

Sicherung der Trinkwasserversorgung der Stadt Höchstädt an der Donau

Hydrogeologische Erkundung zur Neueinrich- tung der Trinkwassergewinnung – Abschlussgutachten –

Aktualisierung des numerischen GwStrömungsmodells Höchstädt Datenstand 06/2021

Bericht zur Modellerstellung und –kalibrierung (Modellbericht)

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	Datengrundlage	1
2.	Modellfortschreibung	1
2.1.1	Modellgebiet	1
2.1.2	Randbedingungen:	2
2.1.3	GwNeubildung aus Niederschlag	3
2.1.4	GwMessstellen	4
2.1.5	GwEntnahmen	4
2.1.6	NW-Abflussmessungen	4
3.	Modellkalibrierung	5
3.1.1	Stationäre Kalibrierung	5
3.1.2	Instationäre Kalibrierung	6
3.1.3	Bewertung der Modellkalibrierung	6
4.	Modellanwendung	7

1. Datengrundlage

Für die Fortschreibung des numerischen GwModells Höchstädt wurden folgende Daten bzw. Unterlagen erhoben und in das Modell eingepflegt:

- Brunnen 1 und 2 Höchstädt: Förderdaten und GwStanddaten bis 06/2021 (Anlage 6.6)
- GWM Höchstädt: GwStanddaten bis 06/2021 (Anlage 3.2)
- Kernbohrungen, GWM Bohrungen und Versuchsbrunnen VB Br. 3 und VB Br. 4: Bohrprofile, PV-Daten und GwStände (Anlage 4)
- Entnahme- und Schluckbrunnen der Geothermie-Projekt der LEW: Bohrprofile und GwStände (Anlage 4)
- SF₆-Markierungsversuch an der GWM P1 bzw. Brunnen 1 und 2 (Anlage 4.6).
- Shapefile zur mittleren GwNeubildung für den Zeitraum 1951 bis 2018 vom LfU BY /10/
- Abflussmessungen im 2020 (Büro HG) an kleineren Fließgewässern und Gräben (Anlage 4.5)

2. Modellfortschreibung

Das numerische GwModell wurde mit dem Rechenprogramm MODFLOW (GMS Version 10.4.10) erstellt, das unter Verwendung des LMG (Link-AMG) Solver arbeitet (MODFLOW 2005).

2.1.1 Modellgebiet

- Das Modellgebiet wurde vom früheren GwModell übernommen, jedoch wurde die Modellgrenze im Osten geringfügig verändert. Das Modellgebiet wurde an natürlichen Randbedingungen (RB) orientiert und so groß gewählt, dass es die relevanten Brunneneinzugsgebiete vollständig einschließt (siehe Anlage 6.2):
 - Im Süden bilden die Vorfluter Pulverbach und Klosterbach (Leakage-RB River) die Berandung des Modellgebietes. Analog sind auch im Nordwesten, entlang des Brunnenbachs bei Finningen, als auch im Nordosten, entlang des Nebelbachs oberhalb und unterhalb von Schwennenbach Leakage-RB River definiert.
 - Im Norden bilden No-Flow- Randbedingungen (NFR) entlang abgeschätzten oberirdischen Wasserscheiden die Berandung des Modellgebietes (NFR; wirksam in beiden Modellschichten). Im Westen wurde in /1/ eine Randstromlinie ausgehend von Finningen definiert, die nach Süden auf den Äußeren Riedgraben zuläuft. Diese NFR wurde auch unter Berücksichtigung des aktualisierten GwGleichenplans beibehalten.
 - Im Osten wurde einen tiefliegenden Festpotenzialrand (417,5 m NN) angesetzt, abgeleitet aus dem GwGleichenplan bzw. den GwStänden Anfang/Mitte 04/2019 an den BRW-Messstellen B1 und B3.

- Im Südosten, zwischen dem Festpotenzialrand und dem Klosterbach, ist der Bitziggraben als Modellgrenze (Leakage-RB Drain) vorgegeben.
- Insgesamt umfasst das Modellgebiet eine Fläche von ca. 44,2 km². Horizontal aufgeteilt ist das Modellgebiet am Ende der Kalibrierung in 381 Spalten und 328 Reihen; vertikal beinhaltet es 2 Modellschichten. Damit besteht das numerische Modellgitter aus insgesamt 249.936 Modellzellen, von denen am Ende der Kalibrierung 194.170 aktiv sind. Das Modellgitter wurde insbesondere in den Bereichen der Gewinnungsanlagen räumlich hochauflösend diskretisiert (siehe Anlage 6.3). Die größten Zellen in den Randbereichen des Modells haben eine Abmessung von maximal ca. 90 x 90 m; die kleinsten Zellen im Modellkernbereich bzw. im Bereich der Brunnenstandorte eine Größe von minimal ca. 2 x 2 m.
- Vertikale Diskretisierung:
Umsetzung des Untergrundaufbaus als 2-Schicht-Modell wie folgt:
 - Modellschicht 1: Quartär-GwLeiter; realitätsnaher Ansatz der Quartärbasis gemäß Anlage 5.1.1.
 - Modellschicht 2: Tertiär unterhalb der Quartärbasis. Die Basis der Modellschicht 2 als dichte Modellbasis auf 400 m ü.NN festgesetzt.

2.1.2 Randbedingungen:

- **Leakage-RB (RIVER):**
Die Vorfluter Brunnenbach, Nebelbach, Pulverbach und Klosterbach wurden als Leakage-Randbedingung, Typ River vorgegeben, da diese Gewässer sowohl als Vorfluter als auch Infiltrationsrandbedingung in der GwStrömung wirksam sein können. Zudem ist über diese Gewässer ein (Oberflächen-) Wasserzu- und -abfluss in das Modellgebiet bzw. aus dem Modellgebiet heraus möglich. Die Sohlhöhen bzw. Pegelhöhen der Gewässer wurden auf Grundlage der Topografischen Karten und des Digitalen Geländemodells (DGM 1, DGM 10), sowie bereichsweise bekannter Einmesshöhen von Abflussmessungen angesetzt.
- **Leakage-RB (DRAIN):**
Die übrigen Gräben / Gewässer sowie Quellen sind als Leakage-Randbedingung, Typ Drain vorgegeben. Für diese Gewässer- bzw. Grabenabschnitte gilt somit die Modellannahme, dass hier nur GwAbfluss, jedoch keine Gewässerinfiltration erfolgen kann. Die Sohlhöhen bzw. Pegelhöhen der Gewässer wurden auf Grundlage der Topografischen Karten und des Digitalen Geländemodells (DGM 1, DGM 10), sowie bereichsweise bekannter Einmesshöhen von Abflussmessungen angesetzt.
- **Festpotenzialrand:**
Festpotenzialrand entlang des E` Modellrandes, Höhenniveau abgeleitet aus GwGleichplan bzw. den GwStänden Anfang/Mitte 04/2019 an den BRW-Messstellen B1 und B3, Festpotenzial wirksam in beiden Modellschichten.

➤ **Randstromlinien (No-Flow-RB):**

Die nördliche und nordwestliche Modellgrenzen sind entlang abgeschätzter Wasserscheiden als No-Flow-RB Randbedingungen definiert. Dies bedeutet, dass entlang dieser Modellgrenzen kein Zu- oder Abfluss möglich ist.

Aufgrund der definierten Randbedingungen ist ein Zufluss in das Modellgebiet nur über die natürliche GwNeubildung aus Niederschlag und durch die Versickerung von Oberflächenwasser entlang der Fließgewässer (Leakage-RB, Typ River) möglich, sofern (örtlich) ein entsprechender hydraulischer Gradient gegeben ist. Ein GwAbfluss bzw. -Entzug kann modelltechnisch nur über die Fließgewässer (Leakage-RB Typ River und Drain), über die GwEntnahmen an den Brunnen und Quellen und über die östliche Festpotenzial-Grenze erfolgen.

2.1.3 GwNeubildung aus Niederschlag

Die Grundwasserneubildung erfolgt natürlicherweise durch versickernden Niederschlag und wird als flächenhaft wirksamer Zufluss in der obersten aktiven Modellschicht angesetzt.

Die mittlere GwNeubildung aus Niederschlag wurde mit Hilfe von Daten des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU BY) ermittelt /10/. Dabei wurden die Niederschlagsdaten im Zeitraum von 2012 bis 2018 (Zeitraum für die instationäre Kalibrierung im 2021) ausgewertet (Anlage 6.4.1) und vereinfacht für die stationäre Kalibrierung angewendet (Anlage 6.4.2). Dabei wurde die Flächennutzung (Anlage 6.4.3) auch berücksichtigt. In den Ortsbereichen wurde die GwNeubildung generell mit 50 mm/a angesetzt.

Die berechnete mittlere GwNeubildung (2012-2018) für das gesamte Modellgebiet liegt demnach bei ca. 3,1 l/(s·km²), sofern man die Ortsbereiche mit 50 mm/a berücksichtigt.

Die zeitlich variable GwNeubildung für die instationäre Kalibrierung wurde mittels Bodenwasserhaushaltsmodell durchgeführt.

Hierbei wurden die Klimadaten der DWD Station Dillingen/Donau-Fristingen verwendet. Die GwNeubildungsberechnungen beruhen auf dem Haude-Renger Verfahren. Folgende Eingangswerte wurden implementiert:

- Stationsname: Dillingen/Donau-Fristingen
- Geografische Breite: 48,5
- Stationshöhe: 415 m ü. NN
- Temperatur 2 m Höhe 14 Uhr
- Relative Luftfeuchtigkeit 2 m Höhe 14 Uhr
- Tagesniederschlagssumme

Der Datensatz umfasst den Zeitraum 01/2016 bis 06/2021.

Die nFK-Werte wurden aus den Angaben der jeweiligen GwN-Flächen des LfU Datensatzes übernommen.

Eine Darstellung der berechneten GwNeubildung und Bodenfeuchte ist der Anlage 6.8.1 zu entnehmen.

2.1.4 GwMessstellen

Im Modellraum liegen zahlreiche GwMessstellen, die zu Messnetzen verschiedener Wasserversorger und dem amtlichen bayerischen Messnetz gehören.

Im Gebiet Höchstädt liegen aus dem Zeitraum Jan 2012 bis Sept 2020 meistens nur vereinzelte GwStichtagsmessungen vor (Anlage 3.2). Für die Kalibrierung des GwModells wurde die Stichtagsmessung am 22.06.2021 und 28.06.2021 als Kalibrierungsziel festgelegt. Für die instationäre Kalibrierung wurden zusätzlich die zeitlich hochauflösenden Loggerdaten der GWM D44 Mörslingen (Zeitraum 2016 – 2021), sowie die Loggerdaten der GWM P2, P3, P8 und P11 (Zeitraum 11/2019 – 06/2021) verwendet.

Die berücksichtigten Werte sind in den Anlagen 6.5.1 und 6.6.1 ff tabellarisch und grafisch zusammengestellt.

2.1.5 GwEntnahmen

Die im Modellgebiet vorhandenen GwEntnahmen sind in der Anlage 6.6 dargestellt. Für die stationäre Kalibrierung wurden die Entnahmen vom Juni 2021 angesetzt: für den Brunnen 1 mit 544 m³/d und für den Brunnen 2 mit 246 m³/d.

2.1.6 NW-Abflussmessungen

In den Jahren 2002 und 2004 wurden auf Veranlassung der BRW an den Fließgewässern NW-Abflussmessungen durchgeführt, die für die (größeren) Gewässer Brunnenbach (ab Finningen), Klosterbach und Pulverbach (W' von Höchstädt) und Nebelbach (bis Unterglauheim) deutliche Abflüsse bzw. Abflusszuwächse zeigen. Die übrigen (kleineren) Gewässer im Raum Finningen-Lutzingen-Mörslingen-Höchstädt weisen demnach nur eine geringe Wasserführung auf, und sind zeitweise auch trocken. Für diese Fließgewässer wird angenommen, dass sie – bei entsprechend hohen GwStänden – (temporär) als Dränagen im GwFließsystem wirken können, jedoch zu keiner Zeit Infiltrationsrandbedingungen für das GwSystem darstellen (können).

Diese Einschätzung wird durch die NW-Abflussmessungen von unserem Büro vom 07.07. und 07.08.2020 bestätigt, bei denen in den lokalen Gräben/Bächen nördlich des Klosterbachs und östlich von Mörslingen-Lutzingen kein oder höchstens minimaler Abfluss zu registrieren war.

Eine Darstellung der Abflussmessungen ist in der Anlage 6.5 zu sehen.

Bei der stationären Kalibrierung wurden die Werte vom 26.07.2004 als Kalibrierungsziel definiert, da zu dieser Zeit mutmaßlich NW-Bedingungen und somit GwAbfluss in den Fließgewässern gegeben war.

3. Modellkalibrierung

Die Modellkalibrierung ist nach der Entwicklung der Hydrogeologischen Modellvorstellung (HGM) und der Aufbereitung und Übertragung der vorhandenen Daten ins GwModell der letzte Schritt bei der Erstellung eines numerischen GwModells. Unter der Modellkalibrierung versteht man die Anpassung der Rechenergebnisse des GwModells an das reale System (reale Messwerte).

3.1.1 Stationäre Kalibrierung

Die Anpassung der GwStände an die Durchschnittswerte wurde durch Variation der k_f -Werte im Rahmen hydrogeologisch plausibler Größenordnungen angestrebt (k_f -Wert-Ermittlung durch Modellkalibrierung [Parameteroptimierung]).

Die vorhandenen k_f -Werte vom vorherigen GwModell wurden anhand der Pumpversuchsdaten der neuen GWM angepasst.

Bezüglich der Durchlässigkeitsverteilung sind folgende Punkte hervorzuheben:

- Die horizontalen Durchlässigkeiten (k_{fh} -Wert) der Modellschicht 1 wurde in einem Bereich zwischen 100 und 1500 m/d (0,001 – 0,017 m/s) angesetzt. Die vertikalen Durchlässigkeiten wurden mit $k_{f\text{ hor.}} / k_{f\text{ vert.}} = 10$ angegeben.
- Die horizontale Durchlässigkeit (k_{fh} -Wert) für das Tertiär der Modellschicht 2 wurde einheitlich mit 0,8 m/d (9,3E-06 m/s) und die vertikale Durchlässigkeit (k_{fv} -Wert) wurde mit 0,08 m/d (9,3E-07 m/s) angesetzt.

Die räumliche Verteilung der resultierenden k_{fh} -Werte in der Modellschicht 1 ist in der Anlage 6.7 dokumentiert.

Die GwStrömungssituation für den Kalibrierungszustand ist in der Anlage 6.5.3 in Form von einem GwGleichenplan für die Modellschicht 1 dargestellt.

Die berechnete GwBilanz für den Kalibrierungszustand stellt sich für das gesamte Modellgebiet wie folgt dar:

- Summe Zuflüsse: 41.000,4293 m³/d
- Summe Abflüsse: 41.000,4988 m³/d

Der Fehler der numerischen Wasserbilanz liegt bei 0,0001 m³/d.

Die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit ergab mit der Nutzporosität gemäß HGM von $n_o = 0,27$ bzw. 27% eine im Vergleich zum Markierungsversuch 2021 zu geringe Abstandsgeschwindigkeit. Dementsprechend war die resultierende 50-Tage-Zone für die Brunnen 1 und 2 zu klein, bzw. erfolgte der SF₆-Durchgang am Brunnen 1 deutlich schneller, als dies nach dem im

Folgenden gezeigten Berechnungsergebnis hätte der Fall sein können (siehe Anlage 4.6.1). Eine realitätsnahe Reproduktion der mittels Markierungsversuch nachgewiesenen Abstandsgeschwindigkeit gelingt erst bei Reduktion der Nutzporosität auf 50% des Ausgangswertes.

Geohydraulisch äquivalent wäre, bei einer wirksamen Nutzporosität von $n_o = 0,27$ bzw. 27%, ein um den Faktor 2 erhöhter k_r -Wert.

3.1.2 Instationäre Kalibrierung

Das Ergebnis der instationären Kalibrierung ist der Anlage 6.8.2 zu entnehmen. Hierbei werden die berechneten GwStände und GwDynamik im zeitlichen Verlauf der gemessenen GwSpiegel in Form von Ganglinien dargestellt. Für die instationäre Kalibrierung wurden hierbei die zeitlich hochauflösenden Loggerdaten der GWM D44 Mörslingen (Zeitraum 2016 – 2021), sowie die Loggerdaten der GWM P2, P3, P8 und P11 (Zeitraum 11/2019 – 06/2021) herangezogen. Für die verbleibenden modellrelevanten GWMs wurden alle vorhandenen Einzelmessungen integriert.

Die Modellergebnisse zeigen, dass die Druckhöhe und GwDynamik gut reproduziert werden. Insbesondere sind die Abweichungen der langjährigen Messreihe der GWM D44 Mörslingen gering. Einzig GWM P9 zeigt etwas höhere Abweichungen der berechneten Druckhöhen. Hier wird der berechnete GwSpiegel unterschätzt.

Die angesetzte Nutzporosität von 25% zeigte bei der instationären Kalibrierung die beste Anpassung. Eine niedrigere Nutzporosität führte zu einer Überschätzung der GwDynamik. Dieses Ergebnis bestätigt ziemlich gut die Nutzporosität gemäß HGM von $n_o = 0,27$ bzw. 27%.

3.1.3 Bewertung der Modellkalibrierung

Das Ergebnis der stationären Modellanpassung ist in den folgenden Anlagen dokumentiert:

- Vergleich der gemessenen und berechneten GwStände für den stationären Kalibrierungszustand: Anlage 6.5.1
- Vergleich der gemessenen und berechneten Abflüsse: Anlage 6.5.2
- GwGleichenplan für den stationären Kalibrierungszustand: Anlage 6.5.3

Man kann für den stationären Kalibrierungszustand von einer guten Anpassung der berechneten an die gemessenen GwStände sprechen. Hier zeigt sich, dass für den stationären Kalibrierungszustand einen mittleren Fehler von 0,03 m und ein normalisierter RMS¹ von 0,02 % berechnet wird, was einen guten Wert darstellt. Auch der resultierende Korrelationskoeffizient von nahezu 1 und die Standard-Abweichung von 0,11 m zeigen, dass das Modell insgesamt plausible Druckhöhen errechnet.

Der berechnete Fehler der Abflüsse an den meisten Gewässer liegt unter 10 %. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Abflussmessungen (hydrometrischer Flügel) kann dies als gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung gewertet werden.

¹ RMS = Root Mean Square Error

Nur an einem Gewässer konnten die gemessenen Werte mit dem GwModell nicht nachvollzogen werden. Am Nebelbach konnte der gemessene Wert auch nicht reproduziert werden, für die Modellprognose betreffend die Brunnen der Stadt Höchstädt ist dies jedoch aufgrund der Randlage nicht wesentlich.

Die instationäre Kalibrierung zeigt eine gute Nachbildung der Druckhöhen und GwDynamik. Hierbei wurde der Verlauf der gemessenen GwGanglinien und der einzelnen GwStandmessungen über die Zeit in guter Genauigkeit nachgebildet. Einzig die GWM P9 wurde im Modell bezogen auf die Druckhöhe unterschätzt.

Insgesamt wird eine im Sinne der Aufgabenstellung hinreichende Güte der stationären Modellkalibrierung festgestellt.

4. Modellanwendung

Mit dem auf dem aktuellen Datenstand kalibrierten GwModell wurden folgende Berechnungen durchgeführt (stationäre Modellrechnungen):

- Berechnung der GwEinzugsgebiete für die Brunnen 1 und 2 unter Ansatz der zukünftig geplanten resp. wasserrechtlich beantragenden Jahresentnahmen (430.000 m³/a; Berechnung von Bahnlinien mit Zeitmarken [$\Delta t = 50$ Tage] bei unbegrenzter Laufzeit der Bahnlinienberechnung).
- Berechnung der 50-Tage-Zonen für die Brunnen 1 und 2 unter Ansatz der zukünftig geplanten resp. wasserrechtlich beantragenden Tagesspitzenentnahmen (2.345 m³/d) bzw. – für die Szenarien 1a/1b und 6a/6b – Ansatz der hergeleiteten 50-Tage-Spitze (1.600 m³/d); Berechnung von Bahnlinien bei einer definierten Laufzeit der Bahnlinienberechnung von 50 Tagen).
- Berechnung der Einzugsgebiete und 50-Tage-Zonen für mögliche Brunnenstandorte mit den oben genannten Entnahmen.

Im Folgenden sind die untersuchten Berechnungsfälle (Szenarien) aufgelistet:

Szenario Nr.	Charakterisierung	Untersuchungsziel
1a	Ansatz eines neuen Brunnens am Standort VB Br. 3 ca. 400 m N' der Br. 1 und 2 und ca. 100 m westlich von GWM P2 mit einer Förderrate von: ➤ 430.000 m ³ /a (≅ 13,7 l/s) bzw. 1.180 m ³ /d	Ermittlung des Brunneneinzugsgebietes als Grundlage für die WSG-Bemessung, Zone III für den Standort VB Br. 3.
1b	Ansatz eines neuen Brunnens am Standort VB Br. 3 ca. 400 m N' der Br. 1 und 2 und ca. 100 m westlich von GWM P2 mit einer Förderrate von: ➤ 1.600 m ³ /d (≅ 18,5 l/s)	Berechnung der 50-Tage-Zone ausgehend von Szenario 1a, jedoch bei Ansatz der hergeleiteten „50-Tage-Spitze“ als Grundlage für die WSG-Bemessung, Zone II.
2a	Ansatz der bestehenden Br. 1 und 2 mit einer Förderrate zu je 50% von: ➤ 430.000 m ³ /a (≅ 14,0 l/s) bzw. 1.180 m ³ /d	Ermittlung des Brunneneinzugsgebietes als Grundlage für die WSG-Bemessung, Schutzzone III (Ergebnis aus /1/).
2b	Ansatz der bestehenden Br. 1 und 2 mit einer Förderrate zu je 50% von: ➤ 2.345 m ³ /d (≅ 27,1 l/s)	Berechnung der 50-Tage-Zone ausgehend von Szenario 2a, jedoch bei Ansatz der Tagesspitzenentnahme als Grundlage für die WSG-Bemessung, Schutzzone II (Ergebnis aus /1/).
Sensitivitätsberechnung (Szenario 3)	Ausgehend von Szenario 1a: Ansatz einer vertieften Quartärbasis S' der Bohrung GWM 4/20 (2. Interpretationsansatz für die Erkundungsergebnisse)	Untersuchung der Auswirkungen auf die Einzugsgebietslage bei hypothetisch abgesenkter Aquiferbasis S' GWM 4/20 (Ergebnis aus /1/).
1. Alternativenprüfung (Szenario 4)	Ansatz eines neuen Brunnens am Standort südlich der GWM P4 mit einer Förderrate von: ➤ 430.000 m ³ /a (≅ 13,7 l/s) bzw. 1.180 m ³ /d	Ermittlung des GwEinzugsgebietes eines hypothetischen Brunnens zwischen der GWM P4 und VB Br. 3 (Ergebnis aus /1/).
2. Alternativenprüfung (Szenario 5)	Ansatz eines neuen Brunnens am Standort der GWM P4 mit einer Förderrate von: ➤ 430.000 m ³ /a (≅ 13,7 l/s) bzw. 1.180 m ³ /d	Ermittlung des GwEinzugsgebietes eines hypothetischen Brunnens am Standort GWM P4 (Ergebnis aus /1/).
6a	Ansatz eines neuen Brunnens am Standort VB Br. 4 ca. 600 m N' der Br. 1 und 2 und ca. 200 m südlich von GWM P4 mit einer Förderrate von: 430.000 m ³ /a (≅ 13,7 l/s) bzw. 1.180 m ³ /d	Ermittlung des Brunneneinzugsgebietes als Grundlage für die WSG-Bemessung, Zone III für den Standort VB Br. 4.
6b	Ansatz eines neuen Brunnens am Standort VB Br. 4 ca. 600 m N' der Br. 1 und 2 und ca. 200 m südlich von GWM P4 mit einer Förderrate von: 1.600 m ³ /d (≅ 18,5 l/s)	Berechnung der 50-Tage-Zone ausgehend von Szenario 6a, jedoch bei Ansatz der hergeleiteten „50-Tage-Spitze“ als Grundlage für die WSG-Bemessung, Zone II.

Die Szenarien sind im Kapitel 6.3 des Gutachtens im Detail beschrieben und interpretiert.

Büro HG GmbH
Gießen, Juli 2021

gez.
Dipl.-Ing. Jan Bockholt