

Im wasserrechtl. Verfahren geprüft

Amtl. Sachverständiger
Bayer. Landesamt für Umwelt

Hof, den 23.10.24

W. Lauber
Name

ORR
Dienststellung

S. Ausfertigung

Fernwasserversorgung Franken



**ANTRAG
AUF ERTEILUNG EINER BEWILLIGUNG
ZUR ENTNAHME VON GRUNDWASSER NACH § 8 WHG
AUS DEN BRUNNEN HFB S, N1, N2, S1 UND S2
IN DER GEMARKUNG SULZFELD SOWIE
DEM BRUNNEN HFB M IN DER GEMARKUNG MARKTSTEFT**

**Anhang 3
Numerisches Grundwasserströmungsmodell**

Der Antragsteller:

Uffenheim, den 11.09.2023
Fernwasserversorgung Franken

.....
Dr. Hermann Löhner
(Geschäfts- und
Werkleiter)

.....
Dr. Jörg Habermann
(Projektmanager)
Wasserrechte)

Der Planverfasser:

Koblenz, den 11.09.2023
Björnsen Beratende Ingenieure GmbH

.....
Dipl.-Ing. Ulrich Krath



BJÖRNSEN BERATENDE INGENIEURE

Björnsen Beratende Ingenieure GmbH
Maria Trost 3, 56070 Koblenz
Telefon +49 261 8851-0, info@bjoernsen.de
Aug. 2023, Men, LG, fsm2018081.03



WASSERGEWINNUNGSGEBIET SULZFELD / MARKTSTEFT

Numerisches Grundwasserströmungsmodell



BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH
Maria Trost 3, 56070 Koblenz
Telefon +49 261 8851-0, info@bjoernsen.de
August 2021, KL/BR/LG/MEN fsm2018081.03

Inhaltsverzeichnis

Erläuterungsbericht

1	Veranlassung	1
2	Modellgrundlagen	1
3	Modellaufbau	1
3.1	Modellnetz	1
3.2	Vertikaler Modellaufbau	4
3.3	Untergrundparameter	6
3.4	Randbedingungen	9
3.5	Grundwasserneubildung	10
3.6	Brunnen der FWF	11
3.7	Störungssystem	13
3.8	Modellberechnungen zur Kalibrierung	14
3.8.1	Übersicht	14
3.8.2	Stationäre Kalibrierung mittlere Strömungsverhältnisse 2013	15
3.8.3	Instationäre Kalibrierung Pumpversuch 2018 - 2019	16
3.8.4	Instationäre Validierung Hochwasser 2013	17
4	Modellkalibrierung	18
4.1	Berechnungsergebnisse stationäre Kalibrierung mittlere Strömungsverhältnisse 2013	18
4.2	Berechnungsergebnisse instationäre Kalibrierung Pumpversuch 2018 - 2019	24
4.2.1	Berechnete Grundwasserstände	25
4.2.2	Berechnete Uferfiltratanteile	29
4.3	Berechnungsergebnisse instationäre Validierung Hochwasser 2013	33
4.4	Fazit	34
5	Einzugsgebiet der Wassergewinnung bei 6,5 Mio. m³/a	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Modellnetz: Übersicht Gesamtmodell	3
Abbildung 2:	Modellnetz: West-Ost-Schnitt der Quartärrinne im Bereich der Wassergewinnung	3
Abbildung 3:	Modellnetz im Bereich der Wassergewinnungen mit Angabe der Knotenabstände	4
Abbildung 4:	Aufteilung des Quartärs in mehrere Schichten südlich von Kitzingen	6
Abbildung 5:	Zonierung der Durchlässigkeiten nach HGM	7
Abbildung 6:	Seen im Grundwassermodell (grüne Punkte = Gewässerknoten)	10
Abbildung 7:	Filterstränge als „discrete feature elements“ (blau) - HFB Sulzfeld	12
Abbildung 8:	Filterstränge als „discrete feature elements“ (blau) - HFB Marktsteft	12
Abbildung 9:	Radialer Schnitt um den Brunnenschacht durch die Filterstränge am Horizontalfilterbrunnen Marktsteft (Layer 7 ist nicht vollständig abgebildet)	13
Abbildung 10:	Störungssystem (blaue Linien)	14
Abbildung 11:	Punktewolke gemessen - gerechnet des Basislaufs	21
Abbildung 12:	Punktewolke gemessen - gerechnet des Kalibrierungslaufs	21
Abbildung 13:	Erhöhung der Sohldurchlässigkeit im Main im Bereich der Messstellen S2a, N15 im Rechenlauf VI (Lila) und im Bereich der Messstelle GP1 im Rechenlauf VII (Gelb)	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Hydrostratigrafie und Zuordnung der Schichten aus dem HGM im Grundwassermodell	5
Tabelle 2:	Durchlässigkeit (horizontal) HGM / Modell (GWL = Grundwasserleiter, GWGL = Grundwassergeringleiter)	8
Tabelle 3:	Stauhaltungen des Mains im Modellgebiet (Angaben der Wasserstraßen- und Schiffahrtsverwaltung des Bundes (WSV))	10
Tabelle 4:	Statistische Auswertung gemessener / berechneter Grundwasserstände des Basis- und Kalibrierungslaufs	22
Tabelle 5:	Modellbilanz nach HGM	23
Tabelle 6:	Modellbilanz im Grundwassermodell	24
Tabelle 7:	Übersicht der Rechenläufe zur Untersuchung der Sensitivitäten	25
Tabelle 8:	Statistische Auswertung gemessener / berechneter Grundwasserstände der Stichtage während des Pumpversuchs (PV)	26
Tabelle 9:	Ermittelter (HGM) und berechneter Uferfiltratanteil während des Pumpversuches (Kalibrierungslauf)	30
Tabelle 10:	Berechneter Uferfiltratanteil während des Pumpversuches bei erhöhter (Rechenlauf I) und verminderter (Rechenlauf II) Sohldurchlässigkeit des Mains	31
Tabelle 11:	Änderung der Uferfiltratanteile bei erhöhtem Leakage im Zustrom der Messstellen S2a und N15	33
Tabelle 12:	Verteilung der Entnahmen basierend auf dem Bescheidentwurf bei maximaler 50- Tagesentnahme	35
Tabelle 13:	Bilanz im Einzugsgebiet der FWF-Brunnen	35

Anlagen

1. Modellgrundlagen
 - 1.1 Übersicht
 - 1.2 Messstellen und Brunnen im Bereich Sulzfeld / Marktsteft
 - 1.3 Modellnetz
 - 1.4 Vergleich hydrogeologischer Schnitt / Modellschnitt
 - 1.4.1 Profilschnitt 2 (HGM)
 - 1.4.2 Quartärrinne Schnitt A (HGM)
2. Modellparameter/-randbedingungen
 - 2.1 Durchlässigkeit
 - 2.2 Nutzbare Porosität
 - 2.3 Übersicht Randbedingungen
 - 2.4 Stationäre Grundwasserneubildung (Mittel 1971-2018, LfU)
 - 2.5 Tabelle Grundwasserentnahmen 2013
3. Randbedingungen während des Pumpversuchs 2018-2019
 - 3.1 Mainwasserstand
 - 3.2 Grundwasserentnahmen
 - 3.3 Instationäre Grundwasserneubildung
4. Randbedingungen während des Hochwasser 2013
 - 4.1 Mainwasserstand
 - 4.2 Grundwasserentnahmen
5. Berechnungsergebnisse stationäre Kalibrierung (Mittel 2013)
 - 5.1 Berechnete Grundwassergleichen OGWL
 - 5.2 Berechnete Grundwassergleichen MGWL
 - 5.3 Berechnete Grundwassergleichen UGWL
 - 5.4 Tabelle gemessener / berechneter Grundwasserstände
6. Berechnungsergebnisse instationäre Kalibrierung (Pumpversuch)
 - 6.1 Berechnete Grundwasserstandsganglinien Sulzfeld
 - 6.2 Berechnete Grundwasserstandsganglinien Marktsteft
 - 6.3 Berechnete Grundwassergleichen GWLq vor dem Pumpversuch (25.07.2018)
 - 6.4 Berechnete Grundwassergleichen GWLq Ende Pumpstufe 1 (12.03.2019)
 - 6.5 Berechnete Grundwassergleichen GWLq Ende Pumpstufe 2 (01.05.2019)
 - 6.6 Berechnete Grundwassergleichen GWLq Ende Pumpstufe 3 (07.05.2019)
- 6.7 Berechneter Uferfiltratanteil während des Pumpversuchs
 - 6.7.1 Übersicht - tabellarisch
 - 6.7.2 Gemessen / berechnet Horizontalfilterbrunnen Sulzfeld / Marktsteft
 - 6.7.3 Gemessen / berechnet Brunnen N1 und N2

- 6.7.4 Gemessen / berechnet Brunnen S1 und S2
- 6.7.5 Berechnete Einzugsbereiche im Brunnenumfeld

- 6.8 Berechnete Grundwasserstandsganglinien (Auswahl)
 - 6.8.1 Rechenlauf I - Sohldurchlässigkeit Main um Faktor 5 erhöht - GP1
 - 6.8.2 Rechenlauf II - Sohldurchlässigkeit Main um Faktor 2,5 verringert - GP1
 - 6.8.3 Rechenlauf III –Ohne Trennschicht - N1a

- 6.8.4 Rechenlauf VI - Sohldurchlässigkeit Main bei S2a, N15 erhöht)

- 7. Berechnungsergebnisse instationäre Validierung (HW 2013)
 - 7.1 Berechnete Grundwasserganglinien Sulzfeld
 - 7.2 Berechnete Grundwasserganglinien Marktsteft

- 8. Einzugsgebiet der Wassergewinnung bei 6,5 Mio. m³/a Entnahme
 - 8.1 Berechnete Stromlinien
 - 8.2 Berechnete Einzugsgebietsfläche

Anhang

- I Berechnungsergebnisse Sensitivitätsuntersuchungen - Berechnete Grundwasserstandsganglinien (Rechenlauf I – Sohldurchlässigkeit Main um Faktor 5 erhöht)
- II Berechnungsergebnisse Sensitivitätsuntersuchungen - Berechnete Grundwasserstandsganglinien (Rechenlauf II – Sohldurchlässigkeit Main um Faktor 2,5 verringert)
- III Berechnungsergebnisse Sensitivitätsuntersuchungen - Berechnete Grundwasserstandsganglinien (Rechenlauf III – Ohne Trennschicht)
- IV Berechnungsergebnisse Sensitivitätsuntersuchungen - Berechnete Grundwasserstandsganglinien (Rechenlauf IV – Flächige Trennschicht)
- V Berechnungsergebnisse Sensitivitätsuntersuchungen - Berechnete Grundwasserstandsganglinien (Rechenlauf V – Reduzierte Durchlässigkeit / Porosität im MGWL)
- VI Berechnungsergebnisse Sensitivitätsuntersuchungen - Berechnete Grundwasserstandsganglinien (Rechenlauf VI – Sohldurchlässigkeit Main bei N15, S2a erhöht)
- VII Berechnungsergebnisse Sensitivitätsuntersuchungen - Berechnete Grundwasserstandsganglinien (Rechenlauf VII – Sohldurchlässigkeit Main bei N15, S2a, GP1 erhöht)
- VIII Berechnungsergebnisse Sensitivitätsuntersuchungen - Übersicht Berechnungsergebnisse der Rechenläufe im Vergleich zur Kalibrierung

Verwendete Unterlagen

- [1] Zweckverband Fernwasserversorgung (FWF) (Hrsg.)
Mathematisches Grundwassermodell für das Gewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft
Koblenz, April 1987
Verfasser: BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH

- [2] Zweckverband Fernwasserversorgung (FWF) (Hrsg.)
Mathematisches Grundwassermodell für das Gewinnungsgebiet Sulzfeld-Marktsteft; Ergänzende Untersuchungen
Koblenz, Dezember 1987
Verfasser: BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH

- [3] Zweckverband Fernwasserversorgung (FWF) (Hrsg.)
Antrag auf Neufestsetzung eines Schutzgebietes für das Erschließungsfeld Sulzfeld / Marktsteft
Koblenz, Dezember 1996
Verfasser: BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH

- [4] Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft (FH-DGG):
Hydrogeologische Modelle; Ein Leitfaden mit Fallbeispielen
Hannover, 2002

- [5] Licht-, Kraft- und Wasserwerke Kitzingen GmbH (Hrsg.)
Antrag auf Festsetzung eines Wasserschutzgebietes für die Brunnen K1, K2, K3, K4, K5 und K6; Klinge
Haßfurt, 2006
Verfasser: BAURCONSULT

- [6] Licht-, Kraft- und Wasserwerke Kitzingen GmbH (Hrsg.)
Antrag auf wasserrechtliche Genehmigung zur Entnahme und Ableitung von Grundwasser § 3 Abs. Nr. 1 Nr. 6, WHG Gehobene Erlaubnis gemäß §7 WHG für die Brunnen K1, K2, K3, K4, K5 und K6; Klinge
Haßfurt, 2006
Verfasser: BAURCONSULT

- [7] Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft (FH-DGG):
Hydrogeologische Modelle; Bedeutung des hydrogeologischen a-priori-Wissens
Hannover, 2010

- [8] DVGW Regelwerk, Technische Regeln – Arbeitsblatt W 107 (A)
Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten
Bonn, Februar 2016

- [9] Kopp, B., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, M., Kampf, J., Morhard, A., Neumann, J. (2018):
Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen von 1951 bis 2015 - Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 62, (2), 62-76; DOI: 10.5675/HyWa_2018,2_1
2018
- [10] Licht-, Kraft- und Wasserwerke Kitzingen GmbH (Hrsg.)
Hydrogeologisches Basisgutachten zur Einzugsgebietsermittlung und Wasserschutzgebietsvorschlag für die Brunnengalerie M5, M6 und M7 Mainstockheimer Straße
Haßfurt, 2019
Verfasser: BAURCONSULT
- [11] Zweckverband Fernwasserversorgung (FWF) (Hrsg.)
Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstef
Hydrogeologisches Modell
Koblenz, August 2020
Verfasser: BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH
- [12] Bayerisches Landesamt für Umwelt, Gewässerkundlicher Dienst :
https://www.gkd.bayern.de/de/fluesse/wasserstand/main_unten/wuerzburg-24042000/jahreswerte/tabelle?zr=jahr&addhr=hr_w_hw&beginn=01.05.2013&ende=16.01.2021
Wasserstand, Hauptwerte Pegel Würzburg
2021

1 Veranlassung

Die Fernwasserversorgung Franken (FWF) fördert im Gewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft Grundwasser für die öffentliche Trinkwasserversorgung. Die Grundwasserförderung erfolgt derzeit auf Grundlage der beschränkten Erlaubnis des LRA Kitzingen vom 12.11.2020 (Az.: 62-6421.3). Für die Wasserversorgung im zugehörigen Versorgungsbereich wird das am WW Sulzfeld / Marktsteft gewonnene und aufbereitete Grundwasser mit dem zusätzlich durch den Zweckverband Fernwasserversorgung fränkischer Wirtschaftsraum (WFW) gelieferten Wasser vor dem Wasserwerksausgang gemischt und im Versorgungsgebiet verteilt.

Da die aktuell geltende beschränkte Erlaubnis zum 31.12.2023 ausläuft und zukünftig eine Erhöhung des Versorgungsanteils aus dem Gewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft vorgesehen ist, muss eine neue wasserrechtliche Bewilligung für das Gewinnungsgebiet beantragt werden.

Im Rahmen des Wasserrechtsverfahrens ist der Einsatz eines Grundwassermodells zur Berechnung der Grundwasserströmung bei unterschiedlichen Randbedingungen gefordert. In einem ersten Schritt sind die fachlichen Grundlagen mit dem Hydrogeologischen Modell (HGM) [11] erarbeitet und dokumentiert worden. Für die geplante Beantragung der Wasserrechte wird basierend auf dem HGM ein numerisches Grundwasserströmungsmodell aufgebaut und kalibriert. Mit dem Grundwassermodell sind verschiedene Untersuchungen wie Einzugsgebietsberechnungen, 50-Tage-Fließzeit, Auswirkungen besonderer hydrologischer Bedingungen und ähnliches vorgesehen. In diesem Bericht werden der Aufbau, die Kalibrierung, die Validierung, die durchgeführten Sensitivitätsbetrachtungen und ein erster Modelleinsatz dokumentiert.

2 Modellgrundlagen

Die hydrogeologischen Grundlagen für das numerische Grundwasserströmungsmodell sind im Bericht Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft - Hydrogeologisches Modell (HGM) [11] hergeleitet und detailliert erläutert.

Für die Umsetzung in ein Grundwassermodell kommt das Modellsystem FEFLOW Version 7 von DHI WASY GmbH zum Einsatz. Vorteil von Feflow ist die Möglichkeit zur Generierung von flexiblen Modellnetzen mittels Dreiecksvermaschung (Finite Elemente), die im Vergleich zu rasterbasierten Modellsystemen (Finite Differenzen) komplexe Geometrien detailgetreu abbilden können. So kann zum Beispiel der Verlauf der Filterstränge eines Horizontalfilterbrunnens genau im Netz integriert werden.

3 Modellaufbau

3.1 Modellnetz

Das im HGM hergeleitete Modellgebiet ist in Anlage 1.1 dargestellt und weist eine Fläche von 235 km² auf, die nähere Umgebung der Wassergewinnung Sulzfeld / Marktsteft zeigt Anlage 1.2. Die Netzgenerierung im Modellgebiet ist ein zentraler Schritt, in dem alle relevanten geometrischen Elemente im

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstett - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Finite-Element-Netz berücksichtigt werden. Neben der Modellgrenze sind dies in der Regel Gewässerläufe, bedeutende Grenzen in den Untergrundeigenschaften oder Bauwerke, die in den Untergrund einbinden.

Im Modellnetz wurden auf Grundlage der TK25 und der Daten im HGM folgende Grenzen, Verläufe und Standorte berücksichtigt:

- Modellgrenze
- Horizontalfilterbrunnen: Filterstränge, Schacht und Gebäude
- Standorte der Vertikalfilterbrunnen
- Gewässer: Main und Nebengewässer, Seeflächen im Quartär
- Schleusen
- Grenze des Quartärs
- Tektonische Störungen
- Zonierung der Untergrunddurchlässigkeiten (nach HGM)

In Abbildung 1 bis Abbildung 3 sowie in Anlage 1.3 ist das Modellnetz in verschiedenen Ansichten dargestellt. Im Bereich der Quartärrinne ist eine feinere Auflösung generiert worden, um der höheren Informationsdichte gerecht zu werden. Im Bereich der Horizontalbrunnen wurde eine weitere Modellverfeinerung vorgenommen, um einzelne Filterstränge und andere Bauwerksteile der Brunnen adäquat im Modellnetz abzubilden. Folgende horizontalen Knotenabstände liegen im Modell vor (Abbildung 3):

- Im Umfeld der Horizontalfilterbrunnen der Wassergewinnungen: 0,5 - 5 m
- Innerhalb der Quartärrinne zwischen Kitzingen und Marktbreit: 5 - 20 m
- Im weiteren Umfeld wurde der Knotenabstand schrittweise von rd. 20 m auf mehrere 100 m erhöht

Das Modellnetz wurde mittels einer Delaunay-Triangulierung erstellt. Das Verfahren zeichnet sich durch eine Minimierung der größten Innenwinkel der verwendeten Dreiecke aus, sodass zu spitze Dreiecke nach Möglichkeit vermieden werden. Aufgrund äußerer (z.B. Schnittwinkel der vorgegebenen Geometrien) und innerer Zwangspunkte (z.B. Übergang von Verfeinerungsbereich zu größerer Diskretisierung) lässt sich diese Vermeidung lokal ungünstiger Modellgeometrien in aller Regel nicht vollständig erzielen, sodass die Netzqualität mit einer statistischen Untersuchung der verwendeten Dreieckselemente beurteilt wird. Die Qualität des Netzes kann durch folgende Parameter charakterisiert werden:

- Delaunay-Kriterium: dieses Kriterium ist an einem Dreieckselement erfüllt, wenn sich im Umkreis des Dreieckes kein weiterer Knoten eines anderen Elementes befindet. Das Kriterium wird lediglich bei 3,2 % der Netzelemente nicht erfüllt.
- Winkel-Kriterium: hier werden die maximalen Innenwinkel der verwendeten Dreiecke überprüft. Der Anteil von weniger günstigen Winkeln ist gering: 1,8 % > 120° (und 21,6 % > 90°).

Die erzielte Güte des Modellnetzes ist für die vorgesehenen Untersuchungen der Grundwasserströmung ausreichend, sodass der Modellaufbau mit dem erzeugten Finite Elemente Netz fortgesetzt werden kann.

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

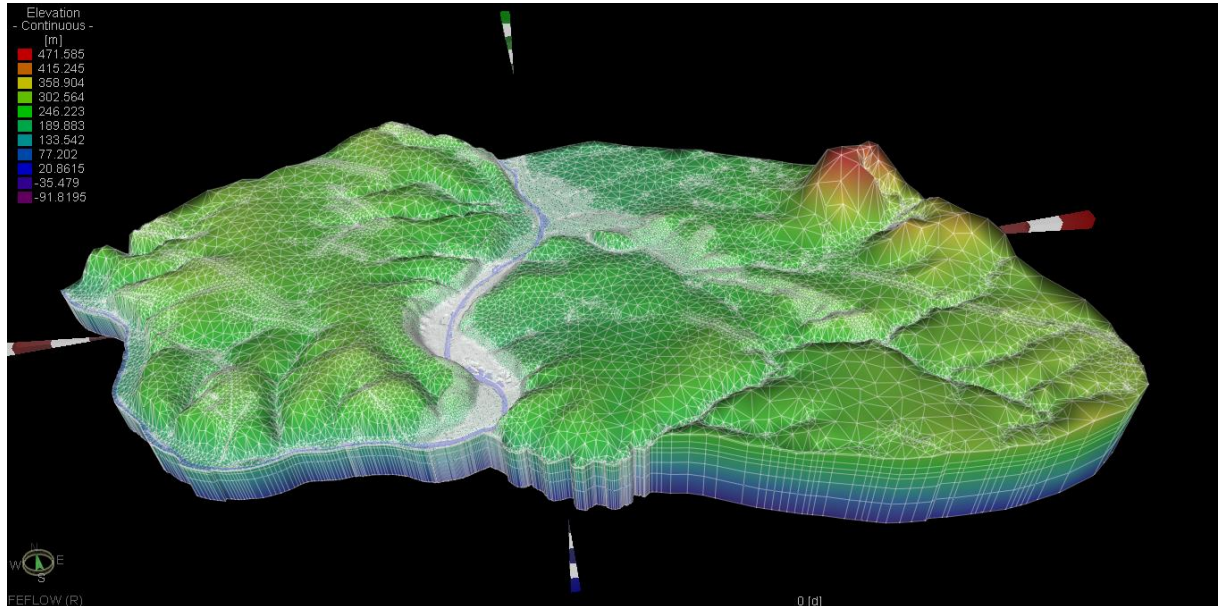


Abbildung 1: Modellnetz: Übersicht Gesamtmodell

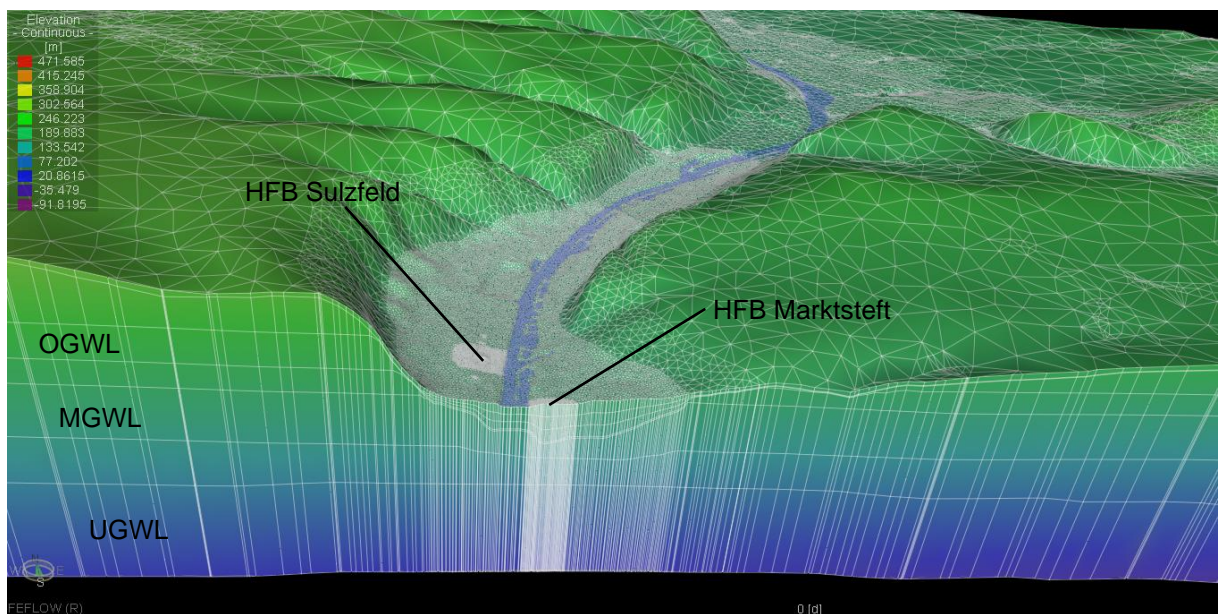


Abbildung 2: Modellnetz: West-Ost-Schnitt der Quartärrinne im Bereich der Wassergewinnung

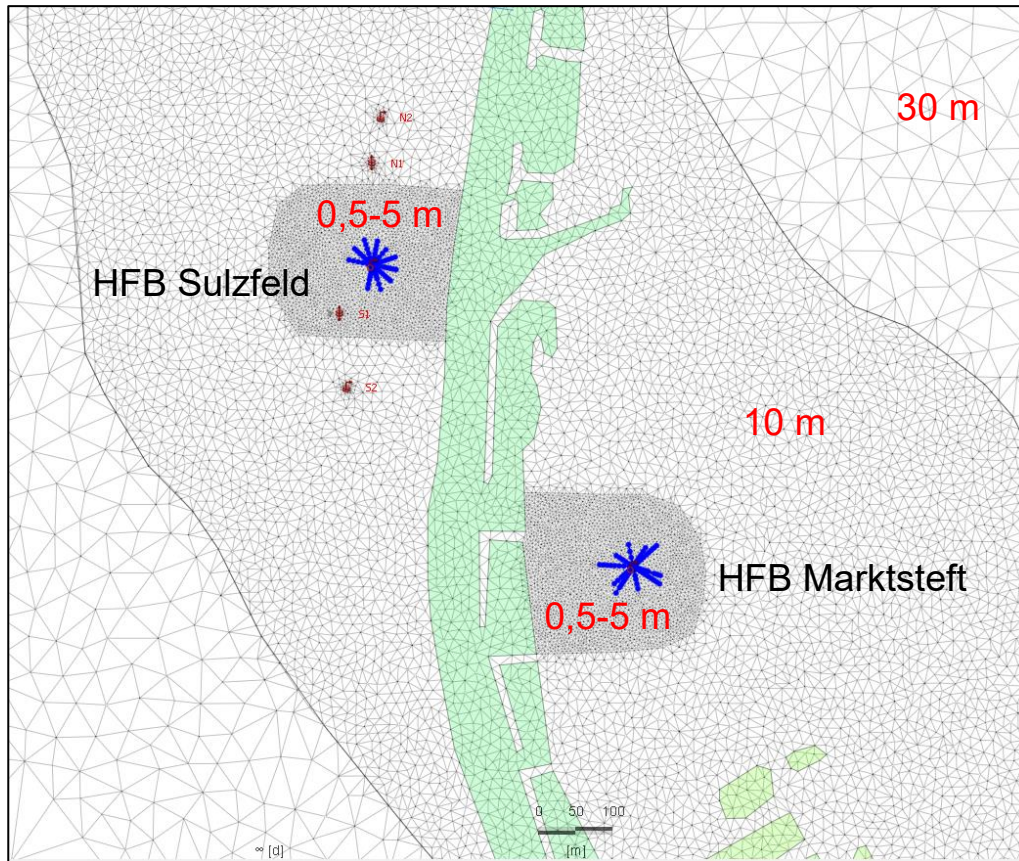


Abbildung 3: Modellnetz im Bereich der Wassergewinnungen mit Angabe der Knotenabstände

3.2 Vertikaler Modellaufbau

Der hydrogeologische Schichtaufbau im Modellgebiet ist ausführlich im HGM erläutert. Im Grundwassermodell wurden alle relevanten, grundwasserleitenden Schichten nach Tabelle 1 umgesetzt. In Abbildung 2 ist die Schichtung anhand eines Querschnitts durch das Modell im Bereich Sulzfeld / Marktsteft gezeigt. Die oberste Schichtgrenze wird durch das Digitale Geländemodell DGM25 (Abbildung 1) begrenzt und die unterste wird durch die Oberkante der Oberen Röttonsteine definiert. Die Schichten des Mittleren und Unteren Keupers wurden zu einer einzigen Modellschicht zusammengefasst. Diese Schichten sind somit im Modell enthalten, werden aber nicht im Detail abgebildet.

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstett - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Tabelle 1: Hydrostratigraphie und Zuordnung der Schichten aus dem HGM im Grundwassermodell

Hydrostratigraphie	Stratigraphie	Kurzbez.	Erosion	Schicht HGM	Schicht numerisches Modell
GWL q	Quartär	q	q	1	1
Geringleiter km	Mittlerer Keuper	km	q	2	2
GWL ku/km	Unterer / Mittlerer Keuper	ku-km	q	3	
Geringleiter ku2	Unterer Keuper	ku ₂	q	4	
GWL ku	Unterer Keuper	ku _w	q	5	
Geringleiter ku1	Unterer Keuper	ku ₁	q	6	
OGWL	Oberer Muschelkalk	mo ₃	q	7	
Geringleiter mo	Oberer Muschelkalk	mo ₂ -mo ₃	q	8	4
MGWL	Mittlerer (Oberer) Muschelkalk	mm ₃ -mo ₂	q	9	5
Geringleiter mm	Mittlerer Muschelkalk	mm ₁ -mm ₂	q	10	6
UGWL	Unterer (Mittlerer) Muschelkalk	mu ₁ -mm ₁	-	11	7
liegender Geringleiter	Obere Röttonsteine	so ₄ T	-	-	-

Die drei Grundwasserleiter im Oberen und Mittleren Muschelkalk – Oberer Grundwasserleiter (OGWL), Mittlerer Grundwasserleiter (MGWL) und Unterer Grundwasserleiter (UGWL) - werden einschließlich der geringleitenden Trennschichten anhand der in [11] dokumentierten, flächigen Schichtgrenzen unverändert ins Modell übernommen. In der Anlagenreihe 1.4 sind zwei der hydrogeologischen Schnitte aus dem HGM (Profilschnitt 2 und Schnitt A in der Quartärrinne) den jeweiligen Schnitten aus dem Grundwassermodell gegenübergestellt. Die Schnitte zeigen, dass die Geometrie im Grundwassermodell genau die Geometrie aus dem HGM abbildet.

In Abbildung 4 ist ein West-Ost-Schnitt durch die Quartärrinne bei Sulzfeld dargestellt. Im schichtbasierten Grundwassermodell müssen alle Schichten durchgängig vorhanden sein. Im Bereich der Quartärrinne sind die Schichten des Keupers und Teile des Muschelkalks durch Erosion nicht mehr vorhanden. Die quasi überflüssigen Schichten des Modells im Bereich der Quartärrinne werden zur Unterteilung des quartären Grundwasserleiters eingesetzt. Diese Vorgehensweise ermöglicht die exakte

geometrische Umsetzung der Filterstränge der Horizontalfilterbrunnen bzw. der Entnahmehorizonte der Vertikalfilterbrunnen bei Sulzfeld / Marktstef (siehe Abschnitt 3.6). Außerdem trägt die verfeinerte, vertikale Diskretisierung zur Stabilisierung des Konvergenzverhaltens während der Modellrechnung bei.

Das Ergebnis ist ein 7-schichtiges Grundwassermodell, das aufgrund der horizontalen und vertikalen Diskretisierung über rd. 720.000 Elemente und rd. 410.000 Berechnungsknoten verfügt.

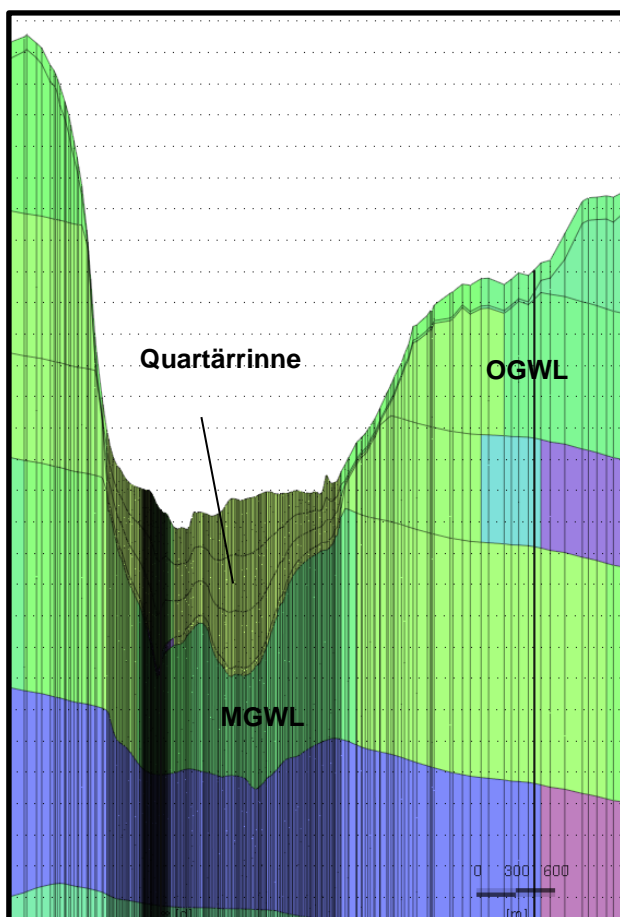


Abbildung 4: Aufteilung des Quartärs in mehrere Schichten südlich von Kitzingen

3.3 Untergrundparameter

Die Grundlage für die Durchlässigkeiten (k_f -Wert) ist die im HGM erarbeitete Verteilung wie sie in Abbildung 5 dargestellt ist. Ausgehend von dieser Verteilung und den im HGM zugeordneten Zahlenwerten wurde der k_f -Wert im Rahmen der stationären und instationären Modellkalibrierung innerhalb plausibler Grenzen variiert. Die Anlagenreihe 2.1 zeigt das Ergebnis der horizontalen Durchlässigkeiten nach Kalibrierung für jede einzelne Schicht. Die vertikalen Durchlässigkeiten sind grundsätzlich um den Faktor 10 kleiner als die horizontalen Durchlässigkeiten angesetzt. Im Bereich des Maintales treten die höchsten Durchlässigkeiten auf; nach Nordwesten und insbesondere in Richtung Osten

werden aufgrund der mächtigeren Keuperüberdeckung bzw. des geringeren Verkarstungsgrades gemäß HGM kleinere Durchlässigkeiten zugeordnet.

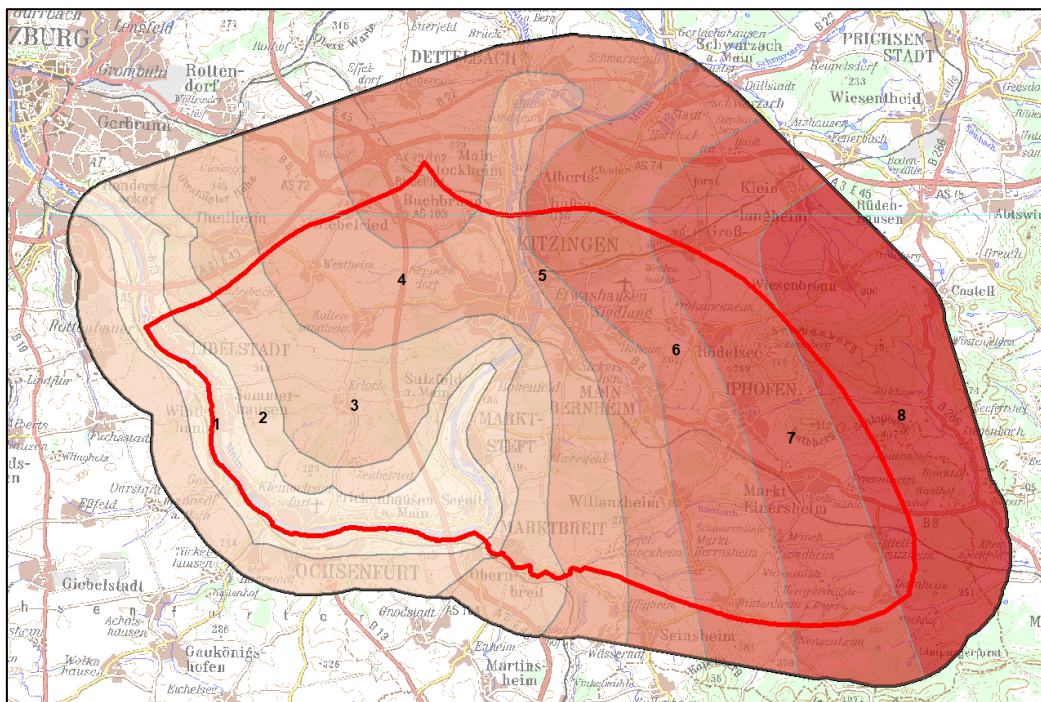


Abbildung 5: Zonierung der Durchlässigkeiten nach HGM

In Tabelle 2 sind die Wertebereiche der Durchlässigkeit in der jeweiligen Schicht aus dem HGM und dem Grundwassermodell (Kalibrierungslauf) zusammengestellt. Die Größenordnungen stimmen mit Ausnahme der Schicht 1 (Quartär), Schicht 2 (km-ku) und der Schicht 4 (Grundwassergeringleiter mo) überein:

- Schicht 1: Mit $k_f = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s im GWL q wird im Modell der Verwitterungshorizont über dem Festgestein außerhalb der Quartärrinne berücksichtigt.
- Die Schicht 2 (km-ku) erfasst im Modell die integrierte Durchlässigkeit von unterschiedlich zusammengesetzten, teils durch Erosion veränderten Horizonten, die gleichzeitig durch ein Bruch- und Störungssystem überprägt sind. Die gewählte Durchlässigkeitsverteilung wurde durch die Kalibrierung bestätigt.
- Die Schicht 4 bzw. der Geringleiter mo ist im Modell insbesondere im Osten des Modells mit $1 \cdot 10^{-8}$ m/s deutlich geringer durchlässig als im HGM. Die berechneten Grundwasserstände im OGWL erreichen die Messwerte nur bei geringer durchlässigem Geringleiter mo (siehe auch Abschnitt 4.1).

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstett - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Tabelle 2: Durchlässigkeit (horizontal) HGM / Modell (GWL = Grundwasserleiter, GWGL = Grundwassergeringleiter)

	Schicht	k _f m/s	
		HGM	Modell
GWL q	1	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$
GWGL km	2	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-4}$
GWL ku-km	2	$1 \cdot 10^{-4}$	
GWGL ku2	2	$1 \cdot 10^{-6}$	
GWL ku	2	$1 \cdot 10^{-4}$	
GWGL ku1	2	$1 \cdot 10^{-6}$	
OGWL	3	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$
GWGL mo	4	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-3}$
MGWL	5	$1 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-3}$
GWGL mm	6	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$
UGWL	7	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$

Eine Besonderheit in der Darstellung in Anlagenreihe 2.1 ergibt sich in der Durchlässigkeitsverteilung der ersten 4 Schichten aus der vertikalen Schichtstruktur im Bereich der Quartärrinne. Wie in Abbildung 4 zu erkennen und in Abschnitt 3.2 erläutert, ist der quartäre Grundwasserleiter südlich von Kitzingen in 4 Schichten aufgeteilt. In den Modellschichten 1 bis 4 der Anlagen 2.1.1 bis 2.1.4 sind die dem Quartär zugeordneten Teilbereiche durch eine grüne Begrenzungslinie ausgewiesen.

Zwischen dem quartären Grundwasserleiter und dem MGWL ist im Bereich der Wassergewinnung bei Sulzfeld eine lokale Trennschicht integriert worden, die im Rahmen der Kalibrierung im Umfeld der Brunnen auf Sulzfelder Seite anhand von gemessenen Druckunterschieden im Grundwasser ermittelt wurde (siehe auch Abschnitt 4.2.1). Diese Trennschicht repräsentiert eine Zone des Festgesteins unter den quartären Sedimenten, die vermutlich aufgrund verminderter oder fehlender Klüftung bzw. Verkarstung geringer durchlässig ist und daher lokal auch weniger Austausch von Grundwasser zwischen Quartär und tieferen Teilstockwerken im Muschelkalk zulässt. Hier treffen die Eigenschaften von Poren- und Festgesteinsgrundwasserleiter aufeinander. Im Porengrundwasserleiter liegen vergleichsweise homogene Fließigenschaften vor. Im Gegensatz dazu treten im Festgestein bei insgesamt starker Klüftung / Verkarstung lokal auch mal geringdurchlässige Zonen auf.

In der Anlagenreihe 2.2 ist die Verteilung der nutzbaren Porosität für jede einzelne Schicht (Kalibrierungsergebnis) abgebildet:

- Quartär 20 % (HGM: 20 %)
- OGWL / MGWL 5 - 15 % (HGM: um 2 - 5 %)
- UGWL 2 % (HGM: um 2 - 5 %)
- Spez. Speicherkoeffizient für gespannte Verhältnisse: $1 \cdot 10^{-4}$ (HGM: $5 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-3}$)

Die nutzbare Porosität ist einer der Faktoren, der zur Nachbildung der Dynamik im Grundwasser eine Rolle spielt (sowohl im Rahmen der instationären Kalibrierung als Speicherkoeffizient für ungespannte Verhältnisse, als auch für Berechnungen der Fließzeiten). Im OGWL und MGWL wurde nach den Modellrechnungen der instationären Kalibrierung insbesondere im Umfeld des Maintals eine höhere

nutzbare Porosität ermittelt. Tendenziell nimmt die nutzbare Porosität gemäß HGM nordwestlich und östlich des Maintals ab.

Die oben beschriebenen Parameterverteilungen wurden im Rahmen der Kalibrierung systematisch optimiert, um das bestmögliche Ergebnis vor dem Hintergrund der Anforderungen im HGM zu erzielen (plausible Wertebereiche, Randbedingungen, Vergleiche mit Messungen).

3.4 Randbedingungen

Die Anlage 2.3 zeigt die im Modell umgesetzten Randbedingungen in einer Übersicht:

- Der Modellrand ist im Südwesten durch Gewässer, am Nordrand im Bereich des Maintals durch Randzufluss und im Übrigen durch Randstromlinien (kein Austausch von Grundwassers über die Grenze hinweg) definiert.
- Mittels einer Neumann Randbedingung (2. Art Randbedingung, vorgegebener Zufluss) ist ein mittlerer Randzustrom in den MGWL am Nordrand im Bereich des Maintals von 66 l/s angesetzt. Der Randzufluss ist basierend auf einer Auswertung des WWA Aschaffenburg vorgegeben worden. Details finden sich im HGM.
- Der Main und die Nebengewässer sind als Cauchy-Randbedingung (3. Art Randbedingung) bzw. Leakage-Knoten integriert. Der Verlauf der Gewässer ist auf Grundlage der TK25 digitalisiert und in das Modell übernommen.
- Die Brunnen mit den Entnahmen von 2013 sind als Mehrschichtbrunnen berücksichtigt, da sie in der Regel über mehrere Schichten verfiltert sind (mit Ausnahme der Horizontalfilterbrunnen, siehe Abschnitt 3.6).

Zudem zeigt die Anlage 2.3 die Sohdurchlässigkeit der Gewässer bzw. den Leakagekoeffizient (Feflow-Transferrate: Quotient aus Durchlässigkeit und Dicke der Gewässersohle):

- Der Leakagekoeffizient der Nebengewässer und insbesondere der Mainsohle im Bereich Sulzfeld / Marktstef ist das Ergebnis detaillierter stationärer und instationärer Modelluntersuchungen (Abschnitt 4).
- Im Bereich Sulzfeld / Marktstef ist die Mainsohle tendenziell geringer durchlässig als in übrigen Abschnitten, was die getroffenen Aussagen im HGM bestätigt (verstärkte Kolmation im brunnennahen Bereich).
- Die Größenordnung des Leakagekoeffizients im Main liegt im vorgegebenen Bereich (HGM) von $1 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ bis $5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Die Mainwasserstände in den Stauhaltungen innerhalb des Modells gehen auf Tabelle 3 zurück und sind entsprechend in das Modell übertragen worden. Für die Stauhaltung Marktbreit stehen Pegeldaten zur Verfügung; weitere Details werden mit der Beschreibung der aufgebauten Modellrechnungen im Abschnitt 3.8 erläutert.

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstett - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Tabelle 3: Stauhaltungen des Mains im Modellgebiet (Angaben der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV))

Wehr	Main-Km	Wasserstand Oberwasser [mNN]	Wasserstand Unterwasser [mNN]	Fallhöhe [m]
Dettelbach	295,398	187,70	182,20	5,50
Kitzingen	283,979	182,20	178,54	3,66
Marktbreit	275,681	178,54	175,23	3,31
Großmannsdorf	269,028	175,23	171,83	3,40
Randersacker	258,885	171,83	161,53	10,30

Die Wasserstände der Nebengewässer sind auf Basis des digitalen Geländemodells hergeleitet, indem entlang des Gewässerverlaufs ein Meter von der Geländehöhe aus dem DGM25 abgezogen wurde. Seen sind im Modell als Grundwasserblänke ($k_f = 1$ m/s, nutzbare Porosität = 1) enthalten. In einigen Fällen sind die Seen gemäß HGM - Anlage 4.4 in [11] - an den Main angeschlossen. In diesem Fall werden sie als Leakage-Randbedingung bzw. als Gewässer implementiert und erhalten den Wasserstand des Mains (Abbildung 6). Das Sohlniveau des Baggersees ehemalige Kiesgrube Wülfert im Norden der Abbildung 6 liegt bei 174 mNN; entsprechend erfolgt die Umsetzung der Sohltiefe im Modell.

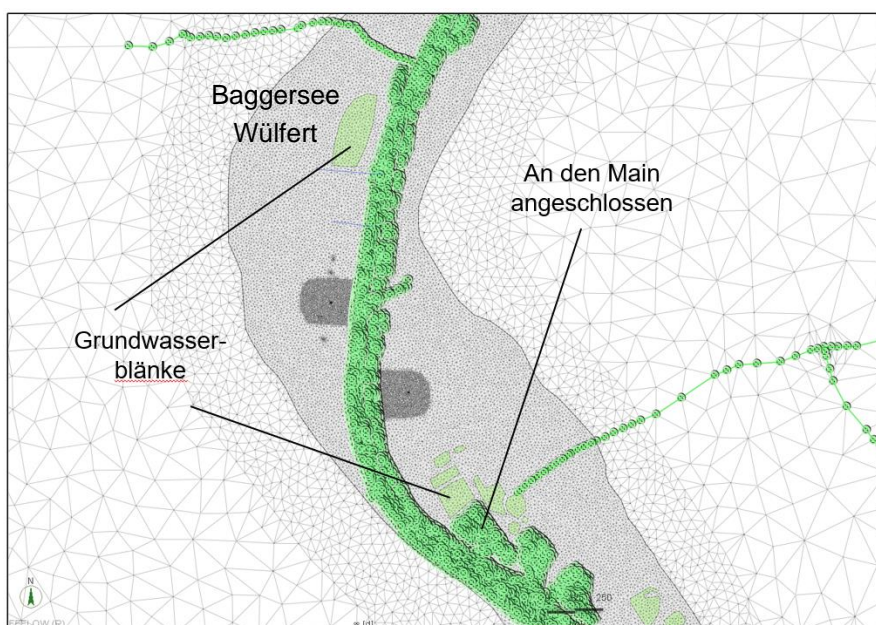


Abbildung 6: Seen im Grundwassermodell (grüne Punkte = Gewässerknoten)

3.5 Grundwasserneubildung

Die Anlage 2.4 stellt die langjährige, mittlere Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1971 bis 2018 dar. Die Grundwasserneubildung ist mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW berechnet und in der aktuellsten, überarbeiteten Fassung (2020) vom LfU zur Verfügung gestellt worden (Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, www.lfu.bayern.de, übermittelt am 13.11.2020). Für das Stadtgebiet Kitzingen liegen keine Daten vor, daher sind die Werte im Stadtgebiet aus der älteren

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Version (Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, www.lfu.bayern.de, übermittelt am 08.05.2018) übernommen worden. Das langjährige Mittel im Modellgebiet beträgt dann 83 mm/a bzw. 2,6 l/s/km².

3.6 Brunnen der FWF

Vertikalfilterbrunnen der FWF

Die Vertikalfilterbrunnen (N1, N2, S1, S2) sind als Mehrschichtbrunnen exakt mit den entsprechenden Entnahmehorizonten bzw. den Filterstrecken im Grundwassermodell umgesetzt. Da im quartären Grundwasserleiter mehrere Schichten zur Verfügung stehen (Abschnitt 3.2), werden diese Schichten zur exakten Umsetzung der Entnahmehorizonte verwendet.

Horizontalfilterbrunnen (HFB) Sulzfeld / Marktsteft

Die Horizontalfilterbrunnen bestehen neben dem Pumpensystem im Wesentlichen aus einem Brunnen-schacht, von dem aus Filterstränge in jeweils zwei Höhenniveaus horizontal in den Untergrund ge-trieben sind. Die Filterstränge liegen auf folgenden Niveaus (siehe auch Abbildung 9):

- HFB Sulzfeld oben / unten: 164,05 mNN / 161,55 mNN
- HFB Marktsteft oben / unten: 172,62 mNN / 170,12 mNN

Die Filterstränge sind mit Hilfe der in Feflow verfügbaren, sog. „discrete feature elements“ umgesetzt. Das sind spezielle Elemente, die entlang des bestehenden Modellnetzes (Kanten, Flächen) definiert werden, über eigene Fließeigenschaften verfügen und zur Berücksichtigung von Störungen, Klüften, Röhren oder ähnlichem vorgesehen sind.

Um die Filterstränge im Modell abzubilden, werden diese speziellen Elemente entlang von Kanten des vordefinierten Modellnetzes auf entsprechendem Höhenniveau eingesetzt (Abbildung 7 - Abbildung 9). Die Fließeigenschaften sind nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille definiert (berechnet Volumenstrom in einer Röhre mit laminarer Strömung).

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

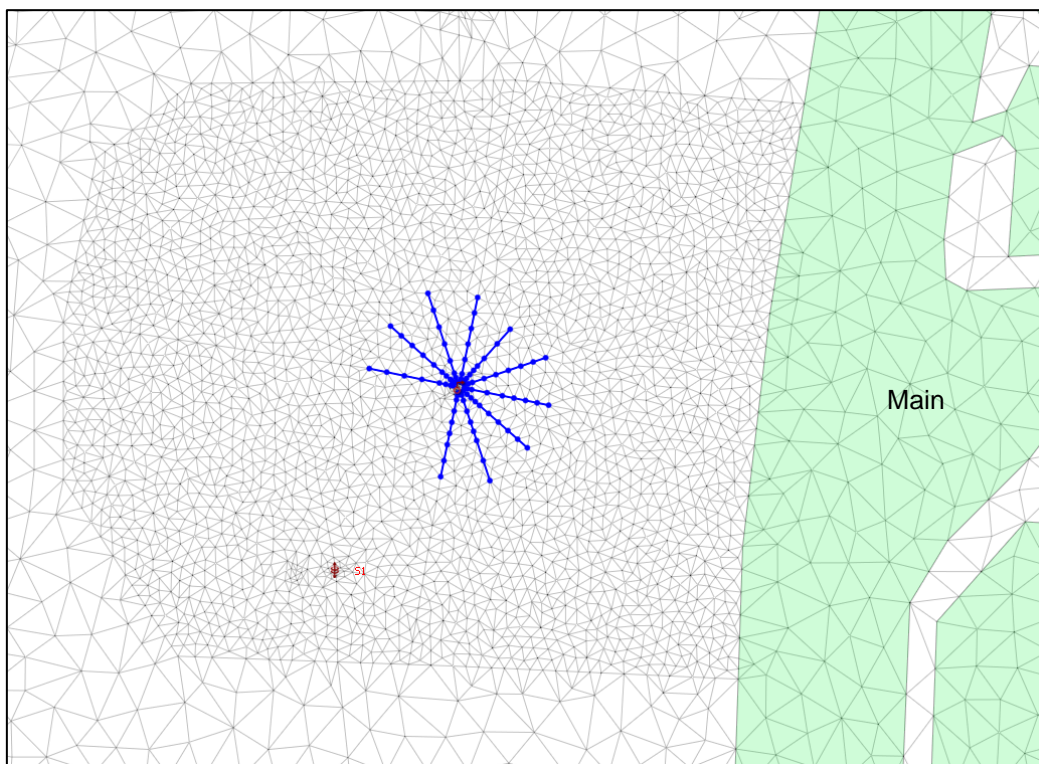


Abbildung 7: Filterstränge als „discrete feature elements“ (blau) - HFB Sulzfeld

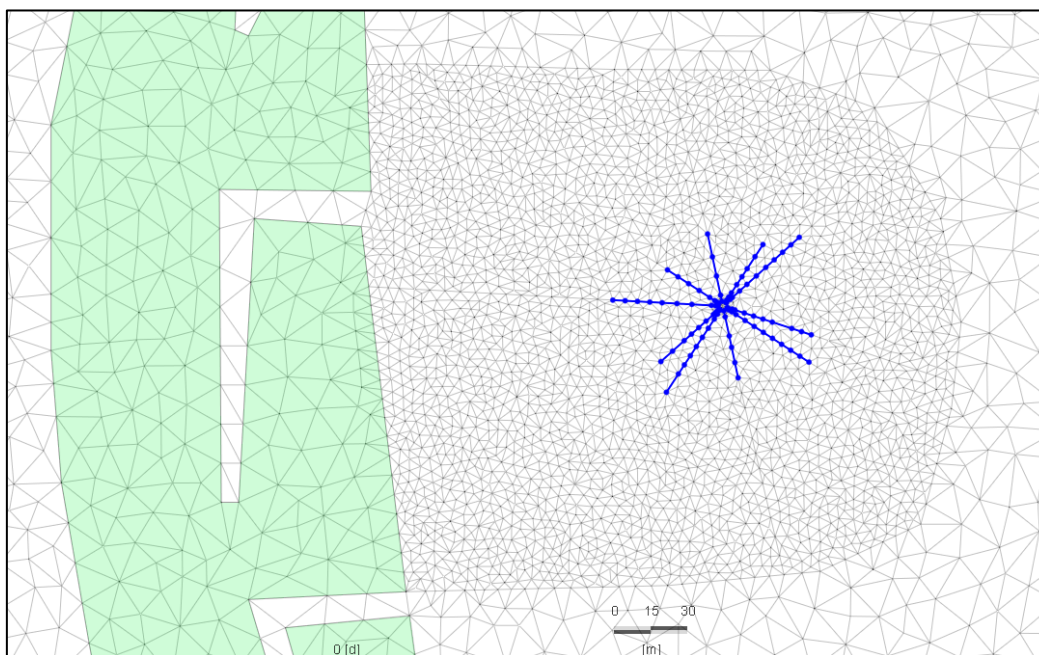


Abbildung 8: Filterstränge als „discrete featre elements“ (blau) - HFB Marktsteft

Horizontalstränge im radialen Schnitt - Horibrunnen Marktstett

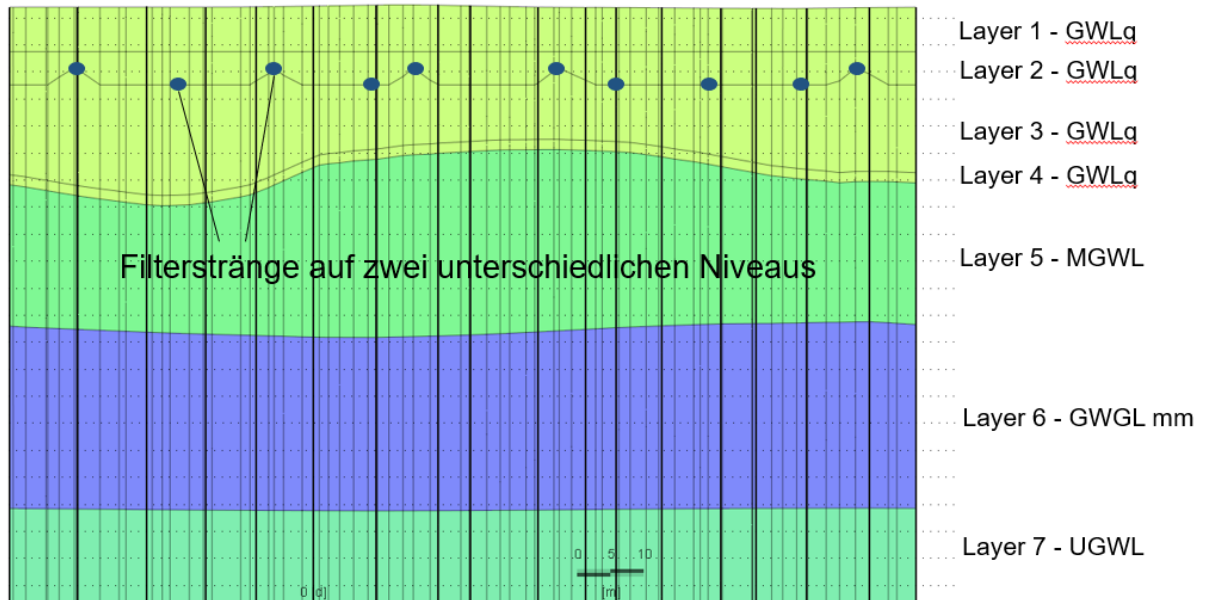


Abbildung 9: Radialer Schnitt um den Brunnenschacht durch die Filterstränge am Horizontalfilterbrunnen Marktstett (Layer 7 ist nicht vollständig abgebildet)

3.7 Störungssystem

Das Störungssystem in Abbildung 10 und Anlage 2.3 ist ebenfalls mit Hilfe der in Feflow verfügbaren, sog. „discrete feature elements“ umgesetzt. In Abbildung 10 ist das Störungssystem zusammen mit dem Modellnetz dargestellt. Entlang der einzelnen Störungen ist das Modellnetz verfeinert, um den Verlauf genau abzubilden.

Im vorliegenden Fall des Störungssystems sind gut durchlässige, vertikale Flächenelemente im Grundwasserleiter definiert, die eine bevorzugte Grundwasserströmung entlang dieser Elemente erlauben. Die Strömungsberechnung innerhalb dieser Elemente erfolgt in diesem Fall nach Darcy mit einer Durchlässigkeit in den Störungsebenen von $k_f = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

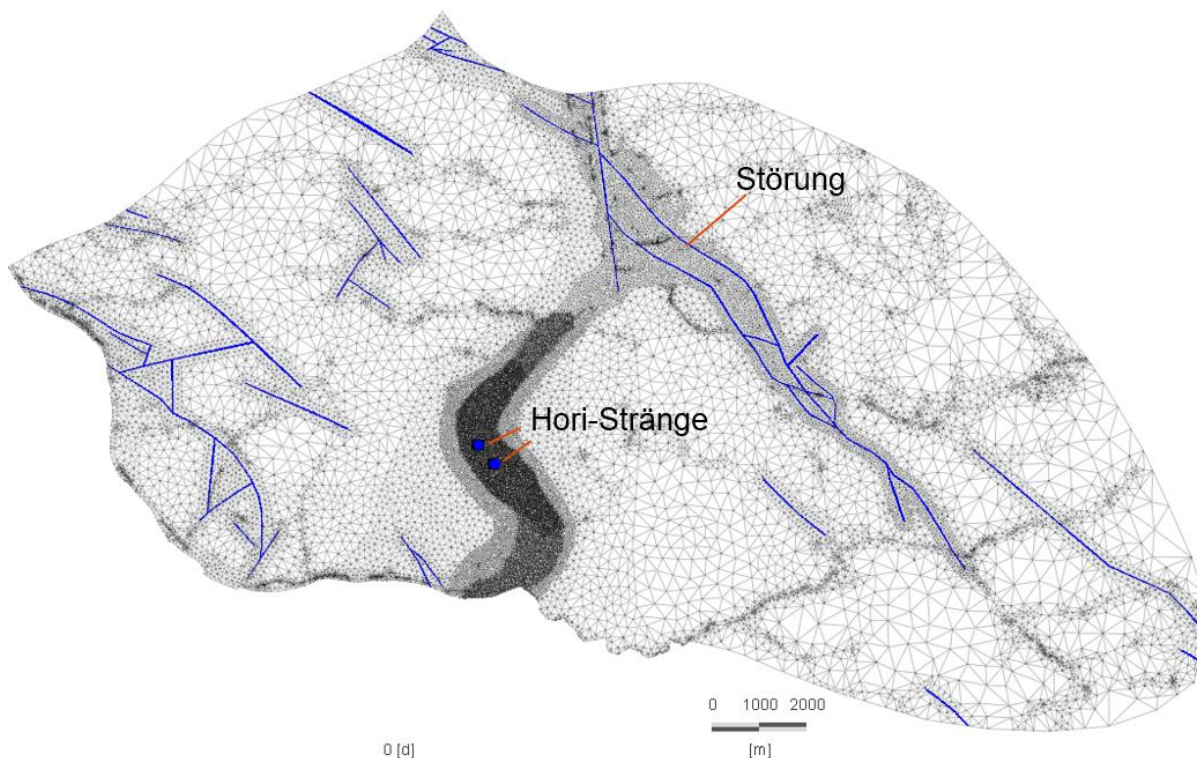


Abbildung 10: Störungssystem (blaue Linien)

3.8 Modellberechnungen zur Kalibrierung

3.8.1 Übersicht

Die Modellkalibrierung setzt sich aus drei Schritten mit unterschiedlichen Randbedingungen zusammen:

1. Stationäre Kalibrierung mittlere Strömungsverhältnisse 2013

Ziel ist die Kalibrierung der großräumigen Grundwasserströmung des OGWL, MGWL und UGWL im gesamten Modellgebiet. Eine Detailkalibrierung des quartären Grundwasserleiters im Bereich Sulzfeld / Marktstef erfolgt im Rahmen der instationären Kalibrierung (Schritt 2), da für diesen Zeitraum die zur Verfügung stehende Datenlage deutlich besser ist. Gemäß HGM entsprechen die Grundwasserstände der im September 2013 großräumig im gesamten Modellgebiet durchgeführten Stichtagsmessung in etwa den langjährigen, mittleren Grundwasserständen. Daher wird diese Stichtagsmessung zur stationären Modellkalibrierung von langjährig, mittleren Strömungsverhältnissen herangezogen.

2. Instationäre Kalibrierung Pumpversuch 2018 - 2019

Ziel ist es, die Grundwasserströmung im quartären Grundwasserleiter im Bereich Sulzfeld / Marktstef sowie die hydraulische Reaktion im Grundwasser nachzubilden, die in Folge der Grundwasserförderung an den FWF-Brunnen ausgelöst werden. Ende Juli 2018 bis Mai 2019

wurde im Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft ein dreistufiger Langzeit-Pumpversuch an den Brunnen der FWF durchgeführt.

Die während des Pumpversuchs aufgezeichneten Grundwasserganglinien an Messstellen im Umfeld des Gewinnungsgebietes werden im Rahmen der Kalibrierung möglichst gut nachgebildet. Zusätzlich werden die vier Stichtage (vor Beginn Pumpversuch und jeweils zu Ende der drei Pumpversuchsstufen) zur Kalibrierung des Modell herangezogen. Des Weiteren sind im HGM aus der Analytik des Förderwassers die Uferfiltratanteile bestimmt worden. Die Nachbildung der Uferfiltratanteile ist ebenfalls ein zentraler Bestandteil der instationären Kalibrierung.

3. Instationäre Validierung (Modelltest) Hochwasser 2013

Nachdem das Grundwassermodell stationär und instationär kalibriert ist, wird das Modell einem Test unterzogen. Mit dem Modell wird ein weiteres hydrologisches Ereignis nachgerechnet. Im vorliegenden Fall wird das Hochwasser Mai / Juni 2013 gewählt (da während dieses Zeitraums vergleichsweise starke Variationen in den Grundwasserständen beobachtet wurden) und die berechneten Reaktionen im Grundwasser mit den Messwerten verglichen.

In den folgenden Abschnitten werden die Randbedingung beschrieben, die der stationären, der instationären Kalibrierung sowie der Validierung zu Grunde liegen. Die Ergebnisse der Modellberechnungen werden in Abschnitt 4 erläutert.

3.8.2 Stationäre Kalibrierung mittlere Strömungsverhältnisse 2013

Mainwasserstände

Die Wasserstände des Mains in der Stauhaltung Marktbreit wurden wie folgt umgesetzt. An den Pegeln Kitzingen UP, Sulzfeld und Marktbreit OP sind die gemessenen Wasserstände für die lineare Interpolation entlang des Gewässerverlaufs zwischen den Pegeln verwendet worden. Die Lage der Pegel ist der Anlage 1.1 zu entnehmen. Für die stationäre Kalibrierung bilden die Mittelwerte des Jahres 2013 die entsprechenden Interpolationsstützpunkte:

- Pegel Kitzingen UP: 179,16 mNN
- Pegel Sulzfeld: 178,94 mNN
- Pegel Marktbreit OP: 178,72 mNN

Sonstige Gewässer und Randzufluss

Die übrigen Gewässer und der Randzufluss im Norden des Modells werden unverändert aus dem Modelllaufbau übernommen.

Grundwasserentnahmen

Im Jahr 2013 fördern die in Anlage 2.3 dargestellten und in Anlage 2.5 tabellarisch erfassten Brunnen rd. 4,3 Mio. m³/a im gesamten Modellgebiet. Die Wassergewinnung Sulzfeld / Marktsteft entnimmt in diesem Jahr rd. 2,4 Mio. m³/a Grundwasser.

Grundwasserneubildung

Für die stationäre Kalibrierung wird die mittlere Grundwasserneubildung 1971 - 2018 angesetzt (siehe auch Abschnitt 3.5).

3.8.3 Instationäre Kalibrierung Pumpversuch 2018 - 2019

Mainwasserstände

Die Wasserstände des Mains in der Stauhaltung Marktbreit wurden basierend auf Pegeldata wie folgt umgesetzt. Für die instationäre Kalibrierung des Pumpversuch im Zeitraum 2018 – 2019 wurden die Tageswerte der drei Pegel Kitzingen UP, Sulzfeld und Marktbreit OP ins Modell übertragen und die Wasserstände zwischen den Pegeln interpoliert. Die Messwerte des Pegels Sulzfeld sind zeitlich nicht hoch aufgelöst; daher wurde die Ganglinie aus den beiden anderen abgeleitet und anhand der vorhandenen Messwerte angepasst. Die entsprechenden Ganglinien sind der Anlage 3.1 zu entnehmen. Der Mainwasserstand am Pegel Kitzingen UP schwankt in der Zeit des Pumpversuch zwischen 178,8 mNN und maximal 180,4 mNN.

Sonstige Gewässer und Randzufluss

Die übrigen Gewässer und der Randzufluss im Norden des Modells wurden unverändert aus dem Modelllauf übernommen.

Grundwasserentnahmen

Die Grundwasserentnahmen an den FWF-Brunnen sind basierend auf Tagessummen für den Zeitraum Sommer 2018 bis Sommer 2019 in das Modell integriert (Anlage 3.2). Diese Periode deckt den Zeitraum des dreistufigen Pumpversuchs ab. Die mittleren Entnahmeraten der drei Stufen des Pumpversuches sind folgend aufgeführt:

- Stufe 1 (234 Tage): 21.227 m³/d bzw. 884 m³/h
- Stufe 2 (42 Tage): 37.371 m³/d bzw. 1.557 m³/h
- Stufe 3 (5 Tage): 41.696 m³/d bzw. 1.727 m³/h

Die übrigen Entnahmen wurden aus dem Rechenlauf der stationären Kalibrierung übernommen.

Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildungsdaten liegen in Jahresmittelwerten vor, so dass eine langjährig, mittlere Neubildung berechnet werden kann. Ein zeitlich höhere Auflösung der Grundwasserneubildungsdaten kann nach Angaben des LfU aus verfahrenstechnischen Gründen nicht geliefert werden. Für die instationäre Kalibrierung des Pumpversuchs 2018 – 2019 ist eine zumindest monatliche Variation der Neubildung allerdings sinnvoll.

Die von der LfU bereitgestellten Daten setzen sich aus der Sickerwasserrate, dem Base-Flow-Index (BFI-Faktor) und der resultierenden Grundwasserneubildung zusammen. Zur Ermittlung der flächendifferenzierten, mittleren Grundwasserneubildung wird die flächenbezogene Sickerwasserrate mit dem jeweiligen BFI multipliziert, um die Sickerwasserrate auf den Basisabfluss (=Grundwasserneubildung ohne den Direktabfluss) zu korrigieren.

Die Sickerwasserrate steht im vorliegenden Datensatz monatsweise zur Verfügung. Anhand der Abweichung der monatlichen Sickerwasserraten vom langjährigen Mittelwert wird ein Monatsfaktor abgeleitet, der zur monatlichen Variation der mittleren Grundwasserneubildung eingesetzt wird. Dieser Faktor liefert eine grobe Abschätzung über die zeitliche Änderung der Grundwasserneubildung ohne Berücksichtigung des Direktabflusses.

In der Anlage 3.3 ist die resultierende, monatliche Grundwasserneubildung im Modellgebiet für den Zeitraum des Pumpversuchs dargestellt. Es ist zu erkennen, dass zu Beginn des Pumpversuchs Ende Juli die für 2018 charakteristischen, trockenen Bedingungen vorherrschen und erst im Winter ab Dezember 2018 wieder höhere Neubildungsraten zur Auffüllung des Grundwasservorrates auftreten. Der Mittelwert für den Zeitraum 2018 / 2019 beträgt danach 2,3 l/s/km² gegenüber dem Mittel 1971 - 2015 von 2,7 l/s/km² (bezogen auf die Originaldaten ohne Stadtgebiet Kitzingen). Damit liegt dieser trockene Zeitraum etwa 15 % unter dem langjährigen Mittelwert.

3.8.4 Instationäre Validierung Hochwasser 2013

Mainwasserstände

Die Wasserstände des Mains in der Stauhaltung Marktbreit wurden wie folgt umgesetzt. Für die Validierung wurden die Tageswerte der Hochwasserwelle April bis August 2013 der drei Pegel Kitzingen UP, Sulzfeld und Marktbreit OP ins Modell übertragen und die Wasserstände zwischen den Pegeln interpoliert. Die Messwerte des Pegels Sulzfeld sind zeitlich nicht hoch aufgelöst; daher wurde die Ganglinie aus den beiden anderen abgeleitet und anhand der vorhandenen Messwerte überprüft. Die entsprechenden Ganglinien finden sich in der Anlage 4.1.

Das Hochwasser 2013 mit einem Wasserstand von 521 cm und einem maximalen Abfluss von 903 m³/s am Pegel Würzburg [12] entspricht dort etwa einem HQ₅ (920 m³/s [12]). Die Hochwasserwelle beginnt um den 26.05.2013, hat ihren Höhepunkt am 05.06.2013 und sinkt dann bis zum 11.07.2013 wieder auf Normalniveau. Der Wasserstand am Pegel Kitzingen UP schwankt von April bis August zwischen rd. 178,8 mNN und 182,5 mNN.

Aufgrund der verstärkten Strömungsbedingungen im Main während des Hochwassers werden Sedimentstoffe aufgewirbelt und das Wasser beansprucht eine größere Fläche aufgrund des höheren Wasserstands (überstaute Böschungsbereiche, Ausuferung). Um diese Effekte (erhöhtes Infiltrationsvermögen) in das Grundwassermodell zu integrieren, wird die Sohdurchlässigkeit des Mains für den Zeitraum des Hochwassers 2013 entsprechend um das 100-fache erhöht.

Seen und Gräben bei Sulzfeld

Der Baggersee der ehemaligen Kiesgrube Wülfert nördlich der Sulzfelder Brunnen wird bei höheren Mainwasserständen ab etwa einem korrespondierenden Mainwasserstand von 180 mNN geflutet (nach Hochwassergefahrenkarten des LfU bereits bei HQ_{Häufig}). Ab einem Mainwasserstand von 180 mNN wurde der Seefläche der Wasserstand des Mains zugewiesen. Auch wurde ein Rückstau in zwei Gräben südlich davon in Höhe der Messstellen GP1 und N11 (von 179,5 mNN bis 181,4 mNN) berücksichtigt.

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstef - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Sonstige Gewässer und Randzufluss

Die übrigen Gewässer und der Randzufluss im Norden des Modells wurden unverändert aus dem Modelllauf übernommen.

Grundwasserentnahmen

Die Grundwasserentnahmen an den FWF-Brunnen wurden basierend auf Tagessummen für den Zeitraum April bis August 2013 in das Modell integriert (Anlage 4.2).

Die übrigen Entnahmen wurden aus dem Rechenlauf der stationären Kalibrierung übernommen.

Grundwasserneubildung

Für die Validierung wurde die mittlere Grundwasserneubildung 1971 - 2018 angesetzt (siehe auch Abschnitt 3.5).

4 Modellkalibrierung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Kalibrierung erläutert, die sich aus den folgenden Schritten zusammensetzt:

- Stationäre Kalibrierung mittlere Strömungsverhältnisse 2013
- Instationäre Kalibrierung des Pumpversuches 2018 - 2019
- Instationäre Validierung Hochwasser 2013

Ein Maß für die Qualität einer Modellkalibrierung liefert der mittlere, relative Modellfehler nach der Definition in den Technischen Regeln DVGW-Arbeitsblatt W 107 [8]. Dafür wird die mittlere, absolute Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Werten in Relation zu der maximal im Modellraum auftretenden Grundwasserstandsdifferenz gesetzt und in Prozent angegeben. Nach DVGW entspricht ein mittlerer, relativer Fehler kleiner 5 % einem guten Ergebnis, ein mittlerer Fehler kleiner 1 % einem sehr guten Kalibrierungsergebnis.

4.1 Berechnungsergebnisse stationäre Kalibrierung mittlere Strömungsverhältnisse 2013

Ziel der stationären Kalibrierung ist die großräumige Kalibrierung des OGWL, MGWL und UGWL im gesamten Grundwassermodell. Die entsprechenden Randbedingungen sind im Abschnitt 3.8.2 erläutert. Verfügbare Grundwassermessstellen im Modellgebiet sind in Anlage 1.1 dargestellt. Die quartären Grundwassermessstellen werden an dieser Stelle nicht ausgewertet. Die quartäre Grundwasserströmung wird im Detail im Rahmen der instationären Kalibrierung basierend auf vier Stichtagsmessungen 2018 / 2019 während des Pumpversuchs angepasst. Die ersten drei dieser Stichtagsmessungen geben quasi-stationäre Verhältnisse wieder.

In einem ersten Schritt wurde ein sogenannter Basislauf aufgebaut, der genau die Parameter und Randbedingungen enthält, die im HGM als Startwerte definiert sind. Dieser Basislauf weist in der Regel Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen auf, die im Rahmen der Kalibrierung auf ein Minimum reduziert werden sollen. Parameter wie Durchlässigkeiten des Untergrundes und Sohldurchlässigkeiten der Gewässer wurden im Rahmen der Unsicherheiten, die sich

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstett - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

aus deren Datenerfassung und Auswertung ergeben, variiert. Die ermittelten Parameterverteilungen des Kalibrierungslaufs sind im Abschnitt 3 beschrieben.

Die berechnete Grundwasserströmung des Kalibrierungslaufs ist in Form von Grundwasserhöhengleichungen in der Anlagenreihe 5 für die Grundwasserleiter OGWL, MGWL und UGWL dargestellt. In den Anlagen sind die Differenzen zwischen gemessenem und berechnetem Grundwasserstand an verfügbaren Messstellen des jeweiligen Grundwasserleiters eingetragen. Die Messwerte der Stichtagsmessung bestehen aus der Stichtagsmessung im September 2013 sowie aus zusätzlichen Messungen außerhalb des Stichtagszeitraums (in der Anlage entsprechend gekennzeichnet). An den Messstellen mit Messungen außerhalb des Stichtagszeitraumes ist eine höhere Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen zu erwarten.

In den Anlagen 5.1 (OGWL) und 5.2 (MGWL) sind für den Vergleich ergänzend die Grundwassergleichungen nach HGM dargestellt, die dort basierend auf der Stichtagsmessung ausgearbeitet wurden. In Bereichen, in denen Messwerte vorliegen, ist eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Gleichungen zu erkennen. Außerhalb dieser Bereiche bestehen teils Unterschiede zwischen der Strömung im HGM und der im Grundwassermodell. Das Grundwassermodell hat den Vorteil, dass es zahlreiche Randbedingungen und Parameter in einem Ergebnis, in Form der berechneten Grundwassergleichungen, zusammenführt.

Die Grundwasserstände im OGWL befinden sich insgesamt auf einem höherem Niveau als im MGWL. Im MGWL stehen um das Maintal sowie im Westen vergleichsweise viele Grundwasserstandsmessungen zur Verfügung. Der Schwerpunkt liegt daher auf der Anpassung insbesondere im Umfeld des Gewinnungsgebietes sowie dessen potentiellm Einzugsgebiet. Im Osten des MGWL sowie im ganzen UGWL sind keine Messungen verfügbar.

Im OGWL ist es möglich anhand der Austrittshöhen von Quellen zusätzliche Hinweise auf die Grundwasserströmung zu erschließen. Nordwestlich von Mönchsondheim im Osten des Modells liegt die Austrittshöhe einer Quelle bei 250 mNN, das Modell berechnet dort einen Grundwasserstand von rd. 247 mNN. Vor dem Hintergrund der Unsicherheit in der Erfassung des Grundwasserstandes und des starken Gefälles ist die Abweichung akzeptabel. Ein weitaus verlässlicherer Messwert befindet sich westlich an der Grundwassermessstelle Hofmann bei Mainbernheim (Abweichung 0,3 m vom Messwert). Eine weitere Quelle in der Nähe des Maintals bei Michelfeld weist eine Austrittshöhe von 209 mNN auf; das Modell berechnet einen Grundwasserstand von rd. 187 mNN. In verschiedenen Testrechnungen konnte der Wert nicht in die gemessene Größenordnung gebracht werden, was darauf hindeutet, dass diese Quelle vermutlich einen schwebenden Grundwasserleiter entwässert.

Die Anlage 5.3 stellt neben den berechneten Grundwassergleichungen des UGWL auch die Gleichungen des darüberliegenden MGWL dar. Grundsätzlich bildet sich eine ähnliche Strömungsrichtung in beiden Grundwasserleitern aus; das Gefälle im UGWL ist aber deutlich kleiner. Im Westen und Osten sind die beiden Grundwasserleiter hydraulisch deutlich voneinander getrennt. Die Druckunterschiede sind im Bereich Sulzfeld / Marktstett am geringsten. Im Bereich des Maintales unterstromig von Kitzingen wird davon ausgegangen, dass der UGWL über den in diesen Bereich weitgehend subrodierten und

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

zumindest bereichsweise als Grundwasserleiter ausgebildeten Geringleiter mm mit dem überlagernden MGWL ein gemeinsames Grundwasserstockwerk bildet (siehe auch HGM).

Eine tabellarische Zusammenstellung der berechneten und gemessenen Grundwasserstände an den einzelnen Messstellen ist der Anlage 5.4 zu entnehmen. In der Tabelle 4 sind die verbleibenden Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen statistisch ausgewertet. Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserstand sind zusätzlich jeweils in einer Punktwolke der gemessenen und berechneten Grundwasserstände für den Basislauf in Abbildung 11 und für den Kalibrierungslauf in Abbildung 12 grafisch visualisiert. Neben einer Darstellung der verbleibenden Abweichungen gibt die Darstellung in einer solchen Punktwolke auch Hinweise auf einen ggf. vorliegenden Trend in den Abweichungen.

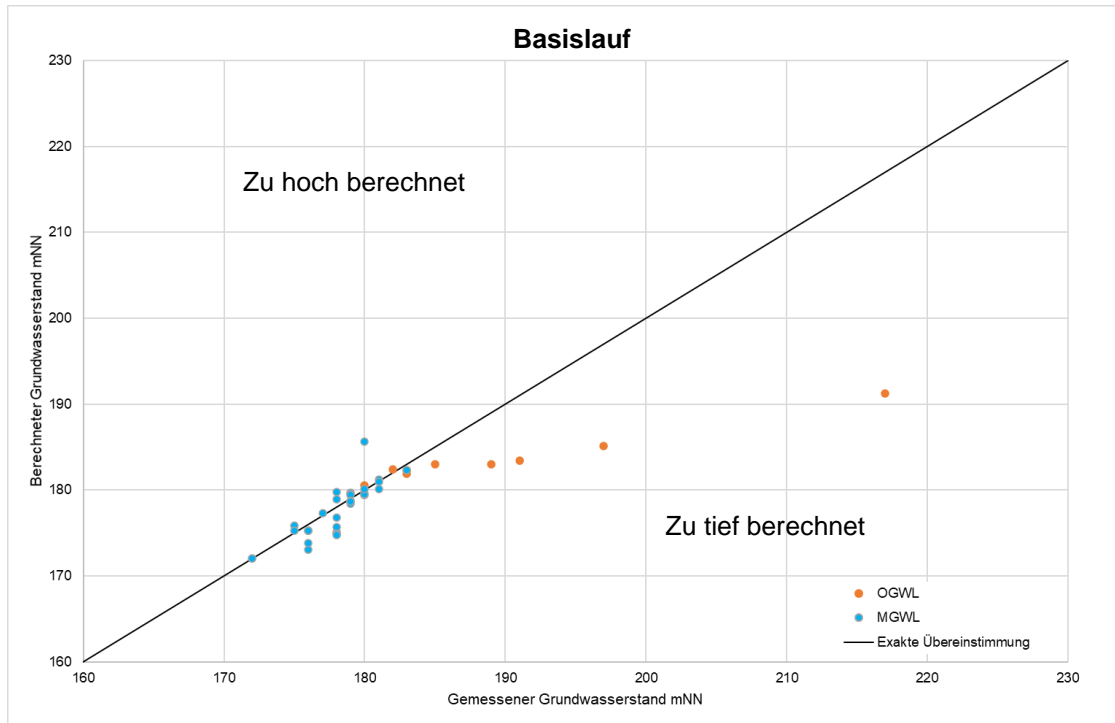


Abbildung 11: Punktwolke gemessen - gerechnet des Basislaufs

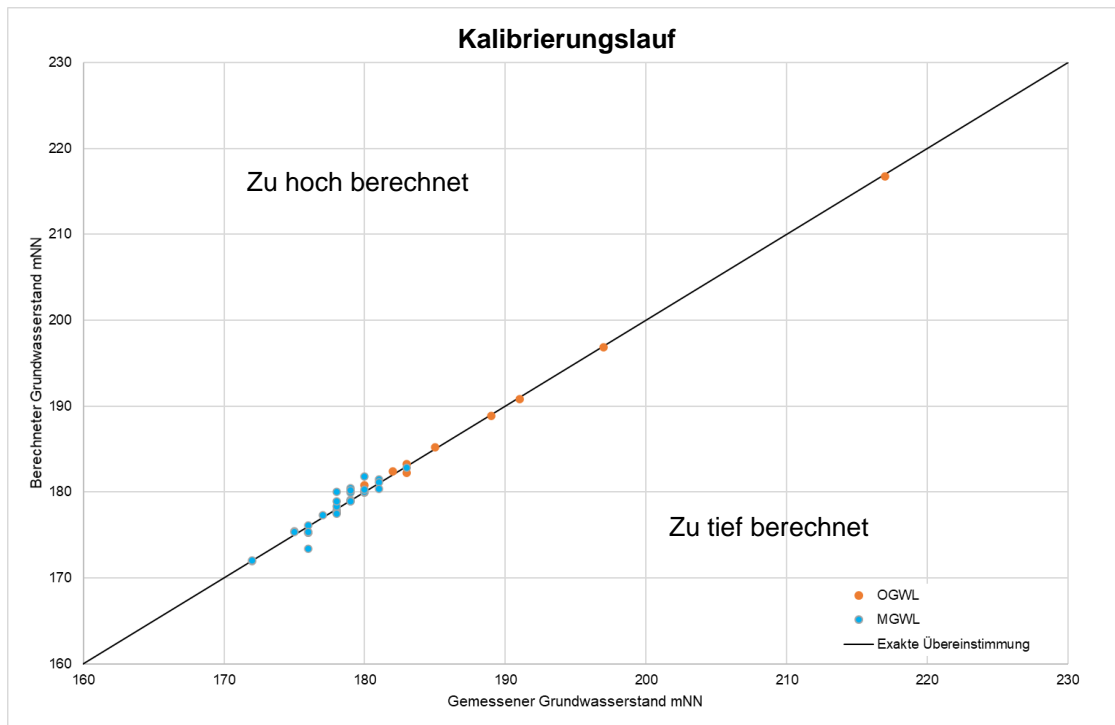


Abbildung 12: Punktwolke gemessen - gerechnet des Kalibrierungslaufs

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstett - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Tabelle 4: Statistische Auswertung gemessener / berechneter Grundwasserstände des Basis- und Kalibrierungslaufs

		Basislauf	Kalibrierungslauf
Mittlere Abweichung	m	1,6	-0,1
Standardabweichung	m	4,5	0,7
Mittl. absolute Abweichung	m	2,5	0,5
Mittlerer Fehler (DVGW A107)	%	5,5	1,1
Minimale Abweichung	m	-5,6	-2,0
Maximale Abweichung	m	25,7	2,6
Minimum gemessen	mNN	172,0	172,0
Maximum gemessen	mNN	217,0	217,0
Anzahl der Messstellen		43	43

Insgesamt sind folgende Charakteristika zu erkennen:

- Die Differenzbeträge zwischen gemessenem und berechnetem Grundwasserstand sind überwiegend kleiner 0,5 m (Anlagenreihe 5).
- Der mittlere Fehler nach DVGW A107 beträgt für den Kalibrierungslauf 1,1 %, also deutlich unter 5 %, was gemäß Technischen Regelwerk [8] eine gute, sogar fast sehr gute Modellkalibrierung bestätigt (bei kleiner 1 %). Der Fehler des Basislaufs liegt über 5 %.
- Die mittlere Abweichung des Kalibrierungslaufs ist klein. Die absolute Abweichung sowie die Standardabweichung konnte gegenüber dem Basislauf um den Faktor 5-6 verkleinert werden.
- Auffällig in der Punktwolke des Basislaufs (siehe Abbildung 11) sind zu niedrig berechneten Grundwasserstände im OGWL, hier zeigt sich ein deutlicher Trend in den Abweichungen. Dies konnte nur durch einen geringer durchlässigen Geringleiter mo im Liegenden erreicht werden.
- In der Punktwolke des Kalibrierungslaufs (siehe Abbildung 12) ist die Streuung im Vergleich zum Basislauf enger und gleichmäßiger um die mittlere Linie verteilt (Linie kennzeichnet exakte Übereinstimmung).

Abweichungen größer 0,5 m gehen auf folgende Ursachen zurück (Lage der Messstellen Anlage 1.1):

- Die Messung liegt außerhalb des Stichtagszeitraums (z. B. Messstelle Segnitz / GwMP16 (MGWL) bei Marktbreit; siehe auch Tabelle in Anlage 5.4).
- Die Messung gibt den Grundwasserstand eines Brunnens an. Brunnenwasserspiegel können mit dem Grundwassermodell auf Grund der Betriebsweise bzw. Brunneneffekte nicht immer exakt nachgebildet werden (z. B. Br. K4 (OGWL) zwischen Kitzingen und Sulzfeld).
- Die Filterstrecke der Messstelle erschließt nicht exakt den Grundwasserleiter und ist daher hydraulisch durch angrenzende Geringleiter / Grundwasserleiter beeinflusst (z. B. Kitzingen / Br TSV (OGWL) bei Hohenfeld).
- Die Messstellen sind hydraulisch unterschiedlich effektiv an den Kluft-/Karstgrundwasserleiter angebunden. Z. B. sind die Messstellen LKW-GM1 und LKW-GM2 im MGWL zwischen Kitzingen und Sulzfeld wahrscheinlich über Kluft-/Karsthohlräume gut an die östlich gelegenen Entnahmehäuser angebunden. Dies kann den für das Umfeld niedrigen Messwert von 179,0 mNN erklären. Ein weiteres Beispiel ist die Messstelle NB NIV bei

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Sommerhausen im Westen des Modells, die deutlich zu tief berechnet wird. Die Messstelle liegt im Bereich des tektonischen Störungssystems. Die lokalen Effekte können mit dem Modell nicht nachgebildet werden.

Die Modellbilanz der hier durchgeführten stationären Berechnung gibt Auskunft über alle berechneten Zu- und Abflüsse im Modellraum. Die Bilanz des Kalibrierungslaufs (Tabelle 6) wird zur Plausibilisierung mit der Bilanz aus dem HGM (Tabelle 5) verglichen:

- Im HGM basiert die Grundwasserneubildung auf einer alten Fassung der Berechnung des LfU (Datenzugang 2019), die ein niedrigeres Gebietsmittel von 2,1 l/s/km² ausweist. In der aktuellen Fassung mit 2,6 l/s/km² strömt dem Modellgebiet daher netto 126 l/s mehr zu.
- Die Datengrundlage der Grundwasserförderung unterscheidet sich. Für die Anpassung an die Stichtagsmessung September 2013 werden Grundwasserentnahmen des Jahres 2013 berücksichtigt. Die Brunnen der Wassergewinnung Sulzfeld / Marktsteft fördern 2,4 Mio. m³ Grundwasser in diesem Jahr.
- Der Main stellt den Hauptvorfluter dar, der das gesamte Modellgebiet entwässert. In der Gesamtsumme nimmt der Main 655 l/s vom Grundwasser auf. Je nach Lage des Wasserspiegels im Main liegen bereichsweise (z.B. oberstrom der Staustufen) auch influente Verhältnisse vor.
- Die Wechselwirkung zwischen Grundwasser und Gewässern wird im Grundwassermodell jeweils wasserstandsabhängig berechnet (Netto-Abstrom in alle Gewässer 552 l/s). Da im HGM die Neubildung kleiner ausfällt, ist dort auch der Abstrom in die Gewässer kleiner (netto 370 l/s).
- Infiltration aus dem Main tritt im Gewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft durch die abgesenkten Grundwasserstände im Umfeld der FWF-Brunnen auf. Auch im Bereich der Mainstaustufen kommt es zur Infiltration; aus dem eingestauten, oberstromigen Abschnitt infiltriert Wasser, um teilweise unterstromig wieder zu exfiltrieren.
- Aus den Nebengewässern strömen im Modell 109 l/s dem Grundwasser zu. In Anbetracht einer Gewässerslänge von insgesamt rd. 200 km im Modellgebiet, ist die Infiltrationsmenge von 0,5 l/s auf 1 km Gewässerslänge im Mittel relativ klein.

Tabelle 5: Modellbilanz nach HGM

HGM	Zustrom	Abstrom	Zustrom	Abstrom
Bilanzgröße	l/s	l/s	Mio. m ³ /a	Mio. m ³ /a
Grundwasserneubildung (Mittel 1951 – 2015)	495	0	15,6	0
Randzustrom	66	0	2,1	0
Grundwasserentnahme (Daten 2016)	0	-191	0	-6,0
Austausch mit Gewässern	20	-390	0,6	-12,3
Summe	581	-581	18,3	-18,3

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Tabelle 6: Modellbilanz im Grundwassermodell

Kalibrierung Mittlere Strömung 2013	Zustrom	Abstrom	Zustrom	Abstrom
Bilanzgröße	l/s	l/s	Mio. m ³ /a	Mio. m ³ /a
Grundwasserneubildung (Mittel 1971 – 2018)	647	-26	20,4	-0,8
Randzustrom	66	0	2,1	0
Grundwasserentnahme (Daten 2013)	0	-136	0	-4,3
Austausch mit Gewässern gesamt	241	-793	7,6	-25,0
Main	132	-787	4,2	-24,8
Nebengewässern	109	-6	3,4	-0,2
Summe	954	-954	30,1	-30,1

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die stationäre Kalibrierung an mittlere Strömungsverhältnisse vor dem Hintergrund der Komplexität eines Kluft- / Karstgrundwassersystems ein gutes bis sehr gutes Ergebnis erzielt.

4.2 Berechnungsergebnisse instationäre Kalibrierung Pumpversuch 2018 - 2019

Eine Detailkalibrierung des Bereiches um die Wassergewinnung Sulzfeld / Marktsteft erfolgt anhand des dreistufigen Langzeit-Pumpversuches vom Juli 2018 bis Mai 2019. Die Messstellen mit Datenloggeraufzeichnungen während des Pumpversuchs in Anlage 1.2 sind mit Ausnahme der Messstellen M1 bis M4 im quartären Grundwasserleiter verfiltert. Die Messstellen M1 bis M4 erschließen den Tiefenbereich des MGWL (Muschelkalk). 25 Messstellen liegen auf Sulzfelder Seite und 15 Messstellen befinden sich im Bereich Marktsteft.

Die folgenden Randbedingung variieren täglich bzw. monatlich in oben genannten Zeitraum und sind im Detail im Abschnitt 3.8.3 erläutert:

- Grundwasserneubildung (monatlich)
- Mainwasserstände (täglich)
- Grundwasserentnahmen an den Brunnen der FWF (täglich)

Im Rahmen der instationären Detailkalibrierung werden zur Erfassung der Sensitivitäten einzelner Parameter in Abstimmung mit dem LfU zusätzliche Berechnungen durchgeführt. Ziel ist es die Auswirkung gezielt gewählter Parameterkombinationen zu erfassen. Eine Übersicht der Sensitivitätsläufe ist der Tabelle 7 zu entnehmen. Die Berechnungsergebnisse werden nachfolgend erläutert.

Tabelle 7: Übersicht der Rechenläufe zur Untersuchung der Sensitivitäten

Rechenlauf (Anhang)	Parametervariation
I	Sohldurchlässigkeit des Mains um Faktor 5 erhöht
II	Sohldurchlässigkeit des Mains um Faktor 2,5 verringert
III	Ohne Trennschicht zwischen Quartär und MGWL
IV	Mit flächig verbreiteter Trennschicht zw. Quartär und MGWL
V	Reduzierte Durchlässigkeit / Porosität im MGWL
VI	Sohldurchlässigkeit des Mains um Faktor 5 nur im Bereich N15, S2a erhöht
VII	Sohldurchlässigkeit des Mains um Faktor 5 nur im Bereich N15, S2a, GP1 erhöht

4.2.1 Berechnete Grundwasserstände

Stichtagsmessungen

Während des Pumpversuches wurde an vier Terminen eine Stichtagsmessung an den Grundwasser-messstellen im Bereich Sulzfeld / Marktstef durchgeführt:

- Vor dem Pumpversuch: 25.07.2018
- Ende der ersten Pumpstufe (234 Tage): 12.03.2019
- Ende der zweiten Pumpstufe (42 Tage): 01.05.2019
- Ende der dritten Pumpstufe (5 Tage): 07.05.2019

Die Grundwasserströmung am Stichtag vor dem Pumpversuch sowie am Ende der ersten beiden Pumpstufen erreicht jeweils quasi-stationäre Verhältnisse. Am Ende der dritten Stufe ist die Strömung nach den 5 Tagen dieser Pumpversuchsstufe noch nicht stationär.

Für diese Stichtagsmessungen ist der berechnete Grundwasserstand aus dem instationären Rechenlauf in Anlage 6.3 bis 6.6 in Form von Grundwassergleichen und den Abweichungen an den Messstellen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen dargestellt. Ziel ist es eine Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Grundwasserstand von betragsmäßig 0,3 m zu unterschreiten. Die Anlagen 6.3 bis 6.6 zeigen, dass dieses Ziel weitgehend erreicht ist. In Tabelle 8 sind die statistischen Daten des jeweiligen Stichtags zusammengestellt:

- Die mittlere Abweichung liegt bei maximal 0,12 m. Die Standardabweichung und die mittlere, absolute Abweichung bleiben deutlich unter 0,5 m.
- Der mittlere Fehler (nach DVGW A107) liegt in allen Fällen unter 5 %, was gemäß Technischen Regelwerk [8] eine gute Modellkalibrierung bestätigt.

Der mittlere Fehler in der Statistik nimmt im Verlauf des Pumpversuches geringfügig zu (auch der Tatsache geschuldet, dass die Spannbreite der Messwerte im Verlauf des Pumpversuches ansteigt). In der letzten Pumpstufe ist der Fehler am größten. Aufgrund der kürzeren Pumpphase ist das hydraulische System noch dabei sich der neuen Belastung anzupassen. Die Veränderungen pro Zeiteinheit sind deutlich größer als z. B. am Ende der ersten Pumpphase, in der quasi stationäre Verhältnisse erreicht werden. Die Nachbildung der gemessenen Grundwasserstände ist daher durch höhere

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstef - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Unsicherheiten geprägt. Dennoch wird auch das Ende der dritten Stufe in guter Qualität abgebildet, wie die Statistik zeigt.

Tabelle 8: Statistische Auswertung gemessener / berechneter Grundwasserstände der Stichtage während des Pumpversuchs (PV)

		Vor dem PV 25.07.2018	Ende Stufe 1 12.03.2019	Ende Stufe 2 01.05.2019	Ende Stufe 3 07.05.2018
Mittlere Abweichung	m	-0,01	-0,12	0,12	0,01
Standardabweichung	m	0,14	0,18	0,28	0,34
Mittl. absolute Abweichung	m	0,12	0,13	0,19	0,26
Mittlerer Fehler (DVGW A107)	%	2,64	2,99	2,43	3,32

Berechnete Grundwasserstände der Kalibrierung

Schwerpunkt der instationären Berechnung ist es, neben der Kalibrierung an die 4 Stichtagsmessungen, die Dynamik im Grundwasser bzw. die Reaktionen der Wasserstände auf die Grundwasserentnahmen an den FWF-Brunnen wiederzugeben. Die berechneten Grundwasserstandsganglinien an den Messstellen im Bereich Sulzfeld und Marktstef während des Pumpversuchs sind in Anlage 6.1 (Sulzfeld) und 6.2 (Marktstef) dargestellt. Folgende Charakteristika sind zu erkennen:

- Die Reaktionen auf die Grundwasserabsenkung an den Brunnen werden insgesamt gut nachgerechnet. Beispiele für gute bis sehr gute Ergebnisse Sulzfeld: GP2, GP10, N5, N6, N12 Sulzfeld, TD1; Beispiele Marktstef: B15, N2, B19, N7, N14.
- An einigen Messstellen wird das Grundwasserstandsniveau nicht exakt getroffen, aber die berechneten Absenkungsbeträge geben die gemessene Reaktion gut wieder. Beispiel Sulzfeld: GP9, GP15, N3neu, N15; Beispiel Sulzfeld: B3, N10 Marktstef, N11 Marktstef.
- Die im Muschelkalk bzw. MGWL verfilterten Messstellen M3 und M4 bei Sulzfeld reagieren während des Pumpversuchs etwas zu stark. Das Niveau liegt im einen Fall zu hoch, im anderen zu tief. Die lokalen Effekte, die hier durch das Muschelkalk-Festgestein, mit einer sehr heterogenen Verteilung der Durchlässigkeiten innerhalb des Grundwasserleiters geprägt werden, können mit dem Modell nicht exakt nachgebildet werden.
- Mit den im Muschelkalk verfilterten Messstellen M1 und M2 bei Marktstef können die Strömungsverhältnisse im MGWL vergleichsweise gut reproduziert werden.
- Durch eine lokale Trennschicht zwischen Quartär und Muschelkalk¹ (Anlage 2.1.4) im Bereich der Sulzfelder Brunnen wird der gemessene Druckunterschied an den Messstellen M3 und TD3 hergestellt. Auf diese Weise wird die gemessene Grundwasserstandsdifferenz im Modell grundsätzlich abgebildet, wenn auch etwas überschätzt.

¹ Die im Modell berücksichtigte lokale Trennschicht zwischen Quartär- und Muschelkalkgrundwasserleiter beruht im Wesentlichen auf den Auswertungen zur hydraulischen Charakteristik, speziell den Unterschieden zwischen Quartär- und Muschelkalkgrundwasserständen. Das Vorhandensein der lokalen Trennschicht wird damit begründet, dass der hydraulische Anschluss zwischen Quartär und Muschelkalk nur dort vorhanden ist, wo im Karstgrundwasserleiter des Muschelkalks auch Karstholräume bzw. Klüfte Anschluss an das Quartär haben. Im Bereich der lokalen Trennschicht ist das, auf Grund der gemessenen Grundwasserstandsdifferenzen zwischen Quartär und Muschelkalk offensichtlich nicht der Fall.

- Die lokale Trennschicht trägt darüber hinaus zur deutlichen Verbesserung der berechneten Grundwasserstände im Umfeld des HFB Sulzfeld und Brunnen N1 bei. Der Austausch zwischen quartärem Grundwasserleiter und MGWL ist in dem Bereich offensichtlich vermindert (fehlende Anbindung an das Kluftsystem). Um diesen Effekt nachzuweisen, wurde mit einem Rechenlauf ohne Trennschicht (Rechenlauf III in Tabelle 7) verglichen, um beispielhaft an der Messstelle N1a in Anlage 6.8.3 die unterschiedlichen Reaktionen aufzuzeigen. Die Ganglinie im Rechenlauf ohne Trennschicht liegt auf deutlich höherem Niveau als im Rechenlauf mit Trennschicht (Kalibrierungslauf). Die Messwerte werden mit dem Kalibrierungslauf deutlich besser abgebildet. Im Anhang III sind für den Rechenlauf III die berechneten Ganglinien an allen Grundwassermessstellen zusammengestellt.
- Im Bereich Marktstef weist ein Druckunterschied an den Messstellen B15 (Quartär) und M2 (Muschelkalk) auf eine hydraulische Trennung hin. Eine hydraulische Trennung zwischen Quartär und tieferem Muschelkalk im Modell ähnlich der bei Sulzfeld führte hier zu keinem Erfolg; in diesem Fall verschlechterten sich alle übrigen Ganglinien im Umfeld.
- Zur Überprüfung der Effekte unter Annahme einer ausgedehnten, flächendeckenden Trennschicht zwischen Quartär und MGWL im Verbreitungsgebiet der Quartärrinne wurde ein weiterer Rechenlauf aufgebaut (Rechenlauf IV in Tabelle 7). Die im Modell umgesetzte Ausdehnung der Trennschicht ist der Anlage 2.1.8 zu entnehmen. Basierend auf den für diesen Fall berechneten Ganglinien im Anhang IV ist zu erkennen, dass die gemessenen Grundwasserstände im Vergleich zur Kalibrierung (Anlage 6.1 und 6.2 mit lokaler Trennschicht) insgesamt weniger gut nachgebildet werden. Die Trennschicht hat zur Folge, dass die Grundwasserstände im Quartär tiefer absinken bzw. stärker auf die quartären Grundwasserentnahmen reagieren als gemessen wurde. Im MGWL (Messstellen M1-M4) hingegen liegen die gespannt berechneten Grundwasserstände deutlich höher als in der Kalibrierung und auch höher als die Messwerte. Eine ausgedehnte, flächendeckende hydraulische Trennung ist daher unwahrscheinlich.
- Außerdem wurde in einem Rechenlauf der folgende Fall untersucht (Rechenlauf V in Tabelle 7): Im Umfeld der Quartärrinne zwischen Staustufe Kitzingen und Marktbreit herrschen kleinere Durchlässigkeiten und kleinere effektive Porositäten im MGWL vor. Dafür wurde die Durchlässigkeit im Maintal von teils rd. 10^{-3} m/s auf pauschal $5 \cdot 10^{-4}$ m/s, wie sie im weiteren Umfeld westlich und östlich vorliegt, herabgesetzt (siehe Anlage 2.1.9). Die effektive Porosität wurde von 5 - 15 % auf 5 % in der gesamten Schicht verringert. Die berechneten Ganglinien im Anhang V zeigen, dass in diesem Fall insgesamt eine Verschlechterung der Ergebnisse gegenüber dem Kalibrierungslauf und hinsichtlich der Messwerte eintritt. Die Reduzierung von Durchlässigkeit und Porosität führt insgesamt zu tiefer berechneten Grundwasserständen und zu stärkeren Absenkungen im Umfeld der Brunnen, die aber durch Messwerte nicht belegt sind.

Berechnete Grundwasserstände der Rechenläufe (Sensitivitätsuntersuchungen)

Die berechneten Ganglinien der Grundwasserstände an allen verfügbaren Messstellen für die in Tabelle 7 zusätzlich durchgeführten Rechenläufe sind vollständig im Anhang I bis VII zusammengestellt. Modellgrundlage ist die instationäre Kalibrierung des Pumpversuches (Anlage 6.1 (Sulzfeld) und 6.2 (Marktstef)). Die Berechnungen dienen der Erfassung von Auswirkungen bei Variation ausgewählter Parameter im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse. Eine zusammenfassende Bewertung ist dem

Anhang VIII zu entnehmen. In der Bewertung ist der jeweils durchgeführte Rechenlauf mit dem Ergebnis der instationären Kalibrierung (in Anlage 6.1 und 6.2) verglichen; dabei zeigt „+“ eine Verbesserung, „=“ keine gravierende Änderung sowie „-“ eine Verschlechterung gegenüber der Kalibrierung an. In die Bewertung fließen folgende Aspekte ein: Niveau, Dynamik, Reaktion, Trend sowie Gesamteindruck der berechneten Grundwasserstandsganglinie. Mit jedem Rechenlauf verändern sich die berechneten Grundwasserstände an den einzelnen Messstellen; das geschieht in der Regel nicht synchron, d. h. manche Messstellen zeigen Verbesserungen, andere Verschlechterungen. Ein durchweg objektive Beurteilung der Berechnungsergebnisse auf Grundlage der Ganglinien ist vor dem Hintergrund der zu berücksichtigten o. a. Aspekte schwierig. In bestimmten Fällen ist eine Ausprägung der Ganglinie von besonderer Bedeutung, wie zum Beispiel die Schwankungsbreite, um die Dynamik richtig wiederzugeben. Die berechnete Dynamik im Grundwasser hat im Fall der Nachbildung von Pumpversuchen eine hohe Relevanz. Eine statistische Ganglinienanalyse wird nicht durchgeführt. Ziel der Bewertung ist es einen grundlegenden Trend zu erfassen und in übersichtlicher Form darzustellen.

Basierend auf dem Vergleich mit der instationären Kalibrierung ist eine Bewertung in Anhang VIII erstellt. Folgende Effekte sind zu erkennen:

- Rechenlauf I: Mit der erhöhten Sohldurchlässigkeit im Main ist insgesamt eine Verbesserung insbesondere der Dynamik bzw. Reaktionsweise im Grundwasser festzustellen. Der Mainwasserstand hat einen stärkeren Einfluss auf die Grundwasserstände. In diesen Fall steigen allerdings - wie im nächsten Kapitel beschrieben – die Uferfiltratanteile in den Brunnen deutlich über die im HGM ermittelten Anteile an.
- Rechenlauf II: Eine geringere Sohldurchlässigkeit im Main verschlechtert das Ergebnis insbesondere hinsichtlich der Dynamik, da die Wechselwirkung zwischen Gewässer und Grundwasser abgemildert ist. Der Mainwasserstand wird deutlich gedämpfter auf das Grundwasser übertragen. Das Grundwasserstandsniveau steigt an, da jetzt geringere Mengen in den Main abströmen können. Teils wirkt sich die Brunnenförderung deutlicher aus (stärkere Absenkung), da geringere Mengen aus dem Main nachströmen.
- Rechenlauf III: Im Rechenlauf ohne lokale Trennschicht zwischen Quartär und Muschelkalk nimmt die Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen an den Messstellen im Bereich der Trennschicht zu, wie z. B. an der N12, N1a, N4, TD1. An diesen Messstellen sinken die Grundwasserstände nicht so tief wie gemessen wurde.
- Rechenlauf IV: Dem gegenüber erzeugt eine flächendeckende Trennschicht zwischen quartärem Grundwasserleiter und MGWL generell eine zu starke Absenkung im Brunnenumfeld des quartären Grundwasserleiters. Im MGWL entstehen teils gespannte Verhältnisse und der berechnete Grundwasserstand liegt deutlich zu hoch (Messstellen M1-M4). Die Berechnungsergebnisse verschlechtern sich insgesamt gegenüber der Kalibrierung.
- Rechenlauf V: Die reduzierte Durchlässigkeit und Porosität im MGWL führen an den Messstellen zu einer stärker ausgeprägten Absenkung infolge der Grundwasserförderung. Die gemessenen Grundwasserstände werden auf diese Weise nicht zufriedenstellend abgebildet.
- Rechenlauf VI: Die lokale Erhöhung der Sohldurchlässigkeit führt zu einer verbesserten Nachbildung der Grundwasserstände an den Messstellen S2a und N15. Durch den erhöhten Mainzustrom steigt insgesamt das Grundwasserstandsniveau, was sich aber nur teilweise positiv auswirkt.

- Rechenlauf VII: Zusätzlich zu Rechenlauf VI wird lokal an der Messstelle GP1 die Mainsohle durchlässiger eingestellt. Die Ganglinie der Messstelle GP1 liegt in diesem Rechenlauf auf höherem Niveau, aber eine durchschlagende Verbesserung stellt sich nicht ein. Erst eine offenerere Sohle in einem längeren Abschnitt ermöglicht eine ausreichende Wechselwirkung zwischen Grundwasser und Main, so dass die Abweichung zwischen der berechneten der gemessenen Ganglinie kleiner wird, wie das Rechenlauf I zeigt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Grundwassermodell basierend auf den Stichtagsmessungen während des Pumpversuches sowie hinsichtlich der Dynamik im Grundwasser ein gutes bis sehr gutes Ergebnis berechnet. Die Sensitivitätsuntersuchungen bestätigen darüber hinaus den ermittelten Parametersatz für die Kalibrierung.

4.2.2 Berechnete Uferfiltratanteile

In der Anlage 5.4 des Berichtes zum Hydrogeologischen Modell [11] sind die aus den Beschaffenheitsdaten während des kontrollierten Brunnenbetriebs abgeleiteten Zustromanteile aus dem Main für die Brunnen des Gewinnungsgebietes Sulzfeld / Marktstef ausgewertet und erläutert. Abhängig von Entnahmeraten und Entnahmeverteilung ergeben sich für das gesamte Gewinnungsgebiet danach mittlere Zustromanteile von Uferfiltrat zwischen rd. 14 % und rd.19 %.

Diese Abschätzung liefert wertvolle Hinweise, insbesondere für die Anpassung der Sohldurchlässigkeit des Mains, die zur Kalibrierung des Grundwassermodells beitragen. Während der Kalibrierung werden in jeder Testrechnung sowohl die berechneten Grundwasserstände als auch die berechneten Zustromanteile ausgewertet und mit Messwerten verglichen. Die Auswertung der Uferfiltratanteile erfolgt jeweils zum Ende der drei Stufen. In zahlreichen Testrechnungen ist mit dem vorliegenden Ergebnis die bestmögliche Anpassung hinsichtlich der Grundwasserstände und Uferfiltratanteile ermittelt worden.

In der Anlage 6.7.1 sind die ermittelten und berechneten Uferfiltratanteile tabellarisch für jeden Brunnen aufgelistet. In den Anlagen 6.7.2 - 6.7.4 werden die berechneten Uferfiltratanteile des Kalibrierungslaufes zusammen mit den aus den Beschaffenheitsdaten ermittelten Zustromanteilen grafisch dargestellt. Die Anlage 6.7.5 zeigt die berechneten Einzugsbereiche der Brunnen im unmittelbaren Nahbereich des Mains am Ende der jeweiligen Stufe. Folgendes lässt sich zusammenfassen:

- Es ist zu erkennen, dass die berechneten Uferfiltratanteile im Kalibrierungslauf grundsätzlich gut in das Spektrum der ermittelten Zustromanteile der unterschiedlichen Stoffe hineinpassen (Anlagen 6.7.2 - 6.7.4).
- Im Verlauf des Pumpversuches steigt der Uferfiltratanteil im Förderwasser der Brunnen N1, N2, S2 und HFB Marktstef an. Insbesondere der HFB Marktstef vergrößert bei höheren Entnahmen sein Einzugsgebiet in Richtung Main und bezieht mehr Mainwasser (Anlage 6.7.5).
- Der Anteil für den HFB Sulzfeld bleibt während des gesamten Pumpversuches etwa auf gleichem Niveau.

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstef - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

- Im Förderwasser des Brunnens S1 sinkt hingegen der Mainanteil im Verlauf des Pumpversuches. Durch die Zunahme der Förderung auch an den benachbarten Brunnen wird das Einzugsgebiet des Brunnen S1 südostwärts gedrängt (Anlage 6.7.5).
- Im Fall des Brunnens S2 ist es in vielen Testrechnung nicht möglich gewesen das im HGM ermittelte Niveau von 25 – 30 % zu erreichen und gleichzeitig eine akzeptable Kalibrierung der Grundwasserstände zu erzielen (siehe unten). Die Mainsohle müsste dazu deutlich undurchlässiger sein, was aber wiederum bedeutet hätte, dass der HFB Marktstef weniger bis gar kein Uferfiltrat erhält, da sich dann dessen Einzugsgebiet in Richtung Osten verlagert.

Die berechneten mittleren Zustromanteile der gesamten Wassergewinnung sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Die Tabelle zeigt, dass der berechnete Uferfiltratanteil um den Faktor 1,5 - 2,0 über dem Mittelwert im HGM liegt. Vor dem Hintergrund der bestehenden Unschärfen in der Analytik sowie der Unsicherheiten im Mess- und Auswerteverfahren (Probennahme, Hydrogeologie; siehe auch Anlage 5.4 des Berichtes zum Hydrogeologischen Modell [11]) ist das Ergebnis durchaus akzeptabel. Es hat sich als sinnvoll erwiesen, vorzugsweise die Mittelwerte für die gesamte Wassergewinnung zu vergleichen. Eine größerskalige Betrachtung drängt sich auf, da der Zustrom zu einzelnen Brunnen teils durch lokale Effekte (Kluft-, Karstanbindung) des unterlagernden Muschelkalks beeinflusst sein kann, die im Modell im Detail nicht enthalten sein können.

Tabelle 9: Ermittelte (HGM) und berechnete Uferfiltratanteil während des Pumpversuches (Kalibrierungslauf)

Pumpstufe	Förderung	Uferfiltratanteil HGM	Uferfiltratanteil berechnet
	m ³	%	%
Stufe 1	rd. 21.000	14	27
Stufe 2	rd. 37.000	19	29
Stufe 3	rd. 42.000	19	30

Die Sohldurchlässigkeit des Mains musste im Zuge der Modellkalibrierung grundsätzlich schrittweise kleiner eingestellt werden, da die mittleren Zustromanteile anfangs über 50 % lagen. Gleichzeitig war eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen zu erzielen. Je dichter aber die Mainsohle ist, desto schlechter wird die Dynamik im Grundwasser abgebildet. Diese grundsätzliche Tendenz ist in den Anlagen 6.8.1 und 6.8.2 am Beispiel der berechneten Ganglinie an der Messstelle GP1 verdeutlicht. Die Anlage 6.8.1 zeigt die gemessene und die berechnete Ganglinie aus der Kalibrierung sowie für den Fall, wenn die Sohldurchlässigkeit des Mains um den Faktor 5 erhöht wird (Rechenlauf I in Tabelle 7). Zusätzlich ist der Uferfiltratanteil in Tabelle 10 ausgewertet. Die berechnete Ganglinie zeichnet den Verlauf der gemessenen Kurve sehr gut nach und die Uferfiltratanteile steigen auf über 50 % an. In Anlage 6.8.2 ist der Fall dargestellt, in dem die Sohldurchlässigkeit um den Faktor 2,5 reduziert wird (Rechenlauf II in Tabelle 7)). Die berechnete Ganglinie zeigt eine schlechte Übereinstimmung mit den Messwerten, aber die Uferfiltratanteile kommen den ermittelten Werten des HGMs nahe. Vor diesem Hintergrund stellt das vorgelegte Ergebnis der Kalibrierung den besten Kompromiss dar, der nach Auswertung von zahlreichen Rechenläufen ermittelt werden konnte.

Im Anhang I und II sind die berechneten Ganglinien für die Rechenläufe I und II an allen Grundwassermessstellen zusammengestellt.

Tabelle 10: Berechneter Uferfiltratanteil während des Pumpversuches bei erhöhter (Rechenlauf I) und verminderter (Rechenlauf II) Sohl-durchlässigkeit des Mains

Pumpstufe	Förderung	Uferfiltratanteil Rechenlauf I	Uferfiltratanteil Rechenlauf II
	m ³	%	%
Stufe 1	21.258	55	10
Stufe 2	37.795	55	14
Stufe 3	40.349	57	14

Darüber hinaus wird in zwei zusätzlichen Rechenläufen der Fall untersucht , wenn die Sohldurchlässigkeit des Mains lokal erhöht wird:

- a) Lokal im Zustrom der Messstellen S2a und N15 um den Faktor 5 (Rechenlauf VI in Tabelle 7) und
- b) Lokal im Zustrom der Messstellen von S2a, N15 und zusätzlich der GP1 um den Faktor 5 (Rechenlauf VII in Tabelle 7)

Die Änderungen an der Mainsohle sind in Abbildung 13 dargestellt. Diese Änderung führt dazu, dass mehr Mainwasser infiltrieren bzw. exfiltrieren kann, so dass die berechneten Ganglinien der vom Main beeinflussten Messstellen die gemessenen Grundwasserstände vermutlich besser nachbilden. In der oben beschriebenen instationären Kalibrierung ist in Anlage 6.1.18 und 6.1.19 zu erkennen, dass die dort berechneten Ganglinien im Vergleich zu den Messungen zu tief liegen und die Dynamik etwas überzeichnen.

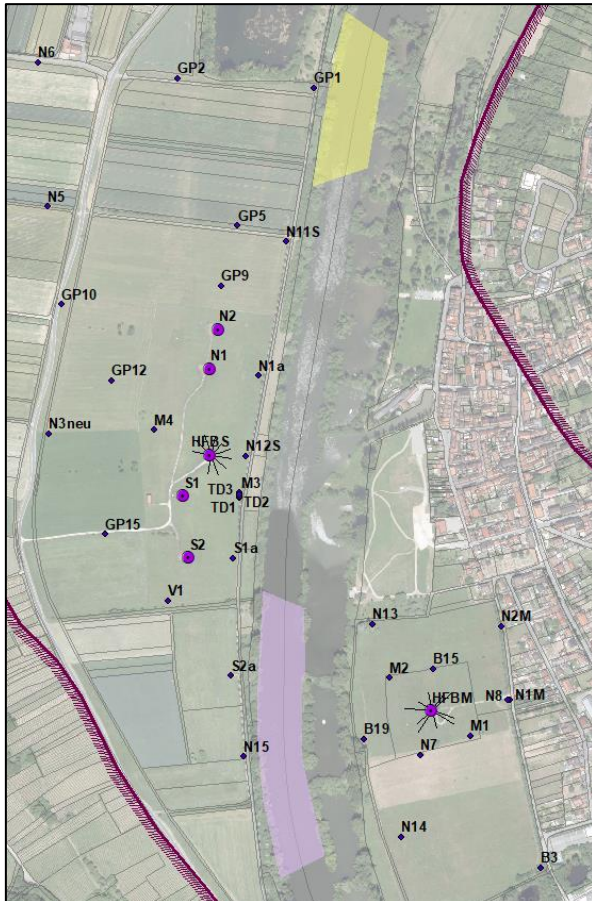


Abbildung 13: Erhöhung der Sohldurchlässigkeit im Main im Bereich der Messstellen S2a, N15 im Rechenlauf VI (Lila) und im Bereich der Messstelle GP1 im Rechenlauf VII (Gelb)

In Anlage 6.8.4 sind für den Fall mit lokal erhöhtem Leakage die berechneten Ganglinien der Messstellen S2a und N15 dargestellt (Rechenlauf VI). Im Anhang VI sind für diesen Rechenlauf ergänzend die berechneten Ganglinien an allen übrigen Grundwassermessstellen zusammengestellt. Die Ganglinien in Anlage 6.8.4 zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen. Allerdings verändern sich dabei auch die entsprechenden Uferfiltratanteile in den südlichen Brunnen (HFB Sulzfeld, Brunnen S1 und S2). Da verstärkt Mainwasser infiltriert, steigen die Anteile in den Brunnen an, wie Tabelle 11 zeigt. Im Vergleich zu der Auswertung im HGM ergeben sich deutlich größere Abweichungen als im Fall der instationären Kalibrierung.

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstett - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Tabelle 11: Änderung der Uferfiltratanteile bei erhöhtem Leakage im Zustrom der Messstellen S2a und N15

Stufe 1	Uferfiltrat HGM	Uferfiltrat Kalibrierung	Uferfiltrat Leak. erhöht	Zunahme
	%	%	%	%
S1	0%	27%	43%	+16%
S2	25%	72%	95%	+23%
HFB M	10%	6%	19%	+13%
Stufe 2	Uferfiltrat HGM	Uferfiltrat Kalibrierung	Uferfiltrat Leak. erhöht	Zunahme
	%	%	%	%
S1	0%	9%	43%	+34%
S2	30%	83%	99%	+16%
HFB M	15%	18%	33%	+14%
Stufe 3	Uferfiltrat HGM	Uferfiltrat Kalibrierung	Uferfiltrat Leak. erhöht	Zunahme
	%	%	%	%
S1	0%	1%	59%	+58%
S2	30%	87%	100%	+13%
HFB M	15%	25%	36%	+11%

Im Anhang VII sind für den Rechenlauf VII die berechneten Ganglinien an allen Grundwassermessstellen zusammengestellt. Hier zeigt die Ganglinie der Messstelle GP1 keine bedeutende Verbesserung zwischen gemessenen und berechneten Werten durch lokale Erhöhung der Sohdurchlässigkeit des Mains im Bereich dieser Messstelle. Nur eine weitflächige Erhöhung oder eine pauschale Erhöhung der Sohdurchlässigkeiten im Main (siehe Rechenlauf I) führt in diesem Bereich zu einer verbesserten Anpassung. Außerdem steigt der Zustromanteil von Uferfiltratwasser im nördlichsten Brunnen N2 auf 45 % in der Pumpstufe 3 an; im HGM wurden 9 % Uferfiltratanteil ermittelt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die instationäre Kalibrierung – wie bereits oben erläutert – einen guten Kompromiss zwischen den Anforderungen darstellt, die sich aus den gemessenen Grundwasserständen und den aus der Grundwasserbeschaffenheit ermittelten Uferfiltratanteilen ergeben.

4.3 Berechnungsergebnisse instationäre Validierung Hochwasser 2013

Ziel der Validierung ist es zu testen, ob das kalibrierte Modell auch mit anderen Randbedingungen plausible Berechnungsergebnisse liefern kann. Die Validierung des kalibrierten Grundwassermodells erfolgte anhand des Hochwassers Mai / Juni 2013.

Die wichtigsten Randbedingungen im Modell sind die Mainwasserstände mit der Hochwasserwelle 2013 sowie die Grundwasserentnahmen der FWF in einer zeitlichen Auflösung von Tagen. Details sind im Abschnitt 3.8.4 erläutert.

Die Berechnungsergebnisse sind für die Messstellen im Bereich Sulzfeld / Marktstef in Form der berechneten Ganglinien zusammen mit den gemessenen Grundwasserständen in Anlage 7.1 und 7.2 dargestellt. Die berechneten Grundwasserstände weisen insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Grundwasserständen auf:

- Die Lage und Dynamik der Grundwasserstände werden durchweg gut nachgebildet
- An einigen Messstellen im Umfeld der Sulzfelder Brunnen prägen die täglich variierenden Grundwasserentnahmen den Tagesverlauf der berechneten Ganglinie (N1a, N4, N12, GP9, TD1-3). Diese täglichen Absenkungen und Aufspiegelungen geben die gemessenen Grundwasserstände nicht wieder, da sie auf Tagesmittelwerten beruhen. Mit dem Grundwassermodell werden Reaktionen im Grundwasser auch innerhalb eines Tages berechnet.

Abschließend ist festzustellen, dass die Validierung basierend auf dem Hochwassers 2013 eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen erzielt.

4.4 Fazit

Das Grundwassermodell wurde basierend auf den Daten des Hydrogeologischen Modells [11] aufgebaut und kalibriert. Folgende Ergebnisse lassen sich zusammenfassen:

- Die stationäre Kalibrierung für das gesamte Modell und die instationäre Kalibrierung insbesondere für den Bereich Sulzfeld / Marktstef belegen nach DVGW A 107 eine gute Qualität. Die Dynamik in den Grundwasserständen während der instationären Berechnung wird gut bis sehr gut wiedergegeben.
- Die Nachbildung der Uferfiltratanteile in den FWF-Brunnen hat die Aussagekraft des Modells hinsichtlich der Zustromanteile deutlich verbessert.
- Die Validierung bestätigt die Kalibrierung.

Das kalibrierte und validierte Grundwassermodell ist damit als Planungswerkzeug zur Simulation von unterschiedlichen Strömungsberechnungen einsatzfähig, wie z. B. Berechnung von Brunneneinzugsgebieten oder zur Abgrenzung der 50-Tage-Fließzeit.

5 Einzugsgebiet der Wassergewinnung bei 6,5 Mio. m³/a

Für das Gewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstef ist die Ausweisung des Einzugsgebietes der FWF-Brunnen ein Bestandteil in den wasserrechtlichen Unterlagen.

Für eine erste Berechnung des Einzugsgebietes der FWF-Brunnen wird auf Basis des nun einsatzfähigen Modells ein stationäres Strömungsmodell mit einer entsprechenden Entnahmekonfiguration aufgebaut. Zunächst wird auf Grundlage einer Gesamtentnahme von 6,5 Mio. m³/a gerechnet. Die Verteilung der Gesamtentnahme auf die einzelnen Brunnen wird basierend auf der maximalen 50-Tagesentnahme des aktuellen Bescheids zur beschränkten Erlaubnis vom 12.11.2020 vorgenommen (Tabelle 12).

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktstett - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Tabelle 12: Verteilung der Entnahmen basierend auf dem Bescheidentwurf bei maximaler 50-Tagesentnahme

Brunnen	Maximale 50-Tagesentnahme [%]	Jahresentnahme [Mio. m³/a]
HFB M	15%	0,98
HFB S	43%	2,79
N1	15%	0,98
N2	7%	0,43
S1	8%	0,54
S2	12%	0,78
Summe	100%	6,50

Das berechnete Einzugsgebiet ist in Anlage 8.1 mit Stromlinien und in Anlage 8.2 mit Hintergrundkarte dargestellt. Zu erkennen sind in Anlage 8.1 die Fließpfade von Partikeln (Stromlinien), die ausgehend von den Brunnen der FWF, entgegen der Strömung, also rückwärts bis zum Ausgangspunkt laufen. Die Partikel starten im nahen Umfeld der Brunnenfilterstrecken und enden an einer Randbedingung wie z. B. der Grundwasserneubildung oder einem Gewässer. Die zahlreichen Fließpfade werden an die Oberfläche projiziert und ergeben dann die Einzugsgebietsfläche in Anlage 8.2 (Umhüllende der Stromlinien). Die Fläche des Einzugsgebiets beträgt danach 64 km².

Für dieses Einzugsgebiet ist in Tabelle 13 die Grundwasserbilanz aufgestellt. Der Hauptteil des Grundwassers (ca. 75%) stammt erwartungsgemäß aus der Grundwasserneubildung. Gewässer und Randzustrom tragen mit 25 % bei. Im Einzugsgebiet befinden sich weitere Grundwasserentnahmen, die in der Bilanz entsprechend Berücksichtigung finden.

Tabelle 13: Bilanz im Einzugsgebiet der FWF-Brunnen

Einzugsgebiet	Zu-/Abstrom (netto)		
	l/s	Mio. m³/a	Prozent
GWNB	176	5,6	75
Randzustrom	23	0,7	10
Gewässer	37	1,2	15
Entnahme FWF	-206	-6,5	-87
Sonstige Entnahmen	-30	-1,0	-13
Summe	0	0	0

Aufgestellt:

Dipl.-Geol. M. Klute

Dipl.-Geol. G. Lehmann

Dr.-Ing. C. Braun

FWF Fernwasserversorgung Franken

Wassergewinnungsgebiet Sulzfeld / Marktsteft - Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Koblenz, August 2021

Björnsen Beratende Ingenieure GmbH



i.A. Dipl.-Ing. agr. R. Menden



i.A. Dr.-Ing. C. Braun