwasserschutzkonzepts für die Stadt Burgau erläutert. Die wesentlichen Bearbeitungsschritte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Aktualisierung des Modells anhand neuer Aufschlussdaten (Kapitel 3).
- Berechnung der Grundwasserneubildung mittels Wasserhaushaltsmodell (WHMOD) für den Zeitraum 2015-2022 (Mittelwert und Monatswerte) (Kapitel 4).
- 3. Stationäre Anpassung an die mittleren Grundwasserstände im Zeitraum vom 01.01.2015 bis 31.12.2022 (Kapitel 5).
- Instationäre Anpassung an die Grundwasserganglinien im Zeitraum vom 01.01.2015 bis 31.12.2022 (Kapitel 6).
- Sensitivitätsuntersuchung für die berechnete Grundwasserneubildung mithilfe von WHMOD und mit dem Datensatz des Landesamts für Umwelt (Kapitel 7).

3 Aktualisierung des numerischen Grundwassermodells

Das numerische Modell wurde entsprechend den Vorgaben des Hydrogeologischen Modells (HGM) [1] aufgebaut. Die Abbildung der im HGM ermittelten Stratigrafie erfolgte durch ein einschichtiges Grundwassermodell, das den GWL im Quartär umfasst. Die Modellunterkante wird durch die Oberkante der Süßwassermolasse (Grundwasserhemmer) gebildet, die obere Modellbegrenzung wird durch die gering durchlässigen Deckschichten gebildet.

Gemäß den aktuellen geotechnischen Untersuchungsergebnissen wurden im Jahr 2019/2020 entlang der Hochwasserumleitung und im innerörtlichen Bereich insgesamt 46 neue Bohrungen durchgeführt [4], [5]). Von diesen Bohrungen wurden 34 zur Erfassung der Basis des Grundwasserleiters und 38 zur Erfassung der Deckschicht Unterseite des Modells ausgewählt, da sie ausreichende Schichtinformationen lieferten.

Die überarbeiteten oberen und unteren Grenzen des Modells wurden genau nach der Methode in Teil 1 [1] festgelegt und sind in den Anhänge 2.1 und 2.2 ersichtlich.

Die Ausdehnung des Modellgebietes (12 km²) ist aus Anhang 1.1 ersichtlich. Das Modellnetz (finite Differenzen) weist eine Auflösung von ca. 10 m x 10 m auf, hierdurch können auch kleinräumige Randbedingungen abgebildet werden. Das Grundwassermodell wurde mit dem Modellsystem MOD-FLOW unter der Benutzeroberfläche Groundwater Vistas (Version 8) erstellt.

4 Berechnung der Grundwasserneubildung

Als Randbedingung für den Einsatz des Grundwassermodells wird die Grundwasserneubildung für den Modellraum eigenständig berechnet. Für die Berechnung der Grundwasserneubildung kommt das Programmsystem WHMOD zum Einsatz. Der WHMOD-Ansatz nutzt die Verdunstungsberechnung basierend auf der FAO-Grasreferenzverdunstung nach Penman/Monteith. Zudem wird die Niederschlagsverteilung der einzelnen Stationen tageweise mittels Interpolation in die Fläche übertragen. Außerdem wird ein Base-Flow-Index berücksichtigt (Verhältnis von Basisabfluss zu Gesamtabfluss). Die Beschreibung des WHMOD befindet sich im Anhang A. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage von aktuellen Zeitreihen (01.01.2015 – 31.12.2022) und Parameterverteilungen.

Folgende Zeitreihen und Parameter zu Niederschlags- bzw. Klimadaten dienen als Grundlage für die Berechnung der Grundwasserneubildung:

- Tageswerte der Niederschlagsstationen Burgau und Haldenwang von Januar 2006 bis Dezember 2022;
- Tageswerte von Januar 2006 bis Dezember 2022 Klimastation Haldenwang;
- Tageswerte von Januar 2006 bis Dezember 2022 Luftdruck aus Klimastation Augsburg

Im untersuchten Gebiet gibt es keine speziellen Klima- und Niederschlagsstationen. Die Stationen Burgau (westlich des Modellgebiets) und Haldenwang (östlich des Modellgebiets) wurden zur Berechnung der Grundwasserneubildung ausgewählt. Bezüglich des Vorlaufs zur Neubildung wurde die Berechnung ab dem Jahr 2006 durchgeführt. Die Lage der Stationen ist in Anhang 4.1 ersichtlich.

Die Jahressummen der Niederschläge an den beiden Stationen sind in Anhang 4.2 aufgeführt. Tabelle 1 fasst die Mittelwerte der jährlichen Niederschläge im Zeitraum von 2006 bis 2022 zusammen.

Tabelle 1 Mittlerer Niederschlag an den Niederschlagsstationen im Modellraum

Mittelwerte [mm/a]	Haldenwang	Burgau
2006 – 2022	766	791
2015 – 2022	743	777

Wasserwirtschaftsamt Donauwörth

Hochwasseranleitung und -rückleitung - Genehmigungsplanung

Grundwassermodell – Ergänzung Teil 2: Fortschreibung und Anpassung des Grundwassermodells

Landnutzungen:

Die Art der Landnutzung steht im Zusammenhang mit der Berechnung der Bodenspeicherkapazität (Wurzeltiefen) sowie der Verdunstung. Die für das WHMOD spezifischen Landnutzungsklassen werden auf Basis des aktuellen Landschaftsmodells von der Bayerischen Vermessungsverwaltung [6] (ALKIS) für das Modellgebiet neu zugeordnet. Die Landnutzung ist in Anhang 4.3 dargestellt.

Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität (nFK100) definiert zusammen mit der Wurzeltiefe die Bodenspeicherkapazität. Die Daten der nutzbaren Feldkapazität werden für das Modellgebiet anhand verfügbarer Daten aktualisiert. Sie gehen zurück auf die Kartendienste des Bayerischen Landesamts für Umwelt (www.lfu.bayern.de) [7]. Auf Grund der Unsicherheiten in der Erfassung der nutzbaren Feldkapazität kann dieser Wert im Rahmen der instationären Kalibrierung innerhalb plausibler Grenzen variiert werden. Dabei wird darauf geachtet, die Werte etwa auf das Niveau der verwendeten nutzbaren Feldkapazität im Jahr 2015 zu halten. Die nutzbare Feldkapazität ist in Anhang 4.4 dargestellt. Im vorliegenden Fall wird die nutzbare Feldkapazität um 50 % erhöht.

Flurabstand

Der Flurabstand hat Einfluss auf die Menge an Grundwasser, das ggf. über den kapillaren Aufstieg dem Bodenspeicher zufließt. Der Flurabstand wird basierend auf den stationär berechneten, mittleren Grundwasserständen (März 2011 – Dez. 2014) abgeleitet bzw. abgeschätzt. Der Flurabstand ist in Anhang 4.5 dargestellt.

Ungesättigte Zone

Die Zusammensetzung der ungesättigten Zone hat Einfluss auf die Fähigkeit des Untergrundes Wasser durch kapillaren Aufstieg in den Bodenspeicher einzubringen. Die Art der ungesättigten Zone für die Untersuchungsgebiete wird aus der Übersichtsbodenkarte des Landesamts für Umwelt (www.lfu.bayern.de) übernommen [7]. Die für das Modellgebiet verwendete ungesättigte Zone ist in dem Anhang 4.6 dargestellt.

Base Flow Index

Der Base-Flow-Index (BFI) wird dazu verwendet, den Anteil des Basisabflusses vom Gesamtabfluss zu separieren. Laut Informationen des Landesamts für Umwelt (LfU) liegt für die Stadt Burgau kein Datensatz für den BFI vor, da dieser methodisch begründet wird. Aufgrund von Unsicherheiten bei der Erfassung kann dieser Wert im Rahmen einer instationären Kalibrierung innerhalb plausibler Grenzen und gemäß einem digitalen Geländemodell (DGM) variieren. Dennoch wird in diesem speziellen Fall der Wert pauschal im gesamten Modellraum auf 0,7 festgelegt.

Berechnung der Grundwasserneubildung

Als räumliche Auflösung der Berechnung werden sogenannte Hydrotope (Flächen gleicher hydrologischer Eigenschaften) verwendet. Diese ergeben sich aus der Verschneidung der oben aufgeführten Eingangsdaten (Landnutzung, nutzbare Feldkapazität, Flurabstand und Bodenart). Die berechneten Grundwasserneubildungsraten werden dann innerhalb einer Modellzelle flächengewichtet aufsummiert. Die Berechnung der Grundwasserneubildung erfolgt in täglichen Schritten für den Zeitraum 01/2015 – 12/2022. Die Tageswerte werden dann zu monatlichen Werten akkumuliert.

Die mittlere berechnete Grundwasserneubildung für den Zeitraum 01/2015 – 12/2022 ist in Anhang 4.7 ersichtlich. Anhang 4.8 zeigt die Ganglinien der berechneten monatlichen Neubildung aus dem Grundwassermodell.

Die mittlere berechnete Grundwasserneubildung für den Zeitraum 2015-2022 beträgt $4,6 \text{ l/s/km}^2$ im Modellgebiet. Im Vergleich dazu lag die mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet gemäß dem gewählten Ansatz (WHMOD) bei der letzten Kalibrierung [2] bei $4,3 \text{ l/s/km}^2$.

5 Stationäre Modellanpassung: Mittelwert 2015-2022 (3. Anpassung)

5.1 Stationäre Ausgangsfall

Für die 3. stationäre Anpassung wurden als Ausgangsmodell die Mittleren Verhältnisse von März 2011 bis Dezember 2014 (2. stationäre Anpassung [2]) verwendet. In der aktuellen Anpassung wurden die mittleren Grundwasserstände für den Zeitraum vom 01/2015 bis 12/2022 herangezogen. Es wurden 26 Grundwassermessstellen im Modellraum für die Kalibrierung berücksichtigt. Die Lage der berücksichtigten Messstellen ist in dem Anhang 1.1 und die Ergebnisse des Ausgangsfall in dem Anhang 6.1 ersichtlich.

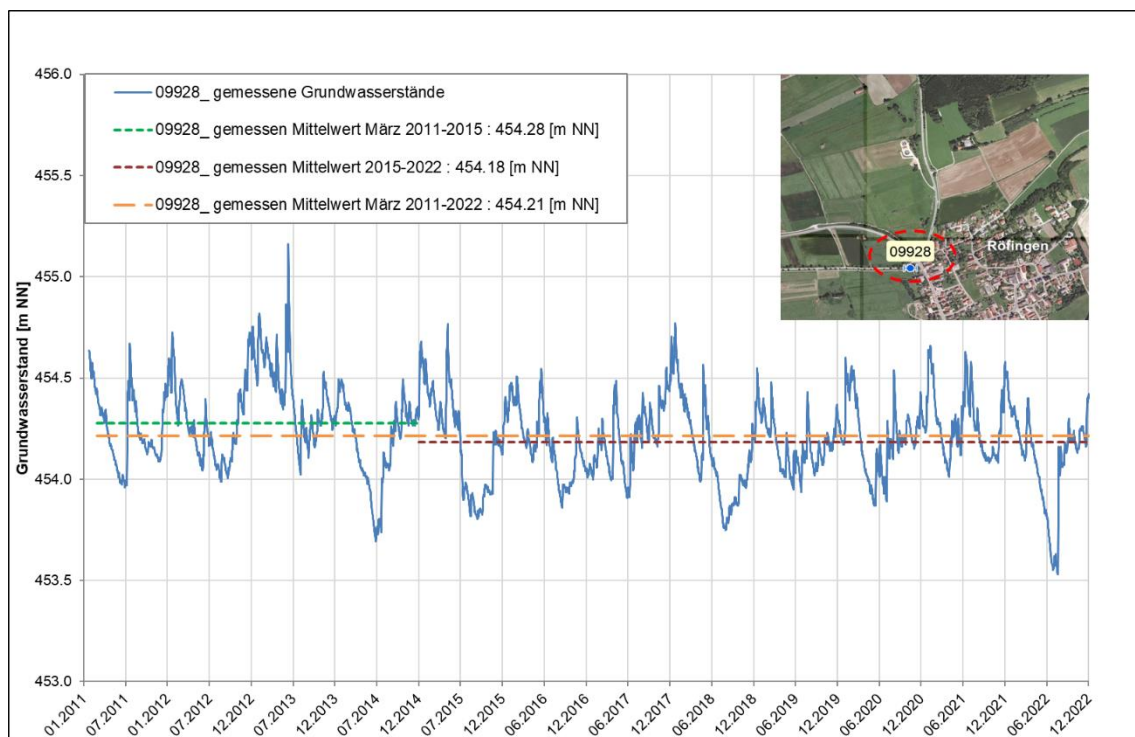


Abbildung 1 Gemessene Grundwasserstände an Messstelle 09928 im Zeitraum 2011-2022

In der Abbildung 1 sind die Grundwasserstandsganglinien beispielhaft an der Messstelle 09928 für den Zeitraum vom 01.2011 bis 12.2022 dargestellt. Dabei sind die Mittelwerte für die Zeiträume 03.2011 bis 12.2022 (Zeitraum der 2. stationären Anpassung), 01.2015 bis 12.2022 (3. stationäre Anpassung) und den gesamten Zeitraum eingezeichnet.

Es ist ersichtlich, dass der mittlere gemessene Grundwasserstand an dieser Grundwassermessstelle (GWM) für den Zeitraum 01/2015 bis 12/2022 etwa 10 cm niedriger liegt als der Mittelwert in der 2. Stationären Anpassung (03/2011 bis 12/2014). Im Vergleich zum gesamten Zeitraum liegt der Mittelwert für den Zeitraum 01/2015 bis 12/2022 um 3 cm niedriger. Andererseits liegt der Mittelwert für den Zeitraum 03/2011 bis 12/2014 um 7 cm höher als der Mittelwert für den gesamten Zeitraum.

Die Ergebnisse aus dem Ausgangsfallmodell sind in Tabelle 2 statistisch ausgewertet und in der Punktwolke in Abbildung 2 grafisch visualisiert. Der mittlere Fehler nach DVGW Arbeitsblatt 107 [9] beträgt rd. 1 %. Somit ist festzustellen, dass bereits für den Basislauf eine gute Modellkalibrierung vorliegt.

Tabelle 2 Statistische Auswertung des Kalibrierungslaufes - Ausgangsfall

Kriterium	Ausgangsfall
Anzahl GWM mit Abweichung $\geq 0,2$ m [-]	8
Prozent GWM mit Abweichung $\geq 0,2$ m [%]	31
Mittlere Abweichung [m]	0,05
Standardabweichung [m]	0,16
Mittlere absolute Abweichung [m]	0,14
Max. Grundwasserstandsdifferenz [m]	11,18
Mittlerer Fehler (DVGW A 107) [%]	1.2
Maximale absolute Abweichung [m]	0,34
Zahl der berücksichtigte GWM	26

In der Punktwolke sind die gemessenen und berechneten Wasserstände einer Messstelle in gegenseitiger Abhängigkeit aufgetragen. Im Idealfall ohne jede Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Wert liegen alle Punkte exakt auf der eingetragenen Winkelhalbierenden. Abbildung 2 zeigt allerdings eine Streuung um diese Linie (Linie kennzeichnet exakte Übereinstimmung).

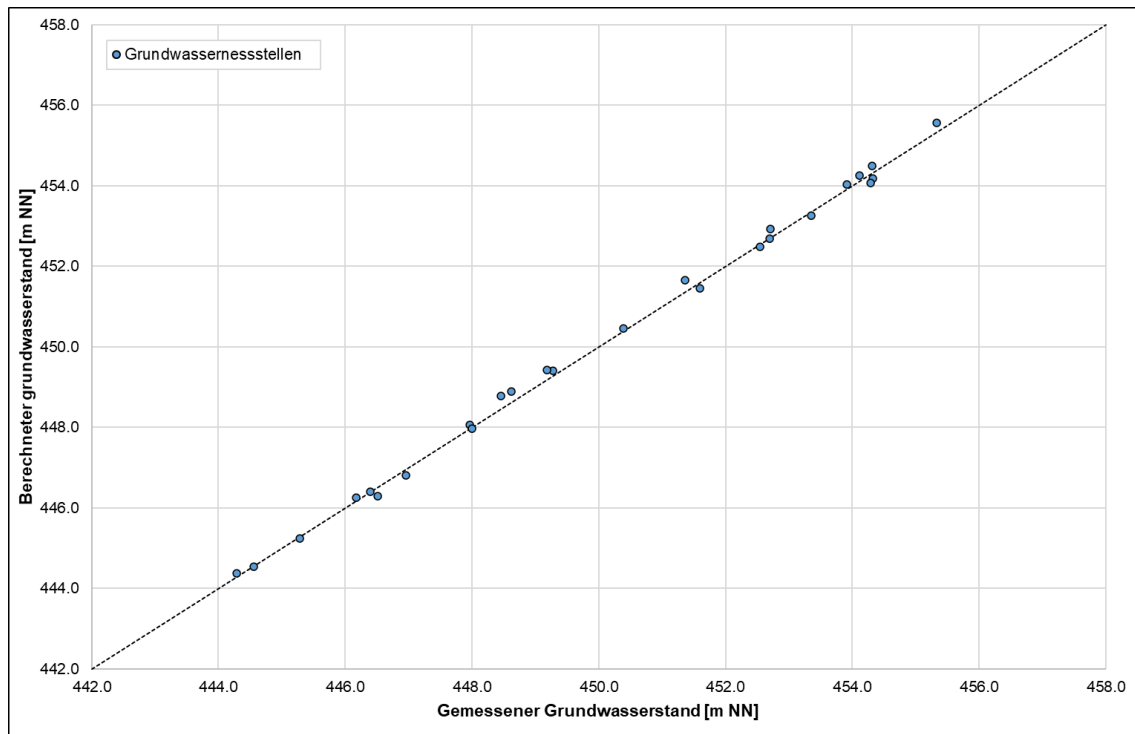


Abbildung 2 Punktwolke gemessener und berechneter Grundwasserstände – Ausgangsfall

5.2 Stationäre Modellanpassung

In Bezug auf die 3. stationäre Kalibrierung (Mittelwert 01/2015 – 12/2022) wurde folgende Vorgaben im Ausgangsmodell eingearbeitet:

- neue Deckschichtunterkante und Grundwasserleiterbasisunterkante anhand von neu durchgeführten Aufschlüssen aus den Jahren 2019-2021 (Kap. 3).
- Grundwasserentnahmen: für den Modellraum wurde der Datenbestand der Grundwasserentnahmen aus [2] für folgende Brunnen gemäß Angabe Wasserwirtschaftsamt Donauwörth aktualisiert/addiert.
 - Brunnen Firma Frey
 - Firma Textilpflege Maier

Nach der Abstimmung mit dem Wasserwirtschaftsamt wurde der Standort des Brunnens der Firma Frey auf das Flurstück mit der Nummer 4504 verlegt. Zusätzlich wurde der Brunnen der Firma Textilpflege Maier, der mit einer maximalen Entnahmemenge von 15.000 m³ pro Jahr betrieben wird, in das Modell integriert. Die Grundwasserentnahmen sind in Anhang 3 dargestellt. Die Lage der Grundwasserentnahmestellen im Modellraum ist dem Anhang 1.1 zu entnehmen.

- Grundwasserneubildung aus Niederschlag: Die mittlere berechnete Grundwasserneubildung aus Niederschlägen wurde für den Betrachtungszeitraum (01/2015 – 12/2022) mithilfe des WHMOD ermittelt und im Grundwassermodell berücksichtigt (Kap. 4).

Andere Modellparameter, nämlich die Wasserspiegellage (Mittelwasser) an Oberflächengewässern, die Modellränder und die Untergrunddurchlässigkeiten, wurden unverändert aus den Mittleren Verhältnissen von März 2011 bis Dezember 2014 übernommen.

Im Verlauf der stationären Kalibrierung wurden die folgenden Bearbeitungsschritte durchgeführt, um die Berechnungsergebnisse zu verbessern:

- Reduzierung der Leakage-Faktoren (L [1/s]) für die folgenden Gewässerabschnitte:
 - Scheidgraben vom südlichen Modellgebiet bis zur Mündung mit dem Erlenbach von $L=1 \cdot 10^{-3}$ auf $L=1 \cdot 10^{-5}$
 - Brühlmindel von $L=1 \cdot 10^{-4}$ auf $L=1 \cdot 10^{-5}$
 - Mindel zwischen Fl.km 11+000 bis 11+750 von $L=1 \cdot 10^{-4}$ auf $L=1 \cdot 10^{-5}$
 - Kleine räumliche Region bei der Mindel, bei Flusskilometer (Fl.Km) 13+250 westlich der Messstelle 09943 von $L=1 \cdot 10^{-6}$ auf $L=1 \cdot 10^{-5}$
 - Mindel bei Fl.Km 11+750 bis 12+000 von $L=5 \cdot 10^{-4}$ auf $L=5 \cdot 10^{-5}$
 - Mündungsbereich der Mindel und der Brühlmindel, kleinräumig von $L=1 \cdot 10^{-4}$ auf $L=1 \cdot 10^{-6}$
 - Krautgartengraben von $L=1 \cdot 10^{-4}$ auf $L=1 \cdot 10^{-6}$
 - Erlenbach, kleinräumig an der Messstelle 09935 von $L=1 \cdot 10^{-4}$ auf $L=5 \cdot 10^{-4}$
 - Scheidgraben, südlich des Modellgebiets bis zur Mündung mit dem Erlenbach. von $L=1 \cdot 10^{-3}$ auf $L=1 \cdot 10^{-5}$
 - Haldenwang von $L=1 \cdot 10^{-4}$ auf $L=1 \cdot 10^{-6}$
 - Gewässergraben kleinräumig an der Messstelle 09933 von $L=1 \cdot 10^{-4}$ auf $L=1 \cdot 10^{-5}$
 - Grabensystem im Bereich Röfingen von $L=1 \cdot 10^{-4}$ auf $L=1 \cdot 10^{-5}$
 - Dürrlauingen von $L=1 \cdot 10^{-4}$ auf $L=2 \cdot 10^{-5}$

Die Endverteilung Leakage-Faktoren beim Gewässersystem im Modell ist dem Anhang 5 zu entnehmen.

- Anpassung des Leakage-Faktors des Kanalnetzes: Reduzierung des Leakage-Faktors im südlichen Bereich bzw. nördlich der Messstelle 09943 um den Faktor 4 (von $2,5 \cdot 10^{-5}$ auf $6,25 \cdot 10^{-6}$). Das Kanalnetz für den Hauptkanal in Nord-Süd-Richtung zeigt Leakage-Werte von $6,25 \cdot 10^{-7}$ m/s. Der östliche Nebkanal wird mit einem Leakage -Faktor von $3,75 \cdot 10^{-5}$ m/s repräsentiert. Die Menge des aus dem Grundwasser in das Kanalnetz austretenden Wassers wurde auf ca. 20 l/s festgestellt.

5.3 Stationäre Endzustand

Die durch die Anpassungsmaßnahmen in Kapitel 5.2 erreichte Verbesserung der Modellanpassung ist aus dem Vergleich maßgebender Kalibrierungsergebnisse in Tabelle 3 ersichtlich und in der Punktwolke in Abbildung 3 grafisch visualisiert.

Wasserwirtschaftsamt Donauwörth

Hochwasseranleitung und -rückleitung - Genehmigungsplanung

Grundwassermodell – Ergänzung Teil 2: Fortschreibung und Anpassung des Grundwassermodells

Tabelle 3 Statistische Auswertung des Kalibrierungslaufes - Ausgangsfall und Endzustand

Kriterium	Basislauf	Endzustand
Anzahl GWM mit Abweichung $\geq 0,2$ m [-]	8	1
Prozent GWM mit Abweichung $\geq 0,2$ m [%]	31	4
Mittlere Abweichung [m]	0,05	-0,04
Standardabweichung [m]	0,16	0,09
Mittlere absolute Abweichung [m]	0,14	0,08
Max. Grundwasserstandsdifferenz [m]	11,18	11,18
Mittlerer Fehler nach DVGW A 107 [%]	1,2	0,7
Maximale absolute Abweichung [m]	0,34	0,11
Zahl der berücksichtigten GWM	26	26

Im Vergleich zum Ausgangsfall hat sich der prozentuale Anteil der Messstellen mit einer Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten von $\geq 0,2$ m von 31 auf 4 reduziert. Der Mittelwert der Abweichungen hat sich um 0,09 verbessert. Zusätzlich hat sich die Standardabweichung der Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserständen von 0,16 auf 0,09 um 0,07 m verbessert. Ausschließlich die maximalen Abweichungen haben sich um etwa 0,23 verringert.

Die Ergebnisse der Kalibrierung für den Endzustand sind in Anhang 6.2 grafisch dargestellt. Dabei sind für jede berücksichtigte Grundwassermessstelle der gemessene mittlere Grundwasserstand im Zeitraum von 01/2015 bis 12/2022 sowie die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Grundwasserstand aufgeführt. Ebenso werden die für den Endzustand der stationären Kalibrierung berechneten Grundwassergleichen für den Betrachtungszeitraum und die aus Messwerten abgeleiteten Grundwassergleichen präsentiert.

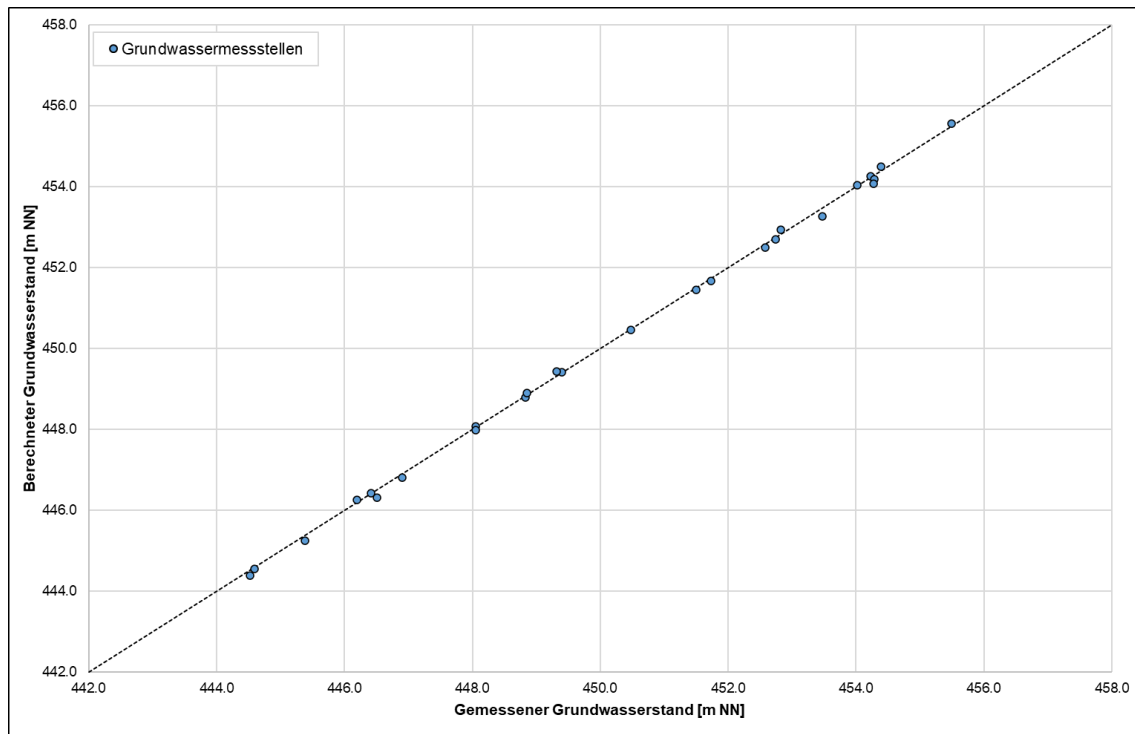


Abbildung 3 Punktwolke gemessener und berechneter Grundwasserstände – Endzustand

Die Differenzbeträge zwischen gemessenem und berechnetem Grundwasserstand sind größtenteils kleiner als 0,21 m (s. Anhang 6.2). Sowohl die absolute Abweichung als auch die Standardabweichung wurden im Vergleich zum Ausgangsfall reduziert. In der Punktwolke (s. Abbildung 1) ist eine kleinere und gleichmäßigere Streuung um die mittlere Linie zu erkennen. Der mittlere Fehler nach DVGW liegt mit 0,7 % unter 1 %, was gemäß Definition in [9] eine sehr gute Modellkalibrierung bestätigt.

Im südlichen Bereich des Modellgebiets, an den Messstellen 09926 und 09927, liegen die Abweichungen zwischen 0,07 m und 0,1 m. Weiter nördlich, zwischen Fl.km 13+500 und Fl.Km 11+500 entlang der Mindel, zeigt das Modell eine sehr gute Anpassung. In diesem Bereich variieren die Abweichungen bis maximal etwa 0,2 m. Im Norden des Modellgebiets sind größere Abweichungen an den Messstellen 09953 (0,21 m), 09957 (0,14) und 09955 (0,13 m) zu verzeichnen. An anderen Messstellen in diesem Bereich konnte das Modell die mittleren Grundwasserstände im Betrachtungszeitraum sehr gut abbilden.

Die Ergebnisse der Kalibrierung geben folgende Anmerkungen wieder:

- An der Messstelle 09929 deuten Abweichungen im Ausgangszustand (0,15 m) und im Endzustand (0,05 m) des Modells darauf hin, dass diese Messstelle von Aussickerungen des Grundwassers im Abwassernetz beeinflusst wird. Eine geringere Reaktion zeigt sich an der Messstelle 09943.
- Die Messstelle 09931 ist stark von der Wasserspiegellage in der Brühlmindel beeinflusst [2]. Durch die Kalibrierung mittels der Durchlässigkeiten der Gewässersohle konnte der

Wasserwirtschaftsamt Donauwörth

Hochwasseranleitung und -rückleitung - Genehmigungsplanung

Grundwassermodell – Ergänzung Teil 2: Fortschreibung und Anpassung des Grundwassermodells

berechnete Grundwasserstand nur mit einer Abweichung von 0,05 zu den gemessenen Werten wiedergegeben werden.

Insgesamt spielt die Interaktion der Oberflächengewässer mit dem Grundwasser im Modellgebiet eine bedeutende Rolle. Die Verbesserung der Abweichungen vom Ausgangsmodell zum Endzustand zeigt, dass die Kalibrierung der Durchlässigkeit der Gewässersohle zu einer deutlichen Verbesserung der Modellgüte führte.

Die Grundwasserbilanz für die stationäre Anpassung an den mittleren Grundwasserständen im Zeitraum 01/2015 - 12/2022 ist aus Tabelle 4 ersichtlich.

Tabelle 4 Grundwasserbilanz - Endzustand

Bilanzgröße	Kalibrierungslauf	
	Zustrom [l/s]	Abstrom [l/s]
Grundwasserneubildung im Modellraum	56	0
Verdunstung	0	1
Randzufluss aus dem Orohydrografischen Einzugsgebiet	260	0
Zustrom über den südlichen/nördlichen Modellrand	240	221
Grundwasserentnahmen	0	6
Infiltration/Exfiltration aus Oberflächengewässern	273	582
Aussickerung von Grundwasser in das Kanalnetz		19
Summe rd.	829	829

Die Auswertung der Grundwasserbilanz lässt folgende Aussagen zu:

- Die größte Bilanzkomponente stellt erwartungsgemäß der Austausch mit den Oberflächengewässern dar. Einer berechneten Zussickerung von 273 l/s steht eine Aussickerung von 582 l/s gegenüber. Insgesamt ergibt sich hieraus eine Netto-Exfiltration, also Aussickerung von Grundwasser in die Gewässer, von 309 l/s.
- Über den südlichen Modellrand gelangen 240 l/s in das Grundwassermodell, über den nördlichen Modellrand fließen hingegen nur 221 l/s ab. Die im Modellgebiet verbleibenden 21 l/s werden vor allem von den Gewässern aufgenommen.
- Die Bilanzterme Grundwasserneubildung, Grundwasserentnahmen, Randzufluss sowie Zussickerung in das Kanalnetz spielen in der Gesamtbilanz nur eine untergeordnete Rolle.
- Die Bilanzsumme des neuen kalibrierten Modells (3. stationäre Anpassung) beträgt 829 l/s, während die des alten kalibrierten Modells (2. stationäre Anpassung) 775 l/s beträgt [2], was größtenteils auf den erhöhten Randzufluss aus dem Orohydrografischen Einzugsgebiet zurückzuführen ist.

Der Endzustand des stationären Kalibrierungsmodells wurde als Anfangsbedingungen (Initial Head) für den instationären im instationären Modell verwendet.

6 Instationäre Modellanpassung: Zeitraum 01.01.2015 – 31.12.2022

Ausgehend von der 3. stationären Kalibrierung (Kap 5.3) wurde das instationäre Grundwassermodell erweitert und für den Betrachtungszeitraum simuliert.

6.1 Vorgabe für die Instationäre Anpassung

- Ausgangswasserstand: als initial Vorlauf wurde die 3. stationäre Anpassung (Endzustand) herangezogen.
- Anpassungszeitraum: Das Modell wurde für den Zeitraum vom 01.01.2015 bis zum 31.12.2022 in monatlichen Schritten berechnet. Dies ergibt 96 Monate (Zeitschritte) im Modell bzw. 96 berechnete Grundwasserstände aus dem Grundwassermodell.
- Grundwassermessstellen: die 26 Messstellen wurden im Modell berücksichtigt.
- Oberflächengewässer: Der Pegel Ramshart wurde aufgrund seiner Nähe zum Modellgebiet für die instationäre Kalibrierung berücksichtigt, um die zeitlich variablen Wasserspiegel an der Mindel, dem Erlenbach, dem Scheidgraben und dem Angerbach zu erfassen. Die Differenzen zwischen dem Mittelwert des Wasserspiegels für den Zeitraum März 2011 bis Dezember 2014 und den Monatsmittelwerten der Wasserspiegel für den Zeitraum 01/2015 bis 12/2022 wurden ermittelt und im Modell berücksichtigt. Die Durchlässigkeiten der Gewässersohle wurden aus der 3. stationären Anpassung (Endzustand) übernommen.
- Instationäre Grundwasserneubildung: Monatliche berechnete Grundwasserneubildung mittels WHMOD (Kap. 4).
- Zeitlich variable Randzustrom: Der Randzustrom am Südlichen- und Östlichen Modellrand wurde proportional zur berechneten instationären Grundwasserneubildung zeitlich interpoliert. Am nördlichen Modellrand wurde ein zeitlich variabler Grundwasserstand angesetzt, der aus dem gemessenen Vorlauf der Grundwasserstände an der nahegelegenen Messstelle (09957) abgeleitet wurde (s. Abbildung 4).

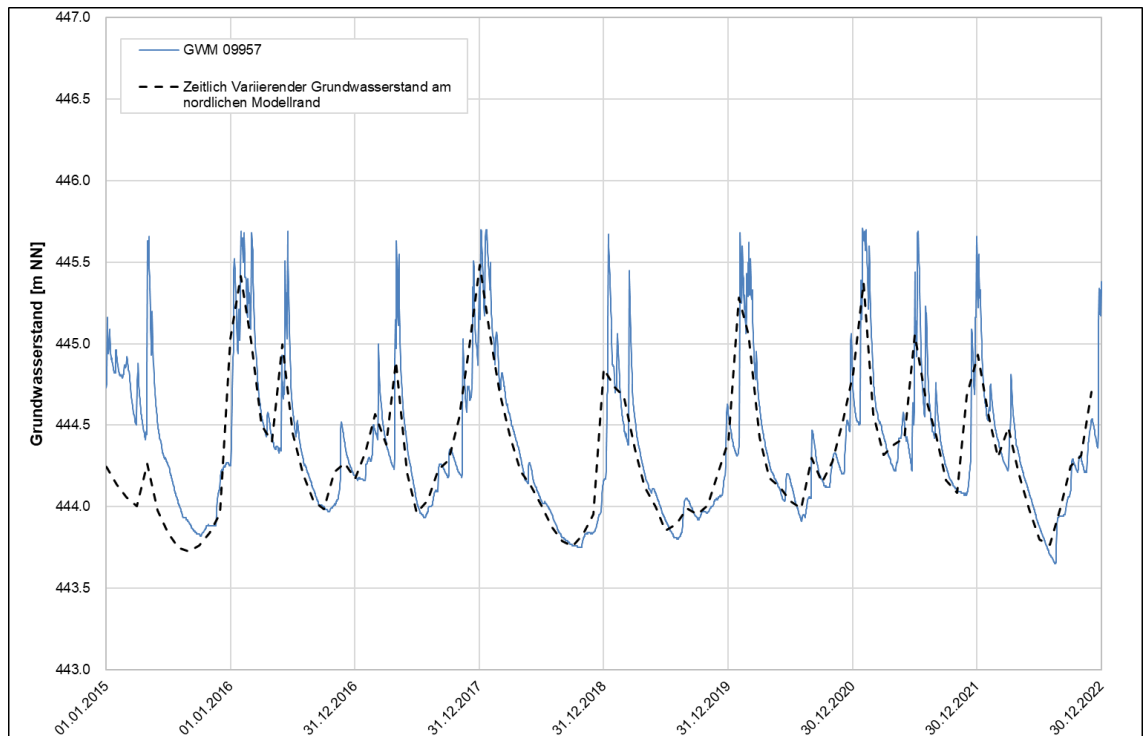


Abbildung 4 Variabler nördlicher Randzustrom anhand gemessenen Grundwasserstands an Messstelle 09957

- Entnahmen: Im Rahmen einer instationären Anpassung für den Betrachtungszeitraum wurden monatliche Entnahmemengen aus Jahresentnahme für die Brunnen Fa. Frey und Fa. Maier ermittelt. Für den Brunnen der Fa. Roma wurde monatliche Mengen anhand von maximale genehmigte Entnahmemenge ermittelt (gemessene Jahresentnahmen liegen nicht vor).
- Speicherkoeffizienten: Vorgabe der Deckschichtunterkante im Modellgebiet als Modelloberkante (Erfassung Wechsel von freien zu (teil)gespannten Grundwasserverhältnissen). Festlegung der Ausgangsverteilung für die Speicherkoeffizienten entsprechend den Vorgaben in der 1. Instationäre Anpassung (HW2013) [2]:
 - für freie Grundwasserverhältnisse: 15 %
 - für (teil)gespannte Grundwasserverhältnisse am östlichen Talrand: 10 %
 - für (teil)gespannte Grundwasserverhältnisse im übrigen Modellgebiet: 2 %

6.2 Ergebnisse Instationäre Anpassung

Das Modell wurde gemäß den Vorgaben in Kapitel 6.1 kalibriert. Die Ergebnisse der instationären Modellanpassung sind in Form von Zeitreihen der berechneten gegenüber den gemessenen Grundwasserständen für die 26 Messstellen in Anhang 7 dargestellt.

Die Ergebnisse der Kalibrierung zeigen folgende Erkenntnisse:

Wasserwirtschaftsamt Donauwörth

Hochwasseranleitung und -rückleitung - Genehmigungsplanung

Grundwassermodell – Ergänzung Teil 2: Fortschreibung und Anpassung des Grundwassermodells

- Insgesamt konnte das Modell die gemessenen Grundwasserstände gut mit den berechneten Werten abbilden. Zudem ermöglichten kleinere Änderungen aus der dritten stationären Anpassung ein plausibleres bzw. besseres Ausgangsniveau für die instationären Berechnungen.
- Die Grundwassermessstelle 09957 weist aufgrund des Pumpbetriebes beim nahen Kiesabbau stark schwankende Grundwasserstände auf (s. Anhang 7) [2]. In diesem Fall konnte das Modell größere Schwankungen nicht abbilden.
- Die Zeitreihen für die Messstellen 09931 und 09932 in der Nähe der Brühlmindel zeigen eine Dynamik, die der Wasserspiegellage der Mindel ähnelt. Dabei ist eine schnelle Reaktion der Grundwasserstände auf die Wasserstandsschwankungen in der Mindel zu beobachten, die nicht mit monatlicher zeitlicher Auflösung abgebildet werden kann.
- Um eine genauere Bewertung der instationären Ganglinien vorzunehmen, zeigt Abbildung 5 täglich gemessene Grundwasserstände (blau) sowie ermittelte monatliche Messwerte (grün) im Vergleich zu monatlich berechneten Grundwasserständen aus der instationären Anpassung (Orange) an der Messstelle 09932. In den täglich gemessenen Grundwasserständen spiegeln sich Schwankungen wider, die in monatlichen Schritten nicht erfasst werden können. Im Vergleich dazu zeigen die berechneten Ergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den monatlich ermittelten gemessenen Werten.

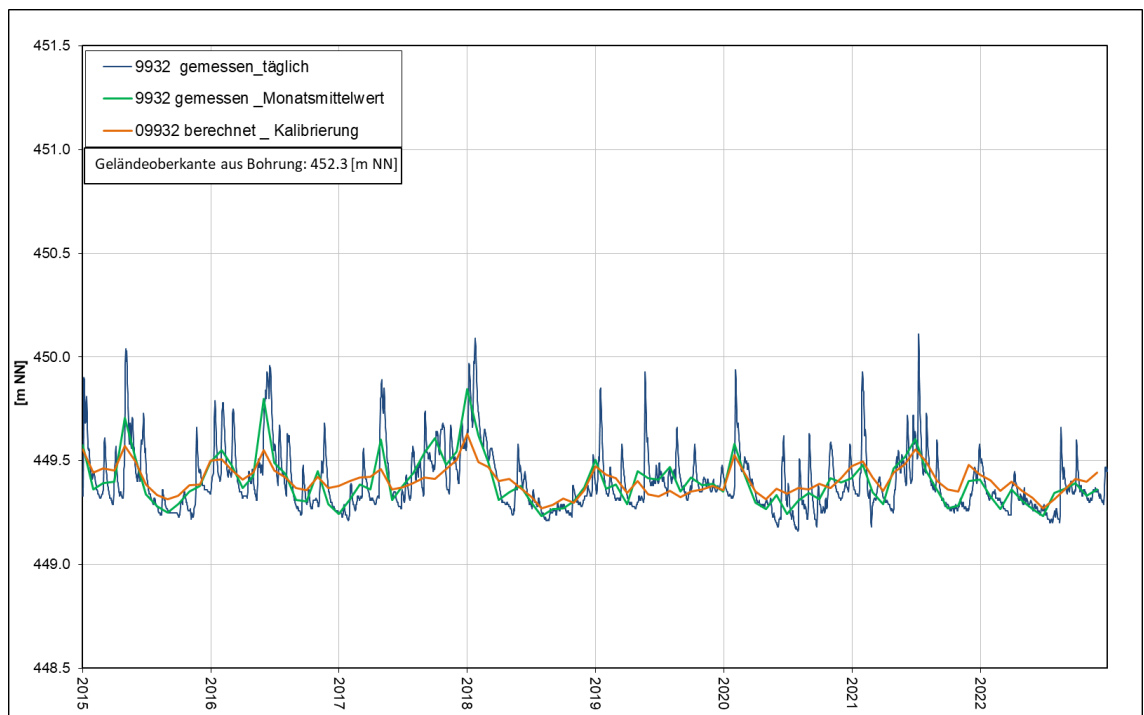


Abbildung 5 Tägliche und monatliche gemessene Grundwasserstände, gegenüber Monatliche berechnete Grundwasserstände

Mit dem Grundwassermodell, das sowohl stationär als auch instationär angepasst wurde, liegt ein zuverlässiges Instrument für die Planungsrechnungen zum Hochwasserschutz in Burgau vor.

7 Sensitivität Grundwasserneubildung

Für die Aktualisierung und Anpassung des Grundwassermodells im Projekt HWS Burgau wurde die Grundwasserneubildung mithilfe der WHMOD-Software berechnet, was die Ergebnisse beeinflusst. Diese Untersuchung zielt darauf ab, die WHMOD-Ergebnisse durch den Vergleich mit den verfügbaren Neubildungsdaten des Landesamts für Umwelt (LfU) zu validieren. Hierzu wurde die Grundwasserneubildung mit WHMOD für den Zeitraum von 2011 bis 2018 mit jährlicher zeitlicher Auflösung berechnet. Die offiziell ermittelten Werte für die Grundwasserneubildung durch das Landesamt für Umwelt liegen als jährliche Werte von 1971 bis 2018 vor. Zusätzlich umfasst der Datensatz Berechnungen für die durchschnittliche jährliche Grundwasserneubildung.

Für die Sensitivitätsanalyse wurden die folgenden Berechnungen mit dem Ausgangszustand der 3. stationären Kalibrierung (Endzustand des Modells) durchgeführt:

➤ stationäre Berechnung:

- berechnete stationäre (Mittelwert) Grundwasserneubildung aus dem WHMOD für den Zeitraum 2015-2022 (Nachfolgend wird dies als „Stationärer Rechenlauf – WHMOD“ bezeichnet und ist in dem Anhang 4.7 ersichtlich). Dieser Rechenlauf entspricht dem Endzustand der stationären Kalibrierung (s. Kap 4.3 5.3).
- mittlere jährliche Grundwasserneubildung vom LfU für den Zeitraum 2003-2018 (Nachfolgend wird dies als „Stationärer Rechenlauf – LfU“ bezeichnet und ist in dem Anhang 8.1 zu entnehmen).

➤ instationäre Berechnung:

- berechnete Instationäre (Jährlich) Grundwasserneubildung mittels WHMOD für den Zeitraum 2011-2018. Zudem wird Randzustrom im Süden zeitlich anhand von der berechneten Neubildung aus WHMOD variiert (Nachfolgend wird dies als „Instationärer Rechenlauf – WHMOD“ bezeichnet).
- berechnete Jährliche Grundwasserneubildung vom LfU für den Zeitraum 2011-2018. Zudem wird Randzustrom im Süden zeitlich anhand von Neubildung LfU variiert (Nachfolgend wird dies als „Instationäre Rechenlauf – LfU“ bezeichnet).

Ergebnisse der Stationären Berechnung:

Die statistische Auswertung für stationäre Rechenläufe von WHMOD und LfU ist in Tabelle 5 ersichtlich. Die Sensitivität bezüglich der berechneten mittleren Grundwasserneubildung durch das LfU zeigt keine signifikant besseren oder schlechteren Ergebnisse im Vergleich zu dem Endzustand stationären Kalibrierung. Insgesamt deutet dies darauf hin, dass die im Rahmen der stationären Kalibrierung berechneten langjährigen Mittelwerte der Grundwasserneubildung mittels WHMOD mit denen des LfU übereinstimmen könnten.

Wasserwirtschaftsamt Donauwörth

Hochwasseranleitung und -rückleitung - Genehmigungsplanung

Grundwassermodell – Ergänzung Teil 2: Fortschreibung und Anpassung des Grundwassermodells

Tabelle 5 Statistische Auswertung Sensitivitätsuntersuchung - berechnete Grundwasserneubildung

Abweichung gegenüber den Messwerten [m]	Stationärer Rechenlauf WHMOD Zeitraum 2015-2022	Stationärer Rechenlauf LfU Zeitraum 2003-2018
Mittlere Abweichung	-0,04	0,00
Absolute mittlere Abweichung	0,08	0,08
Standardabweichung Berechnung	0,09	0,10
Mittlerer relativer Fehler nach DVGW Arbeitsblatt W 107 [9]	0,7	0,7

Die Auswertung der Ergebnisse für die stationären Rechenläufe als Grundwassergleichen Plan und Grundwasserspiegeldifferenzen ist dem Anhang 8.2 und 8.3 zu entnehmen.

Es zeigt sich, dass im nordwestlichen Bereich des Modellgebiets im stationären Rechenlauf WHMOD ein höherer Grundwasserstand berechnet wurde, als im stationären Rechenlauf – LfU. Dies führt zu Grundwasserdifferenzen bis zu maximal 0,3 m, wohingegen diese im südlichen Teil des Untersuchungsraums auf 0,1 m verringert werden könnten.

Ergebnisse der instationären Berechnungen:

Die Ergebnisse für Instationäre Rechenfälle sind für 9 Messtellen als Ganglinien für den Zeitraum 2011-2018 in dem Anhang 8.4 dargestellt.

In allen 9 Messstellen zeigen beide Datensätze einen nahezu identischen Verlauf während des gesamten Betrachtungszeitraums. Für die Messstellen 9931 und 9935 weisen beide Datensätze, WHMOD und LfU so gut wie keine Unterschiede auf, da sie stark von Oberflächengewässern beeinflusst werden. Zusätzlich ist zu erkennen, dass in beiden Rechenläufen die Anfangsniveaus nur geringfügige Unterschiede voneinander aufweisen.

Gesamte Bewertung der Sensitivitätsanalyse

mit den Sensitivitätsberechnungen können folgende Aussagen getroffen werden:

- In dem Zeitraum von 2011-2018 berechnet WHMOD einen Gebietsmittelwert der Neubildung von 0,6 l/s/km², während der Datensatz von LfU einen Mittelwert von 0,25 l/s/km² aufweist.
- Gemäß der statistischen Auswertung reagiert das Grundwassermodell ähnlich auf den Datensatz von LfU wie auf den WHMOD-Datensatz.
- Die Ganglinien weisen keinen nennenswerten Unterschied zwischen Instationärem Rechenlauf – WHMOD und Instationärem Rechenlauf – LfU auf. Daraus lässt sich schließen, dass die Berechnung der Grundwasserneubildung durch WHMOD im Rahmen dieses Modells plausible Ergebnisse liefert und für weitere Untersuchungen eingesetzt werden kann.

- Die Anhänge 4.7 und 8.1 zeigen, dass aufgrund der feineren räumlichen Auflösung durch WHMOD im Vergleich zum LfU Datensatz detailliertere Ergebnisse erzielt werden können. Außerdem ermöglicht WHMOD die Berechnung der Grundwasserneubildung in täglichen Schritten.

8 Beurteilung Prognosefähigkeit

Nach der Aktualisierung durch neue Baugrundaufschlüsse wurde das Grundwassermodell auf hydrogeologische Plausibilität überprüft. Für eine stationäre Anpassung im Zeitraum von 2015 bis 2022 wurden verschiedene Einflussgrößen im Modell aktualisiert. Auf Basis des Endzustands der stationären Kalibrierung wurde das instationäre Modell für denselben Zeitraum mit monatlichen Zeitschritten erweitert. Dabei lag der Schwerpunkt auf der berechneten Grundwasserneubildung, der Durchlässigkeit der Gewässersohle und den variablen Randzuströmen. Die Berechnungsergebnisse für sowohl die stationäre als auch die instationäre Kalibrierung zeigen eine gute bis sehr gute Anpassung an die gemessenen Grundwasserstände.

Das kalibrierte Grundwassermodell steht nun als Werkzeug zur Verfügung, um Strömungsverhältnisse für verschiedene Planungsvarianten und hydrologische Szenarien zu simulieren.

Im Rahmen der Analyse wurde eine Sensitivitätsuntersuchung durchgeführt, um die Plausibilität der durch WHMOD berechneten Neubildungsergebnisse im Vergleich zu einem offiziellen Datensatz zu beurteilen. Die mittlere Grundwasserneubildung für den Zeitraum 2011 - 2018 zeigt zwischen dem LfU-Datensatz (0,25 [l/s/km²]) und dem WHMOD-Datensatz (0,6 [l/s/km²]) deutliche Unterschiede. Die Sensitivitätsuntersuchung ergab jedoch keine wesentlichen Differenzen bei der Verwendung der Neubildung aus WHMOD im Vergleich zum LfU-Datensatz. Daher sind weitere Berechnungen und Anwendungen von WHMOD für die Grundwasserneubildung möglich.

Aufgestellt:

Hanieh Mehrdad M.Sc.

München, März 2024

Björnsen Beratende Ingenieure GmbH

ppa. Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Weise, MBA

Dr.-Ing. Christopherus Braun