

Sicherung der Trinkwasserversorgung der Stadtprozellener Gruppe

Brunnen 1 und 2 Breitenbrunn – Probetrieb 12/2011 bis 02/2019

Fortschreibung des numerischen GwModells und

Hydrogeologisches Abschlussgutachten

Bericht zur Modellerstellung und –kalibrierung (Modellbericht)

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	Veranlassung, Aufgabenstellung	1
2.	Modellerstellung	2
3.	Modellkalibrierung	5
3.1	Stationäre Kalibrierung	5
3.2	Instationäre Kalibrierung	6
3.3	Zusammenfassung und Bewertung der Modellkalibrierung	7
4.	Modellanwendung	8

1. Veranlassung, Aufgabenstellung

Der Zweckverband zur Wasserversorgung (ZV WV) der Stadtprozelten Gruppe versorgt die Verbandsgemeinden Faulbach (inkl. Breitenbrunn), Dorfprozelten und Stadtprozelten (inkl. Neuenbuch), Dorfprozelten und Stadtprozelten (inkl. Neuenbuch) sowie seit dem 26.10.2012 auch die Gemeinde Altenbuch (neues Verbandsmitglied) mit Trinkwasser.

Seit Ende 2010/Anfang 2011 läuft ein Probetrieb an den Brunnen, was zu einer langfristigen Entnahmegenehmigung erforderlich ist. Der Probetrieb wurde Hintergrund der früheren hydrogeologischen Erkundungsergebnisse fachlich begleitet und bisher bis zum Datenbestand Ende 2014 in Form von Zwischenberichten dokumentiert. Im Laufe des Jahres 2014 wurde ein fallender Trend im GwStand an den Brunnen 1 und 2 erkennbar, deshalb wurde im 2015 ein Konzept entwickelt, um eine GwAnreicherung durch die Einleitung des Quellwassers aus der Altenbucher-, der Forstrain- und der Neuen Quelle über die GwMessestelle (GWM) 3 zu betreiben, um dadurch der weitere GwAbsenkung entgegen zu wirken. Der Einleitversuch begann im September 2015.

Februar 2016 legte unser Büro einen Ergebnisbericht vor, der die Dokumentation und GwModellgestützte Auswertung der Daten aus dem Einleitversuch bis Ende 2015 enthält. Auf dieser Grundlage wurden Empfehlungen für die zukünftige GwBewirtschaftung des GG Breitenbrunn gegeben. Daraus ergab sich die Einrichtung des Einleitbrunnens (Schluckbrunnen) in der Nähe der GWM 3 einschließlich Leitungsverlegungen im Laufe des Jahres 2016. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Der Einleitbrunnen ist seit dem 01.02.2017 in Betrieb. Die GWM 3 wird seitdem wieder zur GwStandsmessung genutzt. Für die Einleitung des Quellwassers in den neuen Einleitbrunnen liegt eine beschränkte wasserrechtliche Erlaubnis vor, die die Einleitung von bis zu 10 l/s aus den oben bereits genannten Quellen in den Einleitbrunnen gestattet (Beschränkung derzeit bis 31.12.2019). Die frei zulaufende Einleitrate über die neue Zulaufleitung beträgt ca. 8 l/s.

Zur Berechnung von Brunneneinzugsgebieten, 50-Tage-Zonen und zur Überprüfung der bestehenden WSG-Bemessung wurde das numerische GwModell aus dem Jahr 2007 auf der Datengrundlage von Oktober 2010 bis Ende Februar 2019 (mit Auswertung der Daten aus dem Einleitversuch) verbessert und neukalibriert.

Die Vorgehensweise bei der Fortschreibung des numerischen GwModells Breitenbrunn und die aktuellen Kalibrierungsergebnisse werden in dem vorliegenden Modellbericht dargestellt.

2. Modellerstellung

Das im Jahr 2006 ausgearbeitete und im Jahr 2007 weiterentwickelte numerische GwModell für den Raum Breitenbrunn wurde im Rahmen der aktuellen Aufgabenstellung überarbeitet, wobei folgende Aspekte anzumerken bzw. folgende Vorgaben zu beachten sind:

- Das numerische GwModell wurde mit dem Rechenprogramm MODFLOW (GMS Version 10.4.5) erstellt, das nach der Finite-Differenzen-Methode unter Verwendung des Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control (PCGN-Package) arbeitet (MODFLOW 2005).
Aufgrund der Verwendung des BCF-Packages ist zu beachten, dass bei diesem Ansatz Grundwasser-Geringleiter nicht explizit als eigenständige Modellschicht ausgehalten werden. Vielmehr wird stattdessen ein Leakance-Wert (Einheit [1/d]) eingeführt, der den vertikalen Fließwiderstand dieser Schicht unabhängig von ihrer Mächtigkeit repräsentiert. Dieser Wert ist wie folgt herzuleiten:

$$\text{Leakance (1/d)} = \text{Leakage Faktor} = \text{vertikale Permeabilität (kf}_{\text{vert.}} \text{ [m/d])} : \text{Mächtigkeit (M [m]) der jeweiligen Modellschicht.}$$
- **Modellgebiet:**
Das Modellgebiet wurde von dem GwModell Breitenbrunn 2007 unverändert übernommen. Das Modellgebiet ist an natürlichen Randbedingungen orientiert und so groß gewählt, dass es die relevanten Brunneneinzugsgebiete vollständig einschließt.
 - Für den nordöstlichen Modellrand zwischen Rohrbrunn, Bischbrunn und Hasloch sowie für den südwestlichen Modellrand zwischen Mönchberg und Kirschfurt sind Trennstromlinien als No-Flow-Randbedingungen vorgegeben.
 - Ausgenommen der oben genannten Berandungen wird das Modellgebiet von Fließgewässer eingerahmt. Der Main und der südliche Teil des Faulbachs sind als Leakage-Randbedingung, Typ River vorgegeben. Der restliche Modellrand, die kleinere Fließgewässer und modellrelevante Quellen sind als Leakage-Randbedingung, Typ Drain angesetzt.
 - Insgesamt umfasst das Modellgebiet eine Fläche von ca. 214 km². Horizontal aufgeteilt ist das Modellgebiet in 173 Spalten und 158 Reihen, vertikal beinhaltet es 3 Modellschichten. Damit besteht das numerische Modellgitter aus insgesamt 82.002 Modellzellen. Das Modellgitter wurde insbesondere in den Bereichen der Gewinnungsanlagen bei Breitenbrunn räumlich hochauflösend diskretisiert (Anlage 3.4.1). Die größten Zellen in den Randbereichen des Modells haben eine Abmessung von maximal ca. 300 x 300 m, die kleinsten Zellen im Modellkernbereich (Brunnen) eine Größe von minimal ca. 8 x 8 m.
- **Modellaufbau weiterhin als 3-Schicht Modell wie folgt:**
 - Schicht 1: oberer Buntsandstein (so1 und so2)
 - Schicht 2: mittlerer Buntsandstein (sm) inkl. des Tonlagen-Sandsteins (suST) und Quartär

- Schicht 3: unterer Buntsandstein (suS, suG undsuSB)
- dichte Modellbasis = Oberkante Bröckelschiefer

➤ **Leakage-RB (RIVER):**

Die Fließgewässer Main und die südliche Strecke des Faulbachs sind als Leakage-Randbedingung, Typ RIVER vorgegeben, da entlang dieser Gewässer sowohl Ex- als auch Infiltration sowie ein Oberflächenwasserzufluss und Oberflächenwasserabfluss von bzw. nach außerhalb des Modellgebietes möglich ist. Verlauf und Höhenniveaus der Gewässer wurden aus dem Modell 2007 unverändert übernommen.

➤ **Leakage-RB (DRAIN):**

Die Fließgewässer Elsava, Dammbach, Haslochbach, Kropfbach, Springbach, Fechenbach, Aubach und der Faulbach nördlich des Grohbergs wurden als Leakage-Randbedingung, Typ Drain vorgegeben. Für diese Gewässerabschnitte gilt somit die Modellannahme, dass hier nur GwAbfluss, jedoch keine Gewässerinfiltration erfolgen kann; Verlauf und Höhenniveaus wurden aus dem Modell 2007 unverändert übernommen.

➤ **Randstromlinien (No-Flow-RB):**

Die nordöstlichen und die südwestlichen Modellgrenzen sind als No-Flow-RB Randbedingung definiert. Dies bedeutet, dass hier 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 möglich. Ein GwAbfluss bzw. -Entzug kann somit modelltechnisch nur über die Vorfluter und die Quellen (Leakage-RB) und über die GwEntnahmen an den Brunnen erfolgen.

➤ **GwNeubildung aus Niederschlag:**

Die Grundwasserneubildung erfolgt durch versickernden Niederschlag; sie wird als flächenhaft wirksamer Zufluss angesetzt.

Für das Modellgebiet wurde die GwNeubildung mittels eines Bodenwasserhaushaltsmodells auf der Grundlage von gemessenen Niederschlags- und Klimadaten der Wetterstationen Bürgstadt und Heppdiel berechnet. Hierzu wurden die Niederschlags- und Klimadaten im Zeitraum vom 01.01.2010 bis zum 31.02.2019 ausgewertet. Die Ergebnisse sind in der Anlage 8.6.2 dokumentiert.

Als zu Grunde liegendes Evapotranspirationsverfahren wurde die Berechnung nach *Haude-Renger* herangezogen. Berücksichtigt und vom Modell 2007 übernommen wurden hierbei die mittleren GwNeubildungswerte (nach /12/) und die flächenhafte Verteilung der nutzbaren Feldkapazität, danach wurde das Modell mit den unterschiedlichen Nutzungseigenschaften der verschiedenen Teilflächen (Acker/Grünland, Wald) ergänzt. Danach wurde der GwNeubildungswert im Faulbach-Tal basierend auf /13/ reduziert.

Die räumliche Verteilung der GwNeubildungshöhe ist in der Anlage 8.4.3 dokumentiert. Die berechnete mittlere GwNeubildung (GwNeubildungsspende) für das gesamte Modellgebiet liegt bei 3,3 l/(s·km²).

➤ **GwEntnahmen:**

Im ersten Schritt wurde das Modell für Oktober 2010 stationär kalibriert. Dieser Kalibrierungszeitraum wurde gewählt, da er relativ stabile GwVerhältnisse erfasst und die Brunnen in dieser Zeit noch nicht in Betrieb waren.

Im Modellgebiet befinden sich weitere Brunnen, für die die mittleren Förderraten aus dem Modellstand 2007 unverändert übernommen wurden.

Danach wurde das Modell für den Zeitraum Oktober 2010 bis Ende Februar 2019 instationär kalibriert. Für die instationäre Berechnung wurden die täglichen Förderaten entsprechend dem tatsächlichen variablen Brunnenbetrieb im Gebiet Breitenbrunn angesetzt (siehe Anlage 2.1).

➤ **GwMessstellen:**

Im Untersuchungsgebiet bestehen fünf GwMessstellen (GWM 1 bis 5) des Zweckverbands zur Wasserversorgung (ZV WV) der Stadtprozellener Gruppe und ein Landespegel GWM Faulbach (GWM 6). Die GwMessstellen GWM 3, 4 und 5 wurden im Jahr 2011 in Ergänzung zu den länger bestehenden Messstellen 1 und 2/2a eingerichtet.

Die GwStandserfassung an den Brunnen sowie an den GwMessstellen GWM 1 bis 5 erfolgt kontinuierlich. Die Entwicklung der GwSpiegel ist in der Anlage 2.1.2 dargestellt. Da die GWM 3 bis 5 erst 2011 eingerichtet wurden, der musste Wasserspiegel an diesen Messstellen für Oktober 2010 abgeschätzt werden.

Die GWM 2a erfasst ein schwebendes GwStockwerk und sie zeigt keine Beeinflussung durch die GwFörderung; deswegen wird die GWM im Modell nicht untersucht.

Die mittleren GwStände (Oktober 2010) stellen sich wie folgt dar:

GWM	Wsp. [m NN]
GWM 1	141,8
GWM 2	144,5
GWM 3 (geschätzt)	144,3
GWM 4 (geschätzt)	142,8
GWM 5 (geschätzt)	184,5
GWM 6	139,6

3. Modellkalibrierung

3.1 Stationäre Kalibrierung

Zuerst wurde die Anpassung der GwStände an die Durchschnittswerte für Oktober 2010 durch Variation der k_f -Werte im Rahmen hydrogeologisch plausibler Größenordnungen und unter Berücksichtigung der aus dem vorherigen GwModell ermittelten Werte angestrebt. Die räumliche Verteilung der resultierenden k_f -Werte ist in den Anlagen 8.5.3 in Kartenform dokumentiert. Bezüglich der Durchlässigkeitsverteilung sind folgende Punkte hervorzuheben:

- Die horizontale Durchlässigkeit (k_{fh}) der Modellschicht 1 (oberer Buntsandstein) wurde mit 0,017 m/d, die vertikale Durchlässigkeit (Leakance) mit $1,3 \cdot 10^{-6}$ m/d angesetzt.
- Für das Quartär der Modellschicht 2 wurden horizontale Durchlässigkeiten (k_{fh}) zwischen 1,5 und 130 m/d, für den Buntsandstein Werte zwischen 0,01 und 13 gefunden. Die vertikale Durchlässigkeitswerte (Leakance) wurden für das Quartär mit $4,3 \cdot 10^{-6}$ - $2,6 \cdot 10^{-4}$ und für den Sandstein mit $8,6 \cdot 10^{-7}$ - $1 \cdot 10^{-5}$ m/d angesetzt.
- Für den Buntsandstein der Modellschicht 3 wurden horizontale Durchlässigkeiten (k_{fh}) zwischen 0,0086 und 19 m/d ermittelt. Aufgrund des verwendeten Rechenmodells (Modflow 2000, BCF-Package) können für die Schicht 3 keine vertikalen k_f -Werte angegeben werden.

Die GwStrömungssituation für den stationären Kalibrierungszustand ist in der Anlage 8.5.2 in Form eines GwGleichenplans dargestellt.

MP Teilabfluss	Gemessen m ³ /d	Berechnet m ³ /d	Differenz m ³ /d	l/s
MP13 Gesamt - MP8	-605	-501	-104	-1.2
MP14-MP 13	605	553	52	0.6
MP12-MP14	-259	-268	9	0.1
MP7-MP12	1382	1403	-21	-0.2
MP 7 - MP 8	1123	1096	27	0.3
MP11a-MP7	-1555	-1433	-122	-1.4

Die Differenz der gemessenen und berechneten Teilabflüsse ist als gering anzusehen.

3.2 Instationäre Kalibrierung

Um auch die Dynamik des GwSystems mit dem numerischen GwModell zu erfassen, wurde dieses – ausgehend von der stationären Kalibrierung – auch instationär angepasst. Anpassungsziel war hierbei die Reproduktion der GwStandsänderungen für den Zeitraum Oktober 2010 bis Ende Februar 2019, bei Ansatz der Tagesentnahmen an den Brunnen Breitenbrunn in diesem Zeitraum und der Einleitraten an der GWM 3 ab September 2015. Die Einleitung an dem neu errichteten Einleitbrunnen beginnt ab dem Zeitpunkt 01.02.2017. Die zeitliche Diskretisierung wurde auf ca. zwei Wochen festgelegt.

Auf die Darstellung der räumlichen Verteilung der ermittelten Porositäten (S_y) in den Modellschichten 1 und 3 und der spezifischen Speicherkoeffizienten (S) wurde in den Anlagen verzichtet, da hier großräumig konstante Werte vorgegeben wurden. Folgende Werte wurden durch die instationäre Kalibrierung ermittelt:

- Modellschicht 1 und 3, Buntsandstein: $S_s = 1 \cdot 10^{-5}$ und $S_y = 0,01$ bzw. 1 %
- Modellschicht 2, Buntsandstein:
 $S_s = 5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$ und $S_y = 0,01 - 0,04$ bzw. 1 - 4 %
- Modellschicht 2, Quartär: $S_s = 1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$

Diese Beträge für den effektiven Hohlraumanteil („Nutzporosität“) werden bei der späteren Modellanwendung für die Berechnung der Zeitmarken resp. der GwFließgeschwindigkeiten und Untergrundpassagezeiten angesetzt.

Die Ergebnisse der instationären Kalibrierung sind als Vergleich von gemessenen und berechneten GwGanglinien in der Anlage 8.6.1 dargestellt und wie folgt zu bewerten:

- Sowohl die Absoluthöhen der gemessenen Ganglinien als auch der Trend in den Ganglinien wird in den beiden Brunnen und in den GWM 2 und 3 mit dem GwModell gut reproduziert.
- Die Höhen in den GWM 5 und GWM Faulbach (GWM 6) werden gut erfasst, jedoch werden die GwStände der GWM 5 im Zeitraum 2016 bis 2019 leicht unterschätzt. Die GWM Faulbach wird in diesem Zeitraum leicht überschätzt.
- Die Über- und Unterschätzung ist auf die Umsetzung des GwModells als 3-Schicht-Modell zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass in der Realität eine deutliche zeitliche¹ und hydraulische Dämpfung des GwSystem in den unteren Schichten aufgrund von Schicht-Inhomogenitäten verursacht wird, die so von dem 3-schichtigen Modell nicht nachvollzogen werden kann. Dies wäre nur durch die Einführung weiterer Modellschichten innerhalb des Buntsandsteins möglich.
Mit Blick auf die weiteren wasserwirtschaftlichen Planungen im Gebiet Breitenbrunn erscheint dies jedoch nicht notwendig.

¹ Sickerzeiten durch die nicht gesättigten Bereiche des Buntsandsteins (hoher Flurabstand) können vom GwModell nicht berücksichtigt werden.

Hierzu wäre jedoch eine deutlich dichtere Datenbasis insbesondere hinsichtlich des Schichtaufbaus notwendig, die so nicht vorliegt.

- In den GwMessstellen 1 und 4 werden sowohl die Absoluthöhen zwischen den gemessenen und den berechneten Ganglinien als auch die Dynamik in den Ganglinien mit dem GwModell korrekt erfasst. Der steigende Trend nach Inbetriebnahme des Einleitbrunnen werden gut erfasst.

3.3 Zusammenfassung und Bewertung der Modellkalibrierung

Das numerische GwModell ist unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden hydrogeologischen Informationen und Daten aktualisiert und stationär und instationär (nach-)kalibriert; es ist somit prognosefähig.

Die GwNeubildung wurde mit Hilfe eines Bodenwasserhaushaltsmodells für den Zeitraum vom 01.01.2010¹ bis zum 31.02.2019 räumlich und zeitlich unter Berücksichtigung aller vorhandenen Daten (Flächennutzung, nFKWe-Werte und Klimadaten) variabel berechnet. Dieses Ergebnis wurde sowohl bei der stationären als auch bei der instationären Kalibrierung übernommen. Die GwNeubildung aus Niederschlag (GwNeubildungsspende) beträgt im Mittel ca. 3,3 l/s*km².

Für den stationären Kalibrierungszustand kann man von einer guten Anpassung der berechneten an die gemessenen GwStände sprechen. Das Ergebnis dieser Anpassung ist in der Anlage 8.5.1 dokumentiert. Hier zeigt sich, dass für den stationären Kalibrierungszustand ein mittlerer Fehler von 0,015 m und ein RMS² von 0,079% berechnet wird, was für ein regionales GwModell einen sehr guten Wert darstellt. Auch der Korrelationskoeffizient von nahezu 1 und die Standard-Abweichung von 0,08 m zeigen, dass das Modell insgesamt plausible Druckhöhen errechnet.

Die zeitliche Entwicklung der berechneten und gemessenen GwStände bzw. GwGanglinien ist in der Anlage 8.6.1 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass eine gute Anpassung in den Brunnen und GWM 2-4 sowohl hinsichtlich der Dynamik als auch der Höhenniveaus erreicht werden konnte. Die Höhen in den GWM 5 und GWM Faulbach werden gut erfasst, jedoch werden die GwStände leicht unter- bzw. überschätzt.

¹ Die Berechnung mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell wurde über den gesamten Zeitraum ab Januar 2010 bis Ende Februar 2019 durchgeführt, da hierdurch eine längerfristige Zeitreihe vorliegt und die Startbedingungen rechnerisch genau definiert sind.

² RMS = Root Mean Square Error

4. Modellanwendung

Für die TwVersorgung der Verbandsgemeinden Faulbach (inkl. Breitenbrunn), Dorfprozelten und Stadtprozelten (inkl. Neuenbuch) und Altenbuch ist zunächst die Frage zu klären, inwieweit das numerische GwModell die gemessenen GwSpiegel vor und nach der Quellwassereinleitung abbildet.

Aufbauend auf dem stationär und instationär kalibrierten GwModell wurden folgende Szenarien stationär berechnet:

Szenario		Ansatz der GwEntnahme	Ansatz der Quellwassereinleitung
1	1a	360.000 m ³ /a	0 l/s
	1b	2.000 m ³ /d	
2	2a	360.000 m ³ /a	8 l/s
	2b	2.000 m ³ /d	

Die resultierenden Einzugsgebiete und 50-Tage-Zonen sind in Anlage 8.7 gemeinsam mit den bestehenden WSG-Grenzen dargestellt. Aus diesen Darstellungen wird erkennbar, ob bzw. gegebenenfalls wo WSG-Anpassungen aufgrund der neueren Erkenntnisse resp. aufgrund des Einflusses der Quellwassereinleitung erforderlich sind.

Die Szenarien und ihre Ergebnisse sind im Kapitel 5.2 des Gutachtens detailliert beschrieben; auf diesen Text wird an dieser Stelle verwiesen.

Büro HG

Gießen, August 2019

gez.

Dipl.-Ing. Jan Bockholt