

Hydrogeologisches Gutachten für die Grundwassernutzung für die Energieversorgung, Freiburg i. Br. – Gebiet Dietenbach

Bericht:

**Aufbau und Kalibrierung eines Grundwassermodells,
Erweiterung zu einem Wärmetransportmodell und
Prognoseberechnungen**

Auftraggeber: Umweltschutzamt Freiburg im Breisgau

Berichtsdatum: 28.10.2022

Ansprechpartner

Joswig Ingenieure GmbH

Ansprechpartner:

Philipp Joswig

Dipl.-Ing. Philipp Joswig

T +49 (0) 721 82107929

M +49 (0) 151 11557760

E p.joswig@joswig.de

Viktoriastraße 8
76133 Karlsruhe
DEUTSCHLAND

Projekt-Nr. 21012

Joswig Ingenieure GmbH

www.joswig.de

Geschäftsführer Philipp Joswig

Amtsgericht Mannheim
HRB 727629

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	9
2	Unterlagenverzeichnis	12
3	Hydrogeologisches Strukturmodell	17
3.1	Vorgehensweise	17
3.2	Abgrenzung Modellraum	17
3.2.1	Horizontale Abgrenzung des Modellraums	17
3.2.2	Vertikale Abgrenzung des Modellraums	21
3.2.3	Standortbeschreibung Dietenbach	22
3.3	Geologie	22
3.4	Hydrogeologie	24
3.4.1	Hydrogeologische Einheiten und Hydrodynamik	24
3.4.2	Hydrogeologische Parameter	31
3.5	Grundwassertemperaturen	38
3.6	Hydrologie	41
3.6.1	Hydrologische Übersicht	41
3.6.2	Fließgewässer I. Ordnung	42
3.6.3	Fließgewässer II. Ordnung	43
3.6.4	Stehende Oberflächengewässer	45
3.7	Hydrostratigraphische 3D-Modellierung	45
3.8	Digitales Geländemodell für den IST-Zustand	47
3.9	Grundwasserneubildung	47
3.10	Grundwassernutzung und Wasserschutzgebiete	48
4	Aufbau und Kalibrierung des Numerischen Grundwassermodells	52
4.1	Vorgehensweise und Ziele	52
4.2	Aufbau des Grundwasserströmungsmodells	53
4.2.1	Aufbau des 3D-Grundwasserströmungsmodells	53
4.2.2	Modelldiskretisierung (horizontal/vertikal)	54
4.2.3	Hydraulische Randbedingungen des Grundwasserströmungsmodells	57
4.2.4	Implementierung der hydraulischen Parameter	61
4.3	Kalibrierung Grundwasserströmungsmodell	64
4.3.1	Vorgehen stationäre Kalibrierung	64
4.3.2	Ergebnisse stationäre Kalibrierung	65
4.3.3	Vorgehen instationäre Kalibrierung	71
4.3.4	Ergebnisse instationäre Kalibrierung	72
5	Erweiterung zum Wärmetransportmodell	74

5.1	Wärmetransportparameter	74
5.2	Anfangstemperatur und Temperaturrandbedingungen	75
5.3	Hydraulische Randbedingungen für die Variantenberechnungen	76
5.3.1	Weitere Randbedingungen	76
5.3.2	Grundwasserneubildung	76
5.3.3	Brunnenförderraten der Trink- und Brauchwasserbrunnen	77
5.4	Digitales Geländemodell für die Variantenberechnungen	77
6	Variantenberechnungen	79
6.1.1	Variantenübersicht	79
6.1.2	Modelltechnische Umsetzung der Grundwasserwärmenutzung	80
6.2	Methodik zur Auswertung der Modellergebnisse	82
6.3	Ergebnisse Wärmetransportberechnung	86
6.3.1	Temperaturverteilung Variante EH 40 ABL BA1-6	86
6.3.2	Temperaturverteilung Variante EH 40 ABL BA1-4 v1	87
6.3.3	Temperaturverteilung Variante EH 40 ABL BA1-4 v2	87
6.4	Ergebnisse Grundwasserhydraulik der Variantenberechnungen	88
6.4.1	Referenzprognose ohne Brunnen der geothermischen Anlage Dietenbach	88
6.4.2	Grundwasserhydraulik Variante BA 1-6	88
6.4.3	Grundwasserhydraulik Variante BA 1-4 v1	99
6.4.4	Grundwasserhydraulik Variante BA 1-4 v2	105
6.5	Anmerkungen zu den Modellierungsergebnissen	110
7	Bewertung der Ergebnisse	111
7.1	Grundsätzliche Bewertung	111
7.2	Beeinflussung umliegender Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden	112
7.3	Auswirkungen auf die Entwässerungsplanung	112
7.4	Bewertung Mundenhofer Parkplatz	114
7.5	Auswirkungen auf angrenzende Schutzgebiete und das Langmattenwäldchen	115
7.6	Auswirkungen auf Straßenbegleitbäume	117
7.7	Temperatur-Beeinflussung TB Schorren	118
7.8	Setzungsrisiko Bestandsbebauung Rieselfeld	119
8	Zusammenfassung und Empfehlungen	121
8.1	Zusammenfassung	121
8.2	Empfehlungen	124

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Vergleich der durch JIG interpolierten Grundwassergleichen der STM Mai 2016 [D 53] und der konstruierten Grundwassergleichen MHGW 2016 [D 54]	27
Abbildung 2: Lage der Grundwassermessstellen mit Datenloggern im Raum Freiburg i. Br.	29
Abbildung 3: Datenlage zur hydraulischen Durchlässigkeit der Neuenburg-Formation im Umfeld Dietenbachs, dargestellte Brunnenanordnung: Variante EH40, ABL, BA1-6	34
Abbildung 4: Lage der Temperaturmessstellen mit langjährigen Messreihen	40
Abbildung 5: Ungestörte Grundwassertemperatur der Neuenburg-Formation bei Dietenbach gemäß [D 28]	41
Abbildung 6: Oberflächengewässer bei Dietenbach (Hintergrundkarte TopOpenPlus, Digitaler Lageplan Dietenbach)	44
Abbildung 7: Lageplan mit Wasserschutzgebieten, bekannten Brunnen- sowie Grundwasserwärmepumpenanlagen (GWWP)-Standorten im Modellgebiet	50
Abbildung 8: Ganglinie für die Berechnung der Faktoren für die Wasserstände der Fließgewässer bei der instationären Modellrechnung	60
Abbildung 9: Scatterplot quartärer Grundwasserleiter (Stichtagsmessung 2016)	67
Abbildung 10: Scatterplot Hauptrogenstein - Modellschicht 7 (10/2012)	68
Abbildung 11 Graphische Darstellung der Massenbilanz für den stationären Kalibrierungslauf Mai 2016	70
Abbildung 12: Prinzipskizze zur Methodik zur Berechnung der Grundwasserdifferenzenkarten	84
Abbildung 13: Lage Beobachtungspunkte für die Berechnung von Grundwasserganglinien	85
Abbildung 14: Grundwasserdifferenzen zum Zeitpunkt der max. Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 im Bereich der Infiltrationsbrunnen und Entwässerungsanlagen, BA 1-6	90
Abbildung 15: Berechnete Flurabstände im Bereich des Parkplatzes Mundenhof, BA 1-6 nach ca. 10 Jahren (Ende Januar 2034)	94
Abbildung 16: Lage der Schutzgebiete und des Langmattenwäldchens im Umkreis Dietenbachs	96
Abbildung 17 Lage der betrachteten Straßenbegleitbäume	98
Abbildung 18: Grundwasserdifferenzen zum Zeitpunkt der max. Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 im Bereich der Infiltrationsbrunnen und Entwässerungsanlagen, BA 1-4 v1	100

Abbildung 19: Berechnete Flurabstände im Bereich des Parkplatzes Mundenhof, EH40 ABL BA 1-4 v1 nach ca. 10 Jahren (Ende Januar 2034)	103
Abbildung 20 Grundwasserdifferenzen zum Zeitpunkt der max. Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 im Bereich der Infiltrationsbrunnen und Entwässerungsanlagen, BA 1-4 v2	106
Abbildung 21 Berechnete Flurabstände im Bereich des Parkplatzes Mundenhof, EH40 ABL BA 1-4 v2 nach ca. 10 Jahren (Ende Januar 2034)	108

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Schichtenfolge des Hydrogeologischen Strukturmodells	26
Tabelle 2: Übersicht zum Grundwasser-Zustrom aus dem Zartner Becken bzw. Dreisamtal in die Freiburger Bucht	31
Tabelle 3: Spannweiten der k_f -Werte für die Neuenburg-Formation in m/s	33
Tabelle 4: Spannweiten für die k_f -Werte der Breisgau-Formation in m/s	35
Tabelle 5: Effektive Porosität n_{eff} basierend auf [D12]	37
Tabelle 6: Im Modell angesetzte spez. Speicherkoeffizienten	38
Tabelle 7: Übersicht der bekannten Grundwasserentnahmen im Modellgebiet (Mittelwert 2016 – 2020 sowie für den Zeitpunkt der stationären Kalibrierung 2016)	49
Tabelle 8: Vertikale Modelldiskretisierung	56
Tabelle 9: Hydraulische Parameter des Grundwasserströmungsmodells nach erfolgter instationärer Kalibrierung	63
Tabelle 10: Massenbilanz des stationär kalibrierten Grundwasserströmungsmodells	69
Tabelle 11: Im instationären Wärmetransportmodell angesetzte Wärmeparameter	75
Tabelle 12: Zusammenfassung Temperaturergebnisse nach 20 Jahren Betrieb Ende Januar 2043 ausgehend von einer ungestörten Temperatur von 12,7 °C	119

ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage 1	Lagepläne
Anlage 1.1	Übersichtslageplan Modellgebiet
Anlage 1.2	Detallageplan Standort Dietenbach
Anlage 2	Regionale Geologie und Hydrogeologie
Anlage 2.1	Ausschnitt Hydrogeologische Karte HK50 (LGRB)
Anlage 2.2	Hydrogeologische Schnitte
Anlage 3	Einteilung und Interpolation Hydrogeologie/Hydrostratigraphie
Anlage 3.1	Schichtmächtigkeiten Neuenburg-Formation, Breisgau-Formation, Hauptrogenstein-Formation
Anlage 3.2	Profilschnitte Hydrostratigraphische 3D-Interpolation Hauptrogenstein LGRB
Anlage 3.3	Profilschnitte Modellgebiet
Anlage 4	Modellaufbau: Oberflächengewässer und Randbedingungen
Anlage 4.1	Oberflächengewässer
Anlage 4.2	Grundwasserneubildung
Anlage 4.3	Randbedingungen
Anlage 4.4.1	Brunnenentnahmen stationäre Kalibrierung
Anlage 4.4.2	Brunnenentnahmen instationäre Kalibrierung
Anlage 4.5	Modelldiskretisierung Modellbereich und Standort
Anlage 5	Kalibrierung Grundwasserströmungsmodell
Anlage 5.1.1	Hydraulische Durchlässigkeiten (k_f -Werte) Neuenburg-Formation
Anlage 5.1.2	Hydraulische Durchlässigkeiten (k_f -Werte) Breisgau-Formation
Anlage 5.1.3	Hydraulische Durchlässigkeiten (k_f -Werte) Hauptrogenstein
Anlage 5.2.1	Gegenüberstellung berechneter und konstruierter Grundwassergleichen Neuenburg-Formation STM Mai 2016
Anlage 5.2.2	Gegenüberstellung berechneter und konstruierter grundwassergleichen Hauptrogenstein-Formation Okt. 2012
Anlage 5.3	Instationäre Modellkalibrierung: Vergleich gemessener und berechneter Grundwasserganglinien im Modellgebiet für den Zeitraum 2000 - 2021
Anlage 6	Wärmetransportmodellierung
Anlage 6.1	Tabellarische Zusammenstellung der Förder- und Infiltrationsraten der Brunnen Dietenbach für die 3 Varianten BA1-6, BA1-4_v1 und BA1-4_v2
Anlage 6.2	Tabellarische Zusammenstellung der Förderraten von Trink- und Brauchwasserbrunnen im Modellgebiet für die Prognose der Variantenberechnungen

Anlage 7	Ergebnisse
Anlage 7.1.1	Berechnete Temperaturverteilung Neuenburg-Formation nach 20 Jahren
Anlage 7.1.2	Berechnete Temperaturverteilung Hauptrogenstein-Formation nach 20 Jahren
Anlage 7.1.3	Berechnete Temperaturverteilung Schnitt Abstrom Dietenbach nach 20 Jahren
Anlage 7.2.1	Berechnete Grundwassergleichen Neuenburg-Formation nach 10 Jahren
Anlage 7.2.2	Berechnete Grundwasserdifferenzen Neuenburg-Formation nach 10 Jahren
Anlage 7.2.3	Berechnete Grundwasserflurabstände Neuenburg-Formation nach 10 Jahren
Anlage 7.2.4	Berechnete Grundwasserflurabstände Neuenburg-Formation nach 10 Jahren, Detailbetrachtung
Anlage 7.2.5	Berechnete Grundwasserganglinien an Beobachtungspunkten

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABL	Abluftanlage
BA	Bauabschnitt
DGM	Digitales Geländemodell
EH40	Energiehaus-Klasse 40
GOK	Geländeoberkante
GrwV	Grundwasserverordnung
GW	Grundwasser
GWL	Grundwasserleiter
GWM	Grundwassermessstelle
HSM	Hydrogeologisches Strukturmodell
i.Br.	im Breisgau
LGRB	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
UWSA	Umweltschutzamt Freiburg
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
ZMF	Zelt-Musik-Festival (hier ZMF-Gelände bei Mundenhof)

1 **Veranlassung und Aufgabenstellung**

Nach dem positiven Ergebnis des Bürgerentscheides für eine Bebauung des Dietenbachgeländes im Februar 2019 plant die Stadt Freiburg im Breisgau die Erschließung des neuen Baugebietes Dietenbach. Der neue Stadtteil wird in sechs Bauabschnitte (BA) gegliedert. Es entstehen rund 6.900 Wohneinheiten und 12 bis 16 Quartiersgaragen für etwa 16.000 Menschen [D 57]. Dietenbach soll ein klimaneutrales Stadtgebiet werden, weshalb die Wärmeversorgung über erneuerbare Energien erfolgt. Als Energiequellen sollen folgende Quellen genutzt werden (Stand 06/2022):

- grüner Wasserstoff mittels einer Elektrolyseanlage,
- Abwasser-Wärmetauscher und
- Grundwasserwärme des oberen Grundwasserleiters.

Die Planung und Nutzung der Grundwasserwärme des oberen Grundwasserleiters ist Gegenstand dieses Gutachtens. Am 20.09.2021 wurde die Fa. Joswig Ingenieure GmbH (JIG) beauftragt, das hydrogeologische Gutachten zur Grundwassernutzung für die Energieversorgung von Freiburg i. Br. – Gebiet Dietenbach des Instituts für Angewandte Geowissenschaften, des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) fortzuführen. Das KIT hat im Zuge einer Machbarkeitsstudie ein kleinräumiges Grundwassermodell für den Bereich Dietenbach erstellt [D 19], [D 20], [D 21]. Nach Prüfung des übergebenen Grundwassermodells wurde entschieden, dass ein neues Grundwassermodell für eine detailliertere Planung und Genehmigungsfähigkeit aufgesetzt werden soll.

Die Nutzung der Wärmeenergie aus dem Grundwasser soll in einem offenen System aus Entnahme- und Infiltrationsbrunnen erfolgen. Ziel des Gutachtens ist die Prognose von hydraulischen und thermischen Auswirkungen durch den Betrieb der geothermischen Anlage für das Neubaugebiet Dietenbach. Diese sollen mit einer 3-dimensionalen numerischen Modellierung für den 20-jährigen Betrieb berechnet werden. Die wesentlichen Ziele sind u.a. Aussagen

- zum maximalen Grundwasseraufstau und zur maximalen Grundwasserabsenkung,
- zur Entwicklung des Wärmetransports im Grundwasserabstrom,

- hinsichtlich der Funktionsweise von geplanten Rückhaltebecken, Retentionsbecken, Versickerungsbecken und dezentralen Versickerungsbereiche durch den Grundwasseraufstau,
- zum Grundwasserflurabstand, u.a. beim Mundenhofer Parkplatz, ZMF-Gelände und bei Bestandsbäumen,
- zu vorhandenen Grundwassernutzungen wie Grundwasserwärmepumpen,
- zum Trinkwasserbrunnen und Wasserschutzgebiet Tiefbrunnen (TB) Schorren der Gemeinde Umkirch,
- zum Setzungsrisiko bei Bestandsbebauung (insbesondere im Stadtteil Rieselfeld).

Anhand des Wärmebedarfprofils des neuen Stadtteils Dietenbach wurden durch die EGS Plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH (EGS), Gesamtförderraten für die geothermische Anlage Dietenbach ermittelt, welche die Grundlage für die Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellierung der Prognoseberechnungen bilden. Die Standorte der geplanten Entnahme- und Infiltrationsbrunnen, sowie deren jeweilige Teufe und Durchmesser wurden aus [D 19], [D 20], [D 21] übernommen. Durch JIG wurden folgende Leistungen erbracht:

- Erstellung eines regionalen hydrogeologischen Strukturmodells in Abstimmung mit dem Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB),
- Erstellung eines regionalen Grundwasserströmungsmodells,
- stationäre und instationäre Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells,
- Weiterentwicklung des Grundwasserströmungsmodells zu einem Wärmetransportmodell und
- Prognoseberechnungen für die 3 abgestimmte Varianten:
 - EH40, ABL, Variante BA 1-6: 27 Entnahme- und 26 Infiltrationsbrunnen,
 - EH40, ABL, Variante BA 1-4_v1: 19 Entnahme- und 26 Infiltrationsbrunnen,
 - EH40, ABL, Variante BA 1-4_v2: 19 Entnahme- und 23 Infiltrationsbrunnen.

EH40 beschreibt die Effizienzhaus-Stufe 40 der geplanten Gebäude in Dietenbach, ABL eine Abluftanlage. Die Bezeichnung BA beschreibt die betrachteten Bauabschnitte, welche in der Modellierungsvariante mit Grundwasserwärme versorgt werden. Die Variante BA 1-6 stellt den Endzustand einschließlich des 6. Bauabschnitts dar. Die beiden Variante BA 1-4 bilden den Zustand für die Bebauung bis zum 4. Bauabschnitt ab. Das erweiterte

Grundwasserströmungsmodell und die Ergebnisse der Grundwasser- und Wärmetransportmodellierungen für die jeweiligen Prognosen werden in diesem Bericht dokumentiert.

2 Unterlagenverzeichnis

- [D 1] Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: Institut für Hydrologie, Abflussentwicklung am Pegel Ebnet, URL: <https://www.hydrology.uni-freiburg.de/aktuell/dreisam/index.html>, letzter Zugriff 03.06.2022
- [D 2] Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung, 14.12.2002
- [D 3] BIT Ingenieure AG: Koordinierter Leitungsplan Dietenbach, E-Mail vom 24.02.2022
- [D 4] Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH (BGS Umwelt): Stadttunnel Freiburg Dokumentation des Grundwassermodells, 2018
- [D 5] Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH (BGS UMWELT): Stadttunnel Freiburg, Dokumentation des Grundwassermodells, Februar 2018
- [D 6] Bundesministeriums der Justiz sowie des Bundesamts für Justiz: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts¹ (Wasserhaushaltsgesetz - WHG), Ausfertigungsdatum: 31.07.2009, Zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 18.8.2021 I 3901
- [D 7] Bundesministeriums der Justiz sowie des Bundesamts für Justiz: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer, Oberflächengewässerverordnung (OGewV), 20.06.2016
- [D 8] DIETENBACH Städtebaulicher Rahmenplan, Erläuterungsbericht, Anlage 2 zur DRUCKSACHE G-20/094, Stadt Freiburg im Breisgau, November 2020
- [D 9] EGS-plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH: Gesamtförderraten für die geothermische Anlage Dietenbach in Tagesschritten, E-Mail vom 12.04.2022
- [D 10] Fliß R. et al., Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser und die Wasserversorgung in Süddeutschland, Grundwasser – Zeitschrift der Sektion Hydrogeologie, 2021
- [D 11] Funk E. Hydrogeologie, Bericht Erdaushubzwischenlager Dietenbach Geohydraulische Untersuchungen Tiefbrunnen Lehen – TB FEW 0961/069-6, Pumpversuch, k_f -Wert-Bestimmung, Hydrochemische Analysen, 2020
- [D 12] GEOsens GmbH, Bodenmanagementkonzept Dietenbach, Ergänzende Baugrunduntersuchung im Bereich Versickerungsbecken, 22.06.2021
- [D 13] Gesellschaft für Angewandte Hydrologie und Kartographie, Freiburg (AHK) entnommen aus LGRB-Gutachten vom 30.01.2015 (Az. 94-4763.3//14-9631): Hydrogeologische Untersuchungen im Umfeld des geplanten Stadttunnels

Freiburg: Wasserstände Dreisam für verschiedene Hochwasserstände, 13.01.2022

- [D 14] Hölting B. & Coldewey W. G.: Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 8. Auflage, 2013
- [D 15] HPC AG: AA Silbergrube – Sanierungsuntersuchung Restfläche Silbergrube, - Ergänzende technische Untersuchungen / Schadensquellenerkundung - Vertiefte Sanierungsvariantenstudie, 17.06.2020
- [D 16] HPC AG: Ergebnisse der Pumpversuche Dietenbachgelände, 2020
- [D 17] Hydrogeologisches Büro A. Pikulski, Dipl.-Geologe: Erläuterungsbericht um Antrag auf Ausweisung eines Wasserschutzgebietes für die Grundwasserfassungen "TB Schorren" und "TB Spitzenwäldle" in Umkirch LUBW-Nr. 315/208 und 315/74, 15.03.2021
- [D 18] Ingenieurpartnerschaft Neumann + Schweizer: Grundwassermodell und Variantenuntersuchungen im Stadtteil Landwasser Freiburg i. Br., Mathematisch-numerische Modellrechnungen, 17.03.2020
- [D 19] Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW): Hydrogeologisches Gutachten Freiburg-Dietenbach, Hydrogeologische Machbarkeitsstudie zur Grundwasser-Nutzung für die Energieversorgung, Freiburg i. Br. – Gebiet Dietenbach, 03.04.2020
- [D 20] Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW): Numerisches Grundwassermodell zur Abschätzung der Grundwasserbeeinflussung einer geplanten thermischen Grundwassernutzung für das Neubaugebiet Freiburg-Dietenbach Fortführung der Modellierung vom 03.04.2020, 23.12.2020
- [D 21] Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) Abteilungen Hydrogeologie und Ingenieurgeologie: Numerisches Grundwassermodell zur Abschätzung der Grundwasserbeeinflussung einer geplanten thermischen Grundwassernutzung für das Neubaugebiet Freiburg-Dietenbach, Fortführung der Modellierungen vom 03.04.2020 und 23.12.2020; 12.05.2021
- [D 22] Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Numerisches Grundwassermodell zur Abschätzung der Grundwasserbeeinflussung einer geplanten thermischen Grundwassernutzung für das Neubaugebiet Freiburg-Dietenbach, Modelldatei Variante 6; 5K und Variante 8; 5K, E-Mail vom 20.09.2021
- [D 23] Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg: Digitales Geländemodell Vermaschung DGM Dietenbach NHN16, 30.07.2021 als DXF-Datei
- [D 24] Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB): Informationen 12, Freiburg im Breisgau – Geologie und Stadtgeschichte, Freiburg i. Br., 1999, URL: https://produkte.lgrb-bw.de/docPool/c212_data.pdf, letzter Zugriff 03.06.2022

- [D 25] Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB): Grundwassergleichen vom Stichtag 13.09.2013 der im Rahmen der Untersuchungen zum Stadttunnel; E-Mail vom 18.02.2022
- [D 26] Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB): Geologische Profilschnitte, Geologische Daten als digitale Dateien zur Unterkante der Neuenburg-Formation, Breisgau-Formation
- [D 27] Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB): Daten Freiburger Bucht; Quartärbasis Freiburger Bucht als Isolinien, k_f -Werte Neuenburg-Formation als Punktshape-Datei, Grundwassergleichen Oberrheingraben, Grundwassergleichen Freiburger Bucht, 13.01.2022
- [D 28] Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg (LfU) 2003: Grundwassergleichen für NW 09.09.1991, MW20.10.1986 und HW 11.04.1988, als shape-File, 1996, Demonstrationsvorhaben zum Schutz und zur Bewirtschaftung des Grundwassers im Oberrheingraben (LIFE), E-Mail vom 18.02.2022
- [D 29] Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB): Aktuelle k_f -Werte 2022 für den Bereich Freiburg i. Br. übergeben am 13.01.2022 von Hr. Winker
- [D 30] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW): Daten- und Kartendienst der LUBW, URL: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/q/4X6bD6zpVA4NqPGV4174Mj>, letzter Zugriff 03.06.2022
- [D 31] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW): Digitales Geländemodell HydDGM als Geotiff-Datei aus der Hochwassergefahrenkarte mit integriertem Gewässerschlauch, E-Mail vom 03.03.2022
- [D 32] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW): Klimawandel in Baden-Württemberg: Fakten – Folgen – Perspektiven, März 2012
- [D 33] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW): Monatlich instationäre Grundwasserneubildung 2000 – 2022 als digitale Shape-Datei, E-Mail vom 04.04.2022
- [D 34] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), KLIWA Langzeitsimulation 1951-2020 mit GWN-BW, 2021“
- [D 35] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW): Digitales Geländemodell HydDGM als Geotiff, Bezugssystem ETRS89 / UTM Zone 32N und DHHN 2016 (Höhenstatus 170), E-Mail vom 03.03.2022
- [D 36] Meschede M.: Geologie Deutschlands – Ein prozessorientierter Ansatz, Berlin Heidelberg, 2015
- [D 37] Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg: Hochwassergefahrenkarte Baden-Württemberg, Beschreibung der Vorgehensweise zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten in Baden-Württemberg, 2012

- [D 38] Regierungspräsidium Freiburg Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: LGRB-Kartenviewer, URL: https://maps.lgrb-bw.de/?view=lgrb_geola_hyd, letzter Zugriff 23.06.2022
- [D 39] Regierungspräsidium Freiburg Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: räumliche Verteilung der derzeit beim LGRB gemeldeten Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden, URL: https://maps.lgrb-bw.de/?view=lgrb_uek350_geothermie, letzter Zugriff 26.07.2022
- [D 40] Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: Datenbankauszug von Bohrungen inklusive Schichtenprofile, der LGRB-Aufschlussdatenbank Stand: Januar 2022, E-Mail vom 02.02.2022
- [D 41] Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Geologische Daten, Karten; URL: LGRB https://www.lgrb-bw.de/downloads/index_html, letzter Zugriff 02.06.2022
- [D 42] Regierungspräsidium Freiburg und Landesamt für Geologie, Rohstoffe Und Bergbau Baden-Württemberg: Hydrogeologisches Abschlussgutachten des LGRB zur WSG-Abgrenzung für den TB Schorren vom 01.06.2015 mit Az. 94-4763.1//14 10683 Se/Gie, 2015
- [D 43] Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (Wirsing & Lutz 2007): Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg), CD-ROM: Hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte
- [D 44] Roth & Partner GmbH & Wald+Corbe, Stadt Freiburg: Vorbereitende Untersuchungen für eine Städtebauliche Entwicklungsmaßnahme, Untersuchungsgebiet Dietenbach, Baugrunderkundung und Gründungsberatung, umwelttechnische Untersuchungen, 27.01.2015
- [D 45] Seequent Limited (2021): Leapfrog Works 3.1, Software für 3D-Modellierung, <https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-works/>, zuletzt abgerufen: 30.06.2022
- [D 46] Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz: Pflichtenheft zur Methodik und Dokumentation thermohydrodynamischer Modellierungen im Rahmen des wasserrechtlichen Erlaubnisverfahrens zum Betrieb von Erdwärmesondenanlagen mit einer Heizleistung von >30 kW, Stand 2018, letzter Zugriff 13.07.2022
- [D 47] Smolczyk, Grundbautaschenbuch, Fünfte Auflage, Teil 1, 1996
- [D 48] Stadt Freiburg i. Br., Verordnung der Stadt Freiburg i. Br. über die Festsetzung eines Wasserschutzgebiets auf den Gemarkungen der Stadtteile Munzingen und Tiengen der Stadt Freiburg i. Br. und dem Ortsteil Mengen der Gemeinde Schallstadt (Wasserschutzgebietsverordnung, 26.06.1992
- [D 49] Stadt Freiburg im Breisgau Dezernat II / Umweltschutzamt: Langjährige Messungen der Grundwassertemperatur in Dietenbach für 7 Messstellen

- [D 50] Stadt Freiburg im Breisgau Dezernat II / Umweltschutzamt: Karte mit den Gewässern 1. und 2. Ordnung sowie zur Orientierung weitere Gräben und Fließgewässer im Gebiet von Dietenbach, E-Mail vom 07.02.2022
- [D 51] Stadt Freiburg im Breisgau Dezernat II / Umweltschutzamt: Loggermessungen mit Grundwasserständen von ca. 2000 bis 2021, E-Mail vom 23.12.2021
- [D 52] Stadt Freiburg im Breisgau Garten- und Tiefbauamt: Digitales Geländemodell Vermaschung DGM Dietenbach NHN16, 16.11.2021 als DXF-Datei
- [D 53] Stadt Freiburg im Breisgau, Dezernat II / Umweltschutzamt: Daten zur Stichtagsmessung Mai 2016 , E-Mail vom 21.09.2021
- [D 54] Stadt Freiburg im Breisgau, Dezernat II / Umweltschutzamt: Grundwassergleichenplan sowie Belegpunkte als shape-File, mittlerer Grundwasserhochstand 2016 (MHGW 2016), E-Mail vom 23.12.2021
- [D 55] Stadt Freiburg im Breisgau, Garten- und Tiefbauamt: Geländeoberkante im Endzustand (Höhenkonzept) mit Stand August 2021 als DXF-Datei, E-Mail vom 30.05.2022
- [D 56] Stadt Freiburg im Breisgau, Garten- und Tiefbauamt: Vermessung der Geländeoberkante für Freiburg-Dietenbach mit Stand 16.11.2021 als DXF-Datei, E-Mail vom 01.06.2022
- [D 57] Stadt Freiburg im Breisgau: Internetpräsenz der Stadt Freiburg - Neuer Stadtteil Dietenbach, URL: <https://www.freiburg.de/pb/495838.html>, letzter Zugriff 26.07.2022
- [D 58] Umweltministerium Baden-Württemberg: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser oder Anlagen mit Energieentzug bis zirka 45.000 kWh pro Jahr, 2009
- [D 59] VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt: VDI 4640 Blatt 1 Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte 2010-06
- [D 60] VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt: VDI 4640 Blatt 2 Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen
- [D 61] WALD + CORBE Consulting GmbH: Gewässerausbau Dietenbach zwischen Besançonallee und Straße Zum Tiergehege, Genehmigungsplanung Erläuterungsbericht, Objektplanung Ingenieurbauwerke, Juli 2020
- [D 62] WALD + CORBE Consulting GmbH: Grundwassergleichen als shape-File, mittlerer Grundwasserhochstand Dietenbach 2019 (MHGW 2019), E-Mail vom 23.12.2021
- [D 63] WALD + CORBE Consulting GmbH: Grundwassertemperaturen in der Dietenbachniederung / Stadt Freiburg 2018 – 2019, E-Mail vom 23.12.2021

3 Hydrogeologisches Strukturmodell

3.1 Vorgehensweise

Bei der Erstellung des hydrogeologischen Strukturmodells wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

1. Abgrenzung des großräumigen Untersuchungsraums, Recherche und Darstellung verfügbarer relevanter Unterlagen und Daten, die für das regionale Verständnis der Grundwasserströmungsvorgänge relevant sind und
2. Abgrenzung des Modellraums innerhalb des Untersuchungsraums in Abstimmung mit dem LGRB und dem Umweltschutzamt (UWSA) der Stadt Freiburg: im Modellraum werden die relevanten Grundwasserströmungsvorgänge ausreichend detailliert beschrieben und die thermische Beeinflussung durch die geplante Geothermieranlage (Grundwasserwärmepumpenanlage) untersucht. Der Modellraum des hydrogeologischen Strukturmodells bildet später auch die Grenze des Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodells.

Die Lage des Modellraums ist in Anlage 1.1 und Anlage 2.1 dargestellt. Details zur Festlegung des Modellraums für das hydrogeologische Strukturmodell und das darauf aufbauende Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell sind Kapitel 3.2 zu entnehmen.

3.2 Abgrenzung Modellraum

3.2.1 Horizontale Abgrenzung des Modellraums

Anhand der durchgeführten regionalen Betrachtung der hydrogeologischen Verhältnisse wurde aus den vorhandenen Unterlagen und Daten der Modellraum für das Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell abgegrenzt (siehe Anlage 1.1). Die Festlegung des Modellraums wurde mit dem UWSA Freiburg und dem LGRB abgestimmt. Dabei wurden die Grenzen des Modells so festgelegt, dass das Gebiet eine ausreichende Größe aufweist, um alle relevanten Fragestellungen, insbesondere die hydraulischen und thermischen Auswirkungen durch die geothermische Anlage von Dietenbach, beantworten zu können. Wichtig ist dabei die Vermeidung von unbeabsichtigten Beeinflussungen durch

die Randbedingungen an den Modellrändern (z.B. Vermeidung von künstlichem Entzug oder Speisung von Grundwasser, oder von zu nahe gelegenen undurchlässigen Modellrändern zum Standort Dietenbach).

Am Standort Dietenbach ist für die geothermische Anlage eine Grundwasserentnahme und Grundwasserreinfiltration im Endzustand von ca. 2,38 Mio. m³/a (davon 99,6 % in den Monaten Oktober bis Mai) vorgesehen. Es wird sich im Bereich der Entnahmefunnen ein Grundwasserabsenktrichter und im Bereich der Infiltrationsbrunnen eine Grundwasseraufhöhung einstellen, welche einen ausreichend großen Modellraum voraussetzen. Ziel der Modellierung ist es unter anderem, Aussagen zu potenziellen Beeinträchtigungen der Trinkwasserförderung am TB Schorren der Gemeinde Umkirch zu treffen, weshalb der Modellraum auch das fachtechnisch abgegrenzte Wasserschutzgebiet Umkirch TB Schorren enthält.

Der Betrieb der geothermischen Anlage am Standort Dietenbach wird zu einer verringerten Grundwassertemperatur im Abstrom führen. Um die thermische Beeinflussung im Abstrom über 20 Jahre ausreichend abbilden zu können, wurde der Modellraum in Abstromrichtung (NW) ausreichend groß gewählt (ca. 4,7 km).

Die horizontale Modellraumabgrenzung erfolgte anhand der vorhandenen Grundwassergleichen des quartären Grundwasserleiters (GWL). Die vom UWSA zur Verfügung gestellten, für den mittleren Grundwasser-Hochwasserstand 2016 (MHGW 2016) ausgewerteten Grundwassergleichen [D 54] sind für den größten Teil des Untersuchungsgebietes verfügbar und wurden zur Abgrenzung des Modellraums herangezogen. Dieser zur Verfügung gestellte Grundwassergleichenplan entspricht näherungsweise der interpolierten Stichtagsmessung von Mai 2016 (siehe Abbildung 1). Für den Bereich nordwestlich von Dietenbach mit der Gemeinde Umkirch, welcher nicht durch die GW-Gleichen des MHGW-Plan 2016 abgedeckt wird, wurden zusätzlich die GW-Gleichen vom Hochwasser (HW) des Stichtages 11.04.1988 [D 28] herangezogen. Beide Datensätze (und somit auch die STM Mai 2016) bilden hohe Grundwasserstände ab. An den Übergängen der Datensätze bestehen nur geringe Abweichungen von wenigen Dezimetern bis ca. 0,5 m im Westen und maximal ca. 1 m im Osten. In Anlage 4.3 sind die Modellraumabgrenzung und die äußeren Randbedingungen des Grundwasserströmungsmodells dargestellt.

Der Modellraum umfasst eine Fläche von ca. 66 km². Die NE-SW-Ausdehnung beträgt ca. 11 km und NW-SE-Ausdehnung ca. 9,6 km. Die Distanz zwischen dem Standort Dietenbach und der abstromigen Modellgrenze erstreckt sich über ca. 5 km. Der Modellrand östlich und westlich von Dietenbach befindet sich 3 km entfernt.

Zur numerischen Berechnung und Lösung des mathematischen Gleichungssystems ist das Setzen von Randbedingungen im Modell erforderlich. Es wird in Randbedingungen 1. Art, 2. Art und 3. Art unterschieden. Als Randbedingung 1. Art (= Dirichlet-Randbedingung) wird ein Festpotential an Modellknoten des entsprechenden Modellrands gesetzt und somit ein Grundwasserstand an diesen Knoten definiert. Alternativ kann eine Randbedingung 2. Art (= Neumann-Randbedingung) gesetzt werden. Dabei wird ein Grundwasserzustrom ins Modellgebiet, sprich ein Zufluss über den Rand, in $[m^3/(m^2 \cdot d)]$ (= $[m/d]$) definiert. Liegt die Modellgrenze orthogonal zu den zur Abgrenzung verwendeten Grundwassergleichen (hier MHGW 2016 [D 54]), findet kein Zufluss über den Rand statt („no-flow“) und die Knoten am Modellrand werden mit einer Zufluss-Randbedingung von 0 m/d belegt. Wird das Modellgebiet durch ein Oberflächengewässer begrenzt, kann eine Randbedingung 3. Art (Cauchy-Randbedingung) gesetzt werden. Abhängig von den im Oberflächengewässer gesetzten Potentialen (Wasserständen) und den angesetzten Leakage-Faktoren wirkt das Oberflächengewässer drainierend oder das Oberflächenwasser infiltriert ins Grundwasser.

Südöstliche Modellgrenze bei Freiburg

Die südöstliche Modellgrenze wurde entlang der Äquipotentiallinie 266 m NHN vom MHGW-Plan 2016 festgelegt, welche durch die Stadt Freiburg in SW-NE-Richtung verläuft. Dieser Modellrand stellt den Grundwasserzustrom aus dem Dreisamtal in die Freiburger Bucht dar (Anlage 4.3). Der Modellrand quert die Dreisam entlang der Kronenbrücke und endet südwestlich an der Lorettostraße. Dieser Abschnitt des Modellrandes wurde mit der hydraulischen Randbedingung 1. Art (Festpotential) für die quartären Schichten belegt. Die südwestliche Fortsetzung des Modellrandes erfolgte entlang der Ausbreitung des quartären Grundwasserleiters und wurde mit einer Zustromrandbedingung 2. Art (Neumann-Randbedingung) belegt, da für diesen Abschnitt ein Grundwasserzufluss vom Fuße des Lorettoberges anzunehmen ist. Westlich schließt sich ein kurzer Modellrandabschnitt in W-O-Richtung bei der Gemeinde Merzhausen an. Dieser Abschnitt wurde mit einer hydraulischen Randbedingung 1. Art (Festpotential – Dirichlet-Randbedingung) abgebildet, da durch diesen Modellrandabschnitt ein Zustrom aus dem

Hexental anzunehmen ist. Über die Höhe der Grundwasser-Zuströme aus dem Bereich Lorettoberg sowie aus dem Hexental liegen keine Informationen vor. Der Grundwasser-Zufluss über das Festpotential 1. Art bei Merzhausen/Hexental sowie der Grundwasser-Zufluss aus dem Bereich Lorettoberg wurden im Laufe der stationären Kalibrierung auf 254,5 – 257,5 m NHN bzw. 0,1 m/d festgelegt. Die Lage des Hexentals sowie des Lorettoberges sind in Anlage 4.3 dargestellt. Die Höhe der Festpotentiale wurde initial von den Hydroisohypsen abgeleitet. Der Zufluss als Randbedingung 2. Art ist ein Ergebnis der Modellkalibrierung, für diesen Bereich liegen keine Werte vor.

Nordwestlicher Modellrand

Die nordwestliche Modellgrenze wurde in Absprache mit dem LGRB entlang der Äquipotentiallinie 196 m NHN vom Hochwasser (HW) Stichtag 11.04.1988 festgelegt, da für diesen Bereich keine GW-Gleichen im MHGW-Plan 2016 ausgewiesen sind. Die nordwestliche Modellgrenze stellt den Grundwasserabstrom aus dem Modellraum dar und wurde so gewählt, dass das fachtechnisch abgegrenzte Wasserschutzgebiet Umkirch des TB Schorren vollständig im Modellraum enthalten ist (siehe Abbildung 7) und die Temperaturfahne der geothermischen Anlage Dietenbachs nach 20 Jahren Betrieb abgebildet wird.

Südlicher und westlicher Modellrand

Der südliche und westliche Modellrand wurde entlang der Vorfluter Mühlbach und Kuhlagerbächle festgelegt (Anlage 4.1). Entlang dieses Modellrandes wurde die hydraulische Randbedingung 3. Art (Cauchy) zugewiesen, welche die beiden Fließgewässer abbildet (Anlage 4.3). Der Modellrand verläuft gleichzeitig entlang der Grundwasserströmungsrichtung. Lediglich ein kurzer Abschnitt im Süden bei Sankt Georgen wird durch einen No-Flow-Rand unterbrochen. Die westliche Ausbreitung des Modellrands wird durch die Verbreitung des quartären GWL bestimmt, welche durch den NE-SW verlaufenden Tuniberg (Jura, Tertiär) begrenzt ist. Mögliche Zuflüsse von Westen aus dem Bereich des Tunibergs in die Freiburger Bucht würden sich in Schwankungen des Mühlbaches widerspiegeln, weshalb eine hydraulische Anbindung des Mühlbachs zum Grundwasser berücksichtigt wurde.

Nordöstlicher und nördlicher Modellrand

Der nordöstliche Modellrand stellt eine so genannte No-Flow-Randbedingung dar, entlang welcher kein Grundwasser-Zu- oder -Abstrom in den Modellraum oder aus dem Modellraum erfolgt. Der Modellrand schneidet die Grundwassergleichen in einem Winkel von 90° bis zur Ortschaft Benzhausen am Autobahnkreuz Freiburg Nord. Der Modellrand verläuft von dort aus nach Westen entlang des Ausbisses mesozoischer Gesteinsformationen der tektonischen Hochscholle, die den Marchhügel bzw. Nimberg bildet, und die Ausbreitung des quartären Grundwasserleiters nach Norden hin begrenzen.

3.2.2 Vertikale Abgrenzung des Modellraums

Die obere Abgrenzung des Modellraums wird durch die Geländeoberkante, bzw. das digitale Geländemodell definiert, welches für das Modellgebiet aus mehreren Datensätzen besteht. Details sind dem Kapitel 3.8 zu entnehmen. Die untere vertikale Abgrenzung des Modellraums wird für den Großteil des Modells durch die Unterkante des Quartärs gebildet. Die Unterkante des Quartärs wurde vom LGRB als digitale Höhenlinien und als Bohrpunkte übergeben [D 26]. Da im Abstrom von Dietenbach der TB Schorren der Gemeinde Umkirch Grundwasser in der Hauptrogenstein-Formation (jmHR, „Hauptrogenstein“) für die öffentliche Trinkwasserversorgung erschließt und Aussagen zur Beeinflussung durch die geplante geothermische Anlage von Dietenbach getroffen werden sollen, wurde der Hauptrogenstein westlich von Dietenbach im Modell konzeptionell berücksichtigt. Die Unterkante des Modells westlich von Dietenbach wird deshalb durch die Unterkante der Hauptrogenstein-Formation definiert. Zur Ableitung der Hauptrogenstein-Unterkante wurden vom LGRB 10 Profilschnitte und Bohrdaten übergeben, von denen drei Schnitte in Anlage 3.2 dargestellt sind. Anhand der übergebenen Daten wurden die Unterkante und Oberkante des Hauptrogensteins in einem 3D-Modell hydrostratigraphisch modelliert (siehe Kapitel 3.7). Bereichsweise wird der Hauptrogenstein von der Variansmergel-Formation (jmV) und tertiärem Sedimentgestein überlagert. Die tertiären Formationen werden nur im Modell berücksichtigt, wenn diese den Hauptrogenstein vom Quartär hydraulisch wirksam trennen.

3.2.3 Standortbeschreibung Dietenbach

Der Standort Dietenbach ist ein geplanter Stadtteil der Stadt Freiburg im Breisgau, welcher sich zwischen den bestehenden Stadtteilen Weingarten im Osten, Rieselfeld im Süden und Lehen im Norden befindet. Die östliche Ausdehnung von Dietenbach wird durch die Tel-Aviv-Yafo-Allee (ehemals Besançonallee) und die nördliche bzw. nordöstliche Ausdehnung durch die Bundesstraße B31a begrenzt. Im Westen von Dietenbach befindet sich das Tiergehege Mundenhof und im Nordwesten wird Dietenbach durch die Straße zum Tiergehege begrenzt. Der überwiegende Bereich des Gebietes liegt als Grün- und Ackerfläche vor und wurde bisher landwirtschaftlich genutzt. Der Standort erstreckt sich über eine Fläche von ca. 160 ha und weist eine Ausdehnung von ca. 2,5 km in Nord-Süd-Richtung sowie 1,8 km in West-Ost-Richtung auf [D 61].

3.3 Geologie

Der Standort Freiburg-Dietenbach befindet sich regionalgeologisch in der Freiburger Bucht. Er gehört der lithostratigraphischen Region Schwarzwald an. Westlich im Abstrom schließt sich die lithostratigraphische Region südlicher Oberrheingraben an. Der Oberrheingraben stellt eine lang gestreckte Dehnungszone dar, die von gegeneinander einfallenden Störungen oder Störungszonen begrenzt ist [D 36]. Die jüngsten Sedimente im Oberrheingraben sind Dünensande und Lössablagerungen, die während der Vereisungsphasen im Pleistozän entstanden sind. Die heutige Oberrheinebene ist geprägt von fluviatilen Sedimenten des Rheins, der bis in historische Zeiten seinen Lauf in einem mäandrierenden System ständig verlagerte. Gemäß hydrogeologischem Abschlussgutachten des LGRB zur Wasserschutzgebiets-Abgrenzung für den TB Schorren [D 42] wurden die sich absenkenden Schollen mit quartären Sedimenten überdeckt. Die Schollen sind teilweise versetzt und verkippt, sodass eine komplexe geologische Struktur im Liegenden der quartären Sedimente vorliegt.

Im Folgenden wird die Schichtenfolge vom Hangenden zum Liegenden, also von den jüngsten oberflächennahen Schichten zu den ältesten Schichten beschrieben.

Neuenburg-Formation des Quartärs (qNE)

Oberflächennah stehen die sandig-kiesigen Sedimente des Dreisam-Schwemmfächers an, welche gemäß [D 42] in zwei Einheiten unterteilt werden. Die obere Einheit bildet die Neuenburg-Formation aus Kiesen und Sanden mit einer Mächtigkeit von ca. 15 m. Diese

oberflächennahen, gut durchlässigen Sedimente bedecken nahezu den gesamten Untersuchungsraum. Lediglich bei der Erhöhung Honigbuck südwestlich von Dietenbach und beim Lehener Bergle nördlich von Dietenbach wird die Neuenburg-Formation durch tertiäre bzw. jurassische Ablagerungen durchbrochen. Gemäß [D 42] sind die in der Freiburger Bucht vorkommenden Sedimente der Neuenburg-Formation der Zarten-Subformation (qNEZ) zuzurechnen.

Breisgau-Formation des Quartärs (qBR)

Im Liegenden der Neuenburg-Formation befinden sich die stark verwitterten Kiese der Breisgau-Formation. Die Mächtigkeit der Breisgau-Formation schwankt stark zwischen wenigen Metern bis über 100 m (siehe Anlage 2.2 und 3.1). Im Süden und Osten des Untersuchungsraums sind die höchsten Mächtigkeiten mit über 100 m anzutreffen. Aufgrund der Verwitterung sind die hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte geringer als die der Neuenburg-Formation. Details sind Kapitel 3.4 zu entnehmen.

Tertiäre Sedimentgesteine

Innerhalb des Untersuchungsraums treten bereichsweise tertiäre Sedimentgesteine auf. Gemäß [D 42] handelt es sich dabei um überwiegend tonig-mergelige Sedimentgesteine. Nachgewiesen wurde die größte Mächtigkeit nordwestlich von Dietenbach mit bis zu ca. 50 m. Im Modell wurden lediglich tertiäre Vorkommen berücksichtigt, die die quartären Formationen durchdringen und tertiäre Vorkommen im Hangenden der Hauptrogenstein-Formation.

Variansmergel-Formation des Mitteljura (jmV)

Im Liegenden der tertiären Sedimentgesteine ist bereichsweise die Variansmergel-Formation verbreitet. Dabei handelt es sich um eine Wechselfolge von Kalksteinen, Tonmergelsteinen und Mergelkalksteinen. Im Grundwasserströmungsmodell wurde lediglich das Vorkommen westlich von Dietenbach betrachtet, da dieses für die Abbildung des Hauptrogensteins relevant ist. Details zum vertikalen Modellaufbau sind Kapitel 3.2.2 zu entnehmen. Gemäß [D 42] erreicht die jmV Mächtigkeiten bis zu 30 m.

Hauptrogenstein-Formation des Mitteljura (jmHR)

Die im Untersuchungsgebiet älteste betrachtete geologische Formation stellt die Hauptrogenstein-Formation dar. Der Hauptrogenstein wird als stark verkarstet mit

zahlreichen Hohlräumen bzw. Füllungen charakterisiert [D 42]. Für die Fragestellung der thermischen und hydraulischen Beeinflussung durch Dietenbach wurde lediglich das Hauptrogensteinvorkommen westlich von Dietenbach betrachtet (Anlage 3.1). Weitere Hauptrogensteinvorkommen befinden sich westlich des Modellraums im Bereich des Tuniberg-Ostgrabens, welche jedoch für die Fragestellung nicht relevant sind. Abstromig von Dietenbach erreicht der Hauptrogenstein eine maximale Mächtigkeit von ca. 60 - 70 m. Die Hauptrogenstein-Formation wird durch zwei parallel zueinander verlaufende tektonische Störungen begrenzt. Durch eine nahezu vollständige Erosion im Bereich des Waltershofener Wegs bzw. nördlich davon und im Bereich der Autobahn-Unterführung [D 17] ist der Hauptrogenstein in eine Nord- und Südscholle unterteilt. Anhand der verfügbaren Bohrdaten lässt sich aktuell eine durchgehende Verbreitung des Hauptrogensteins nicht belegen. Basierend auf der räumlichen Verbreitung von LCKW-Konzentrationen sowie den nachgewiesenen geohydraulischen Verhältnissen ist jedoch von einer hydraulischen und stofflichen Verbindung zwischen den Teilschollen auszugehen [D 17]. Details zur hydrogeologischen Situation sind dem Kapitel 3.4 zu entnehmen.

3.4 Hydrogeologie

3.4.1 Hydrogeologische Einheiten und Hydrodynamik

Für die Fragestellung der thermischen und hydraulischen Beeinflussung durch die geothermische Anlage in Dietenbach wurden innerhalb des Untersuchungsraums insgesamt drei Grundwasserleiter (GWL) betrachtet:

- Porengrundwasserleiter Neuenburg-Formation (Oberer GWL des Quartärs),
- Porengrundwasserleiter Breisgau-Formation (Unterer GWL des Quartärs) und
- Kluft- und Karstgrundwasserleiter Hauptrogenstein-Formation (Mitteljura).

Die Freiburger Bucht ist oberflächennah durch quartäre Ablagerungen des Dreisamschwemmfächers gekennzeichnet (Kapitel 3.3). Diese quartären Sedimente werden in einen oberen (OGWL) und unteren Grundwasserleiter (UGWL) unterteilt. Der OGWL stellt die Neuenburg-Formation mit gut durchlässigen Kiesen und Sanden dar. Der UGWL, die Breisgau-Formation, ist dahingegen durch weitgehend verwitterte bis vollständig zersetzte Kiese [D 17] geprägt und somit gegenüber der Neuenburg-Formation

durch eine geringere hydraulische Leitfähigkeit charakterisiert. Bei beiden GWL handelt es sich um Porengrundwasserleiter. Aufgrund der hydraulischen Verbindung des oberen und unteren GWL und nur geringen Grundwasserpotentialunterschiede wird im Folgenden in der Einzahl als quartärer GWL geschrieben.

Im Liegenden des Quartärs befindet sich der GWL in der Hauptrogenstein-Formation des Mitteljura. Die Hauptrogenstein-Formation bildet einen Kluft- und Karstgrundwasserleiter, da dieses Festgestein stark verkarstet und geklüftet ist [D 42]. Informationen zum Anteil der Klüfte am Gesteinsvolumen (Kluftporosität) liegen nicht vor. Dieser wird daher mit ca. 1 % abgeschätzt [D 17]. Die Variansmergel-Formation und die tertiären Sedimentgesteine, welche bereichsweise die Hauptrogenstein-Formation überlagern, wirken als Grundwassergeringleiter und führen somit bereichsweise zu einer hydraulischen Entkopplung zwischen dem quartären GWL und dem Hauptrogenstein-GWL. Dies wird durch die zum Teil unterschiedlichen Grundwasserdruckpotentiale in beiden GWL ersichtlich [D 17]. Gemäß [D 17] liegen die Grundwasserdruckpotentiale im Hauptrogenstein-GWL großräumig etwa 1,7 - 3,7 m niedriger als in den überlagernden quartären Grundwasserleitern. Dagegen liegt nördlich und südwestlich der Ortslage von Umkirch sowie im Bereich des TB Schorren und am westlichen Rand der Teilschollen die Druckfläche des Karstgrundwassers höher als die des Grundwassers in den quartären Kiesen und Sanden.

Im oberen quartären GWL (Neuenburg-Formation) liegen ungespannte Grundwasserverhältnisse vor, wohingegen der untere GWL (Breisgau-Formation) und der GWL Hauptrogenstein gespannte Verhältnisse gemäß [D 17] aufweisen. Der Hauptrogenstein ist darum größtenteils vom quartären Grundwasserleiter hydraulisch entkoppelt. Aus Anlage 5.2.1 ist zu entnehmen, dass die Grundwasserströmung innerhalb des Hauptrogensteins von Südost nach Nordwest erfolgt, wobei in der Nord-Scholle auch Grundwasserströmungen von Süd nach Nord entsprechend den konstruierten Grundwassergleichen abzuleiten sind. Die Grundwassergleichen in der Süd-Scholle wurden anhand von drei Grundwassermessstellen (GWM) und für die Nord-Scholle anhand von vier GWM abgeleitet und bilden den Zustand für Oktober 2012 ab. Es ist zu beachten, dass der Trinkwasserbrunnen TB Schorren der Gemeinde Umkirch erst nach der Stichtagsmessung am 28.11.2012 in Betrieb genommen wurde [D 17] und somit der hydraulische Einfluss des TB Schorren in dem Grundwassergleichen nicht abgebildet ist.

Im Hydrogeologischen Strukturmodell wurden insgesamt fünf hydrostratigraphische Einheiten berücksichtigt, welche die Grundlage für das darauf aufbauende Grundwasserströmungsmodell bilden. Die Unterteilung erfolgte anhand hydrogeologischer Eigenschaften, wobei zwischen grundwasserleitenden und grundwasserhemmenden Schichten unterschieden wurde. In Tabelle 1 sind die 5 Modellschichten zusammengefasst.

Tabelle 1: Schichtenfolge des Hydrogeologischen Strukturmodells

Modell-schicht	Epoche	Bezeichnung	GWL/ GWH*	GWL-Typ
1	Quartär	Neuenburg- Formation	GWL	Poren- grundwasserleiter
2	Quartär	Breisgau- Formation	GWL	Poren- grundwasserleiter
3	Tertiär	Tertiär	GWH	(entfällt)
4	Mittel- jura	Varians- mergel	GWH	(entfällt)
5	Mittel- jura	Hauptrogen- stein	GWL	Karst- grundwasserleiter

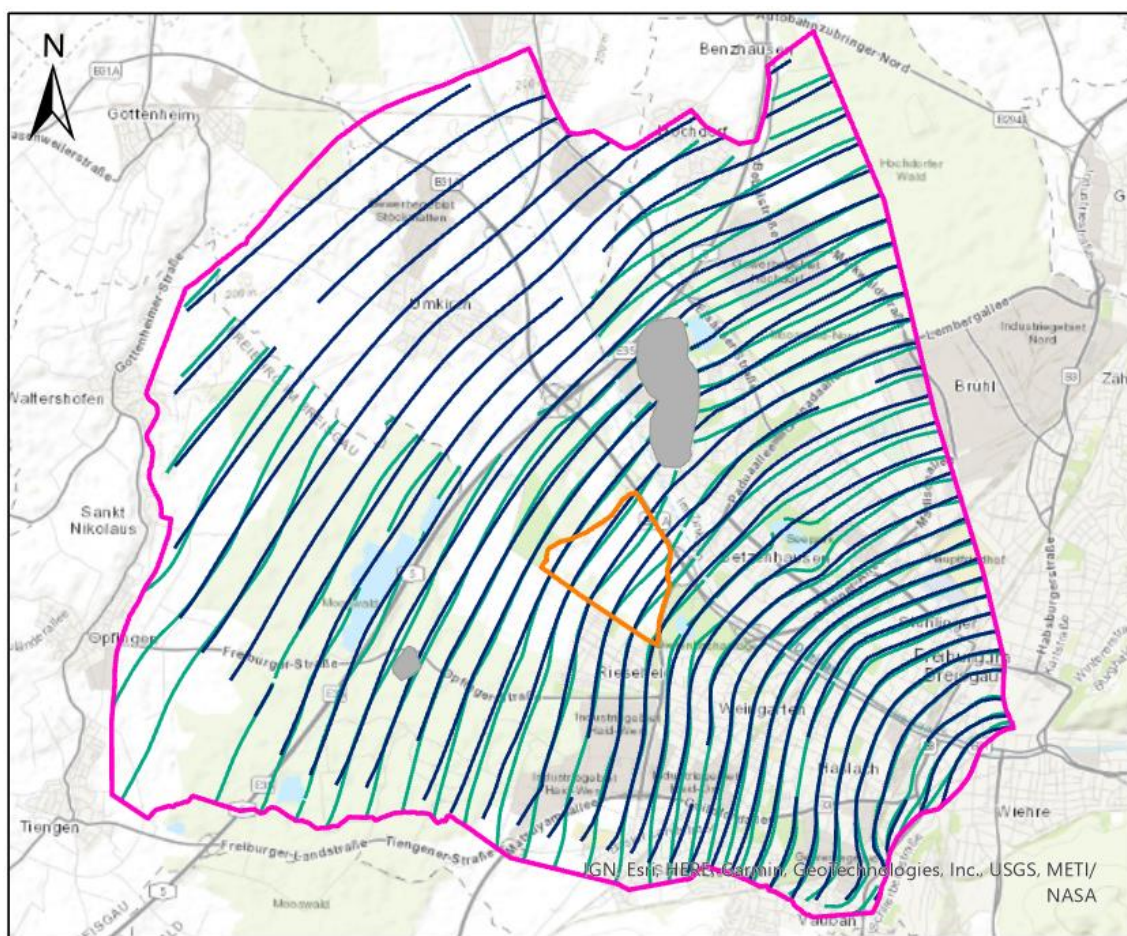
* GWL: Grundwasserleiter, GWH: Grundwasserhemmer (Grundwassergeringleiter)

Für die Hydrodynamik des quartären GWL lagen mehrere Datensätze mit konstruierten Grundwassergleichen vor, wobei die flächige Ausdehnung der verfügbaren Daten variiert. Folgende relevante Datensätze lagen u.a. für den quartären Grundwasserleiter vor:

- Mittlerer Grundwasserhochstand 2019 (MHGW 2019) [D 62],
- Mittlerer Grundwasserhochstand 2016 (MHGW 2016) [D 53] (für die Modellgebietsabgrenzung verwendet),
- Hochwasserstand (HW) vom Stichtag 11.04.1988 [D 28] und

- Grundwassergleichen vom Stichtag 13.09.2013 [D 25].

Zudem liegt ein Datensatz zur Stichtagsmessung Mai 2016 [D 53] vor. Dieser umfasst gemessene Grundwasserstände an insgesamt 178 Grundwassermessstellen (davon 68 im Modellgebiet). Nach Interpolation dieses Datensatzes durch JIG (Kriging-Verfahren mit der Software Surfer) wurde ersichtlich, dass die Grundwassergleichen der STM Mai 2016 näherungsweise mit dem Grundwassergleichenplan des MHGW 2016 [D 54] übereinstimmen (siehe Abbildung 1).



Legende

- Lehener Berge und Honigbuck
- Modellgebiet
- Bereich Freiburg Dietenbach
- Interpolierte Grundwassergleichen Neuenburg-Formation STM Mai 2016
- Konstruierte Grundwassergleichen Neuenburg-Formation MHGW 2016

Kilometer
0 0,5 1 2

Abbildung 1 Vergleich der durch JIG interpolierten Grundwassergleichen der STM Mai 2016 [D 53] und der konstruierten Grundwassergleichen MHGW 2016 [D 54]

Die Grundwassergleichen des MHGW 2016 decken nahezu den gesamten Untersuchungsraum ab (Anlage 5.2.1). Lediglich im Nordwesten des Untersuchungsraums sind keine Grundwassergleichen ausgewiesen. Diesen Bereich deckt dahingegen der Datensatz vom Demonstrationsvorhaben zum Schutz und zur Bewirtschaftung des Grundwassers im Oberrheingraben (LIFE) [D 28] ab. Der Datensatz zum MHGW 2019 deckt lediglich den begrenzten Bereich für Dietenbach ab.

Die Grundwassergleichen vom Stichtag 13.09.2013 [D 25], welche im Rahmen der Untersuchungen zum Stadttunnel vom LGRB erstellt wurden, erstrecken sich von Osten über das Dreisamtal über den östlichen Teil der Freiburger Bucht bis kurz vor Dietenbach. Im Gegensatz zu den übrigen Grundwassergleichen wurde die abschnittsweise infiltrierende und exfiltrierende Wirkung der Dreisam berücksichtigt, sodass der Verlauf der Grundwassergleichen entlang der Dreisam nicht ausgespart wurde und stattdessen flussabwärts gerichtete Ausbuchtungen der Grundwassergleichen bei Niedrigwasser konstruiert wurden.

Alle Datensätze zeigen gleichermaßen eine von Südost nach Nordwest gerichtete Grundwasserströmungsrichtung an. Der hydraulische Gradient i [-] verteilt sich relativ konstant über den Modellraum und beträgt ca. $i = 0,005$ [-] bis $0,006$ [-]. Im Südosten, beim Grundwasserzustrom aus dem Zartner Becken, steigt der hydraulische Gradient auf ca. $i = 0,01$ [-] an. Diese hier durchgeführten Berechnungen werden durch die Aussagen in [D 24] grundsätzlich bestätigt, hier wird für den hydraulischen Gradient im Osten zwischen $i = 0,011$ [-] und $0,012$ [-] sowie weiter stromabwärts im Westen ein abnehmender hydraulischer Gradient von $i = 0,01$ [-] bis auf $0,004$ [-] angegeben.

Der Grundwasserflurabstand nimmt von Osten nach Westen ab, da das Gefälle der Geländeoberkante steiler als das Gefälle der Grundwasseroberfläche ist [D 24]. Im Übergangsbereich vom Zartner Becken zur Freiburger Bucht beträgt der Flurabstand ca. 10 bis 20 m. Von dort nimmt er mit wachsender Entfernung vom Zartner Becken bis auf unter 1 m im Bereich Dietenbachs sowie abstromig von Dietenbach ab.

Grundwasserschwankungen

Aus den vorhandenen Grundwassermessstellen mit Datenloggern (siehe Abbildung 2) [D 51] für den Zeitraum von ca. 2010 bis 2020 ergeben sich für die meisten Grundwassermessstellen Schwankungen von ca. 1 bis 2 m im Umfeld von Dietenbach.

Lediglich im nordöstlichen Bereich der Freiburger Bucht wurden Grundwasserschwankungen von bis zu 3 m gemessen.

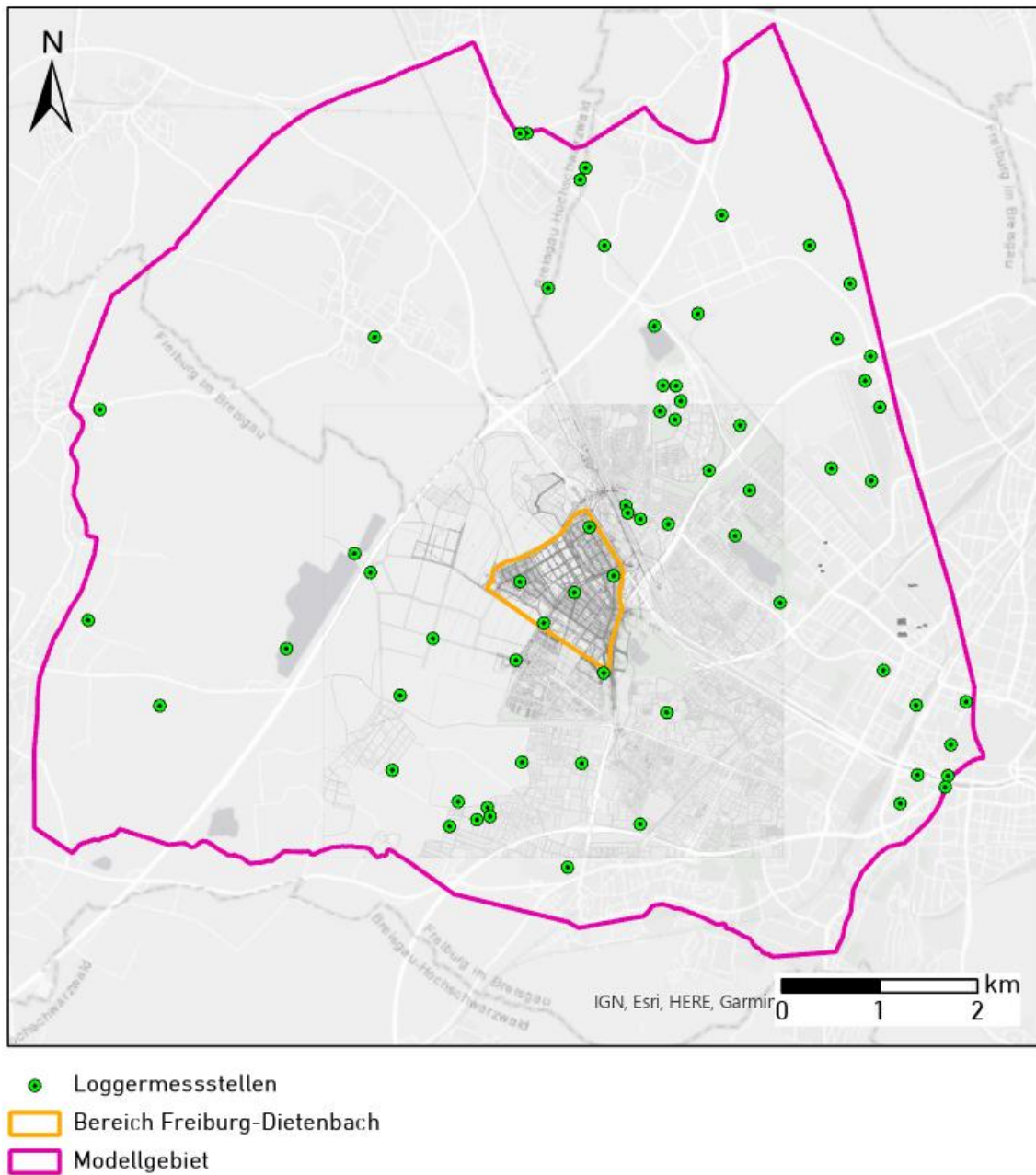


Abbildung 2: Lage der Grundwassermessstellen mit Datenloggern im Raum Freiburg i. Br.

Grundwasserspeisung

Wie aus den Grundwassergleichen von Anlage 5.2.1 hervorgeht, erfolgt der Grundwasserzustrom in die Freiburger Bucht im Südosten aus dem Zartner Becken. Insgesamt wird das Grundwasservorkommen der Freiburger Bucht nach [D 17] durch folgende drei Anteile gespeist:

- Zustrom aus dem Zartner Becken,
- Grundwasserneubildung (aus Niederschlag) und
- Infiltration durch Oberflächengewässer (insbesondere Vorfluter Dreisam).

Die Speisung durch den Niederschlag wird maßgeblich durch die Grundwasserneubildung beschrieben. Die stationäre langjährige mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet im Zeitraum 1951 bis 2020 beträgt 14 Mio. m³ pro Jahr mit einem flächengewichteten Mittelwert von ca. 210 mm/a (LUBW) [D 34]. Details zur Grundwasserneubildung im Untersuchungsraum sind in Kapitel 3.9 beschrieben.

In Tabelle 2 sind die verschiedenen Angaben zum Zustrom aus dem Zartner Becken zusammengestellt. Wie aus der Dokumentation des Grundwassermodells für den Stadttunnel Freiburg [D 4] zu entnehmen ist, beträgt der Zustrom aus dem Dreisamtal in die Freiburger Bucht nach Badenova ca. 750 l/s. Gemäß LGRB [D 4] lassen sich durch Wasserhaushaltsbetrachtungen bis zu 2.500 l/s abschätzen. Es fließen ca. 700 l/s Grundwasser aus dem Zartner Becken dem Dreisamtal zu. Dieser Zustrom bezieht sich jedoch auf den Bereich des Übergangs vom Zartner Becken ins Dreisamtal (ca. Höhe Dreisam-Pegel in Ebnet). Unter Beachtung der vorliegenden Hangabflüsse und Infiltrations- sowie Exfiltrationsmengen aus dem BGS-Bericht [D 4], der bekannten Grundwasserentnahmen sowie der Grundwasserneubildung aus dem LGRB-Datensatz [D 34], wurde der Zufluss für die neue Modellraumgrenze auf 680 l/s geringfügig gemindert.

Tabelle 2: Übersicht zum Grundwasser-Zustrom aus dem Zartner Becken bzw. Dreisamtal in die Freiburger Bucht

Zitierte Quelle [D 4]]	Grundwasser-Zustrom [l/s]	Methode
Badenova	750	unbekannt
LGRB	bis zu 2.500	Wasserhaushaltsbetrachtungen
BGS	700	Abgestimmter Wert nach numerischer Berechnung
LUBW	550 – 840	unbekannt

Der Vorfluter Dreisam infiltriert bereichsweise ins Grundwasser. Je nach Gewässerabschnitt ändert sich jedoch die Funktionsweise der Dreisam, sodass sich Abschnitte mit influenten und effluenten Verhältnissen abwechseln. Derzeit liegen uns keine Abflussmessungen entlang der Dreisam in der Freiburger Bucht vor, sodass eine Abschätzung der Austauschmengen mit dem aktuellen Datenstand nicht möglich ist. Aus Beobachtungen geht hervor, dass die Dreisam jahreszeitlich bedingt im Sommer im Stadtgebiet südlich des Lehener Bergles zeitweise austrocknet, woraus (zumindest zeitweise und unter Berücksichtigung der saisonal geminderten Durchflüsse der Dreisam) auf infiltrierende Verhältnisse geschlossen werden kann.

3.4.2 Hydrogeologische Parameter

3.4.2.1 Hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte k_f

Die hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte k_f für den Modellraum wurden aus mehreren Unterlagen recherchiert und ausgewertet. Folgende Quellen, die uns zum Abschluss der Datenübergabe (18.02.2022) vorlagen, wurden verwendet:

- LGRB (2007): 36 Messwerte „Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben“ Wirsing & Luz, [D 43],
- LGRB (2022): am 13.01.2022 übergebener Datenauszug zu k_f -Werte aus der Datengrundlage des LGRB [D 29],
- KIT (2020): Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten basierend auf Wirsing & Luz (2007) [D 19],
- KIT (2020): Anpassung der k_f -Wertverteilung im Rahmen der Kalibrierung des Modells mit FEPEST [D 20],
- Ingenieurpartnerschaft Neumann + Schweizer (2020) [D 18],
- HPC (2020): k_f -Werte ermittelt bei Sanierungsuntersuchung Restfläche Silbergrube [D 15],
- BGS (2018): Stadttunnel Freiburg, Dokumentation des Grundwassermodells [D 5],
- Pikulski (2021): 5 k_f -Werte durch Pumpversuchen zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit in der Breisgau-Formation [D 17].

Neuenburg-Formation

Die aus zahlreichen Pumpversuchen ermittelte hydraulische Durchlässigkeit k_f der Neuenburg-Formation wird vom LGRB für den Bereich zwischen Freiburg und Umkirch mit einem Mittelwert von ca. $k_f = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s angegeben [D 29]. Die Recherchen haben ergeben, dass die Spannweiten des k_f -Wertes von ca. $1,0 \cdot 10^{-4}$ m/s bis ca. $6,0 \cdot 10^{-3}$ m/s reichen. Gemäß DIN 18130-1 kann die Neuenburg-Formation als stark durchlässig charakterisiert werden.

Tabelle 3: Spannweiten der k_f -Werte für die Neuenburg-Formation in m/s

Minimaler k_f-Wert [m/s]	Maximaler k_f-Wert [m/s]	Quelle
$2,5 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	BGS (2018) [D 5]
$2,4 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	HPC (2020) [D 15]
$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	KIT (2020) [D 19]
$1,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	KIT (2020) [D 20]
$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	LGRB (2007) [D 43]
$1,9 \cdot 10^{-3} \#$	-	Pikulski (2021) [D 17]

#T/H-Wert (Transmissivität / Teufe) obere Abschnitt der Breisgau-Schichten inklusive und deshalb nicht repräsentativ [D 17]

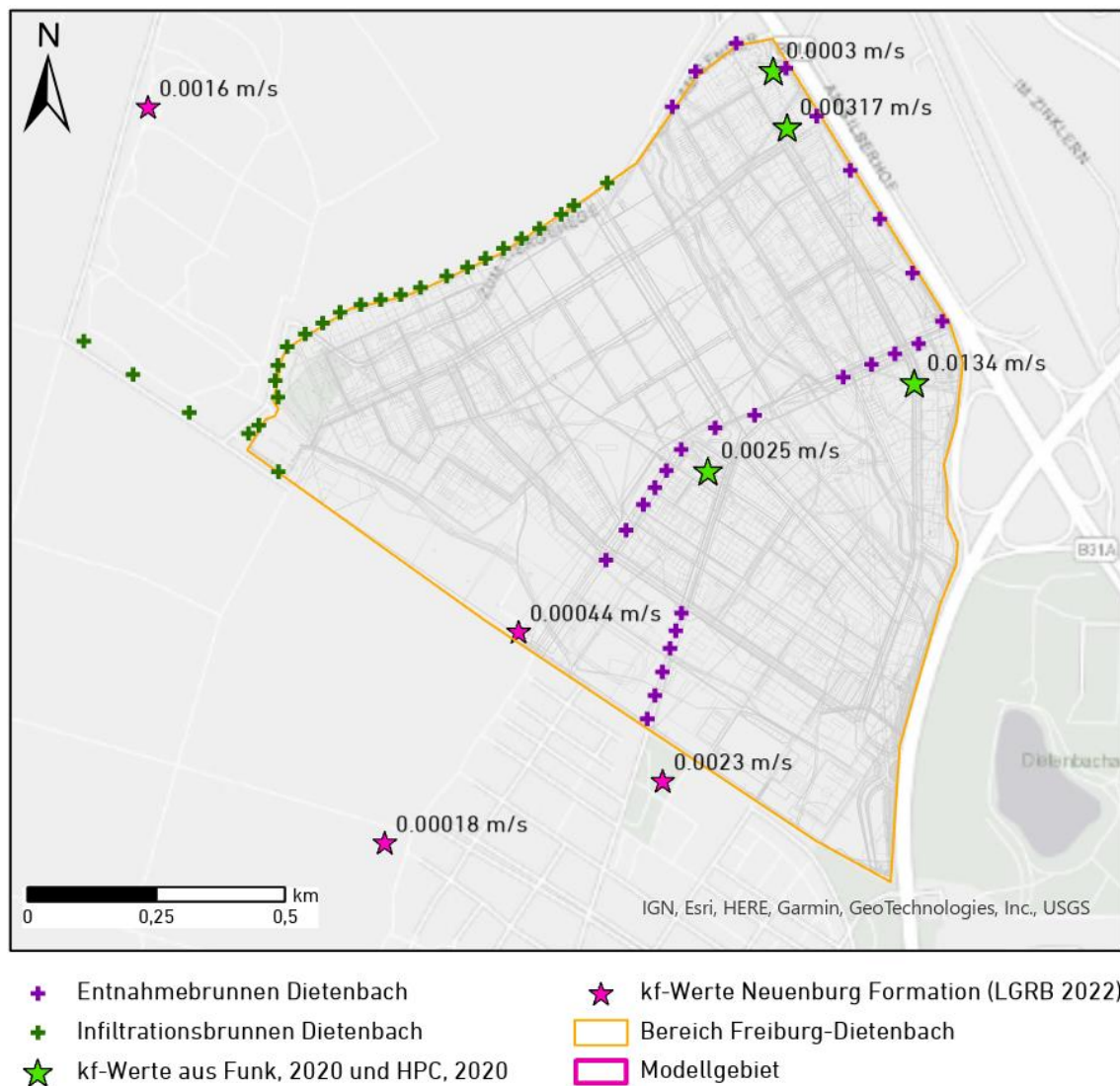


Abbildung 3: Datenlage zur hydraulischen Durchlässigkeit der Neuenburg-Formation im Umfeld Dietenbachs, dargestellte Brunnenanordnung: Variante EH40, ABL, BA1-6

Im direkten Umfeld des Standorts Dietenbach liegen drei k_f -Werte aus Pumpversuchen [D 11], [D 16] und vier k_f -Werte aus dem LGRB-Datensatz von 2022 [D 29] vor. Die Lage der Bohrungen mit k_f -Wert-Bestimmung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die k_f -Werte bei Dietenbach liegen in einem Wertebereich von ca. $3,0 \cdot 10^{-4}$ m/s und maximal $1,3 \cdot 10^{-2}$ m/s. Gemäß DIN 18130-1 kann die hydraulische Durchlässigkeit in Dietenbach ebenfalls als stark durchlässig bis sehr stark durchlässig charakterisiert werden.

Breisgau-Formation

Für die Breisgau-Formation im Liegenden der Neuenburg-Formation wurde durch das Büro Pikulski [D 17] ein Mittelwert der Gebirgsdurchlässigkeit durch fünf Pumpversuche von ca. $2,3 \cdot 10^{-4}$ m/s ermittelt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass der Durchlässigkeitsbeiwert etwas kleiner ausfallen dürfte, da die Filterstrecken der getesteten GWM jeweils nur einen Abschnitt und nicht die gesamte Mächtigkeit der Formation erfassten. Die k_f -Werte des LGRB [D 43] liegen zwischen $1,0 \cdot 10^{-4}$ m/s und $2,0 \cdot 10^{-3}$ m/s. Die Recherchen ergaben insgesamt eine Spannweite der k_f -Werte von ca. $1,8 \cdot 10^{-6}$ m/s [D 17] und $3,9 \cdot 10^{-3}$ m/s [D 5]. Gemäß DIN 18130-1 kann darum die hydraulische Durchlässigkeit in Dietenbach als durchlässig bis sehr durchlässig charakterisiert werden. In Tabelle 4 sind die recherchierten Spannweiten der k_f -Werte für die Breisgau-Formation zusammengefasst.

Tabelle 4: Spannweiten für die k_f -Werte der Breisgau-Formation in m/s

Minimaler k_f -Wert [m/s]	Maximaler k_f -Wert [m/s]	Quelle
$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	BGS (2018) [D 5]
$1,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	HPC (2020) [D 15]
$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	KIT (2020) [D 19]
$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	KIT (2020) [D 20]
$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	LGRB (2007) [D 43]
$1,8 \cdot 10^{-6} \#$	$6,2 \cdot 10^{-4} \#$	Pikulski (2021) [D 17]

#T/H-Wert (Transmissivität/Teufe)

Variansmergel und Tertiär

Für die Variansmergel-Formation und die Tertiär-Formation fanden sich keine Angaben zur hydraulischen Durchlässigkeit. Bei der Variansmergel-Formation handelt es sich um eine Wechselfolge von Kalksteinen, Tonmergelsteinen und Mergelkalksteinen. Das Tertiär besteht überwiegend aus tonig-mergeligen Sedimentgesteinen. Beide Formationen wurden somit als Grundwassergeringleiter eingestuft. Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen im Rahmen der Entwicklung eines Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte haben für Kalkstein, Mergelstein und Ton/Tonstein insgesamt k_f -Werte über einen sehr großen Wertebereich von $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s bis $1,0 \cdot 10^{-14}$ m/s für den Tiefenbereich 300 – 1.500 m u. GOK ergeben [D 2]. Für die Modellierung wurden hydraulische Durchlässigkeiten für den Variansmergel sowie das Tertiär von $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s (geringe Durchlässigkeit) angesetzt.

Hauptrogenstein-Formation

Für den Hauptrogenstein-GWL liegen Daten aus sechs GWM (fünf GWM + TB Schorren) zur Erkundung der Trinkwasserversorgung der Gemeinde Umkirch vor [D 17]. Diese Untersuchungen beschränken sich jedoch nur auf den nördlichen Bereich des Hauptrogenstein-Vorkommens, der sogenannten Nord-Scholle (Anlage 5.1.3; Kapitel 3.3). Der durch das Büro Pikulski ermittelte Mittelwert des k_f -Werts beträgt für diesen Bereich ca. $3,0 \cdot 10^{-4}$ m/s. Da die Filterstrecken der getesteten GWM jeweils nur einen Abschnitt und nicht die gesamte Mächtigkeit der Formation erfassten, handelt es sich um einen T/H-Wert (Transmissivität/Teufe). Der k_f -Wert kann somit geringer ausfallen. Die hydraulische Durchlässigkeit des Hauptrogenstein-GWL unterscheidet sich somit nur geringfügig von der Breisgau-Formation. Es ist jedoch zu beachten, dass der Karst- und Kluftgrundwasserleiter im Hauptrogenstein eine hohe Heterogenität und Anisotropie der hydrogeologischen Eigenschaften aufweist, weshalb u. a. die hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte im Hauptrogenstein stark variieren können und von bereichsweise sehr hohen Durchlässigkeiten und Fließgeschwindigkeiten auszugehen ist.

3.4.2.2 Porosität und Speichervermögen

Gemäß LGRB werden für die effektiven Porositäten in der Neuenburg-Formation und in der Breisgau-Formation (eher konservative) Erfahrungswerte von $n_{\text{eff}} = 15 \%$ und $n_{\text{eff}} = 10 \%$ angenommen [D 42]. Die effektive Porosität für den Hauptrogenstein wird vom LGRB auf $n_{\text{eff}} = 3 \%$ geschätzt [D 42]. Erkenntnisse zur Kluftporosität des Hauptrogenstein-GWL, anhand derer sich die effektive Porosität abschätzen ließe, liegen nicht vor. Zur Porosität des Variansmergels und der tertiären Einheiten lagen keine Informationen vor.

Tabelle 5: Effektive Porosität n_{eff} basierend auf [D12]

Modell-Schicht	Hydrogeologische Einheit	Effektive Porosität n_{eff} [-]
1	Neuenburg-Formation	0,15
2	Breisgau-Formation	0,10
3	Variansmergel-Formation	keine Angaben
4	Tertiär-Formation	keine Angaben
5	Hauptrogenstein-Formation	0,03

Der spezifische Speicherkoeffizient S_s (specific storage) ist definiert als Wasserabgabe pro Kontrollvolumen, die bei Erniedrigung des Druckes um 1 m Wassersäule erfolgt [$\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{m} \rightarrow 1/\text{m}$]. Der Speicherkoeffizient S (specific yield) ergibt sich aus dem Integral des spez. Speicherkoeffizienten (S_s) über die Grundwassermächtigkeit [D 14].

Die Änderung des Wasservolumens bei Änderung der Standrohrspiegelhöhe um 1 m entspricht im freien Grundwasserleiter in etwa dem (speicher-)nutzbaren Porenraum, welcher entwässert wird. Integriert über die Grundwasserletermächtigkeit entspricht somit der Speicherkoeffizient S im ungespannten GWL dem (speicher-) nutzbaren Hohlraumanteil n_{eff} (effektive Porosität) [D 14], aufgelistet in Tabelle 5.

In gespannten (Poren-)Grundwasserleitern ändert sich bei Druckentlastung hingegen kaum der speichernutzbare Hohlraumanteil, da der gespannte Grundwasserleiter gesättigt bleibt. Die Änderung des Speichers hängt hier im Wesentlichen von der Elastizität und damit Kompressibilität des Korngerüsts ab [D 14]. In Tabelle 6 sind die im Modell angesetzten spezifischen Speicherkoeffizienten (Kompressibilität) aufgelistet. Für ungespannte Grundwasserleiter ist der spez. Speicherkoeffizient bei der Berechnung in der Software Feflow vernachlässigbar, da der Speicherkoeffizient (specific yield, = n_{eff}) um mehrere Größenordnungen darüber liegt.

Tabelle 6: Im Modell angesetzte spez. Speicherkoeffizienten

Modell-Schicht	Hydrogeologische Einheit	Spezifischer Speicherkoeff. S_s [m^{-1}]
1	Neuenburg-Formation	$1,0 \cdot 10^{-4}$
2	Breisgau-Formation	$1,0 \cdot 10^{-5}$
3	Variansmergel-Formation	$1,0 \cdot 10^{-5}$
4	Tertiär-Formation	$1,0 \cdot 10^{-5}$
5	Hauptrogenstein-Formation	$1,0 \cdot 10^{-6}$

*(teil)gespannter GWL

3.5 Grundwassertemperaturen

Informationen zu Grundwassertemperaturen der Neuenburg-Formation liegen für sieben GWM in Bereich Dietenbach (Abbildung 4) vor. Die Temperaturdaten liegen als stündliche Messdaten vor. Der Messzeitraum erstreckt sich bei fast allen Messstellen von 2012 bis 2017. In Abbildung 43 sind die langjährigen Temperaturganglinien der sieben GWM dargestellt. Neben den jahreszeitlichen Schwankungen ist anhand der Trendlinien bei allen Messstellen eine langfristig steigende Temperatur zu erkennen. Der Mittelwert aller

Messungen beträgt 12,93 °C. In der Regel nimmt in größeren Tiefen die Temperatur um ca. drei Kelvin (K) pro 100 m zu (geothermische Tiefenstufe). Da die geothermische Anlage von Dietenbach nur in den oberen 15 m der Neuenburg-Formation betrieben wird, ist die besondere Temperaturanomalie für die Fragestellung nicht relevant. Während der Messungen für die Erstellung der Grundwassergleichen MHGW 2019 wurde in vier weiteren GWM von Juni 2018 bis August 2019 die Grundwassertemperatur in 3,9 m u. GOK, 5,0 m u. GOK, 7,5 m u. GOK und 10 m u. GOK stündlich aufgezeichnet [D 63]. Mit Mittelwerten zw. 11,62 und 12,92 °C werden die langjährigen Messungen bestätigt. Die Temperaturschwankungen betragen zw. 1,1 K und 5,4 K.

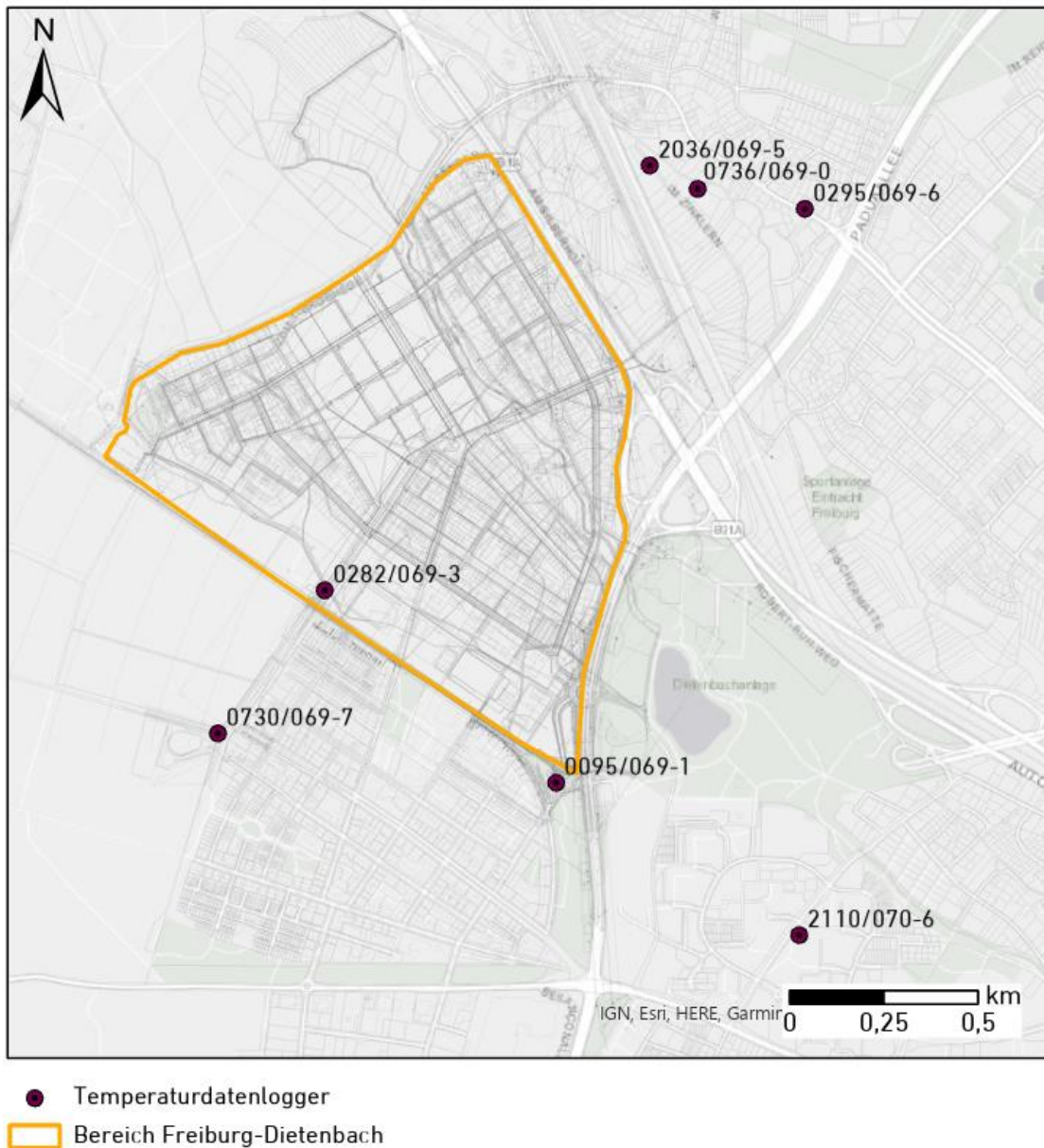


Abbildung 4: Lage der Temperaturmessstellen mit langjährigen Messreihen

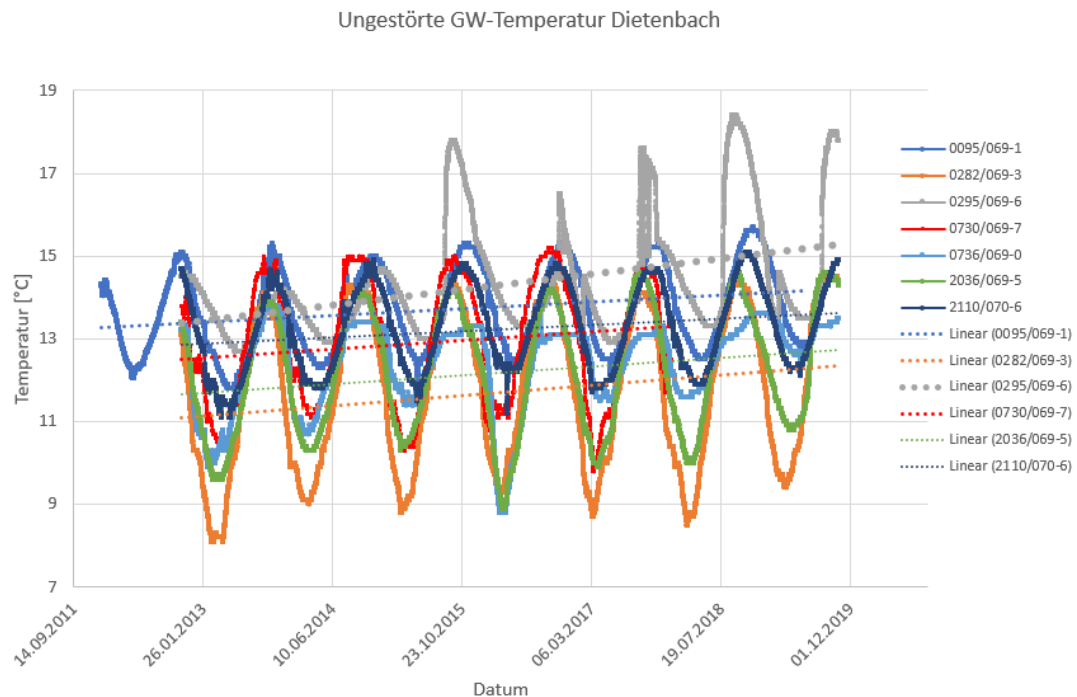


Abbildung 5: Ungestörte Grundwassertemperatur der Neuenburg-Formation bei Dietenbach gemäß [D 28]

3.6 Hydrologie

3.6.1 Hydrologische Übersicht

Eine Übersicht der Oberflächengewässer in der Freiburger Bucht ist in Anlage 4.1 dargestellt. Die Gewässerverläufe sowie stehenden Oberflächengewässer wurden als digitale Daten vom Daten- und Kartendienst der LUBW verwendet [D 30]. Dieser Dienst umfasst alle wasserwirtschaftlich relevanten Fließgewässer Baden-Württembergs.

Daten zur Sohlage der Fließgewässer liegen mit dem digitalen Geländemodell HydDGM mit einer Auflösung von 0,5 x 0,5 m vor. Das HydDGM basiert auf terrestrischen Vermessungen und dem digitale Geländemodell (DGM) der Landesvermessung Baden-Württemberg [D 37]. Informationen zu Wasserständen in den Fließgewässern lagen uns, außer für die Dreisam (Kapitel 3.6.2), zum Zeitpunkt der Berichtserstellung nicht vor. Informationen zur jeweiligen Sohle der stehenden Oberflächengewässer sind derzeit nicht vorhanden.

In den folgenden Kapiteln sind die relevanten Oberflächengewässer für die städtebauliche Entwicklung von Dietenbach kurz beschrieben.

3.6.2 Fließgewässer I. Ordnung

Das wichtigste Oberflächengewässer innerhalb des Modellraums ist der Vorfluter Dreisam mit der Gewässer-ID 11279 als Gewässer I. Ordnung (G.I.O.). Die Dreisam fließt von Südosten aus dem Dreisamtal kommend nach Nordwesten durch die Stadt Freiburg und knickt nördlich des Dietenbachparks weiter nach Norden ab. Der Stadtteil Dietenbach befindet sich ca. 200 m linksseitig der Dreisam. Gespeist wird die Dreisam durch Niederschläge, durch mehrere Vorfluter im östlich gelegenen Schwarzwald und durch Grundwasserzustrom im Zartner Becken sowie entlang des Dreisamtals. Die Dreisam ist abschnittsweise sowohl am Ufer als auch an der Gewässersohle befestigt. Die Gewässersohle ist durch zahlreiche Schwellen gekennzeichnet.

Für die Dreisam sind Abflussmessungen am Pegel Ebnet im Dreisamtal im Südosten außerhalb des Modellraums verfügbar. Kontinuierliche Abflussmessungen in der Freiburger Bucht liegen zum Zeitpunkt der Berichtsabgabe nicht vor. Die Pegelmessungen wurden bei der instationären Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells im Kapitel 4.3.3 berücksichtigt. Das Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg stellt die Abflussentwicklung am Pegel Ebnet seit 2002 in jährlichen Graphiken dar, welche auf unkorrigierten Abflussdaten der Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg (HVZ) basieren. Für den Vorfluter Dreisam wurde eine hydraulische Verbindung zum Grundwasser anhand von Grundwasserstandsganglinien und Ganglinien des Wasserstandes in der Dreisam nachgewiesen. Vorgegangene Untersuchungen und Modellberechnungen zur Planung des Stadttunnels haben abschnittsweise infiltrierende und exfiltrierende Gewässerabschnitte ergeben [D 4]. Für die Dreisam wurden Daten zur Sohlage und Wasserstandsdaten im Intervall von 1 m für folgende Zustände übergeben: HQ2, HQ10, HQ20, HQ50, HQ100 und HQ1000.

Die Daten erstrecken sich über einen Großteil des festgelegten Modellraums. Für den nördlichen Gewässerabschnitt ca. 2 km nördlich von Dietenbach ohne Daten innerhalb des Modellraums wurden unter Annahme gleichbleibenden Gefälles die Sohlage und die im Grundwasserströmungsmodell verwendeten Wasserstandsdaten des HQ2 extrapoliert.

Durch regelmäßige Abflussmessungen der Dreisam an mehreren Querprofilen innerhalb des Modellraumes können Daten zum Infiltrationsverhalten der Dreisam in den oberflächennahen Grundwasserleiter abgeschätzt werden.

3.6.3 Fließgewässer II. Ordnung

Der Mühlbach mit der Gewässer-ID 3820, im Folgenden Dietenbach genannt, stellt gemäß LUBW [D 30] ein Gewässer II. Ordnung dar und verläuft von Südost nach Nordwest durch den Stadtteil Dietenbach. Vor der Erschließung wird der Mühlbach/Dietenbach hochwassersicher ausgebaut. Auch im Endzustand der Stadtentwicklung wird der Dietenbach in seiner jetzigen Form erhalten (Abbildung 6) [D 61].

Im Gegensatz dazu wird der derzeit ausgehend vom Dietenbachsee südöstlich vom Standort nach Nordwesten fließende und ca. 900 m nordöstlich in den Dietenbach mündenden Käserbach im Endzustand nicht im Bereich des Neubaugebiets (NBG) Dietenbach vorhanden sein. Der Käserbach wird bis zur Straße am Tiergehege zurückgebaut und verliert somit seine entlastende Wirkung. Der Käserbach wird derzeit erst ca. 100 m südöstlich vom nördlichen Rand des NBG als Gewässer II. Ordnung eingestuft. Gemäß [D 61] wird der Käserbach ab der Straße Zum Tiergehege als Be- und Entwässerungsgraben von wasserwirtschaftlich untergeordneter Bedeutung eingestuft. Derzeit [D 61] ist der Käserbach trockengefallen und im Bereich der geplanten Siedlungserweiterung großflächig überpflügt, so dass er nur noch am Ein- und Austritt im geplanten Baugebiet zu erkennen ist.

Ein weiteres Fließgewässer ist der Landwassergraben/Mundenhofer Graben, welcher parallel zur Mundenhofer Straße und somit parallel zum Dietenbach verläuft. Gemäß [D 30] ist der Landwassergraben ab dem Parkplatz Mundenhof als Gewässer II. Ordnung eingestuft [D 50].

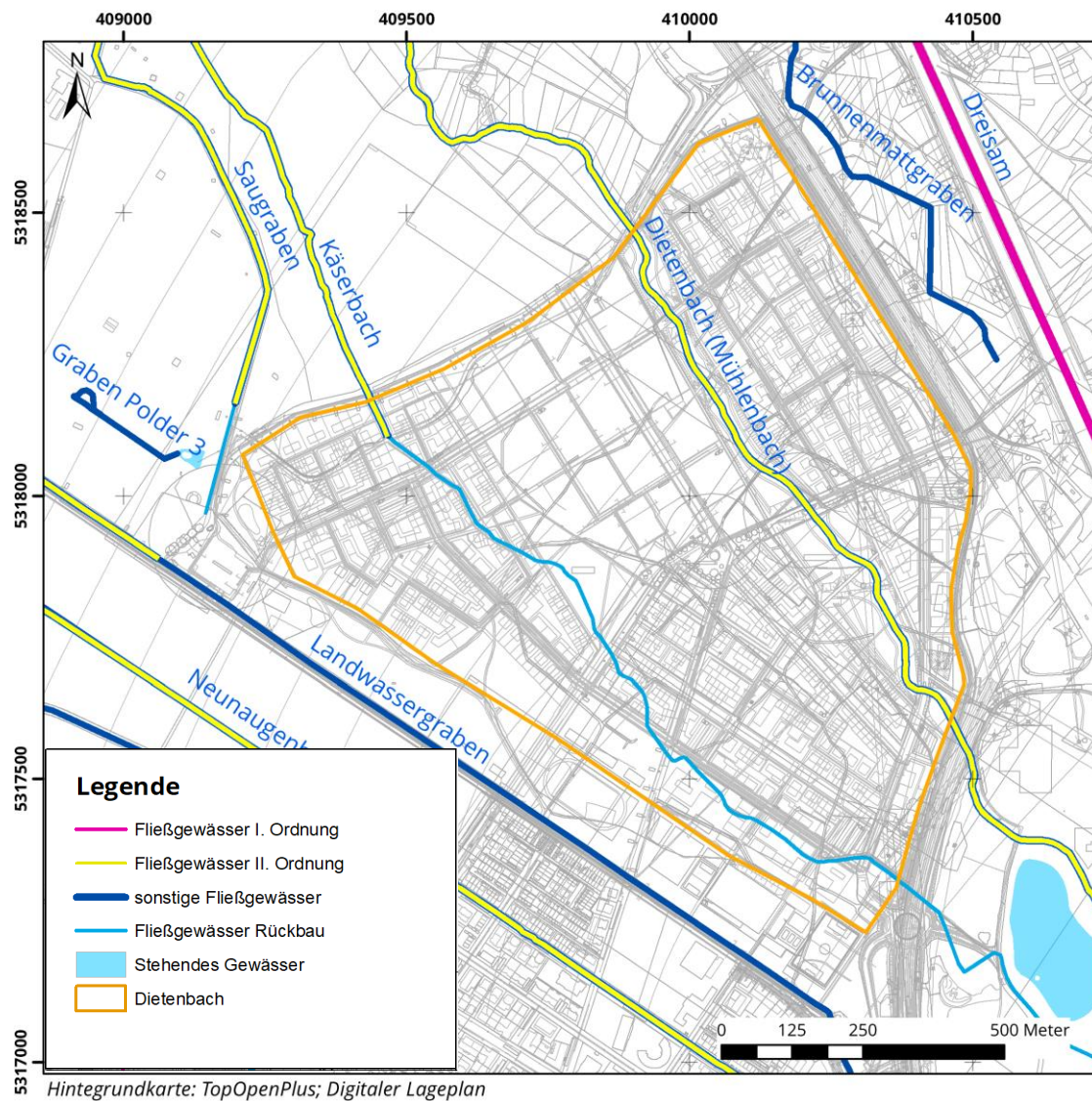


Abbildung 6: Oberflächengewässer bei Dietenbach (Hintergrundkarte TopOpenPlus, Digitaler Lageplan Dietenbach)

3.6.4 Stehende Oberflächengewässer

Die Lage der stehenden Oberflächengewässer wurde [D 30] entnommen. In Anlage 4.1 sind die im Modellraum vorliegenden und im Modell berücksichtigten stehenden Oberflächengewässer dargestellt:

- Opfinger See,
- Waltershofener See und
- Dietenbachsee.

Der Opfinger See und Waltershofener See, ca. 1,5 km westlich von Dietenbach gelegen, befinden sich im Abstrom von Dietenbach und Rieselfeld. Der Opfinger See wurde ehemals für den Abbau von Kiesen und Schotter genutzt. Der Waltershofener See entstand während Bauarbeiten des Autobahnzubringers Freiburg-Mitte. Beide Gewässer sind als künstliche Baggerseen gemäß [D 30] eingestuft. Der Opfinger See weist eine Tiefe von 30 m und eine Fläche von 45,5 ha auf. Der Waltershofener See misst ca. 5,5 ha und ist ca. 20 m tief. Sowohl der Opfinger als auch der Waltershofener See befinden sich gemäß [D 30] im Landschaftsschutzgebiet Mooswald, FFH-Gebiet Mooswälder bei Freiburg sowie im Vogelschutzgebiet Mooswälder bei Freiburg.

Der Dietenbachsee befindet sich ca. 200 m südöstlich von Dietenbach und dient neben seiner Funktion als lokales Erholungsgebiet bei Hochwasserereignissen als Retentionsraum [D 61].

3.7 Hydrostratigraphische 3D-Modellierung

Die hydrostratigraphische 3D-Modellierung der Tertiär-, Varismergel- und Hauptrogenstein-Unterkanten erfolgte mit der Software Leapfrog Works 3.1 der Firma Seequent (U8). Leapfrog ist ein Programm zur impliziten geologischen Modellierung. Für die Interpolation der Schichtunterkanten standen folgende Informationen zur Verfügung:

- 10 geologische Profilschnitte (2 N-S-Richtung, 8 W-O-Richtung) als PDF mit Lage der Profilschnitte als shape-Dateien [D 26],
- Bohrpunkte mit Schichtenverzeichnissen [D 40] und

- Isolinien Quartärunterkante als shape-Dateien [D 27].

Ausgangspunkt der geologischen Modellierung sind Schichtenverzeichnisse von Bohrungen aus dem Untersuchungsgebiet und dessen unmittelbaren Umfeld. Die Bohrdaten wurden vom LGRB zur Verfügung gestellt [D 40]. Bei den aus der LGRB-Aufschlusssdatenbank (ADB) exportierten Schichtenprofilen handelt es sich um Interpretationen des LGRB, die zum Teil erheblich von den Originalprofilen abweichen können. Für einige Schichtenprofile sind in der Datenbank nur lithostratigraphische oder hydrogeologische Kurzprofile abgelegt ohne Informationen zur Petrographie und weiteren Eigenschaften des Bohrguts. In der Datenlieferung sind enthalten:

- 1781 Stammdatensätze (Schichtenverzeichnisse)
- 896 Schichttitel datensätze
- 6053 Schicht datensätze

Von den insgesamt 1781 Schichtenverzeichnissen lagen 355 im Bereich der Hauptrogenstein-Verbreitung westlich und nordwestlich von Dietenbach (Nord- und Südscholle). Lediglich 19 Bohrungen durchteufen den Hauptrogenstein komplett. Um die Interpolation der Hauptrogensteinunterkante auf einer besseren Datenbasis durchführen zu können, wurden zusätzlich Stützstellen entlang der 10 übergebenen Profilschnitte erstellt und bei der Interpolation berücksichtigt. Die Unterseite des Quartärs lag zwar bereits als fertiger Datensatz vor, wurde jedoch im Rahmen der hydrostratigraphischen Modellierung in Leapfrog im Bereich der Hauptrogenstein-Verbreitung detaillierter nachmodelliert. Im Ergebnis wurden für das Grundwasserströmungsmodell die Schichtunterkanten als DXF-Datei vom

- Quartär,
- Variansmergel (im Bereich des Hauptrogensteins),
- Tertiär (im Bereich des Hauptrogensteins) und
- Hauptrogenstein (Nord- und Südscholle)

als digitale Punktdaten generiert. Vergleichende Profilschnitte zu Anlage 3.2 aus der 3D-Modellierung sind in Anlage 3.3 dargestellt.

3.8 Digitales Geländemodell für den IST-Zustand

Die Modelloberkante wurde anhand des verfügbaren Geländemodells festgelegt. Für den IST-Zustand von Dietenbach wurde eine Vermessung mit Stand vom 30.07.2021 übergeben. Diese umfasst Dietenbach, Bereiche nordwestlich Dietenbachs (Schildkrötenkopf), Bereiche westlich des Tiergeheges sowie Bereiche westlich des Rieselfelds. Die Auflösung variiert zwischen < 1 m und ca. 25 m. Im Abschluss der Modellierung wurden vom Garten- und Tiefbauamt (GuT) aktuellere Vermessungsdaten mit Stand 16.11.2021 übergeben, welche nach Abschluss der Grundwasserströmungs-Wärmetransportmodellierung zur Auswertung der Flurabstandskarten nachträglich im Modell angepasst wurden [D 52].

Für das übrige Modellgebiet stand das digitale Geländemodell HydDGM aus der Hochwassergefahrenkarte mit einer sehr hohen Auflösung von $0,5 \times 0,5$ m als Geotiff-Datei zur Verfügung [D 35]. Auch dieser Datensatz liegt, analog zur Vermessung von Dietenbach, im Höhenstatus 170 (DHHN 2016) vor. Für die Implementierung im Modell wurde die Auflösung des Geländemodells HydDGM von 0,5 m auf 10 m konvertiert, da diese Auflösung für die Fragestellung im Umfeld von Dietenbach hinreichend genau ist. Entlang der Gewässerschläuche wurde jedoch in einem Bereich von 50 m die sehr hohe Auflösung von 0,5 m beibehalten, um die Gewässersohle möglichst akkurat abbilden zu können, welche die Grundlage für die Höhe der Wasserstände darstellt (Kapitel 4.2.3).

3.9 Grundwasserneubildung

Für das Untersuchungsgebiet wurde vom LUBW sowohl die langjährige mittlere Grundwasserneubildung [D 34] als auch die monatlich instationäre Grundwasserneubildung zur Verfügung gestellt [D 33]. Erstere wurde für die stationäre Kalibrierung, letztere für die instationäre Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells verwendet. Die stationäre langjährige mittlere Grundwasserneubildung gemittelt über den Zeitraum 1991 bis 2020 beträgt ca. 11,1 Mio. m^3 pro Jahr für das gesamte Modellgebiet mit einem flächengewichteten Mittelwert von ca. 168 mm/a. Der Datensatz der LUBW enthält Angaben zur mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsrate (mm/a) für die aktuelle 30-jährige Referenzperiode 1991 bis 2020 auf Bezugsflächen, die sich aufgrund der Bodenverhältnisse (und der

Landnutzung) ergeben. In Anlage 4.2 ist die flächige Verteilung der Grundwasserneubildung dargestellt. Im Bereich von Dietenbach ist eine mittlere Grundwasserneubildung zwischen 187,5 mm/a und 340,4 mm/a ausgewiesen. Diese liegt über dem Mittelwert des Modellgebiets, da es sich beim Standort aktuell größtenteils um unbebaute landwirtschaftlich genutzte Flächen handelt.

Die monatlich instationäre Grundwasserneubildung steht für den Zeitraum 2000 bis 2020 zur Verfügung. Für die Prognoserechnungen des Grundwasserströmungsmodells wurden für jeden Monat die Mittelwerte aus dem Zeitraum 2000 bis 2020 berechnet, welche sich jährlich wiederholen.

3.10 Grundwassernutzung und Wasserschutzgebiete

Angrenzende Wasserschutzgebiete

Ca. 3 km nordwestlich von Freiburg Dietenbach befindet sich die Gemeinde Umkirch, welche im Grundwasserabstrom von Dietenbach liegt. Die Gemeinde Umkirch ist für die Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellierung relevant, da diese für die Wasserversorgung den TB Schorren im Karst-Grundwasserleiter Hauptrogenstein seit 2012 erschlossen hat. Der TB Schorren befindet sich am Südrand der Gemeindegrenze im Gewinn Schorren und wird als Hauptbrunnen für die Wasserversorgung genutzt. Die zwei weiteren Brunnen TB Kühneracker und TB Spitzenwäldle wurden früher genutzt und dienen laut Angaben des UWSA aktuell als Reservebrunnen. Diese sind im Quartär ausgebaut. Das Gebiet Dietenbach befindet sich in der fachtechnisch abgegrenzten Wasserschutzzone IIIB der TB Schorren und Spitzenwäldle (siehe Abbildung 7).

Brunnen

Innerhalb der Stadt Freiburg i.Br. befinden sich 145 bekannte Grundwasserentnahmen (siehe Abbildung 7). Da sich das Modellgebiet über die Stadtgrenze von Freiburg i.Br. hinaus erstreckt, wurden weitere 16 bekannte Grundwasserentnahmen berücksichtigt. Davon befinden sich vier Brunnen in der Gemeinde March (Teilgemeinde Hugstetten) ca. 3 km nördlich von Dietenbach und 12 Brunnen in der Gemeinde Umkirch im Nordwesten von Dietenbach (siehe Abbildung 7). Insgesamt liegen somit Standortinformationen zu 161 Brunnen vor. Für 30 der 161 Brunnen lagen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung

Grundwasserentnahmen vor, wobei für zwei Brunnen die Entnahmemengen nur bis 2013 bekannt sind (siehe Anlage 4.4.1). Für den Zeitraum 2016 bis 2020 wurden im Mittel ca. 1,3 Mio. m³/a Grundwasser durch die Brunnen entnommen (siehe Tabelle 7). Dies entspricht in etwa der Entnahmemenge des Jahres 2016, für welches die stationäre Kalibrierung durchgeführt wurde.

Zu acht der 30 Brunnen mit bekannten Grundwasserentnahmen lagen zum Zeitpunkt der Berichterstellung Informationen zum Brunnenradius vor. Für die übrigen 22 Brunnen wurde ein Brunnenradius von 0,2 m angenommen und im Grundwasserströmungsmodell implementiert.

Tabelle 7: Übersicht der bekannten Grundwasserentnahmen im Modellgebiet (Mittelwert 2016 – 2020 sowie für den Zeitpunkt der stationären Kalibrierung 2016)

	2016 [m³/a]	2016 [m³/d]	Mittelwert* 2016-2020 [m³/a]	Mittelwert* 2016-2020 [m³/d]
Max	372.855	1.022	371.947	1.019
Mittel	39.209	107	39.934	109
Median	3.425	9	3.029	8
Summe	1.254.695	3.438	1.277.896	3.501

*Für 18 Brunnen Zeitreihen unvollständig

Der TB Schorren für die Wasserversorgung der Gemeinde Umkirch befindet sich ca. 2,5 km nordwestlich von Dietenbach und stellt die nächste bekannte Grundwasserentnahme im Abstrom von Dietenbach dar. Der TB Schorren ist 92,2 m tief und erschließt mit einem Filter zwischen 62,2 und 92,2 m unter GOK [D 17] den Hauptrogenstein (Kapitel 3.4). Die am 16.11.2012 vom Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald genehmigten Förderraten betragen 20 l/s, 1.200 m³/d bzw. 320.000 m³/a. Der Mittelwert der tatsächlichen Förderung für den Zeitraum 2016 – 2020 beträgt 866 m³/d bzw. 316.090 m³/a und liegt damit unter den genehmigten Jahresmengen.

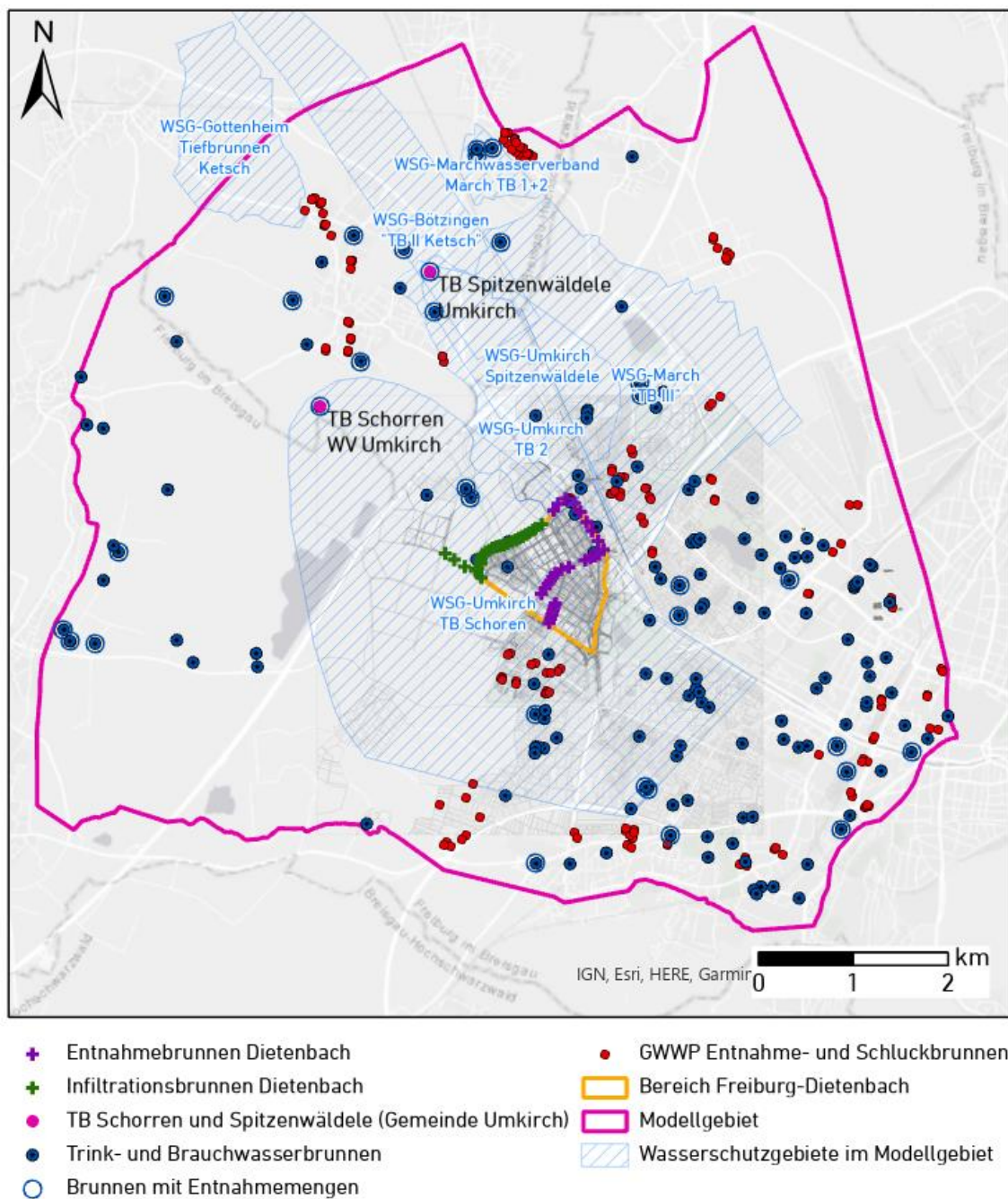


Abbildung 7: Lageplan mit Wasserschutzgebieten, bekannten Brunnen- sowie Grundwasserwärmepumpenanlagen (GWWP)-Standorten im Modellgebiet

Grundwasserwärmepumpen (GWWP)

Die im Modellgebiet bekannten Grundwasserwärmepumpen sind in Abbildung 7 dargestellt. Zwei GWWP-Anlagen befinden sich im äußersten Norden des Baugebiets Dietenbach. Die übrigen GWWP-Anlagen liegen hingegen weder im An- noch im Abstrom von Dietenbach. Aufgrund der geringen Grundwasserförderraten wurde auf eine Abbildung der GWWP im Grundwasserströmungsmodell verzichtet. Jedoch erfolgte eine Bewertung hinsichtlich der thermischen Beeinflussung durch die geothermische Anlage Dietenbach in Kapitel 7.7.

4 Aufbau und Kalibrierung des Numerischen Grundwassermodells

4.1 Vorgehensweise und Ziele

Auf Basis des abgestimmten hydrogeologischen Strukturmodells wurde ein numerisches Grundwasserströmungsmodell aufgebaut und zunächst stationär kalibriert (Kapitel 4.3). Nach erfolgreicher stationärer Kalibrierung wurde die instationäre Kalibrierung durchgeführt. In einem weiteren Arbeitsschritt wurde das Grundwasserströmungsmodell zu einem Wärmetransportmodell erweitert (Kapitel 5).

Die Vorgehensweise zu Modellaufbau und -kalibrierung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Aufbau des 3-dimensionalen Grundwasserströmungsmodells auf Basis des hydrogeologischen Strukturmodells,
- Stationäre Kalibrierung der Hydrodynamik im Quartär anhand der Stichtagsmessung (STM) 2016, [D 53]
- Stationäre Kalibrierung der Hydrodynamik im Hauptrogenstein anhand der Stichtagsmessung Okt. 2012, [D 42]
- Instationäre Kalibrierung der Hydrodynamik im Quartär anhand von vorliegenden Grundwasserganglinien aus Datenlogger-Messungen für den Zeitraum 2000 bis 2020 [D 49].

Der Schwerpunkt der Kalibrierung lag auf der adäquaten Abbildung der Grundwasserdynamik im Quartär. Die Hydrodynamik im Hauptrogenstein wird nur schematisch abgebildet, indem die Grundwasserdruckpotentiale an den sieben vorhandenen GWM nachgerechnet wurden, um mögliche Auswirkungen auf den TB Schorren prognostizieren zu können. Eine detaillierte Kalibrierung des Hauptrogenstein-GWL ist aus den folgenden Gründen nicht möglich und nicht erforderlich:

- Gemessene Grundwasserstände von Okt. 2012 liegen nur für den Zustand vor Inbetriebnahme des TB Schorren vor,
- Informationen zur hydraulischen Durchlässigkeit sind nur für die Nord-Scholle des Hauptrogensteins vorhanden,

- Karstgrundwasserleiter ohne Detail-Informationen zu Kluftnetz und Karsthohlräumen sind nur schematisch abbildbar und
- die geplante geothermische Anlage Dietenbach ist nicht im tieferen Hauptrogenstein verfiltert, sondern in den ersten 15 m der Neuenburg-Formation.

4.2 Aufbau des Grundwasserströmungsmodells

4.2.1 Aufbau des 3D-Grundwasserströmungsmodells

Auf Basis des hydrogeologischen Strukturmodells wurde das 3D-Grundwassermodell mit der Software FEFLOW 7.4 (DHI WASY GmbH) erstellt. FEFLOW ist ein professionelles Softwarepaket zur Berechnung von Wasserströmung, Massen- und Wärmetransport in porösen Medien. Die geographischen Daten der Modellierung wurden mit dem Programm Arc-GIS Pro 2.9.3 aufbereitet.

Folgende Arbeitsschritte waren für den Aufbau des Grundwasserströmungsmodells erforderlich:

- Modellnetzerstellung horizontal (Netzdiskretisierung mit Berücksichtigung der Bestandsbrunnen und geplanten Brunnen, Fließgewässer, Seen und geplante Retentionsbecken sowie Regenwasserbehandlungsbecken),
- Modellnetzerstellung vertikal (Geländeoberkante, Schichtunterkanten),
- Parametrisierung (k_f -Werte, Porosität, Speicherkoeffizienten, Transferraten bei Oberflächengewässern),
- Zuweisung der Randbedingungen (An- und Abstrom als 1. Art, Zustrom als 2. Art, Fließgewässer als 3. Art., Brunnen-Randbedingungen).

4.2.2 Modelldiskretisierung (horizontal/vertikal)

Horizontale Modellnetzdiskretisierung

Für das Feflow-Modell wurde ein horizontales Modellnetz aus Dreieckselementen (FE-Netz) erstellt. Die Netzdiskretisierung ist für das gesamte Modellgebiet in Anlage 4.5 dargestellt. Bei der Modellnetzerstellung wurden folgende Aspekte beachtet:

- Verlauf der Fließgewässer,
- Konturen der stehenden Oberflächengewässer,
- 225 Standorte von Bestandsbrunnen sowie Grundwasserwärmepumpenanlagen (GWWP),
- Standorte von geplanten Brunnen, hier insbesondere Entnahme und Infiltrationsbrunnen für Dietenbach und
- Konturen von Versickerungsbecken und Retentionsbecken.

Im nahen Umfeld der oben aufgezählten Geometrien wurde das Netz mit einer erhöhten Auflösung an die numerischen Erfordernisse der Strömungs- bzw. Wärmetransportberechnungen angepasst. Zusätzlich wurde die Auflösung des Modellnetzes im gesamten Bereich von Dietenbach erhöht, um die hydraulische und thermische Beeinflussung der Variantenberechnungen adäquat abbilden zu können. Vor allem bei höheren Gradienten ist eine höhere Auflösung erforderlich. Die Kantenlänge des Modellnetzes für Dietenbach beträgt ca. 20 bis 30 m und im nahen Umfeld der Brunnen ca. fünf bis sieben Meter. Im übrigen Modellgebiet betragen die Kantenlängen des Modellnetzes zwischen ca. 50 und 100 m.

Vertikale Modellnetzdiskretisierung

Das Grundwasserströmungsmodell basiert auf dem schichtenbasierten Ansatz von FEFLOW. Jede Modellschicht verläuft über die gesamte horizontale Ausdehnung des Modellgebietes. Auslaufende Schichten sind bei dem schichtbasierten Ansatz nicht möglich. Werden hydrostratigraphische Schichten unterbrochen, wurde die Eigenschaften (k_f -Werte) in den jeweiligen Schichten angepasst. Dies ist zum Beispiel der Fall bei den

mesozoischen bzw. tertiären Vorkommen des Lehener Bergle bzw. Honigbuck, welche die quartären Schichten bis zur Geländeoberkante unterbrechen (Anlage 3.3). Auf eine Verwendung der unstrukturierten 3D-Modelldiskretisierung (unstructured mesh), welche auslaufende Schichten und Linsen ermöglicht, wurde verzichtet, da die Auswertung der Hydrodynamik und des Wärmetransports bei diesem Ansatz einen erheblichen Mehraufwand darstellt. Da die geothermische Anlage von Dietenbach im geologischen Sinne einfacher Tektonik des Quartärs geplant ist, besteht keine Notwendigkeit für die unstrukturierte 3D-Modelldiskretisierung.

Für die Schichtunterkanten der Neuenburg-Formation und der Breisgau-Formation lagen interpolierte Daten vor, die unverändert in FEFLOW zur 3D-Erstellung verwendet werden konnten. Die Schichtunterkanten des Haupttrogensteins, des Variansmergels und Tertiärs (im Bereich des Haupttrogenstein-Vorkommens) wurden aus den in der hydrostratigraphischen 3D-Modellierung gewonnenen Daten implementiert.

Die Übersicht der Modellschichten und deren Funktion ist in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Modellschichten 1 bis 5 bilden den quartären Grundwasserleiter ab, von denen die Modellschichten 1 und 2 der Neuenburg-Formation sowie die Modellschichten 3 bis 5 der Breisgau-Formation zugeteilt wurden. Die Unterteilung der hydrostratigraphischen Einheiten in mehrere Schichten dient der adäquaten Abbildung der hydrodynamischen und thermischen Auswirkungen. Die Neuenburg-Formation wurde in zwei Schichten unterteilt, da in der ersten Modellschicht die stehenden Oberflächengewässer mit einem hohen k_r -Wert belegt wurden. Im Liegenden der Neuenburg-Formation bildet die geringmächtige Modellschicht 3 eine Pufferschicht zwischen der Neuenburg-Formation und der Breisgau-Formation. Diese geringmächtige Schicht stellt den nachgewiesenen Übergangsbereich (sogenannte Übergangsschicht) dar, der genetisch als Aufarbeitungshorizont der Breisgau-Formation interpretiert wird. Die Breisgau-Formation wurde aufgrund ihrer großen Mächtigkeit in zwei gleich mächtige Modellschichten unterteilt (Anlage 3.3). Für die Modellschichten 6 und 7 wurden die Eigenschaften des Variansmergels und Tertiärs nur dort zugewiesen, wo sie den Haupttrogenstein überdecken. Außerhalb dieses Bereichs wurden die Modellschichten 6 und 7 als fiktive Schichten fortgeführt, da der schichtenbasierte Modellnetzansatz kein Ausstreichen der Modellschichten ermöglicht. Die implementierten Mächtigkeiten der Neuenburg-, der Breisgau-, sowie der Haupttrogenstein-Formation sind in Anlage 3.1 dokumentiert.

Tabelle 8: Vertikale Modelldiskretisierung

Modell- schicht	Hydrostratigraphie	Bemerkung
1	Neuenburg- Formation	Oberer Abschnitt, Tertiär lokal vorhanden, Stehende Oberflächengewässer mit hohem k_f -Wert belegt
2	Neuenburg- Formation	Unterer Abschnitt, Tertiär lokal vorhanden
3	Breisgau-Formation	Puffer-/Übergangsschicht, Tertiär lokal vorhanden
4	Breisgau-Formation	Tertiär lokal vorhanden
5	Breisgau-Formation	Tertiär lokal vorhanden
6	Tertiär	Nur im Bereich des Hauptrogensteins, außerhalb als Pufferschicht fortgeführt
7	Variansmergel- Formation	Nur im Bereich des Hauptrogensteins- verbreitert
8	Hauptrogenstein- Formation	Nur im Bereich der Nord- und Südscholle abstromig von Dietenbach hydraulisch wirksam

4.2.3 Hydraulische Randbedingungen des Grundwasserströmungsmodells

Äußere Randbedingungen

Die äußeren hydraulischen Randbedingungen an den Modellrändern dienen zur Abbildung des Grundwasserzu- und Grundwasserabstroms in das Modellgebiet hinein und aus dem Modellgebiet heraus. Die Randbedingung 1. Art am Übergang zum Dreisamtal im Süden sowie im Nordwesten verlaufen entlang einer Äquipotentiallinie (Kapitel 3.2.1). Der Grundwasser-Zustrom aus dem Hexental leitet sich von den MHGW 2016 Grundwassergleichen ab. Der Randzustrom vom Lorettoberg wurden im Laufe der stationären Kalibrierung festgelegt. Folgende äußere Randbedingungen wurden im stationären Grundwasserströmungsmodell berücksichtigt (siehe Anlage 4.3):

Randbedingung 1. Art:

- Grundwasser-Zustrom aus Dreisamtal im Südosten bei Freiburg i.Br (angesetzte Potentialhöhe: 266 m NHN),
- Grundwasser-Zustrom aus dem Hexental bei Merzhausen (angesetzte Potentialhöhen: 256 – 259 m NHN),
- Abstrom im Nordwesten bei Gottenheim (angesetzte Potentialhöhe: 196 m NHN),
- Abstrom im Norden bei Benzhausen (angesetzte Potentialhöhen: 205,5 -206,5 m NHN).

Randbedingung 2. Art:

- Grundwasser-Zustrom vom Fuße des Lorettoberges im Südosten (0,1 m/d).

Randbedingung 3. Art:

- Fließgewässer Mühlbach im Süden und Westen
- Fließgewässer Kuhlagerbächle im Südwesten.

Eine Quantifizierung der Grundwasser-Zu- und Abflüsse für das stationär kalibrierte Grundwassermodell findet sich in Kapitel 4.3.2 (Massenbilanz).

Innere Randbedingungen

Innerhalb des Grundwasserströmungsmodells wurden zahlreiche hydraulische Randbedingungen berücksichtigt, um die Hydrodynamik adäquat abbilden zu können (siehe Anlage 4.3). Es wurden zahlreiche Fließgewässer innerhalb des Modellgebietes als Randbedingung 3. Art implementiert. Folgenden Fließgewässer wurden als Randbedingung 3. Art innerhalb des Grundwasserströmungsmodells berücksichtigt:

- Dreisam
- Brunnenmattgraben
- Mühlbach/Dietenbach
- Käserbach
- Saugraben
- Landwassergraben/Mundenhofer Graben
- Neunaugengraben
- Kronenmühlbach

Für die **stationäre Modellberechnung** standen zur Höhe der Wasserstände in den Fließgewässern mit Ausnahme der Dreisam keine Informationen zur Verfügung. Deshalb wurde die Höhe der Wasserstände in den Fließgewässern vereinfacht ca. 0,5 m über Gewässersohle festgelegt und bereichsweise geglättet, da die Gewässersohle nicht kontinuierlich abfällt und abstromig steigende Wasserstände nicht plausibel sind. Die Gewässersohle wurde basierend auf dem hochaufgelösten HydDGM in FEFLOW interpoliert. Zur Implementierung der Dreisam liegen für den größten Gewässerabschnitt Wasserstände für unterschiedliche Hochwasserszenarien vor. Da die Modellgebietsabgrenzung und die stationäre Kalibrierung auf den MHGW-Plan von 2016 beruhen, wurden die Wasserstände des statistisch 2-jährigen Hochwassers (HQ2) zugewiesen. Die mittlere Differenz Wasserstand (HQ2) – Gewässersohle wurde auf den nördlichen Bereich der Dreisam übertragen.

Für die **instationäre Modellberechnung** wurden schwankende Wasserstände in den Fließgewässern verwendet. Die Höhe der Schwankung wurde von kontinuierlichen Wasserstandsmessungen am Pegel Ebnet der Dreisam abgeleitet [D 1]. Diese wurden in einen Faktor umgerechnet (siehe Gleichung 1), welcher anschließend mit dem jeweiligen Wasserstand an den Gewässerknoten des stationären Modells multipliziert wurde (siehe Gleichung 2)

$$f_{\text{instat}}(t) = \frac{\text{Wasserstand}_{\text{Ebnet}}(t)}{\text{Wasserstand}_{\text{Ebnet,stat}}} \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$\text{Wasserstand}_{\text{instat}}(x, t) = \text{Wasserstand}_{\text{stat}}(x) * f_{\text{instat}}(t) \quad (\text{Gleichung 2})$$

Wobei $f_{\text{instat}}(t)$ den im instationären Modell zum Zeitpunkt t angesetzten Faktor beschreibt, $\text{Wasserstand}_{\text{Ebnet}}(t)$ den geglätteten Wasserstand am Pegel Ebnet zum Zeitpunkt t (dargestellt in Abbildung 8) und $\text{Wasserstand}_{\text{Ebnet,stat}}$ den im stationären Modell angesetzten Wasserstand am Pegel Ebnet.

$\text{Wasserstand}_{\text{instat}}(x, t)$ beschreibt das Potential zu einem Zeitpunkt t an einem Modellknoten x sowie $\text{Wasserstand}_{\text{stat}}(x)$ das im stationären Modell angesetzte Potential am Modellknoten x .

Somit wurde eine Ganglinie von Faktoren für die Wasserstände erstellt. Diese Ganglinie wurde der Dreisam und vereinfacht auch allen anderen Fließgewässern im Modell der Randbedingung 3. Art zugewiesen. In Abbildung 8 ist die Ganglinie der Abflussmessungen am Pegel Ebnet und die geglättete Ganglinie zur Ableitung der Faktoren für die Wasserstände der Fließgewässer dargestellt. Die Ganglinie wurde geglättet, um keine täglichen Schwankungen im Modell zu implementieren, was zu einer extremen Berechnungszeit geführt hätte.

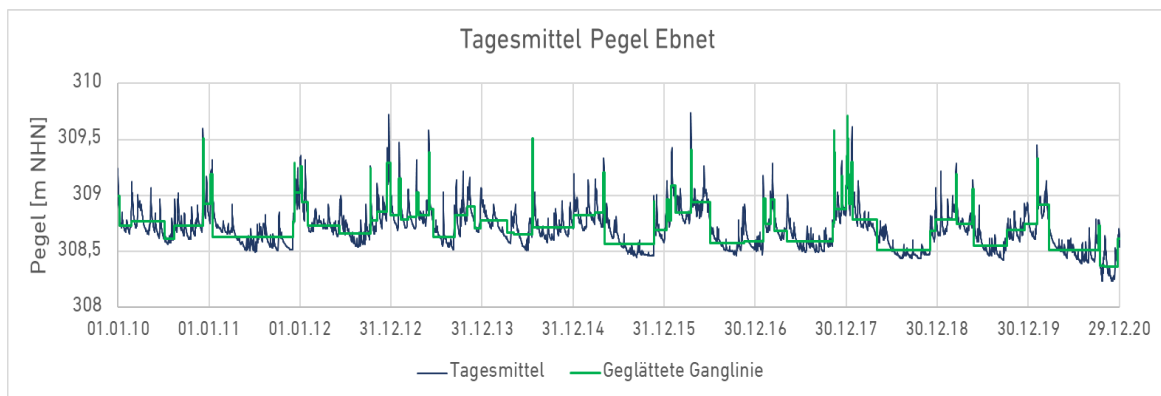


Abbildung 8: Ganglinie für die Berechnung der Faktoren für die Wasserstände der Fließgewässer bei der instationären Modellrechnung

Die Grundwasserentnahmen bei der **stationären Modellberechnung** (Kalibrierung) wurden für 30 Brunnen zur Trink- und Brauchwasserförderung mit einer Entnahmerate $> 1 \text{ m}^3/\text{d}$ berücksichtigt (Kapitel 3.10). Es wurden die mittlere Brunnenentnahmen von 2016, dem Jahr in dem die Stichtagsmessung zur Kalibrierung der Neuenburg-Formation durchgeführt wurde, in das Modell implementiert. Die Förderraten sind Anlage 4.4.1 zu entnehmen. Zur überschlägigen Kalibrierung der Grundwasserhydraulik des Hauptrogensteins (basierend auf der Stichtagsmessung 2012) wurden ebenfalls die Förderraten (der im Quartär verfilterten Brunnen) von 2016 verwendet, da diese keinen relevanten Einfluss auf die Grundwasserstände in der Hauptrogenstein-Formation haben. Im Unterschied zur stationären Kalibrierung der Neuenburg-Formation, ist der TB Schorren jedoch für die Hauptrogenstein-Kalibrierung nicht im Modell aktiv, da der TB Schorren erst ab Dezember 2012 in Betrieb genommen wurde. Details sind Kapitel 4.3.1 zu entnehmen.

Für die **instationäre Modellberechnung** (Kalibrierung) wurden von 35 Brunnen (Anlage 4.4.2) die Grundwasserentnahmen im Modell implementiert. Die implementierten Brunnen wiesen im Zeitraum 2000 – 2020 zumindest zeitweise eine Entnahmerate $> 1 \text{ m}^3/\text{d}$ auf. Abweichend von der stationären Kalibrierung wurden 5 zusätzliche Brunnen verwendet, da diese im Jahr 2016 kein Wasser oder nur vernachlässigbare, geringe Entnahmeraten $< 1 \text{ m}^3/\text{d}$ förderten.

Für die **stationäre Modellberechnung** wurde die langjährige mittlere Grundwasserneubildung verwendet, welche aus dem Zeitraum 1951 – 2020 gebildet wurde [D 34]. In Anlage 4.2 ist die hydrotopbezogene Grundwasserneubildung für das

Modellgebiet dargestellt. Es handelt sich dabei um mittlere Verhältnisse und nicht um Hochwasserzustände, denn die Grundwasserneubildungsraten wurden über einen Zeitraum von 30 Jahren gemittelt. Die instationäre Grundwasserneubildung wurde erst nach Abschluss der stationären Kalibrierung an JIG übergeben und wurde darum in diesem Arbeitsschritt nicht berücksichtigt.

Bei der **instationären Modellberechnung** wurden monatlich instationäre Grundwasserneubildungsraten für den Zeitraum 2000 bis 2020 verwendet [D 33].

4.2.4 Implementierung der hydraulischen Parameter

Die relevanten hydraulischen Parameter (Durchlässigkeitsbeiwerte k_f , effektive Porosität n_{eff} , Speicherkoeffizient) wurden mit einer initialen Parameterverteilung auf Grundlage der recherchierten Literaturwerte (Kapitel 3.4.2) in das Modell implementiert.

Im Verlauf der stationären und instationären Modellkalibrierung wurden die hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte, die Speicherkoeffizienten, sowie die Transferraten der Oberflächengewässer etc. durch zahlreiche Modellberechnungen iterativ geprüft und angepasst. Die nach der instationären Kalibrierung festgelegten Parameterbereiche sind im Vorgriff auf die in Kapitel 4.3 dargestellte Modellkalibrierung in Tabelle 9 zusammengefasst.

Hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Anisotropie von horizontalen (k_x und k_y) zu vertikalen (k_z) hydraulischen Durchlässigkeiten ist im Verhältnis 10:1 (k_x/k_z) definiert. Die k_f -Werte in x- und y-Richtung wurden identisch angesetzt (keine horizontale Anisotropie), da es sich um gut durchlässige quartäre Sedimente handelt. Zur Abbildung der Seen wurde der k_f -Wert vereinfacht mit 1 m/s umgesetzt. Bereichsweise treten tertiäre (Honigbuck) und mesozoischen jurassische Sedimente (Lehener Bergle) bis an die Geländeoberkante, sodass lokal dort keine quartären Ablagerungen vorkommen (Anlage 5.1.1). Da beim schichtbasierten Ansatz des 3D-Modellnetzes ein Auslaufen von Modellschichten bzw. Fehlstellen (Löcher) innerhalb von Schichten nicht möglich ist, erfolgte die Implementierung der tertiären bzw. jurassischen Vorkommen über die Zuweisung der hydrogeologischen Parameter in den einzelnen Modellschichten. Für die Neuenburg-, Breisgau und Hauptrogenstein-

Formationen sind die k_r -Wert-Verteilungen in den Anlagen 5.1.1, 5.1.2 sowie 5.1.3 dargestellt.

Effektive Porosität

Die effektive Porosität n_{eff} wurde für den oberen GWL (Neuenburg-Formation) mit 15 % angesetzt. Für den Hauptrogenstein wurde eine effektive Porosität von 3 % verwendet. Alle übrigen Modellschichten, auch die gering durchlässige Variansmergel-Formation, wurden mit einer effektiven Porosität von 10 % belegt. Eine Übersicht der verwendeten Werte ist in Tabelle 9 dargestellt.

Speicherkoeffizient

Für die Neuenburg-Formation wurde einheitlich ein spez. Speicherkoeffizient (hier Kompressibilität des Korngerüsts) von $1 \cdot 10^{-4}$ [1/m] verwendet. Der Speicherkoeffizient (specific yield) entspricht im ungespannten Grundwasserleiter jedoch der durchflusswirksamen Porosität n_{eff} und der spezifischen Speicherkoeffizient (Kompressibilität) kann vernachlässigt werden. Für die teilgespannten Bereiche wurde ein spezifischer Speicherkoeffizient von $1 \cdot 10^{-5}$ [1/m] angenommen. Das betrifft die Breisgau-Formation sowie die tertiären und mesozoischen Vorkommen und den Variansmergel im Hangenden des Hauptrogenstein-GWL. Für den Hauptrogenstein-GWL westlich von Dietenbach wurde ein spezifischer Speicherkoeffizient von $1 \cdot 10^{-6}$ [1/m] angenommen.

Der Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser erfolgt im Grundwasserströmungsmodell über die sogenannten Transferraten. Aus Untersuchungen ist bekannt, dass vor allem aus der Vorflut Dreisam abschnittsweise Wasser in das Grundwasser infiltriert oder die Vorflut von Grundwasser gespeist wird (Kapitel 3.6). Die Transferraten ermöglichen eine hydraulische Kommunikation zwischen dem Grundwasser und den Fließgewässern, welche mit einer Randbedingung 3. Art belegt sind. Die Transferraten dienen zur Berechnung des Fließwiderstandes (Kolmationsschicht) am Übergangsbereich zwischen Grundwasser und Fließgewässer. Die Transferraten hängen vom hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwert und der Mächtigkeit der Kolmationsschicht ab. Die Eigenschaften der Kolmationsschicht können nur abgeschätzt werden und sind weitestgehend eine unbekannte Größe. Die Transferraten sind somit unbekannt und wurden im Verlauf der instationären Kalibrierung angepasst. Eine Übersicht der verwendeten Werte ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Hydraulische Parameter des Grundwasserströmungsmodells nach erfolgter instationärer Kalibrierung

Hydrogeologische Einheit	k_r -Wert horizontal* [m/s]	Effektive Porosität n_{eff} [-]	spez. Speicherkoeffizient [1/m]
Neuenburg-Formation	$7,5 \cdot 10^{-5}$ bis $1,5 \cdot 10^{-2}$ *	0,15	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Breisgau-Formation	$1,0 \cdot 10^{-5}$ bis $2 \cdot 10^{-4}$ *	0,1	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Variansmergel-Formation	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0,1	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Tertiär	$3,0 \cdot 10^{-6}$	0,1	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Hauptrogenstein	$1,0 \cdot 10^{-5}$ bis $4,0 \cdot 10^{-4}$ *	0,1	$1,0 \cdot 10^{-6}$

* siehe Anlagen 5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3 für die flächige Darstellung

4.3 Kalibrierung Grundwasserströmungsmodell

4.3.1 Vorgehen stationäre Kalibrierung

Die stationäre Kalibrierung erfolgte anhand der Stichtagsmessungen Mai 2016 [D 53] (Kalibrierung quartärer GWL) sowie Oktober 2012 (Kalibrierung Hauptrogenstein- GWL).

Quartärer Grundwasserleiter

Der Fokus der stationären Kalibrierung lag auf dem quartären GWL der Neuenburg-Formation, da in der Neuenburg-Formation die Brunnen für die geothermische Anlage Dietenbach errichtet werden sollen. Für die stationäre Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells wurden die gemessenen Grundwasserstände der Stichtagsmessung 2016 verwendet. Insgesamt standen im Modellgebiet 86 Grundwassermessstellen mit gemessenen Wasserständen zur Verfügung.

Im Verlauf der stationären Kalibrierung wurde der Fokus auf die folgenden relevanten Modellparameter gelegt:

- Hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) und
- Hydraulische Anbindung der Fließgewässer an das Grundwasser (Transferraten).

Die hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte und Transferraten der Fließgewässer wurden iterativ, bereichsweise und manuell, sowie innerhalb sinnvoller Wertebereiche liegend, so lange angepasst, bis eine gute Übereinstimmung der berechneten Grundwasserstände mit den gemessenen Grundwasserständen erzielt wurde. Zudem wurde der Randzufluss vom Fuße des Lorettoberges im Laufe der Kalibrierung festgelegt.

Hauptrogenstein-Grundwasserleiter

Der tiefere GWL in der Hauptrogenstein-Formation wurde im Modell für die Verbreitung westlich und nordwestlich von Dietenbach berücksichtigt. Innerhalb dieser Formation ist der Trinkwasserbrunnen TB Schorren der Gemeinde Umkirch verfiltert, welcher möglicherweise durch die geothermische Anlage von Dietenbach beeinflusst werden könnte. Gemessene Grundwasserstände mit konstruierten Grundwassergleichen liegen nur für den 22.10.2012 vor. Aus diesem Grund wurde die Hydraulik des Hauptrogenstein-GWL abweichend zum Quartär anhand der Messwerte von 2012 kalibriert. Der Trinkwasserbrunnen TB Schorren der Gemeinde Umkirch ist bei der stationären Kalibrierung nicht aktiv, da dieser erst ab 28.11.2012 in Betrieb genommen wurde [D 17].

Für den Vergleich der gemessenen und berechneten Grundwasserdruckpotentiale im Hauptrogenstein standen drei GWM für die Nordscholle (B2, B3, B6) plus TB Schorren sowie drei GWM für die Südscholle (B9, B10, B12) zur Verfügung. Die Kalibrierung erfolgte anhand der k_f -Werte, wobei nur für die Nordscholle mit Pumpversuchen k_f -Werte ermittelt wurden.

4.3.2 Ergebnisse stationäre Kalibrierung

Vorbemerkung

Die stationäre Kalibrierung des Grundwassermodells wurde auf Basis der Stichtagsmessung (STM) Mai 2016 durchgeführt. Für die Stichtagsmessung (STM) Mai 2016 wurden der JIG die gemessenen Wasserstände an den Grundwassermessstellen im Modellgebiet zur Verfügung gestellt.

Ein „Mischen“ verschiedener Grundwasserstände aus verschiedenen Stichtagsmessungen ist generell nicht sinnvoll, da jede Stichtagsmessung einen unterschiedlichen Zustand der Grundwasserhydraulik abbildet. Die Verwendung eines konstruierten Grundwassergleichenplans (sei es MHW 2016 oder MHGW 2019) ist daher ebenfalls nicht für die stationäre Kalibrierung geeignet, da es sich hierbei nicht um gemessene Wasserstände und somit nicht um einen realen Zustand der Grundwasserpotentiale handelt. Zudem liegen die Grundwassergleichen für MHGW 2019 nur sehr lokal im Umkreis Dietenbachs vor, wodurch eine Kalibrierung des Gesamtmodells nicht möglich ist.

Quartärer Grundwasserleiter

Die mit dem Modell berechneten Grundwassergleichen und die konstruierten Grundwassergleichen der Stichtagsmessung 2016 (entspricht laut dem UWSA ungefähr HW-Zuständen D 53]) sind in Anlage 5.2.1 gegenübergestellt. Der generelle Verlauf der mit dem Grundwassermodell berechneten Grundwassergleichen weist für das gesamte Modellgebiet eine gute Übereinstimmung mit den konstruierten Grundwassergleichen auf.

Dies wird auch im Vorhabensgebiet Dietenbach erzielt. Lediglich im Osten von Dietenbach, bei der Kreuzung der B31 mit der Tel-Aviv-Yafo-Allee, gibt es geringfügige Abweichungen. Weitere Abweichungen sind südwestlich und abstromig des Opfinger Sees zu verzeichnen. Auf Grund der großen Entfernung von ca. 3 bis 5 km zu Dietenbach sind diese Abweichungen für die hier vorliegende Fragestellung nicht relevant.

Abbildung 9 zeigt die Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Grundwasserstände zur Modellabweichung im quartären Grundwasserleiter für die Stichtagsmessung 2016. Im Idealfall einer Modellanpassung liegen alle Punkte auf der blauen Referenzlinie oder im Konfidenzintervall von ± 1 m (schwarze Balken). Das Konfidenzintervall wurde anhand des minimalen und maximalen Wasserstandes im Modellgebiet abgeleitet. Berechnete Grundwasserstände, die außerhalb des Konfidenzintervalls liegen, wurden rot dargestellt.

Im Ergebnis der stationären Modellkalibrierung der Stichtagsmessung 2016 wurde eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserständen erzielt. Die Kalibrierungsgüte für das gesamte Modellgebiet lässt sich mit einem absoluten Fehler von $E = 0,52$ m, dem quadratischen Mittelwert (RMS) von $0,67$ [-] und einer Standardabweichung von $0,68$ m beschreiben. Lediglich an 13 von 86 GWM wurde der Wasserstand mehr als 1 m überschätzt. Die GWM in unmittelbarer Umgebung von Dietenbach wurden jedoch sehr gut abgebildet und haben durchgängig nur geringe Abweichungen $< 0,5$ m.

Es ist zu beachten, dass durch die Verwendung der 30-jährigen mittleren Grundwasserneubildung bei der stationären Kalibrierung mittlere Zuflüsse über die Grundwasserneubildung erfolgen und keine ggf. temporär abweichenden Grundwasserneubildungsraten im Modell angesetzt wurden. Monatlich instationäre Grundwasserneubildungsraten wurden bei der instationären Kalibrierung verwendet.

Die stationäre Kalibrierung („Gleichgewichtszustand“, keine zeitliche Komponente) erfolgte als erster Kalibrierungsschritt vor der instationären Kalibrierung. Der hier vorgelegte Stand der stationären Modellkalibrierung des Grundwasserströmungsmodells bildet die komplexen Grundwasserströmungsverhältnisse auf dem Standort und in dessen Umgebung zum Zeitpunkt der STM 2016 gut ab.

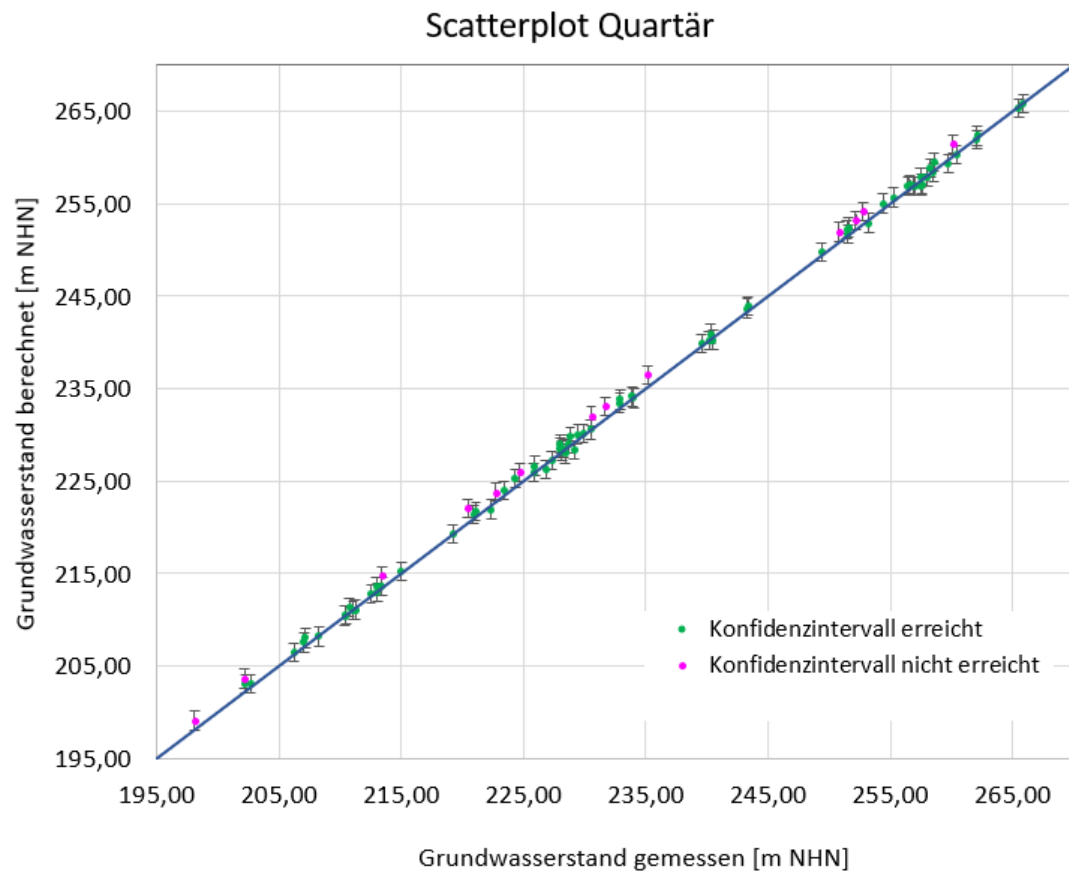


Abbildung 9: Scatterplot quartärer Grundwasserleiter (Stichtagsmessung 2016)

Hauptrogenstein-Grundwasserleiter

Wie bereits in Kapitel 4.3.1 erläutert wurde zusätzlich zum quartären GWL die Hydrodynamik im Hauptrogenstein westlich und nordwestlich von Dietenbach orientierend berechnet. Es ist zu beachten, dass die verfügbaren Grundwasserstandsdaten für den Hauptrogenstein vom Oktober 2012 sind und somit ca. vier Jahre älter als die Messdaten der STM 2016. In Abbildung 10 ist die Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Grundwasserstände zur Modellabweichung im tieferen GWL Hauptrogenstein dargestellt. Bei fünf von sieben GWM wurde das Konfidenzintervall von 1 m eingehalten. Beim TB Schorren wurde eine Abweichung von -0,44 m berechnet. Für die orientierende Abbildung der Grundwasserströmung ist die erzielte Genauigkeit ausreichend.

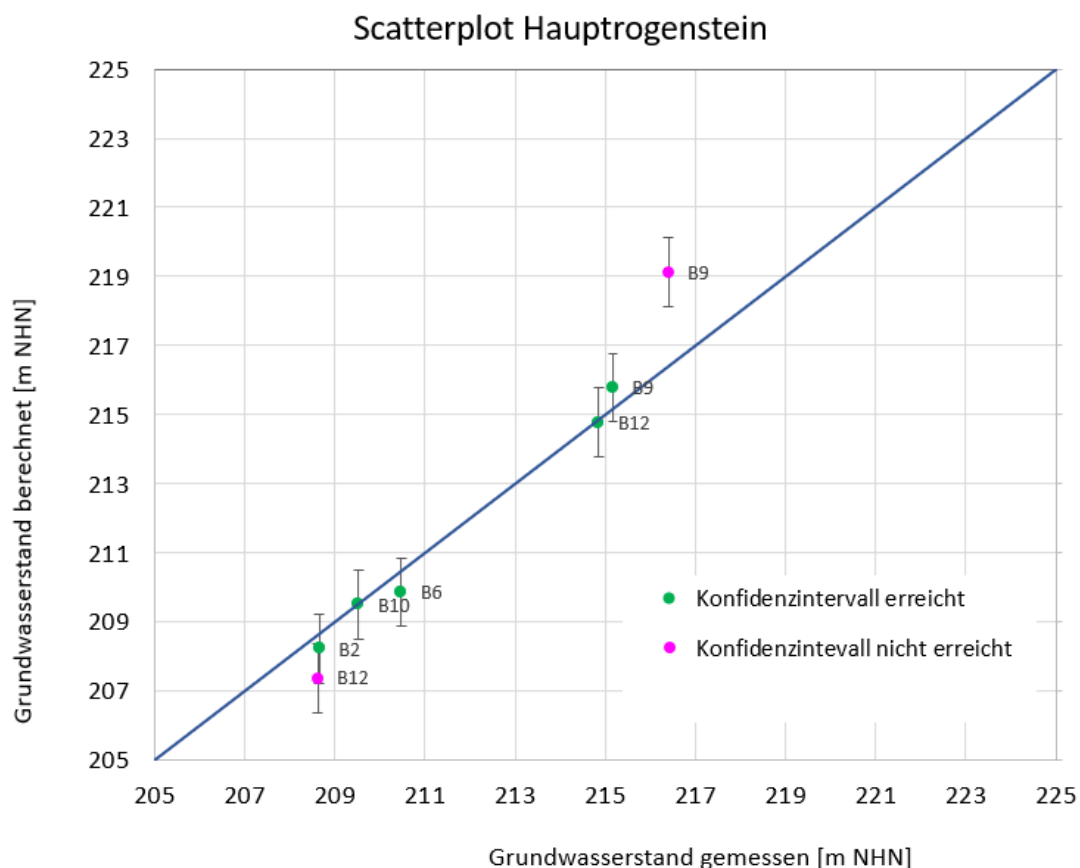


Abbildung 10: Scatterplot Hauptrogenstein - Modellschicht 7 (10/2012)

In Tabelle 10 ist die Wasserbilanz der stationären Kalibrierung dargestellt. Es wird ersichtlich, dass über die Oberflächengewässer (Fließgewässer) mit einem Anteil von 40 % vom Grundwasserzu- und -abfluss ein hoher Austausch zwischen dem Grundwasser und

den Gewässern stattfindet. Summarisch ist der Grundwasserabfluss um ca. 27.500 m³/d höher als der Zufluss. Die gesamten Brunnentnahmen sind mit 2 % der Grundwasserabflüsse im Vergleich zu den anderen Bilanzgliedern sehr klein. Die Modellabweichung mit 0,23 m³/d zwischen Grundwasserzu- und -abflüssen ist als sehr gering und vernachlässigbar zu bewerten. Relevante Bilanzglieder sind in Abbildung 11 dargestellt.

Tabelle 10: Massenbilanz des stationär kalibrierten Grundwasserströmungsmodells

Bilanzglied	m ³ /d	%
Berechnete Grundwasser-Zuflüsse in den Modellgebiet		
Grundwasserneubildung	31.117	18
Grundwasserzufluss über Modellränder (1. Art + 2.Art)	67.141	40
Grundwasserzufluss über Oberflächengewässer	70.222	42
Berechnete Grundwasser-Abflüsse aus dem Modellgebiet		
Grundwasserzehrung	-694	0
Grundwasserabfluss über Modellränder	-67.443	40
Grundwasserabfluss über Oberflächengewässer	-97.740	58
Brunnenentnahmen	-2.602	2
Nettobeträge		
Grundwasserneubildung/-zehrung	30.423	-
Modellränder	-302	-
Oberflächengewässer	-27.518	-
Brunnenentnahmen	-2.602	
Summe Grundwasser-Zuflüsse	168.480	-
Summe Grundwasser-Abflüsse	-168.479	-
Abweichung	< 1	0,0005*

*Basierend auf dem berechneten Bilanzergebnis des Grundwassermodells inkl. Berücksichtigung von Nachkommastellen.

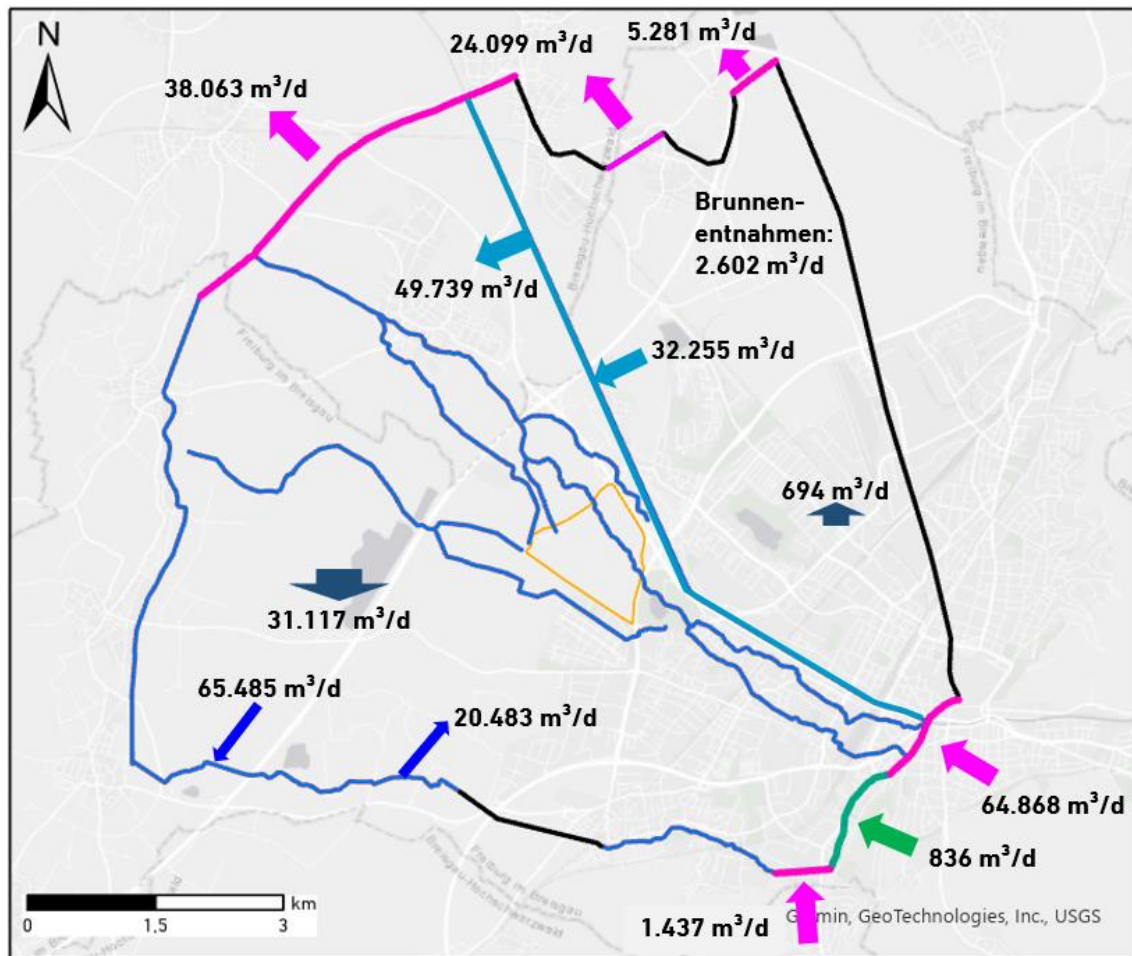


Abbildung 11 Graphische Darstellung der Massenbilanz für den stationären Kalibrierungslauf Mai 2016

4.3.3 Vorgehen instationäre Kalibrierung

Im Anschluss an die stationäre Kalibrierung wurde das Grundwasserströmungsmodell instationär kalibriert. Die instationäre Kalibrierung erfolgte für die Neuenburg-Formation anhand der vorliegenden kontinuierlichen Messungen der Grundwasserstände mittels Datenloggern im Zeitraum 2000 – 2021. Insgesamt liegen Loggeraufzeichnungen für 67 GWM vor [D 51]. Im Rahmen der Kalibrierung wurde der Fokus auf die hydraulische Anbindung der Fließgewässer zum Grundwasser (Transferraten) gelegt. Diese wurden durch iterative instationäre Modellberechnungen innerhalb sinnvoller Wertebereiche angepasst, bis eine gute Übereinstimmung der berechneten Grundwasserganglinien mit den gemessenen Grundwasserganglinien an den Beobachtungsmessstellen erzielt wurde. Die k_f -Werte wurden im Laufe der instationären Kalibrierung bereichsweise weiter angepasst. Der spezifische Speicherkoeffizient (Kompressibilität) und die effektive Porosität wurden zunächst variiert. Da diese beiden Parameter bei verschiedenen Berechnungen kaum einen signifikanten Einfluss auf die Grundwasserganglinien zeigten, sind diese Parameter als vergleichsweise wenig sensitiv zu bewerten. Daher wurden für diese beiden Parameter die Werte, wie in Tabelle 9 dokumentiert, beibehalten. Die Festpotentiale mussten im Laufe der instationären Kalibrierung angepasst (um 1,5 m verringert) werden, da die stationäre Kalibrierung auf hohe Grundwasserstände und nicht auf mittlere Grundwasserverhältnisse erfolgte. Der Fokus der instationären Kalibrierung lag weiterhin auf Dietenbach. Im Gegensatz zur stationären Kalibrierung stehen bei der instationären Kalibrierung in Dietenbach vier zusätzliche GWM zur Verfügung, da diese nach 2016 neu errichtet wurden. Für Dietenbach und das nahe Umfeld sind insbesondere die folgenden sechs GWM relevant (Anlage 5.3):

- 0095/069-1: Messdaten 2004 – 2021,
- 0282/069-3: Messdaten 2000 – 2021,
- 0961/069-6: Messdaten 2018 – 2020,
- 0986/069-6: Messdaten 2018 – 2020,
- 2040/069-9: Messdaten 2018 – 2020 und
- 2328/069-1: Messdaten 2018 – 2020.

Darüber hinaus wurden weitere GWM ausgewertet und in Anlage 5.3 dokumentiert. Ziel der instationären Kalibrierung ist die Abbildung der Grundwasserschwankungen in Höhe und zeitlicher Abfolge. Die berechneten und gemessenen Grundwasserstände sind in Anlage 5.3 für ausgewählte GWM gegenübergestellt.

4.3.4 Ergebnisse instationäre Kalibrierung

In der Anlage 5.3 sind die berechneten Ganglinien der Grundwasserstände mit den gemessenen Ganglinien für ausgewählte GWM gegenübergestellt. Im Ergebnis wurde mit dem aktuellen Stand des Grundwasserströmungsmodells eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Grundwasserständen, sowohl regional als auch auf dem Standort in

- Tendenz und
- Größenordnung

erzielt. Die Kalibrierung wurde anhand der Dynamik und des Niveaus der Grundwasserstände beurteilt. Für die Messstellen im Bereich Dietenbach wurden die maximalen Amplituden ausgewertet, sowie, ob eine systematische Verschiebung des Grundwasserstands vorliegt. Die langjährige Messreihe der GWM 0095/069-1 zeigt, dass das Niveau der Wasserstände gut übereinstimmt, aber teilweise eine etwas geringere Dynamik berechnet wurde. Die Spitzenwerte von GWM 0095/069-1 wurden teilweise leicht unter- oder überschätzt. Bei GWM 0282/069-3 wurde eine gute Übereinstimmung der Dynamik erzielt. Das Niveau der Wasserstände ist teilweise geringfügig unterschätzt. Die vier weiteren Messstellen von Dietenbach weisen im Vergleich zu den ersten beiden GWM nur eine kurze Messreihe auf.

Wie aus Anlage 5.3 hervorgeht, wurden auch die Grundwasserganglinien an den übrigen GWM im Modellgebiet gut abgebildet.

Die komplexe instationäre Grundwasserdynamik am Standort wird gut mit dem Grundwassermodell abgebildet. Das instationär kalibrierte Grundwasserströmungsmodell kann somit als Ausgangslage für die Variantenberechnungen verwendet werden.

Die kalibrierten hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte k_f liegen insgesamt im Wertebereich der bisherigen Untersuchungen und Gutachten (Kapitel 3.4.2.1) und sind somit als plausibel einzuschätzen.

Die Anisotropie der k_f -Werte wurden im Zuge der instationären Kalibrierungen, nach einigen vergleichenden Modellberechnungen, als vergleichsweise wenig sensitiv bewertet und nicht weiter verändert, bzw. der initial angesetzte Wert beibehalten.

5 Erweiterung zum Wärmetransportmodell

Für eine thermohydrodynamische Modellierung wurde das kalibrierte Grundwasserströmungsmodell zu einem Wärmetransportmodell erweitert, mit welchem anschließend drei Variantenberechnungen durchgeführt wurden. Ziel der Variantenberechnungen ist die Bewertung hinsichtlich

- der thermischen Beeinflussung (räumlich und zeitlich) sowie
- des Grundwasseraufstaus und der Grundwasserabsenkung

durch die Grundwasserwärmenutzung in Dietenbach.

5.1 Wärmetransportparameter

Für eine Wärmetransportmodellierung sind die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Untergrundes essenzielle Einflussgrößen. Im Regelfall wird die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität mit einem Geothermal Response Test (GRT) am Standort bestimmt. Da bisher kein GRT durchgeführt wurde und anderweitig keine Informationen zur Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität vorliegen, wurden Literaturwerte entsprechend der am Standort vorkommenden Lithologie verwendet. In Tabelle 11 sind die im Modell den hydrostratigraphischen Schichten zugewiesenen lithologieabhängigen Wärmeparameter zusammengefasst. Grundlage für die Zuweisung bildet die Richtlinie VDI 4640 – Blatt 1 [D 59] und das Pflichtenheft zur Methodik und Dokumentation thermohydrodynamischer Modellierungen von Berlin [D 46]. Die für den Wärmetransport erforderliche effektive Porosität wurde von der Grundwasserströmungsberechnung unverändert übernommen (Kapitel 4.2.4).

Tabelle 11: Im instationären Wärmetransportmodell angesetzte Wärmeparameter

Modellschicht	Hydrostratigraphie	Wärmekapazität effektiv [MJ/m ³ x K]	Wärmeleitfähigkeit effektiv [W/m x K]
Neuenburg- Formation	Mittel- bis Grobsand	1,45*/ 2,50	0,4*/ 3,0
Breisgau-Formation	Mittelsand	2,50	3,0
Tertiär	tonig-mergeligen Sedimentgesteinen	2,20	2,3
Variansmergel	Wechselagerung von feinsandigen Kalk- und Tonmergeln (Wikipedia)	2,20	2,5
Hauptrogenstein	Kalkstein (Karst)	2,20	2,7

*ungesättigt

5.2 Anfangstemperatur und Temperaturrandbedingungen

Wie bereits in Kapitel 3.5 erläutert, liegen für den Standort Dietenbach langjährige Temperaturmessungen für den oberen Grundwasserleiter (Neuenburg-Formation) vor. Der Mittelwert aller Messwerte inklusive der jahreszeitlichen Schwankungen beträgt 12,93 °C. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie des KIT wurde als Untergrundtemperatur 12,7 °C verwendet [D 22]. Um eine Vergleichbarkeit mit den Modellergebnissen der Machbarkeitsstudie des KIT zu gewährleisten, wurde daher der geringfügig niedrigere Werte von 12,7 °C als ungestörte Untergrundtemperatur verwendet. Diese Temperatur wurde ungeachtet der jahreszeitlichen Schwankungen als Anfangsbedingung und als Randbedingung des Zustroms am südöstlichen Modellrand angesetzt. Die Temperaturrandbedingung 1. Art wurde im Bereich der hydraulischen Randbedingung 1. Art am Übergang zum Dreisamtal und bei der Zustromrandbedingung 2. Art zugewiesen

(Anlage 4.3). Bei der Temperaturrandbedingung 1. Art handelt sich um eine fest angesetzte Temperatur, die einzelnen Modellknoten zugewiesen wird, welche sich nicht im Laufe der Modellierung ändert. Analog zu den Modellberechnungen der Machbarkeitsstudie [D 19] wurde keine geothermische Tiefenstufe berücksichtigt. Durch die Vernachlässigung der geothermischen Tiefenstufe und des geothermischen Wärmestroms wird die Temperaturbeeinflussung durch das kühlere reinfiltrierte Wasser im Abstrom von Dietenbach tendenziell überschätzt, da keine Wärmezufuhr aus den tieferen Schichten berücksichtigt wurde. Saisonale Temperaturschwankungen, welche in der Regel in den oberen 20 m stattfinden, und erfahrungsgemäß keinen relevanten Einfluss auf die Modellergebnisse haben, wurden analog zur Machbarkeitsstudie nicht berücksichtigt.

5.3 Hydraulische Randbedingungen für die Variantenberechnungen

5.3.1 Weitere Randbedingungen

Die hydraulischen Randbedingungen 1. Art im An- und Abstrom sowie die Zustromrandbedingung 2. Art in das Modell wurden analog zur instationären Kalibrierung unverändert beibehalten. Die konstant angesetzten Potenzialhöhen an den mit Randbedingung belegten Modellrändern wurden nicht verändert.

Die hydraulischen Randbedingungen 3. Art zur Abbildung der Wasserstände in den Fließgewässern wurden analog dem Vorgehen bei der instationären Kalibrierung mit einer Ganglinie implementiert. Details sind Kapitel 4.3.3 zu entnehmen. Für die Prognose der Variantenberechnungen wurden aus der langjährigen Messreihe der Abflussmessungen am Pegel Ebnet die gemessenen Abflüsse von 2017 zyklisch angesetzt [D 1]. Das Jahr 2017 wurde ausgewählt, um konservativ hohe Wasserstände in den Fließgewässern abzubilden, da in den Wintermonaten von 2017 im Vergleich zu den anderen Jahren hohe Abflüsse am Pegel Ebnet gemessen wurden (Abbildung 8).

5.3.2 Grundwasserneubildung

Für die Prognoseberechnungen lagen monatlich instationäre Daten zur hydrotopbezogenen Grundwasserneubildung für den Zeitraum 2000 bis 2020 vor. Für die

Prognose der Variantenberechnungen wurden aus den monatlich instationären Grundwasserneubildungsraten Mittelwerte für jeden Monat gebildet. Diese Monatsmittelwerte wurden zyklisch für die Variantenberechnungen verwendet. Es ist zu berücksichtigen, dass mit diesem Ansatz die Grundwasserneubildungsraten mittlere langjährige Verhältnisse und keine Hochwasserzustände mit hohen Grundwasserneubildungsraten abbilden. Durch die monatliche Auflösung können jedoch die Schwankungen der Grundwasserneubildung bei den Variantenberechnungen abgebildet werden.

Für das Neubaugebiet Dietenbach wurde in den Prognosen der Variantenberechnung eine unveränderte Hydrotopstruktur angenommen und somit eine unveränderte Grundwasserneubildung im Endzustand im Modell angesetzt. Eine Versiegelung, bzw. teilweise Versickerung durch die geplante Bebauung wurde bisher nicht im Grundwassermodell berücksichtigt, da die Gestaltung des Wasserhaushaltes des neuen Viertels Dietenbach zum Zeitpunkt der Berechnungen noch nicht abschließend vorgelegen hat.

5.3.3 Brunnenförderraten der Trink- und Brauchwasserbrunnen

Für die Variantenberechnungen wurden konstante Förderraten der Trink- und Brauchwasserbrunnen angesetzt, die Mittelwerte der jeweiligen Förderraten der letzten 5 Jahre von 2016 bis einschließlich 2020 gebildet und im Modell implementiert. In Anlage 6.2 sind die Förderraten der im Modell berücksichtigten Brunnen zusammengefasst. Für den Trinkwasserbrunnen TB Schorren der Gemeinde Umkirch, welcher im Hauptrogenstein ausgebaut ist, wurde anstatt des 5-jährigen Mittelwertes von $836 \text{ m}^3/\text{d}$ die maximal genehmigte Förderrate in Höhe von $889 \text{ m}^3/\text{d}$ angesetzt [D 17]. Durch eine höhere Förderrate ist potenziell eine höhere Temperaturbeeinflussung für den TB Schorren zu erwarten, da dieser im Abstrom von Dietenbach gelegen ist.

5.4 Digitales Geländemodell für die Variantenberechnungen

Für den Endzustand von Dietenbach ist eine bereichsweise Erhöhung der Geländeoberkante im Bereich des neuen Stadtteils vorgesehen. Für die Überführung in das Grundwasserströmungsmodell wurden die flächenhaften Höhendaten in Punktdaten als

Schwerpunkte der Flächen konvertiert. Die Interpolation der Höhendaten (Endzustand) wurde dann auf die Geländeoberkante im Grundwassermodell übertragen.

Anhand der Daten aus der Vermessung der Geländeoberkante vom 16.11.2021 [D 56] sowie dem geplanten Höhenkonzept mit Stand August 2021 [D 55] wurde die erhöhte Geländeoberkante von Dietenbach (DGM im Endzustand) abgeleitet. Die Aufhöhung beträgt zwischen 0 und maximal 4,5 m, wobei die Aufhöhung im Norden und im mittleren Bereich von Dietenbach am höchsten ausfällt.

6 Variantenberechnungen

6.1.1 Variantenübersicht

Für die Bewertung der hydraulischen und thermischen Auswirkungen der geothermischen Anlage für Dietenbach war sowohl der Zustand für die Bauabschnitte 1 bis 4 (BA 1-4) als auch der Zustand für die Bauabschnitte 1 bis 6 (BA 1-6) modelltechnisch zu prüfen. Der Zustand BA 1-6 stellt den Endzustand dar. Je nach Bauabschnitt sind unterschiedlich hohe Energiemengen durch die geothermische Anlage zu erbringen. Für den Zustand BA 1-4 wurden zwei Untervarianten berechnet. Die Anzahl der Infiltrationsbrunnen sollte nach Abstimmung mit der AG variiert werden. Die von der geothermischen Anlage erforderlichen Energiemengen wurden von EGS Plan ermittelt und die daraus resultierenden Förderraten an JIG übergeben [D 9]. Alle von EGS Plan übermittelten Gesamtförderraten beziehen sich auf die Nachhaltigkeits-Klasse/Effizienzgebäude-Stufe EH 40 sowie Zu- und Abluft ohne Wärmerückgewinnung (ABL). Der Gesamtwärmebedarf für den Endzustand, d.h. für die Bauabschnitte 1-6 beträgt gemäß EGS Plan 44,4 GWh/a. Dieser Gesamtwärmebedarf soll hauptsächlich durch folgende drei Quellen gedeckt werden:

- Abwärme der Elektrolyseanlage für die Gewinnung von grünem Wasserstoff,
- Abwasser-Wärmenutzung und
- Grundwasserwärme.

Je nach Anzahl der Bauabschnitte wird ein unterschiedlich hoher Energiebedarf durch das Grundwasser erforderlich. Gemäß EGS Plan wurden für beide Zustände folgende Lasten angesetzt:

- EH40, ABL, BA 1-4: 8,1 GWh/a jährliche Gesamtentzugsenergiemenge
Maximale Entzugsleistung: 5,2 MWth entspricht einer Förderrate von 900 m³/h
(Tagesmittelwert bei 5K GW-Spreizung) und
- EH40, ABL, BA 1-6: 13,9 GWh/a jährliche Gesamtentzugsenergiemenge
Maximale Entzugsleistung: 7,8 MWth entspricht einer Förderrate von 1.334 m³/h
(Tagesmittelwert bei 5K GW-Spreizung).

Grundlage der Variantenberechnungen in diesem Bericht stellen die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie des KIT dar [D 39]. Details zur modelltechnischen Umsetzung sind Kapitel 6.1.2 zu entnehmen. Folgende Varianten wurden berechnet:

- Variante EH40, ABL, BA 1-6: 27 Entnahme- und 26 Infiltrationsbrunnen
- Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1: 19 Entnahme- und 26 Infiltrationsbrunnen
- Variante EH40, ABL, BA 1-4 v2: 19 Entnahme- und 23 Infiltrationsbrunnen
- Referenzprognose: keine Entnahme- und Infiltrationsbrunnen

Die jeweilige Lage der Brunnen für die verschiedenen Prognosen kann Anlage 7.2.1 entnommen werden. Die Referenzprognose dient zur Berechnung der Grundwasserdifferenzen (siehe Kapitel 6.2). Die jeweils angesetzten Grundwasserentnahme- und Infiltrationsmengen sind Anlage 6.1 zu entnehmen.

6.1.2 Modelltechnische Umsetzung der Grundwasserwärmenutzung

Bei der geothermischen Anlage handelt es sich um ein offenes System, Grundwasser wird im Anstrom durch die Entnahmebrunnen gefördert und im Abstrom wird das um max. 5 K abgekühlte Wasser wieder infiltriert. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie des KITs [D 39] wurde die Dimensionierung von Förder- und Infiltrationsbrunnen zur Gewinnung und Rückführung des zu nutzenden Wassers bereits durchgeführt. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurden Vorzugsbereiche für die Brunnenstandorte, sowie Anzahl und Tiefe der Brunnen festgelegt. Die in der Machbarkeitsstudie von Variante 8,5 K Spreizung ermittelten folgenden Brunnenkonfigurationen wurden als Grundlage für die erneute Modellierung herangezogen:

- Durchmesser Brunnen und Brunnenfilter: 600 mm,
- Endteufe: 15 m u. GOK (nach Aufschüttung im Endzustand) und
- Verfilterung: 5 – 10 m u. GOK.

Im Gegensatz zur Machbarkeitsstudie des KIT wurden die Brunnen über die gesamte Teufe, von der Geländeoberkante bis zur Endteufe über 15 m, verfiltert. Bisher erfolgte noch keine Planung der Brunnentechnik (z.B. Tiefe der Brunnen, Durchmesser, Lage der Filterstrecken). Nach erfolgter Planung der Brunnentechnik kann der neue Planungsstand im Modell implementiert werden. Die Brunnen sind in Modellschicht 1 und somit

ausschließlich in der gut durchlässigen Neuenburg-Formation implementiert. Die Brunnenstandorte wurden von BIT-Ingenieure im Zuge der Erstellung des koordinierten Leitungsplans übergeben [D 3]. Die in den jeweiligen Varianten zu berücksichtigenden Brunnen wurden bei einer Projektbesprechung am 21.03.2022 abgestimmt. Die Temperaturspreizung wurde mit fünf K bei einer ungestörten mittleren Grundwassertemperatur von 12,7 °C vorgegeben. Um die Temperaturspreizung im Modell umzusetzen, wurde den Infiltrationsbrunnen eine zusätzlich Temperatur-Randbedingung 1. Art von konstant 7,7 °C zugewiesen. Diese Brunnenrandbedingung ist ab dem 01.01.2024 (1. Betriebsjahr) bis zum Modellende durchgehend aktiv.

Von EGS Plan wurden tägliche Gesamtförderraten für die beiden Zustände BA 1-4 und BA 1-6 übergeben [D 9]. Die Gesamtförderraten wurden für die modelltechnische Realisierung durch die jeweilige Brunnenanzahl der Varianten gleichermaßen dividiert. Aufgrund der wenigen Informationen zu hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerten und bisher fehlenden Infiltrationsversuchen am Standort Dietenbach, wurden die Förder- und Infiltrationsraten auf alle Brunnen gleich verteilt. Aus den von EGS Plan übergebenen Ganglinien der Gesamtförderraten geht hervor, dass der Betrieb der Entnahme- und Infiltrationsbrunnen im Wesentlichen auf die Monate Oktober bis Mai beschränkt ist. In den übrigen Monaten ist nur sporadisch an wenigen Tagen mit sehr geringen Wassermengen zu rechnen. Um die numerische Modellierung zu beschleunigen, wurden darum anstelle von Tageswerten Monats- Mittelwerte für April bis September implementiert. Die im Modell angesetzten Förder- und Infiltrationsraten sind in Anlage 6.1 dokumentiert.

Die Variantenberechnungen beginnen fiktiv am 01.01.2023 und wurden über einen Zeitraum von 21 Jahren bis 31.12.2043 gerechnet. Die Grundwasserförderung und -reinfiltration an den geplanten Brunnen Dietenbach startet mit Modellbeginn am 01.01.2023. Das erste Modelljahr ohne thermische Beeinflussung dient zur Überprüfung der korrekten Implementierung der Brunnenförder- und Infiltrationsraten, weshalb im ersten Jahr das Wasser ohne Abkühlung im Abstrom reinfiltrierte wird. Am 01.01.2024 wird das Wasser mit der vorgegebenen Temperaturspreizung von fünf K bis zum Modellende 31.12.2043 reinfiltrierte. Die geothermische Anlage ist vom 01.01.2024 bis zum Modellende 31.12.2043 über die geforderten 20 Jahre im Modell aktiv.

6.2 Methodik zur Auswertung der Modellergebnisse

Im Ergebnis der Variantenberechnungen liegen sowohl Temperaturverteilungen als auch Grundwasserpotentiale vor, aus denen für den Zeitraum der Berechnungen (19 Jahre) Grundwasserdifferenzkarten abgeleitet werden können. Folgende Ergebnisse werden je Variantenberechnung in den Anlagen 7 graphisch dargestellt:

- Temperaturverteilung Neuenburg-Formation Ende Januar 2043 (Anlage 7.1.1)
- Temperaturverteilung Hauptrogenstein Ende Januar 2043 (Anlage 7.1.2)
- Temperaturverteilung entlang NW-SE Profil Ende Januar 2043 (Anlage 7.1.3)

Ebenfalls werden anhand von Graphiken folgende Ergebnisse illustriert:

- Berechnete Grundwasserströmungsverhältnisse Ende Januar 2034 (Anlage 7.2.1)
- Grundwasserdifferenzkarten Ende Januar 2034 (Anlage 7.2.2)
- Grundwasserflurabstandskarten Ende Januar 2034 zum aufgeschütteten Endzustand (Anlage 7.2.3)
- Grundwasserflurabstandskarten Ende Januar 2034 Detailansicht (Anlage 7.2.4)
- Grundwasserganglinien an ausgewählten Punkten im Modellgebiet (Anlage 7.2.5).

Temperaturverteilungen

Die berechneten Temperaturen wurden für einen 19-jährigen Betrieb ausgewertet. Die höchsten Entnahme- und Förderraten fallen jeweils Ende Januar an. Ausgehend von einem fiktiven Betriebsbeginn der geothermischen Anlage am 01.01.2024 wurden die Ergebnisse für Ende Januar 2043 ausgewertet. Die vertikale Temperaturverteilung nach 19 Jahren ist im Profilschnitt NW-SE (Anlage 7.1.3) und die horizontale Temperaturverteilung ist in Anlage 7.1.1 für die Neuenburg-Formation und in Anlage 7.1.2 für die Hauptrogenstein-Formation dargestellt. Erwartungsgemäß stellt sich durch den Betrieb der geothermischen Anlage Dietenbach (nur Wärmeentzug) im Abstrom eine Abkühlung ein.

Aus dem Profilschnitt (Anlage 7.1.3) ist ersichtlich, dass die größte Temperaturbeeinflussung im oberen quartären GWL (Neuenburg-Formation) berechnet wurde, da die Brunnen Dietenbach nur im oberen GWL implementiert wurden. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Temperaturbeeinflussung ab. Da die horizontale Temperaturbeeinflussung in der Neuenburg-Formation gegenüber der Breisgau-

Formation größer ausfällt, wurde auf eine Darstellung der horizontalen Temperaturbeeinflussung in der Breisgau-Formation verzichtet.

Grundwasserhydraulik

Für alle Varianten werden die Grundwasserströmungsverhältnisse analog zum KIT-Gutachten [D 21] nach ca. zehn Jahren (Ende Januar 2034) mit Hilfe von Grundwassergleichen in Anlage 7.2.1 dargestellt. Zur Berechnung der Grundwasserdifferenzkarten (Anlage 7.2.2) wurden die Grundwasserpotentiale eines zuvor definierten Referenzzustands nach zehn Jahren (Ende Januar 2034) von den Grundwasserpotentialen der Prognoseberechnungen EH40 ABL BA 1-6, EH40 ABL BA 1-4 v1 und EH40 ABL BA1-4 v2 zum gleichen Zeitpunkt (Ende Januar 2034) subtrahiert. Das Vorgehen ist in Abbildung 12 skizziert. Bei der Referenzprognose handelt es sich um einen instationären Modelllauf ohne implementierte Brunnen (Fortführung Status Quo). Im weiteren Abstrom von Dietenbach (in Anlage 7.2.2 nicht dargestellt) sind keine durch die Grundwasserwärmenutzung bedingten Grundwasserdifferenzen festzustellen.

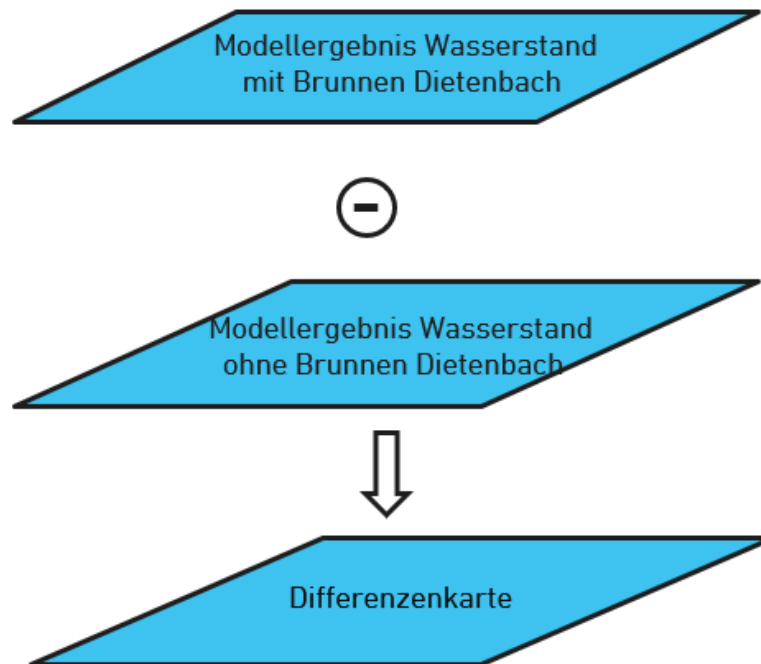


Abbildung 12: Prinzipskizze zur Methodik zur Berechnung der Grundwasserdifferenzenkarten

Zur Darstellung der Flurabstandskarten (Anlage 7.2.3 und 7.2.4) wurden die berechneten Grundwasserpotentiale der Variantenberechnungen zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 von der Geländeoberkante (GOK) des Standort Dietenbachs im Endzustand subtrahiert.

Die Punkte, an denen Ganglinien der Grundwasserstände über einen Zeitraum von 20 Jahren dargestellt werden (siehe Anlage 7.2.4), wurden zuvor in Abstimmung mit dem Garten- und Tiefbauamt Freiburg i. Br., der Stadtentwässerung Freiburg i. Br. sowie dem Umweltschutzamt Freiburg i. Br. festgelegt. Die Punkte befinden sich im Nahbereich der Entwässerungsanlagen, auf dem Parkplatz Mundenhof, dem Bereich nördlich der Mundenhofer Straße an bestehenden Straßenbegleitbäumen, im Langmattenwäldchen sowie im Landschaftsschutzgebiet Mooswald (siehe Abbildung 13). Im Folgenden wird auf die Beobachtungspunkte mit ihrer Nummer „Punkt Nr. X“ verwiesen.

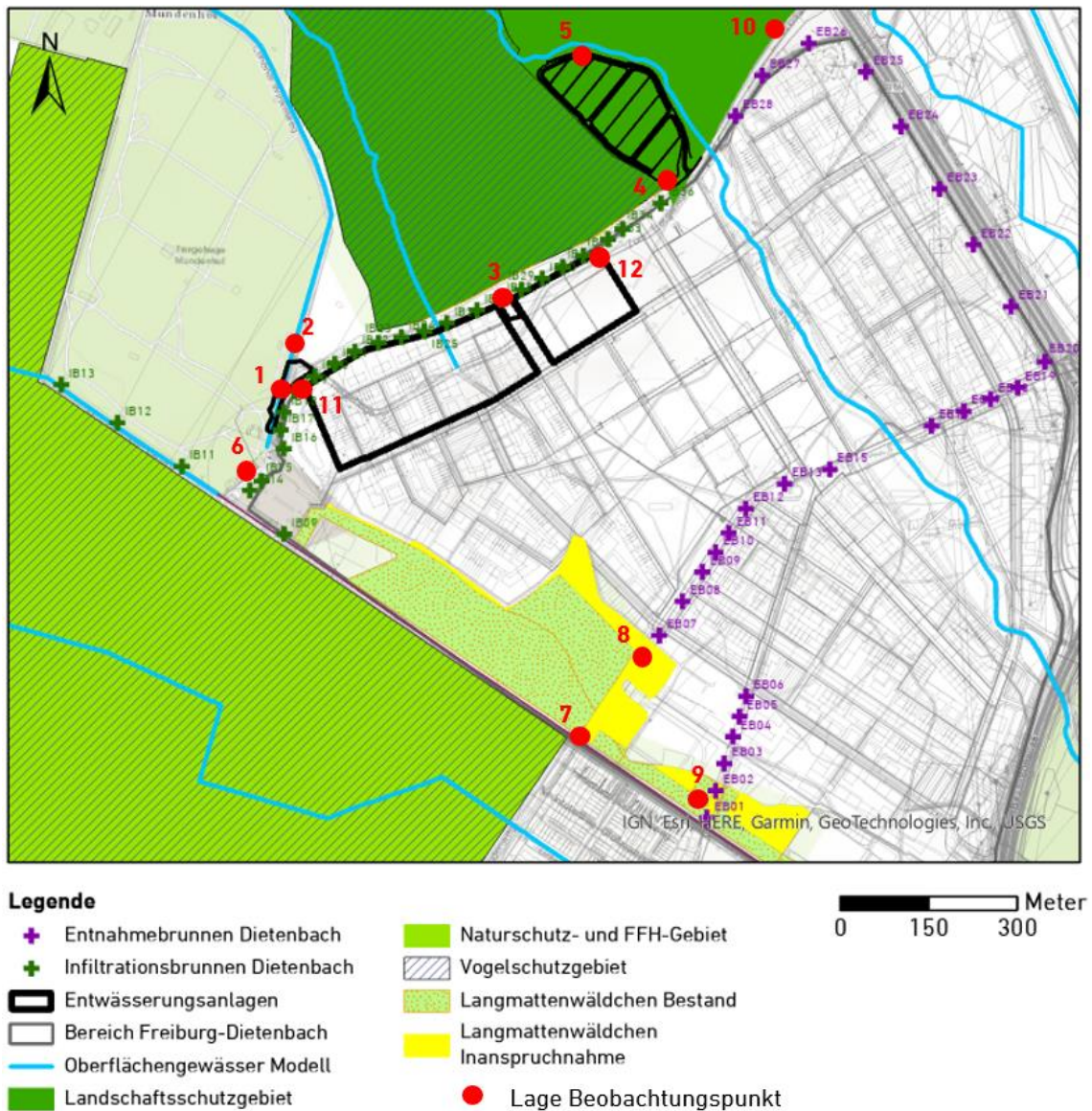


Abbildung 13: Lage Beobachtungspunkte für die Berechnung von Grundwasserganglinien

Zur Darstellung der Auswirkungen der Grundwasserwärmenutzung auf die betroffenen Schutzgebiete sowie Straßenbegleitbäume, wurden die natürlichen Grundwasserschwankungen im Bereich Dietenbach abgeleitet. Diese betragen bis zu 2 m. Der minimale Grundwasserstand der letzten 20 Jahre liegt angrenzend an das Rieselfeld (abgeleitet aus Loggeraufzeichnungen der Grundwassermessstelle 0282/069-3) ca. 1,7 m unter MHGW 2019, an den übrigen Datenloggern im Bereich Dietenbachs bis ca. 1,9 m unter MHGW 2019.

Aus den Ergebnissen der Temperatur- sowie Grundwasserhydraulik-Berechnungen (Kapitel 7.2 und 7.3) folgt eine Bewertung hinsichtlich:

- einer möglichen Beeinflussung auf den TB Schorren und das zugehörige Wasserschutzgebiet,
- möglicher Konflikte mit der Entwässerungsplanung,
- der Auswirkungen auf den Mundenhofer Parkplatz,
- der Auswirkungen auf angrenzende Schutzgebiete bzw. deren Schutzziele (NSG Freiburger Rieselfeld, Vogelschutzgebiet Mooswälder/Frohnholz, Landschaftsschutzgebiet Mooswald),
- der Auswirkungen auf den sensiblen Baumbestand (Straßenbegleitbäume) nördlich der Mundenhofer Straße und
- des Setzungsrisikos der Bestandsbebauung Rieselfeld im Bereich der Extraktionsbrunnen.

6.3 Ergebnisse Wärmetransportberechnung

6.3.1 Temperaturverteilung Variante EH 40 ABL BA1-6

Die Länge der Temperaturfahne nach 20 Jahren Betrieb beträgt zum Zeitpunkt des stärksten Wärmeentzugs Ende Januar ausgehend von den Infiltrationsbrunnen ca. fünf km in Abstromrichtung (Nordwest). Die Beeinflussung wurde anhand einer Temperaturbeeinflussung von 0,2 K (12,5 °C-Isotherme) abgegrenzt. Es ist zu beachten, dass die berechnete Temperaturbeeinflussung den Modellrand erreicht und sich somit geringfügig über das Modellgebiet hinaus erstrecken kann (Anlage 7.1.1). Die Ausdehnung der Temperaturbeeinflussung quer zur Strömungsrichtung beträgt ca. 1,6 km. Gemäß der erforderlichen Temperaturspreizung in Höhe von 5 K (12,7 °C – 5 °C = 7,7 °C), beträgt die Grundwassertemperatur im unmittelbaren Umfeld der Infiltrationsbrunnen (30 m abstromig) entlang der Straße Zum Tiergehege zwischen 7,7 °C und 8 °C.

In Anlage 7.1.2 ist die Temperaturverteilung für den tieferen GWL der Hauptrogenstein-Formation nach 20 Jahren Betrieb zum Zeitpunkt des stärksten Wärmeentzugs Ende Januar dargestellt. Es ist ersichtlich, dass für die Nord-Scholle des Hauptrogensteins eine Temperaturbeeinflussung berechnet wurde. Die höchste Temperaturbeeinflussung wurde bei der Bohrung B6/10 ca. 600 m südöstlich des TB Schorren mit einer Temperatur von ca. 11,6° C berechnet, was einer Abkühlung um 1,1 K (ausgehend von 12,7° C) entspricht. Am

TB Schorren beträgt die Temperatur ca. 12,0° C. Die Temperatur wurde somit um ca. 0,7 K verringert.

6.3.2 Temperaturverteilung Variante EH 40 ABL BA1-4 v1

Die Länge der Temperaturfahne nach 20 Jahren Betrieb beträgt zum Zeitpunkt des stärksten Wärmeentzugs Ende Januar ausgehend von den Infiltrationsbrunnen und einer Temperaturbeeinflussung von 0,2 K (12,5° C Isolinie) ca. 4,5 km in Abstromrichtung (Nordwest). Gemäß der erforderlichen Temperaturspreizung in Höhe von 5 K (12,7° C – 5° C = 7,7 °C), beträgt die Grundwassertemperatur im unmittelbaren Umfeld der Infiltrationsbrunnen (30 m abstromig) entlang der Straße Zum Tiergehege zwischen 7,7 °C und 8° C. Die Temperaturbeeinflussung entlang der Mundenhofer Straße ist etwas stärker ausgeprägt, da bei Variante BA1-4_v1 drei Infiltrationsbrunnen in Abstromrichtung hintereinander implementiert sind und sich die Abkühlung somit überlagert (siehe Anlage 7.1.1).

In der Anlage 7.1.2 ist die Temperaturverteilung für den tieferen GWL Hauptrogenstein-Formation nach 20 Jahren Betrieb zum Zeitpunkt des stärksten Wärmeentzugs Ende Januar dargestellt. Es ist ersichtlich, dass für die Nord-Scholle des Hauptrogensteins eine Temperaturbeeinflussung berechnet wurde. Die höchste Temperaturbeeinflussung wurde bei der Bohrung B6/10 ca. 600 m südöstlich des TB Schorren mit einer Temperatur von ca. 12,0 °C berechnet, was einer Abkühlung um 0,7 K (ausgehend von 12,7 °C) entspricht. Am TB Schorren beträgt die Temperatur ca. 12,3 °C. Die Temperatur wurde somit um ca. 0,4 K verringert.

6.3.3 Temperaturverteilung Variante EH 40 ABL BA1-4 v2

Die Länge der Temperaturfahne nach 20 Jahren Betrieb beträgt zum Zeitpunkt des stärksten Wärmeentzugs Ende Januar ausgehend von den Infiltrationsbrunnen und einer Temperaturbeeinflussung von 0,2 K (12,5° C Isolinie) ca. 4,7 km in Abstromrichtung (Nordwest). Die Temperaturbeeinflussung quer zur Strömungsrichtung beträgt ca. 1,6 km. Gemäß der erforderlichen Temperaturspreizung in Höhe von 5 K, beträgt die

Grundwassertemperatur im unmittelbaren Umfeld der Infiltrationsbrunnen (30 m abstromig) entlang der Straße Zum Tiergehege zwischen 7,7 °C und 8 °C.

In Anlage 7.1.2 ist Temperaturverteilung für den tieferen GWL Hauptrogenstein nach 20 Jahren Betrieb zum Zeitpunkt des stärksten Wärmeentzugs Ende Januar 2043 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass für die Nord-Scholle des Hauptrogensteins eine Temperaturbeeinflussung berechnet wurde. Die höchste Temperaturbeeinflussung wurde bei der Bohrung B6/10 ca. 600 m südöstlich des TB Schorren mit einer Temperatur von ca. 11,8 °C berechnet, was einer Abkühlung um 0,9 K (ausgehend von 12,7 °C) entspricht. Am TB Schorren beträgt die Temperatur ca. 12,2 °C. Die Temperatur wurde somit um ca. 0,5 K abgekühlt.

6.4 Ergebnisse Grundwasserhydraulik der Variantenberechnungen

6.4.1 Referenzprognose ohne Brunnen der geothermischen Anlage Dietenbach

In Anlage 7.2.1 sind die berechneten Grundwassergleichen für den Referenzzustand in der Neuenburg-Formation nach ca. zehn Jahren (Ende Januar 2034) dargestellt, welche für die Berechnung der Grundwasserdifferenzen verwendet wurden.

6.4.2 Grundwasserhydraulik Variante BA 1-6

Die berechneten Grundwasserstände, -differenzen sowie die berechneten Flurabstände von BA 1-6 sind in den Anlagen 7.2 jeweils vergleichend mit den Varianten BA 1-4 v1 und BA 1-4 v2 dargestellt.

Gesamtbetrachtung Dietenbach BA 1- 6

Die berechneten Grundwassergleichen sowie die Grundwasseraufhöhungen und -absenkungen sind nach ca. zehn Jahren, analog [D 21], zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme und Infiltration (Ende Januar 2034) in den Anlagen 7.2.1 und 7.2.2 dargestellt. Die berechnete Absenkung > 25 cm erstreckt sich gen Süden bis an die südliche Grenze des Rieselfelds und reicht im Nordosten bis an die Dreisam heran. In Anlage 7.2.3 sind die berechneten Grundwasserflurabstände, bezogen auf den aufgeschütteten Endzustand, für das Modellgebiet dargestellt. Die geringsten Flurabstände werden im Bereich der

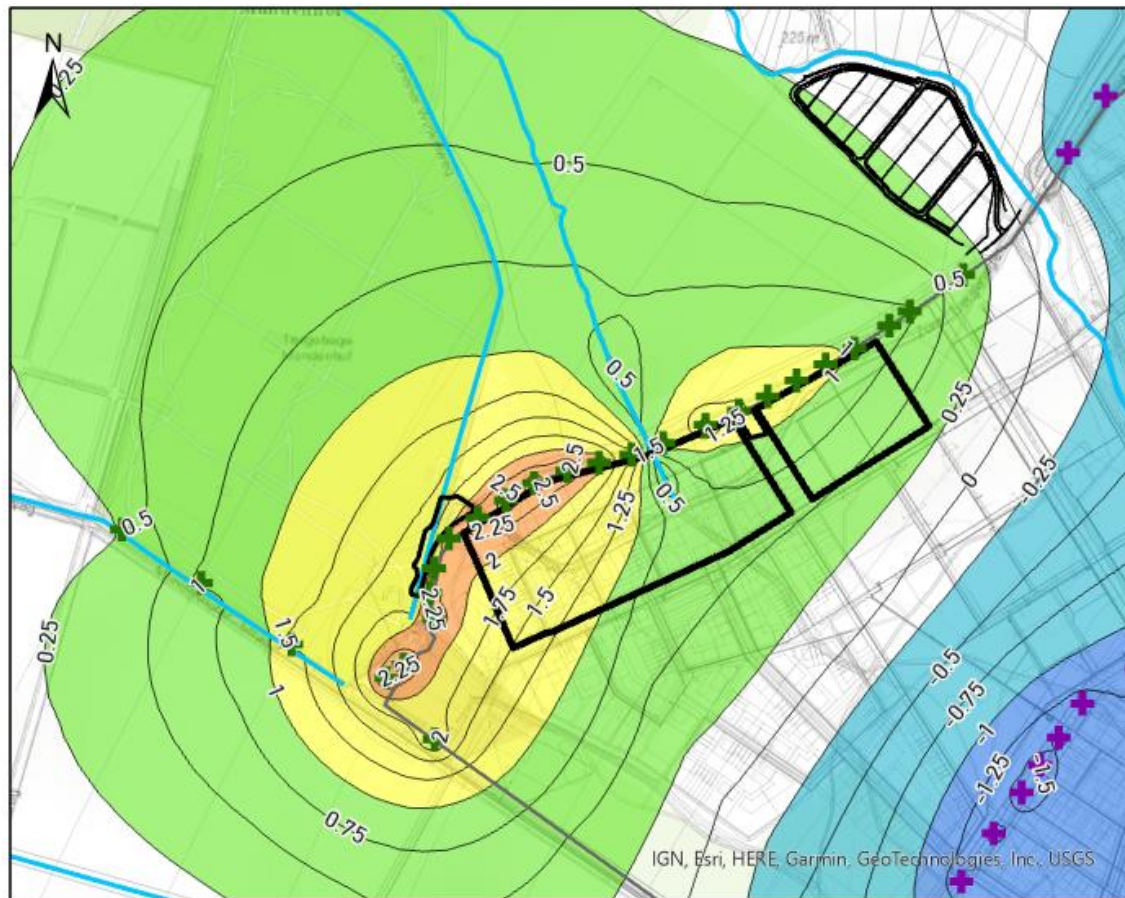
Infiltrationsbrunnen (Westen Dietenbach) bis ca. 0,5 m u. GOK berechnet, während sie im Bereich der Entnahmefunnen bis zu > 6 m u. GOK betragen.

Die berechneten Grundwasserabsenkungen sowie -erhöhungen sind für die Entwässerungsplanung, den Parkplatz Mundenhof, die naturschutzfachlichen Aspekte (Einfluss auf umliegende Schutzgebiete), die Planung der Straßenbegleitbäume sowie zur Bewertung möglicher Auswirkungen auf die Bestandsbebauung relevant. Darum folgt jeweils eine Detailbetrachtung der berechneten Grundwasserdifferenzen, Grundwasserganglinien sowie Grundwasserflurabstände in ausgewählten Bereichen.

Betrachtung Entwässerungsanlagen

Die Infiltrationsbrunnen befinden sich bei der aktuellen Variante (EH40, ABL, BA 1- 6 im direkten Umfeld folgender Entwässerungsanlagen (siehe Abbildung 14):

- Zentrale Versickerungsbecken im Gewinn Hardacker Am Frohnholz,
- Regenwasserbecken Mundenhof,
- Dezentrales Versickerungsbecken und
- Dezentrale Versickerungsflächen.



Legende

- ✚ Entnahmekbrunnen Dietenbach
- ✚ Infiltrationsbrunnen Dietenbach
- ▭ Entwässerungsanlagen
- ▭ Bereich Freiburg-Dietenbach
- Oberflächengewässer Modell
- Isolinien Grundwasser-
absenkungen und -erhöhungen

Berechnete Grundwasserdifferenzen

- < -2 m
- 2 bis -1 m
- 1 bis -0,25 m
- 0,25 bis 1 m
- 1 bis 2 m
- > 2 m

0 65 130 260 Meter

Abbildung 14: Grundwasserdifferenzen zum Zeitpunkt der max. Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 im Bereich der Infiltrationsbrunnen und Entwässerungsanlagen, BA 1-6

Im unmittelbaren Umkreis der Infiltrationsbrunnen ergeben sich für die Variante BA 1-6 Erhöhungen in Bezug zum Referenzzustand von $> 2,5$ m. Zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 werden bei der Versickerungsanlage Am Frohnholz Grundwassererhöhungen zwischen ca. 0 m und 0,3 m berechnet. Für das Regenwasserbecken Mundenhof ergeben sich Erhöhungen von ca. 1,6 m bis 2,3 m. Der Grundwasserstand steigt am dezentralen Versickerungsbecken im Vergleich zum Referenzzustand Ende Januar 2034 um ca. 1 m – 1,5 m an. Die Grundwasserstände an den dezentralen Versickerungsflächen sind ebenfalls von der Grundwasserinfiltration beeinflusst, da diese direkt an die Infiltrationsbrunnen grenzen (Erhöhungen um ca. 0,3 m bis 2,5 m).

Da es sich bei den Grundwassererhöhungen zum Zeitpunkt Ende Januar 2034 jedoch nur um kurzzeitige Zustände handelt, wurden zur Bewertung die Grundwasserganglinien an fiktiven Beobachtungspunkten berechnet und in Relation zur Geländeoberkante und dem Bezugswasserstand MHGW 2019 gesetzt (siehe Anlage 7.2.5). Die Lage der Beobachtungspunkte ist in Abbildung 13 dargestellt.

Am Frohnholz wird am südlichsten Punkt des Versickerungsbeckens (Punkt Nr. 4) bei Variante AB1-6 der MHGW 2019 dauerhaft unterschritten. Die Grundwasserstände erreichen dabei einen Maximalstand von ca. 225 m NN und liegen somit max. 15 cm unterhalb des MHGW 2019 (225,1 m NN). Am nördlichen Rand des Versickerungsbeckens (Punkt Nr. 5) erreichen die Grundwasserstände maximal 223,0 m NN und liegen somit ca. 0,6 m unter MHGW 2019 (223,6 m NN). Die „0-Meter-Linie“ der Grundwasserdifferenzen verläuft entlang des östlichen Rands des Versickerungsbeckens (siehe Abbildung 14).

Der MHGW 2019 wird am Regenwasserbecken Mundenhof an bis zu ca. 3 Wochen im Jahr jeweils im Winter im zentralen Beckenbereich überschritten (Punkt Nr. 1). Kurzzeitig (wenige Tage) wurden Grundwasserstände von bis zu max. 1 m über MHGW 2019 und 0,8 m über der Unterkante der Filterschicht des Beckens (223,2 m NN) berechnet. Die modellierten Grundwasserstände für die Variante BA 1-6 überschreiten in dem vom Regenwasserbecken Mundenhof nach Norden ableitenden Graben den MHGW 2019 an wenigen Tagen im Jahr jeweils im Winter um bis zu ca. 0,3 m (Punkt Nr. 2).

Am nördlichen Randbereich der dezentralen Versickerungsanlage (siehe Abbildung 14) wird der MHGW 2019 in der Modellierung dauerhaft zwischen November und März überschritten (Punkt Nr. 3). Die Grundwasserstände erreichen dabei jedoch nicht die Sohle

des Beckens und liegen mit einzelnen Spitzen über 226,00 m ü NN maximal 0,3 m unter Sohllage (226,5 m NN). Die dauerhafte Überschreitung des MHGW 2019 in den Wintermonaten ist auf die direkte Nähe eines Infiltrationsbrunnens zurückzuführen (IB 28).

Für die dezentralen Versickerungsflächen wurden zwei Beobachtungspunkte gesetzt, am westlichsten Eckpunkt der westlichen Fläche (Punkt Nr. 11) sowie am nordöstlichsten Eckpunkt der östlichen Fläche (Punkt Nr. 12). An beiden Punkten wird der MHGW 2019 laut Modellberechnungen größtenteils im Zeitraum November bis März überschritten. Die Überschreitungen betragen bis zu 1 m (Westen) und bis zu 1,5 m (Nordosten). Im südlichen Bereich der Entwässerungsflächen ist die Grundwassererhöhung weniger stark ausgeprägt (siehe Abbildung 14).

Auswertungen bei -5°C mittlerer Außentemperatur

Mit dem UWSA Freiburg (Abteilung Klimaschutz und Luftreinhaltung) wurde abgestimmt, die Absenkungen und Erhöhungen zum Zeitpunkt der -5°C Tagesmitteltemperatur zu betrachten, da bei niedrigeren Temperaturen voraussichtlich nur wenig Niederschlagswasser zur Entwässerung und Regenwasserbehandlung anfällt. Die Auswirkungen auf die Entwässerungsanlagen könnten somit in Realität milder ausfallen als nach den bisherigen Berechnungen.

Bei der bisherigen Auswertung der Variantenberechnungen wurde der Zustand Ende Januar 2034 betrachtet. Dieser Zeitpunkt entspricht dem Zeitpunkt der maximalen Grundwasserabsenkung und -erhöhung und somit ca. dem Zeitpunkt der maximalen Grundwasserentnahme/-infiltration, korreliert jedoch nicht auf den Tag genau mit dieser. Grund dafür sind Trägheitseffekte und langsame Fließgeschwindigkeiten im Grundwasserleiter, die dazu führen, dass sich die maximalen Absenk- und Aufhöhungstrichter erst mit leichter Verzögerung einstellen. Beim Wärmetransportmodell handelt es sich um ein komplexes instationäres System mit diversen zeitlichen Wechselwirkungen.

Von EGS-Plan wurde ein Außentemperaturprofil zur Verfügung gestellt, welches in ihre Berechnungen zur benötigten Energie- und somit auch Grundwasserfördermenge eingeflossen ist. Da die Elektrolyse-Betriebszeiten jedoch größtenteils vom Wetter unabhängig sind, korreliert die mittlere Außentemperatur sehr stark, jedoch nicht vollständig, mit der geförderten/infiltrierten Grundwassermenge. Die tagspezifische

geförderte/infiltrierte Grundwassermenge und somit indirekt die tägliche mittlere Außentemperatur korrelieren hingegen wegen der Trägheitseffekte nur begrenzt mit den sich ausbildenden Grundwasserabsenkungen bzw. -erhöhungen. Ein Rückschluss von einer tagspezifischen mittleren Außentemperatur (z.B. -5°C) auf einen sich ausbildenden Absenk-/ Aufhöhungstrichter lässt sich nicht direkt ziehen.

Nach dem Temperaturprofil von EGS-Plan beträgt die minimale mittlere Außentemperatur am 25.01. ($-6,3^{\circ}\text{C}$). Ein Tag mit mittlerer Außentemperatur von -5°C existiert im Temperaturprofil nicht. Die Auswirkungen der maximalen Förderrate bei minimaler mittlerer Außentemperatur Ende Januar wurden bereits diskutiert. Da $-6,3^{\circ}\text{C}$ nur als leicht kälter als -5°C befunden wird und wie dargelegt eine exakte Korrelation zwischen Außentemperatur und Grundwasserabsenkungen- und -erhöhungen nicht vorliegt, werden die bisher durchgeführten Berechnungen als ausreichend angesehen.

Parkplatz Mundenhof

Im Vorgutachten des KIT [D 21] wurden im Bereich des Parkplatzes Mundenhof Grundwasserstände über Flur berechnet, welche eine Vernässung des Parkplatzes bedeuten würden. In Abbildung 15 ist eine Detailansicht der berechneten Flurabstände Ende Januar 2034 im Bereich des Mundenhofer Parkplatzes und der zukünftigen Energiezentrale für die Variante BA 1-6 zu sehen. Der Parkplatz sowie das ZMF-Gelände sind mit einem pink gestrichelten Umriss dargestellt. Negative Werte bedeuten rechnerische Grundwasserstände über Flur.

Die geringsten Grundwasserflurabstände betragen ca. 0,5 m u. GOK im südlichen Teil des Parkplatzes (zukünftige Energiezentrale). Im nördlichen Bereich des Parkplatzes (ZMF-Gelände) bewegen sich die Grundwasserflurabstände größtenteils zwischen 1 m bis 1,5 m u. GOK. Sowohl am Landwassergraben als auch im Bereich des Regenwasserbeckens Mundenhof werden negative Flurabstände berechnet, was jedoch lediglich zu einer Grundwasserdrainage durch diese Gräben führen würde. Eine großflächigere Darstellung der berechneten Flurabstände für Variante BA 1-6 ist in Anlagen 7.2.3 (Überblick Dietenbach) und 7.2.4 (Bereich der Entwässerungsanlagen) zu finden.

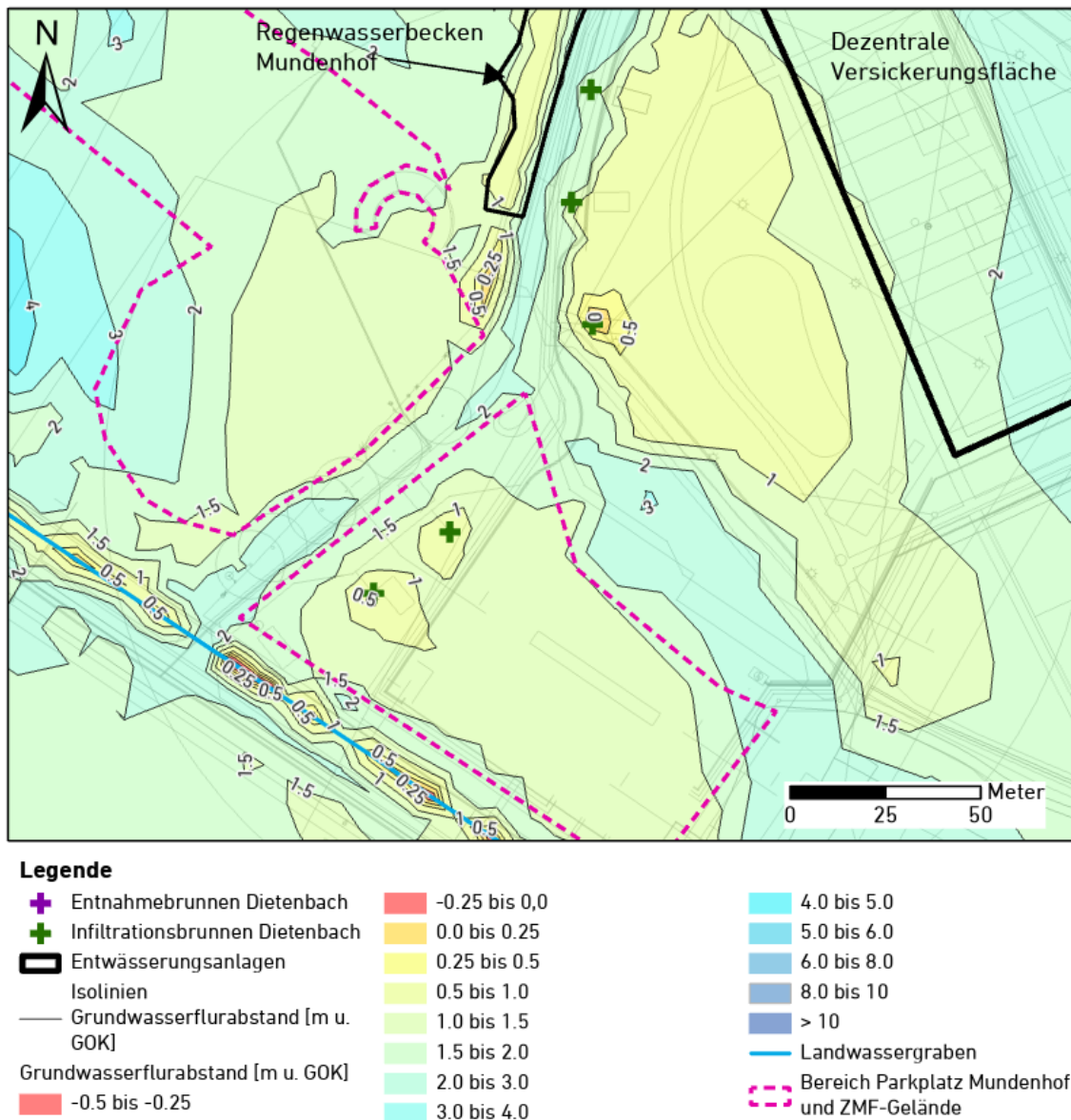


Abbildung 15: Berechnete Flurabstände im Bereich des Parkplatzes Mundenhof, BA 1-6 nach ca. 10 Jahren (Ende Januar 2034)

Bei Variante BA 1-6 mit dem größten Wärmebedarf überschreiten die Grundwasserstände im Bereich des Mundenhofer Parkplatzes am Beobachtungspunkt (Punkt Nr. 6, siehe Abbildung 13) die Geländeoberkante zu keinem Zeitpunkt (siehe Anlage 7.2.5). Es werden maximale kurzzeitige Flurabstände von bis zu ca. 0,15 m u. GOK erreicht. Mehrwöchige Überschreitungen des MHGW 2019 sind voraussichtlich zwischen November und März möglich.

Schutzgebiete und Langmattenwäldchen

An den neuen Stadtteil Dietenbach angrenzend befinden sich mehrere Schutzgebiete. Dazu gehören das Naturschutzgebiet Rieselfeld, das Natura-2000-Gebiet Mooswälder bei Freiburg (inklusive dem Frohnholz) und das Landschaftsschutzgebiet Mooswald. Aufgrund der naturschutzfachlichen Wertigkeit und der Nähe der Brunnenstandorte ist zudem das Langmattenwäldchen inklusive dem Waldstreifen zwischen dem bestehenden Stadtteil Rieselfeld und dem zukünftigen Stadtteil Dietenbach zu betrachten.

Das Naturschutzgebiet Rieselfeld ist nach den Modellberechnungen bei Variante EH40, ABL, BA 1-6 von Grundwasserabsenkungen $< 0,25$ m westlich des Rieselfelds sowie von Grundwasseranstiegen an der Mundenhofer Straße lokal von bis zu ca. 1,75 m im Vergleich zum Referenzzustand betroffen (siehe Anlage 7.2.2).

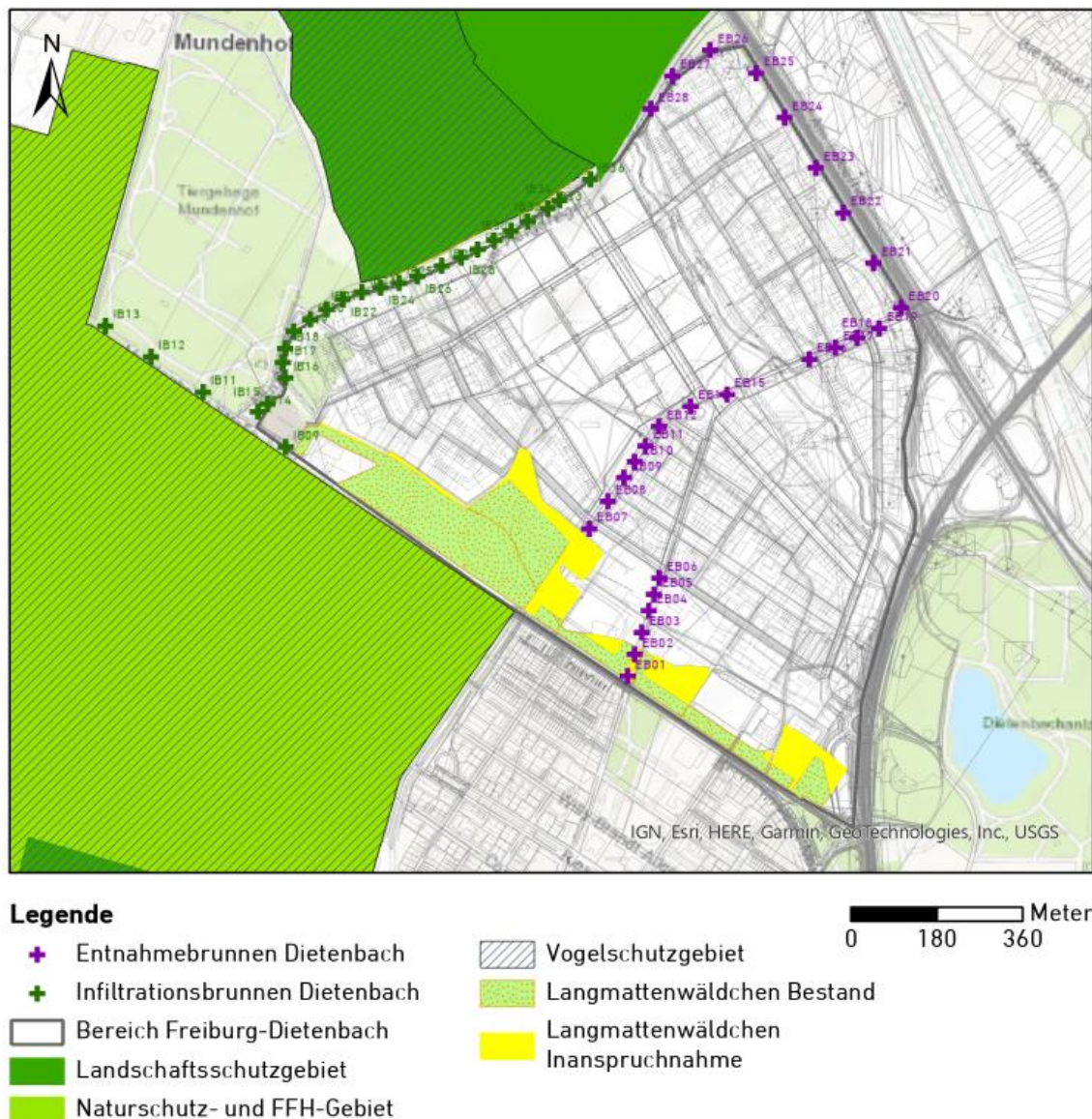


Abbildung 16: Lage der Schutzgebiete und des Langmattenwäldchens im Umkreis Dietenbachs

Nördlich sowie nordwestlich der Entnahmebrunnen befindet sich das Landschaftsschutzgebiet Mooswald (inkl. Frohnholz) sowie das Vogelschutzgebiet Mooswälder bei Freiburg (siehe Abbildung 16). Größtenteils ist das Landschaftsschutzgebiet von den Grundwasseranstiegen durch die Infiltrationsbrunnen betroffen (westlicher Bereich Frohnholz und Vogelschutzgebiet nahe der Beobachtungspunkte 3, 4 und 12). Geringe Grundwasserabsenkungen $< 0,5$ m im Vergleich zum Referenzzustand treten voraussichtlich nur in unmittelbarer Nähe der Entnahmebrunnen EB26, EB27 und EB28 auf (Punkt Nr. 10). Dort werden jedoch die

bisherigen Grundwassertiefstände (abgeleitet von Logger 0961/069-6) nach den Modellberechnungen nicht unterschritten und die Grundwasserstände in der Prognoseberechnung liegen im Bereich der natürlichen Schwankungen (siehe Anlage 7.2.5).

Das Langmattenwäldchen befindet sich größtenteils im Bereich der Grundwasserentnahme, wo max. Grundwasserabsenkungen bis zu > 1,5 m (bei maximaler Grundwasserentnahme im Januar) im Vergleich zum Referenzzustand auftreten. Die Lage der Beobachtungspunkte, an denen Grundwasserganglinien berechnet wurden, findet sich in Abbildung 13. Der natürliche Grundwasserschwankungsbereich (abgeleitet aus den Grundwasserständen der letzten 20 Jahre des Datenloggers 0282/069-3) wird bei Variante EH40, ABL, BA 1-6 am westlichen Beobachtungspunkt (Punkt Nr. 7) voraussichtlich bis zu einem Monat um bis zu max. 0,5 m im Januar unterschritten (siehe Anlage 7.2.5). Am nördlichen sowie südlichen Beobachtungspunkt (Punkt Nr. 8 bzw. 9) wird der Grundwasserschwankungsbereich in der größten Zeit des Winters zwischen November und März um bis max. 1,4 m unterschritten. Dies ist auf die nah gelegenen Entnahmefrünnen EB07 bzw. EB01/ EB02 zurückzuführen.

Straßenbegleitbäume

Am nördlichsten Punkt des Stadtteils Rieselfeld an der Mundenhofer Straße befinden sich laut Garten und Tiefbauamt der Stadt Freiburg (GuT) bestehende Straßenbegleitbäume im Einflussbereich der Entnahmefrünnen (siehe Abbildung 17). Der natürliche Grundwasserschwankungsbereich (abgeleitet aus den Grundwasserständen der letzten 20 Jahre des Datenloggers 0282/069-3) wird bei Variante EH40, ABL, BA 1-6 an Punkt 7 voraussichtlich bis zu einem Monat um bis zu max. 0,5 m im Winter unterschritten (siehe Anlage 7.2.5). Zwischen März und November wird der Grundwasserschwankungsbereich voraussichtlich nicht unterschritten.

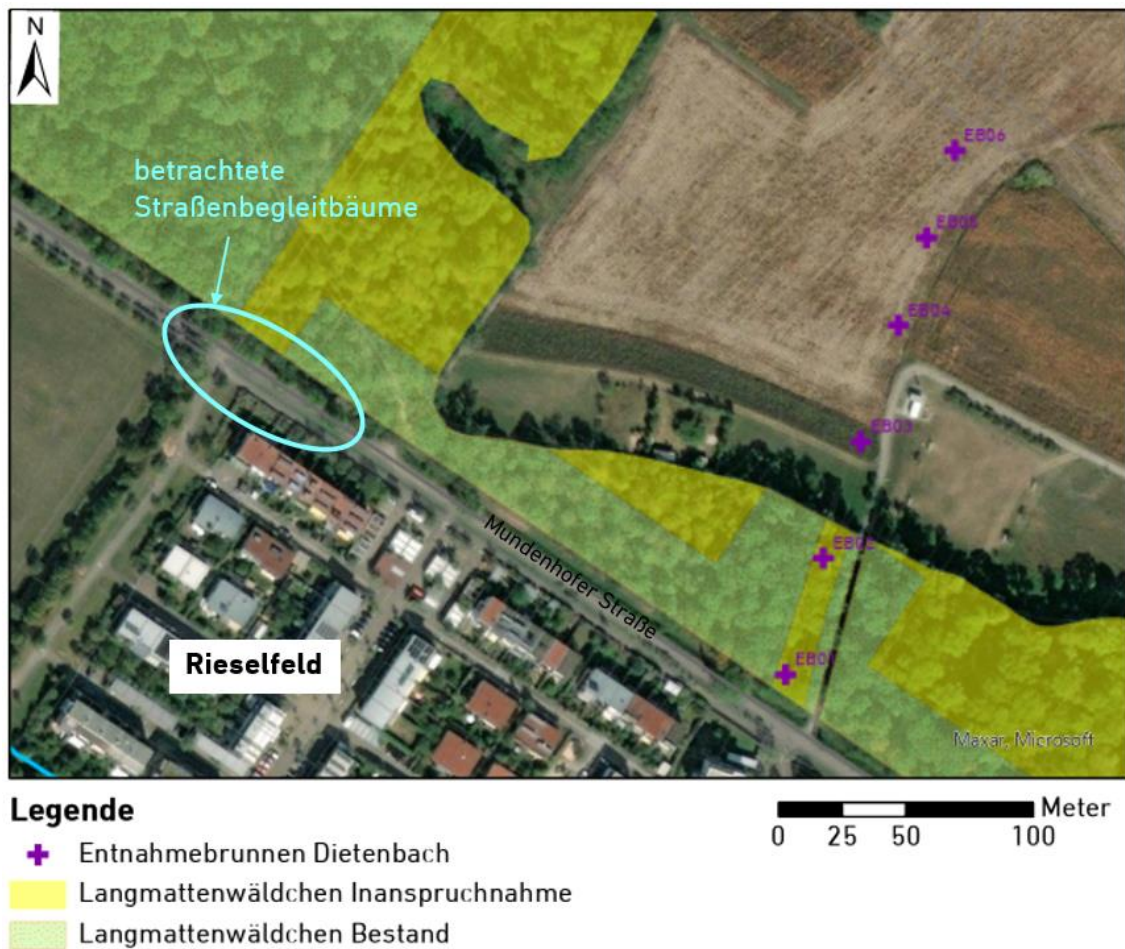


Abbildung 17 Lage der betrachteten Straßenbegleitbäume

Im Umkreis der Entnahmebrunnen, wo ein Pflanzen von Straßenbegleitbäumen möglicherweise vorgesehen ist, wird das Grundwasser bei maximaler Entnahme Ende Januar 2034 um $> 1,5$ m im Vergleich zum Referenzzustand abgesenkt (siehe Anlage 7.2.2). Die Grundwasserflurabstände betragen aus diesem Grund nach Aufhöhung der Geländeoberkante im Endzustand zu diesem Zeitpunkt > 6 m.

Bestandsbebauung Rieselfeld

Die berechneten Grundwasserabsenkungen durch den Betrieb der geothermischen Anlage liegen im Winter im Bereich Rieselfeld bei ca. $< 0,25$ m bis ca. 1,0 m im Vergleich zum Referenzzustand (siehe Anlage 7.2.2).

6.4.3 Grundwasserhydraulik Variante BA 1-4 v1

Gesamtbetrachtung Dietenbach

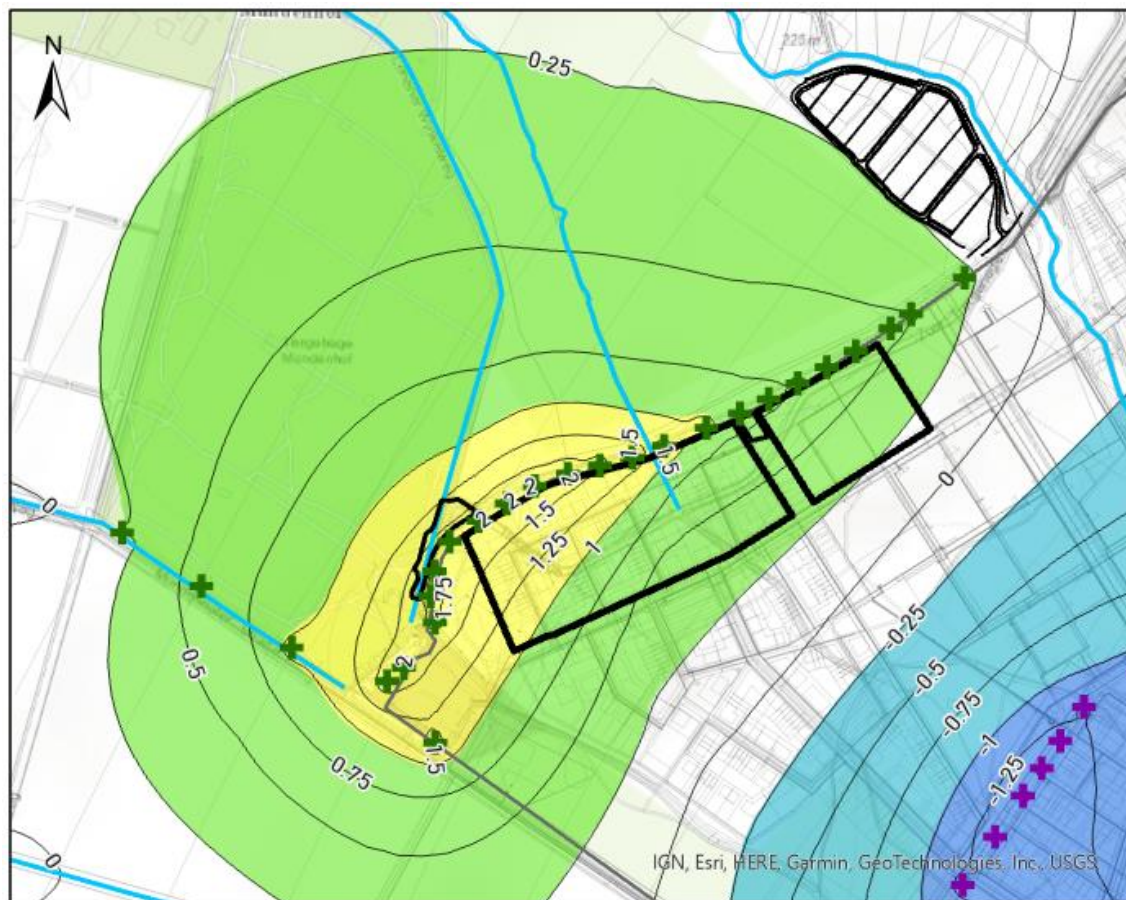
Die berechneten Grundwassergleichen sowie die Grundwasseranstiege und -absenkungen sind nach ca. 10 Jahren zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme und Infiltration (Ende Januar 2034) in den Anlagen 7.2.1 und 7.2.2 dargestellt. Die berechnete Absenkung > 25 cm erstreckt sich gen Süden bis an die südliche Grenze des Rieselfelds und reicht im Nordosten ähnlich wie bei Variante BA 1-6 bis fast an die Dreisam heran. Die Grundwasserabsenkung umfasst aufgrund der geringeren Anzahl an Entnahmefrünnen und der geringeren Förderrate hingegen nicht den nördlichsten Teil Dietenbachs und ist insgesamt geringer ausgeprägt.

In Anlage 7.2.3 sind die berechneten Grundwasserflurabstände für das Modellgebiet dargestellt. Die geringsten Flurabstände (ca. 1 m u. GOK) werden im Bereich der Infiltrationsbrunnen (Nordwesten Dietenbach) erreicht, während sie im Bereich der Entnahmefrünnen lokal > 6 m u. GOK betragen.

Betrachtung Entwässerungsanlagen

Die Infiltrationsbrunnen befinden sich wie bei Variante BA 1-6 im direkten Umfeld der Entwässerungsanlagen (siehe Abbildung 18). Die Infiltrationsraten sind jedoch geringer als im Bauzustand BA 1-6, was zu einem geringeren Grundwasseranstieg und somit auch größeren Flurabständen in diesem Bereich führt.

Im unmittelbaren Umkreis der Infiltrationsbrunnen ergeben sich maximale Grundwasseranstiege von lokal > 2 m im Vergleich zum Referenzzustand. Zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 werden bei der Versickerungsanlage Am Frohnholz Grundwasseranstiege von bis zu 0,25 m am südöstlichen Beckenrand berechnet. Für das Regenwasserbecken Mundenhof ergeben sich Anstiege von ca. 1,3 m bis 1,7 m. Der Grundwasserstand steigt am dezentralen Versickerungsbecken im Vergleich zum Referenzzustand Ende Januar 2034 um ca. 0,7 m bis 0,8 m an. Die Grundwasserstände an den dezentralen Versickerungsflächen sind ebenfalls von der Grundwasserinfiltration beeinflusst, da diese direkt an die Infiltrationsbrunnen grenzen (Anstiege um ca. 0,2 m bis 2 m).



Legende

- + Infiltrationsbrunnen Dietenbach
- + Entnahmebrunnen Dietenbach
- Entwässerungsanlagen
- Bereich Freiburg-Dietenbach
- Oberflächengewässer Modell
- Isolinien Grundwasser-
absenkungen und -erhöhungen

Berechnete Grundwasserdifferenzen

- < -2 m
- 2 bis -1 m
- 1 bis -0,25 m
- 0,25 bis 1 m
- 1 bis 2 m
- > 2 m

0 65 130 260 Meter

Abbildung 18: Grundwasserdifferenzen zum Zeitpunkt der max. Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 im Bereich der Infiltrationsbrunnen und Entwässerungsanlagen, BA 1-4 v1

Da es sich bei den Grundwasseranstiegen jedoch nur um kurzzeitige Maximalzustände handelt, wurden zur Bewertung die Grundwasserganglinien an Beobachtungspunkten berechnet und in Relation zum Bezugswasserstand MHGW 2019 gesetzt (siehe Anlage 7.2.4).

Am Frohnholz wird am südlichsten Punkt des Versickerungsbeckens (Punkt Nr. 4) bei Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 der MHGW 2019 dauerhaft unterschritten. Die Grundwasserstände erreichen dabei einen Maximalstand von 224,93 m NN und liegen somit max. ca. 20 cm unterhalb des MHGW 2019 (225,1 m NN). Am nördlichen Rand des Versickerungsbeckens (Punkt Nr. 5) erreichen die Grundwasserstände maximal 223,1 m NN und liegen somit ca. 0,5 m unter MHGW 2019 (223,6 m NN). Die „0-Meter-Linie“ der Grundwasserdifferenzen verläuft entlang des östlichen Rands des Versickerungsbeckens (siehe Abbildung 14). Eine relevante Entlastung der Versickerungsanlage im Sinne größerer Flurabstände bei der Variante BA 1-4 v1 im Vergleich zu BA 1-6 ist nicht festzustellen.

Der MHGW 2019 wird am Regenwasserbecken Mundenhof (Punkt Nr. 1) an sehr wenigen Tagen im Jahr jeweils im Winter im zentralen Beckenbereich überschritten. Kurzzeitig (wenige Tage) wurden Grundwasserstände von bis zu max. 0,4 m über MHGW 2019 und 0,2 m über der Unterkante der Filterschicht des Beckens (223,2 m NN) berechnet. Die modellierten Grundwasserstände für die Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 unterschreiten in dem vom Regenwasserbecken Mundenhof nach Norden ableitenden Graben (Punkt Nr. 2) den MHGW 2019 dauerhaft. Im Vergleich zu Variante BA 1-6 steigen die Grundwasserstände am Regenwasserbecken Mundenhof sowie am nach Norden ableitenden Graben durch die geringere Infiltrationsrate weniger stark an.

Am nördlichen Randbereich der dezentralen Versickerungsanlage (Punkt Nr. 3) wird der MHGW 2019 voraussichtlich regelmäßig zwischen November und März überschritten. Die Grundwasserstände erreichen dabei jedoch nicht die Sohle des Beckens und liegen mit 225,5 m NN bei max. 1 m unter Sohlage (226,5 m NN). Die regelmäßige Überschreitung des MHGW 2019 in den Wintermonaten ist auf die Nähe eines Infiltrationsbrunnens zurückzuführen (IB 28).

Für die dezentralen Versickerungsflächen wurden zwei Beobachtungspunkte gesetzt, am westlichsten Eckpunkt der westlichen Fläche (Punkt Nr. 11) sowie am nordöstlichsten Eckpunkt der östlichen Fläche (Punkt Nr. 12). An beiden Punkten wird der MHGW 2019 laut

Modellberechnungen regelmäßig im Zeitraum November bis März und um bis zu maximal 1,5 m (Westen) und 1,1 m (Nordosten) überschritten. Im südlichen Bereich der Entwässerungsflächen ist die Grundwassererhöhung weniger stark ausgeprägt (siehe Abbildung 18).

Parkplatz Mundenhof

Auch bei Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 werden im Bereich des Mundenhofer Parkplatzes keine Grundwasserstände über Flur für Ende Januar 2034 berechnet (siehe Abbildung 19). Sowohl im nördlichen Teil des Parkplatzes (ZMF-Gelände) als auch im südlichen Teil (zukünftige Lage Energiezentrale) bewegen sich die Flurabstände meist zwischen 2 m und 1,5 m u. GOK.

Sowohl am Landwasser- als auch im Bereich des Regenwasserbeckens Mundenhof erreichen die Grundwasserstände laut Modellberechnungen die Geländeoberkante, was jedoch lediglich als eine Grundwasserdrainage dieser Gräben zu interpretieren ist. Eine Quantifizierung der Drainage erfolgt aufgrund der geringen Datenlage zu den Durchflüssen und Wasserständen der Oberflächengewässer zum Datenstand der Kalibrierung nicht. Eine großflächigere Darstellung der berechneten Flurabstände für Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 ist in Anlagen 7.2.3 (Überblick Dietenbach) und 7.2.4 (Bereich der Entwässerungsanlagen) zu finden.

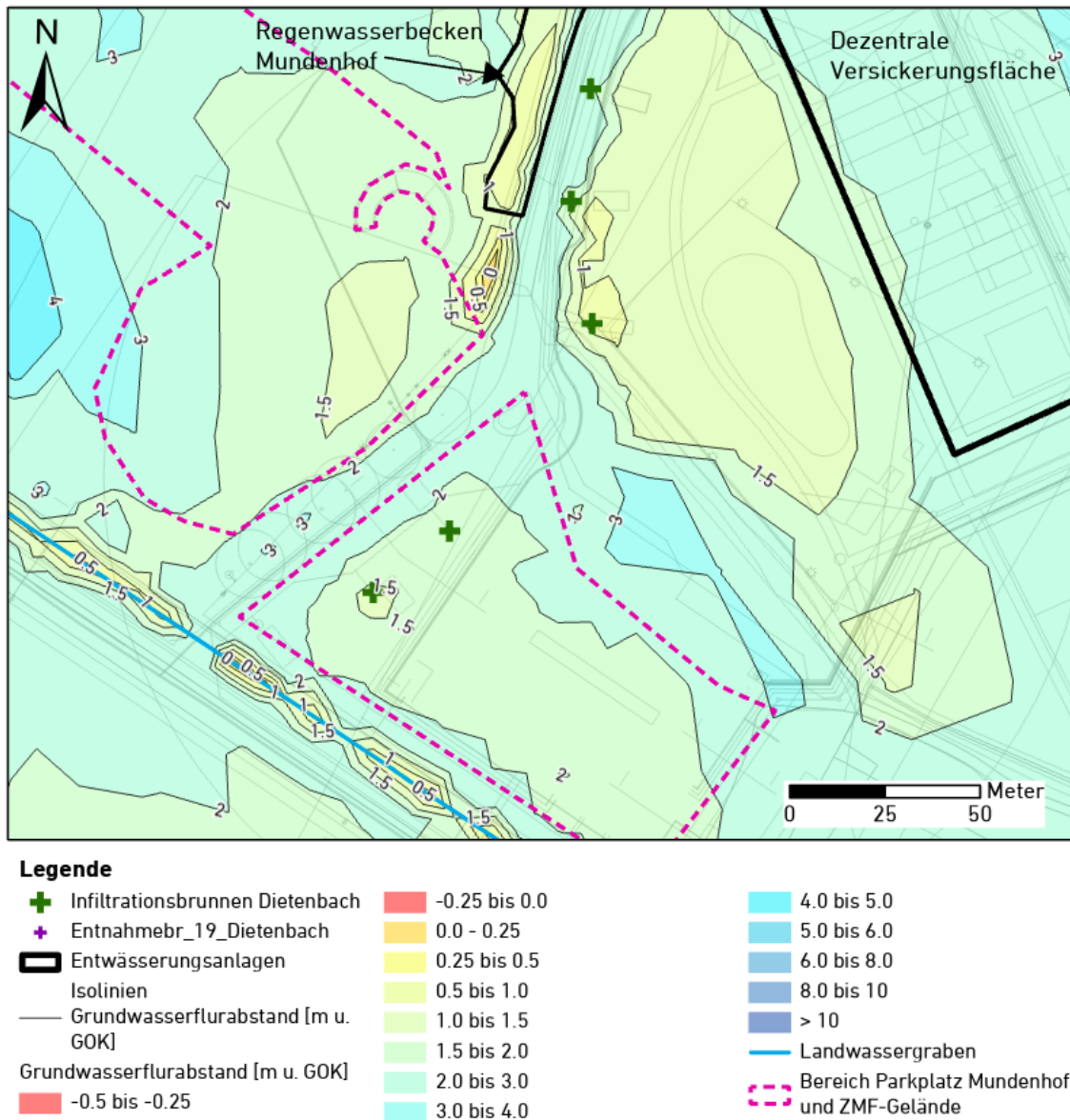


Abbildung 19: Berechnete Flurabstände im Bereich des Parkplatzes Mundenhof, EH40 ABL BA 1-4 v1 nach ca. 10 Jahren (Ende Januar 2034)

In den aktuellen Modellberechnungen (Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1) überschreiten die Grundwasserstände im Bereich des Mundenhofer Parkplatzes am Beobachtungspunkt Nr. 6 die Geländeoberkante zu keinem Zeitpunkt (siehe Anlage 7.2.5). Es werden maximale kurzzeitige Flurabstände von bis zu ca. 0,8 m u. GOK erreicht. Kurzzeitige Überschreitungen des MHGW 2019 sind voraussichtlich insbesondere im Dezember möglich. Die zugrunde gelegte Grundwasserneubildung ist im Dezember höher als im Januar, wodurch trotz einer geringeren Infiltrationsrate im Dezember höhere Grundwasserstände vorliegen können.

Schutzgebiete und Langmattenwäldchen

Das Naturschutzgebiet Rieselfeld ist voraussichtlich bei Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 von kleinräumigen Grundwasserabsenkungen $> 0,25$ m westlich des Rieselfelds sowie von Grundwasseranstiegen an der Mundenhofer Straße lokal von bis zu ca. 1,5 m im Vergleich zum Referenzzustand betroffen (siehe Anlage 7.2.2).

Nördlich sowie nordwestlich der Entnahmebrunnen befindet sich das Landschaftsschutzgebiet Mooswald (inkl. Frohnholz) sowie das Vogelschutzgebiet Mooswälder bei Freiburg (siehe Abbildung 16). Größtenteils ist das Landschaftsschutzgebiet von den Grundwasseranstiegen durch die Infiltrationsbrunnen betroffen (westlicher Bereich, Bereich Frohnholz und Vogelschutzgebiet nahe der Beobachtungspunkte 3, 4 und 8). Die Grundwasserentnahmen haben keinen Einfluss auf das Landschafts- und das Vogelschutzgebiet.

Das Langmattenwäldchen befindet sich größtenteils im Bereich der Grundwasserentnahme, wo maximale Grundwasserabsenkungen lokal $> 1,5$ m (im Zeitraum der max. Grundwasserentnahme im Januar) im Vergleich zum Referenzzustand auftreten. Die Lage der Beobachtungspunkte, an denen Grundwasserganglinien berechnet wurden, findet sich in Abbildung 13. Der natürliche Grundwasserschwankungsbereich (abgeleitet aus den Grundwasserständen der letzten 20 Jahre des Datenloggers 0282/069-3) wird bei Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 am westlichen Beobachtungspunkt (Punkt Nr. 7) voraussichtlich bis zu einem Monat um bis zu max. 0,55 m im Winter unterschritten (siehe Anlage 7.2.5). Am nördlichen sowie südlichen Beobachtungspunkt (Punkt Nr. 8 bzw. 9) wird der Grundwasserschwankungsbereich in der meisten Zeit des Winters zwischen November und März bis um max. 1,3 m unterschritten. Dies ist auf die nah gelegenen Entnahmebrunnen EB07 bzw. EB01/ EB02 zurückzuführen.

Straßenbegleitbäume

Am nördlichsten Punkt des Stadtteils Rieselfeld an der Mundenhofer Straße (Punkt Nr. 7) befinden sich laut GuT bestehende Straßenbegleitbäume im Einflussbereich der Entnahmebrunnen. Der natürliche Grundwasserschwankungsbereich (abgeleitet aus den Grundwasserständen der letzten 20 Jahre des Datenloggers 0282/069-3) wird bei Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 voraussichtlich bis zu einem Monat um bis zu ca. 0,5 m im Januar unterschritten (siehe Anlage 7.2.5).

Im Umkreis der Entnahmebrunnen, wo ein Pflanzen von Straßenbegleitbäumen möglicherweise vorgesehen ist, wird das Grundwasser bei maximaler Entnahme Ende Januar 2034 um $> 1,5$ m im Vergleich zum Referenzzustand abgesenkt (Siehe Anlage 7.2.2). Die Grundwasserflurabstände betragen aus diesem Grund nach Aufhöhung der Geländeoberkante im Endzustand zu diesem Zeitpunkt > 6 m.

Bestandsbebauung Rieselfeld

Die berechneten Grundwasserabsenkungen durch den Betrieb der geothermischen Anlage liegen im Winter im Bereich Rieselfeld bei ca. $< 0,25$ m bis ca. $1,0$ m im Vergleich zum Referenzzustand (siehe Anlage 7.2.2).

6.4.4 Grundwasserhydraulik Variante BA 1-4 v2

Gesamtbetrachtung Dietenbach

Die berechneten Grundwassergleichen sowie die Grundwasseraufhöhungen und -absenkungen sind nach ca. 10 Jahren zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme und Infiltration (Ende Januar 2034) in den Anlagen 7.2.1 und 7.2.2 dargestellt. Die berechnete Absenkung entspricht im Wesentlichen der Absenkung von Variante EH40, ABL, BA1-4 v1, da sich weder in der Anzahl, Lage noch Entnahmemenge der Entnahmebrunnen unterscheidet (siehe Anlage 7.2.2). Nichtsdestotrotz scheint die Grundwasserabsenkung gen Osten flächiger ausgeprägt als bei Variante EH40, ABL, BA1-4 v1, was jedoch auf numerische Schwankungen, u.a. im Bereich der wechselnden Drainage-Wirkung der Dreisam zurückzuführen ist.

Wie bei Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 werden die geringsten Flurabstände (ca. 1 m u. GOK) im Bereich der Infiltrationsbrunnen (Nordwesten Dietenbach) erreicht, während sie im Bereich der Entnahmebrunnen bis zu > 6 m u. GOK betragen (siehe Anlage 7.2.3 und 7.2.4).

Betrachtung Entwässerungsanlagen

Die Bereiche, in denen die Grundwassererhöhung > 1 m im Vergleich zum Referenzzustand beträgt, sind durch die fehlenden Infiltrationsbrunnen auf der Mundenhofer Straße weniger stark nach Westen ausgeprägt. Die Grundwassererhöhung verschiebt sich dafür

stärker nach Osten Richtung dezentrale Versickerungsflächen und dezentrale Versickerungsanlage (siehe Abbildung 20).

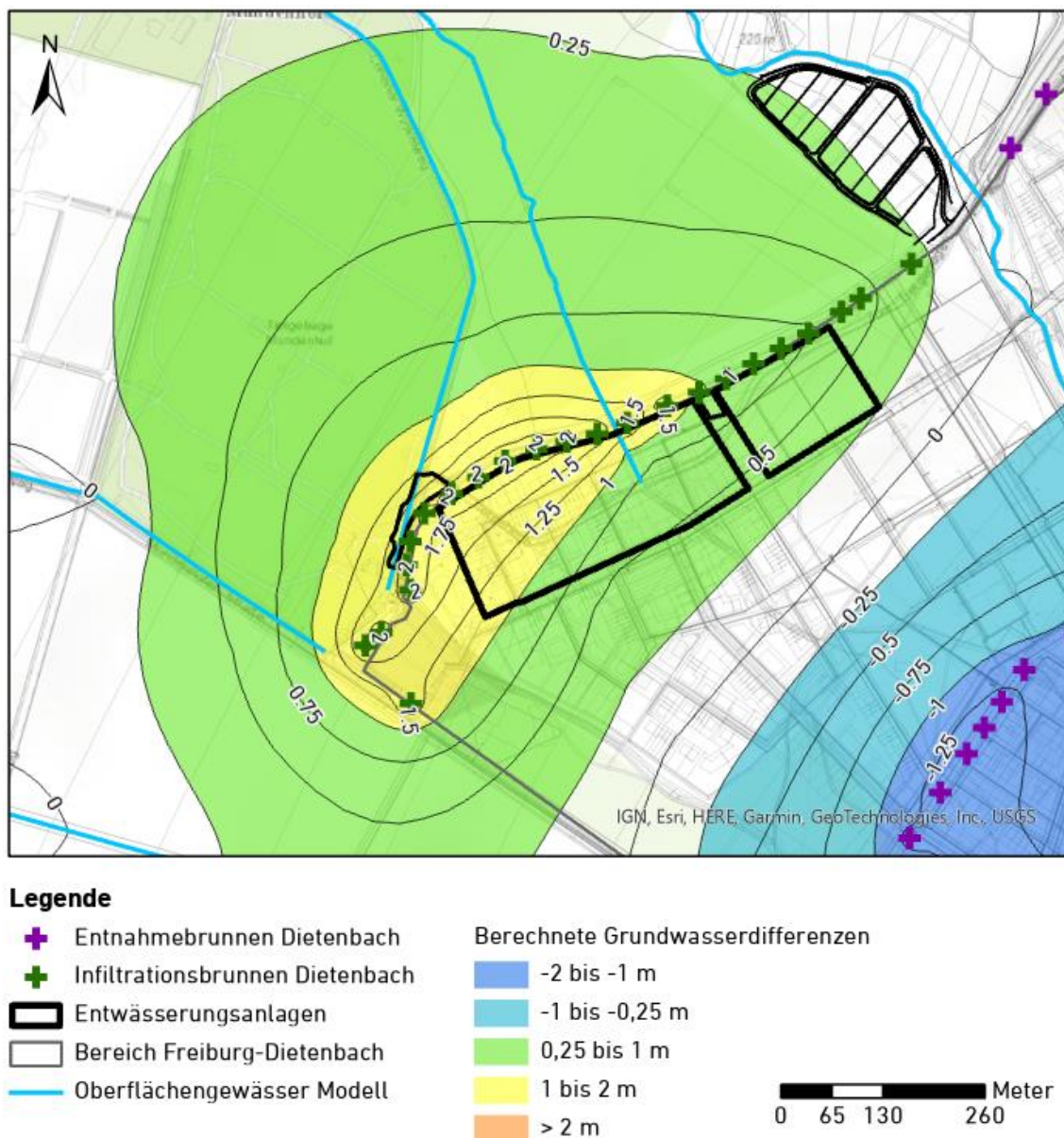


Abbildung 20 Grundwasserdifferenzen zum Zeitpunkt der max. Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 im Bereich der Infiltrationsbrunnen und Entwässerungsanlagen, BA 1-4 v2

Im unmittelbaren Umkreis der Infiltrationsbrunnen ergeben sich maximale Erhöhungen von bis zu > 2 m. Zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme/ Infiltration Ende Januar 2034 werden bei der Versickerungsanlage Am Frohnholz Grundwassererhöhungen von bis zu ca. 0,3 m am südöstlichen Beckenrand berechnet. Für das Regenwasserbecken Mundenhof ergeben sich Erhöhungen von ca. 1,25 m bis 1,75 m. Der Grundwasserstand steigt am

dezentralen Versickerungsbecken im Vergleich zum Referenzzustand Ende Januar 2034 um ca. 0,8 m bis 1 m an. Die Grundwasserstände an den dezentralen Versickerungsflächen sind ebenfalls von der Grundwasserinfiltration beeinflusst, da diese direkt an die Infiltrationsbrunnen grenzen (Erhöhungen um ca. 0,25 m bis 2 m).

Für Variante EH40, ABL, BA 1-4 v2 wurden aufgrund der Vergleichbarkeit zu EH 40 ABL BA 1-4 v1 keine Grundwasserganglinien an Beobachtungspunkten berechnet.

Parkplatz Mundenhof

Auch bei Variante EH40, ABL, BA 1-4 v2 werden im Bereich des Mundenhofer Parkplatzes keine Flurabstände oberflur für Ende Januar 2034 erreicht (siehe Abbildung 21). Wie in Variante BA1-4 v1 bewegen sich die Flurabstände sowohl im nördlichen Teil des Parkplatzes (ZMF-Gelände) als auch im südlichen Teil (zukünftige Lage Energiezentrale) meist zwischen 2 m und < 1,5 m u. GOK.

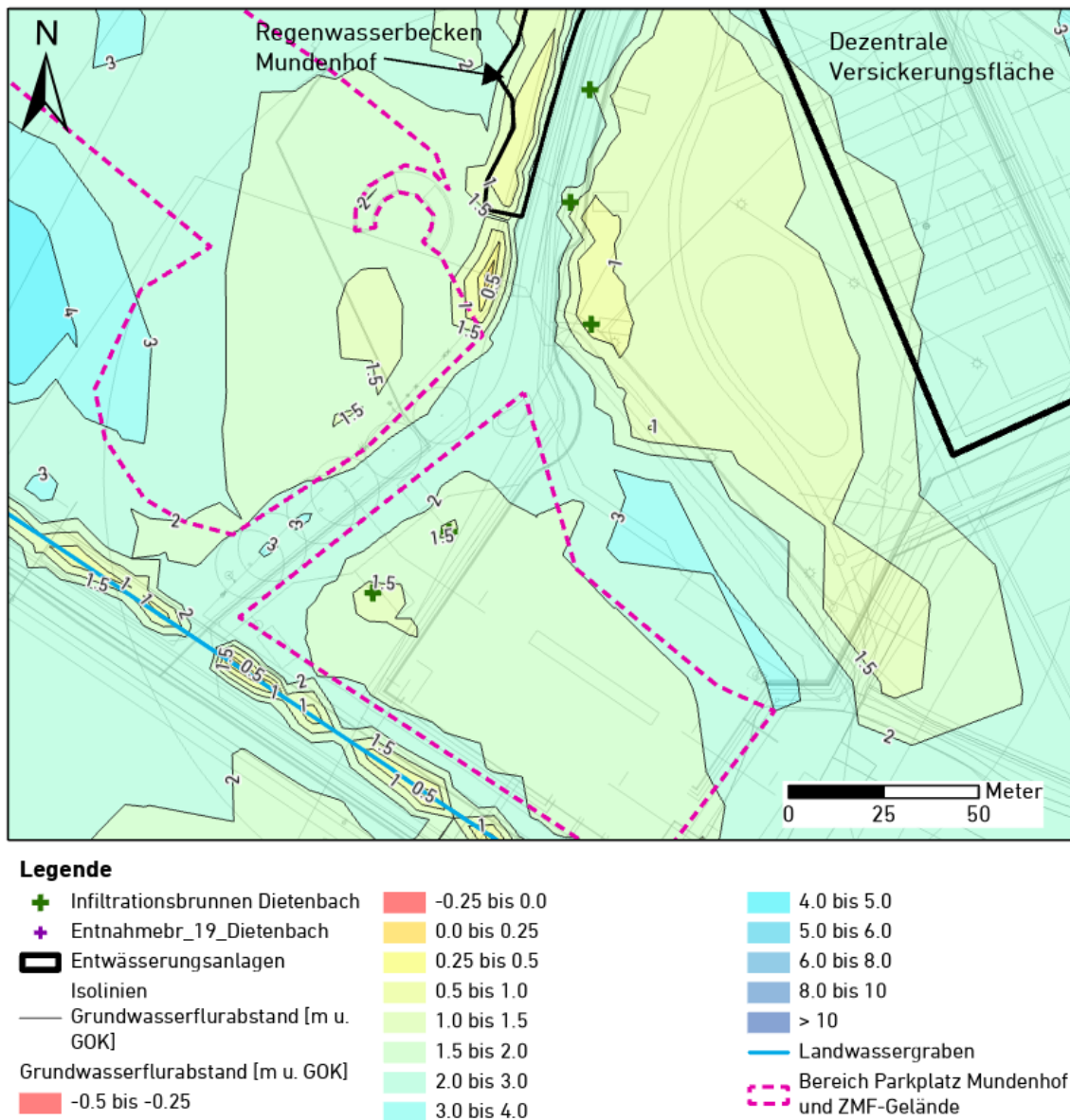


Abbildung 21 Berechnete Flurabstände im Bereich des Parkplatzes Mundenhof, EH40 ABL BA 1-4 v2 nach ca. 10 Jahren (Ende Januar 2034)

Eine großflächigere Darstellung der berechneten Flurabstände für Variante EH40, ABL, BA 1-4 v2 ist in Anlagen 7.2.3 (Überblick Dietenbach) und 7.2.4 (Bereich der Entwässerungsanlagen) zu finden.

Schutzgebiete und Langmattenwäldchen

Das Naturschutzgebiet Rieselfeld ist voraussichtlich wie bei Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 bei Variante BA 1-4 v2 von Grundwasserabsenkungen < 0,25 m westlich des Rieselfelds sowie von Grundwassererhöhungen an der Mundenhofer Straße lokal von bis zu ca. 1,5 m im Vergleich zum Referenzzustand betroffen (siehe Anlage 7.2.2).

Nördlich sowie nordwestlich der Entnahmebrunnen befindet sich das Landschaftsschutzgebiet Mooswald (inkl. Frohnholz) sowie das Vogelschutzgebiet Mooswälder bei Freiburg (siehe Abbildung 16). Größtenteils ist das Landschaftsschutzgebiet von den Grundwassererhöhungen durch die Infiltrationsbrunnen betroffen (westlicher Bereich, Bereich Frohnholz und Vogelschutzgebiet nahe der Beobachtungspunkte 3, 4 und 8). Die Grundwasserentnahmen haben keinen Einfluss auf das Landschafts- und das Vogelschutzgebiet. Für Variante EH40, BA1-4 v2 wurden keine Grundwasserganglinien berechnet.

Das Langmattenwäldchen befindet sich größtenteils im Bereich der Grundwasserentnahme, wo Grundwasserabsenkungen bis zu $> 1,5$ m im Vergleich zum Referenzzustand auftreten. Die Ausdehnung sowie Tiefe der Grundwasserabsenkungen sind mit den Absenkungen aus Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 vergleichbar. Für Variante EH40, BA1-4 v2 wurden keine Grundwasserganglinien berechnet.

Straßenbegleitbäume

Die bestehenden Straßenbegleitbäume des Stadtteils Rieselfeld an der Mundenhofer Straße befinden wie bei Variante BA 1-4 v1 im Einflussbereich der Entnahmebrunnen. Die Ausdehnung sowie Tiefe der Grundwasserabsenkungen sind mit den Absenkungen aus Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 vergleichbar. Für Variante EH40, BA1-4 v2 wurden keine Grundwasserganglinien berechnet.

Im Umkreis der Entnahmebrunnen, wo ein Pflanzen von Straßenbegleitbäumen möglicherweise vorgesehen ist, wird das Grundwasser bei maximaler Entnahme Ende Januar 2034 um $> 1,5$ m im Vergleich zum Referenzzustand abgesenkt (Siehe Anlage 7.2.2). Die Grundwasserflurabstände betragen aus diesem Grund nach Aufhöhung der Geländeoberkante im Endzustand zu diesem Zeitpunkt > 6 m.

Bestandsbebauung Rieselfeld

Die berechneten Grundwasserabsenkungen durch den Betrieb der geothermischen Anlage liegen im Winter im Bereich Rieselfeld bei ca. $< 0,25$ m bis ca. $1,0$ m im Vergleich zum Referenzzustand (siehe Anlage 7.2.2).

6.5 Anmerkungen zu den Modellierungsergebnissen

Das erarbeitete Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell führt zu einer deutlichen Verbesserung des Gesamtverständnisses der Grundwassersituation und der Komplexität des Standorts und stellt ein gutes Werkzeug für die weitere Planung und die Genehmigungsfähigkeit dar.

Aufgrund der hohen Komplexität, der im Modell berücksichtigten Randbedingungen, mussten einige fachliche Vereinfachungen getroffen werden. Saisonale Temperaturschwankungen des Grundwassers sowie der Oberflächengewässer wurden nicht berücksichtigt. Es wurde kein geothermischer Tiefengradient implementiert, wodurch die berechnete Abkühlung im Abstrom von Dietenbach leicht überschätzt wird (konservativer Ansatz). Die angesetzte Grundwasserneubildung für die Prognoseberechnung wurde monatlich über 30 Jahre gemittelt, wodurch keine Extremereignisse im Modell abgebildet werden. Zu den Abflüssen und Wasserständen in den Vorflutern (außer der Dreisam) liegen keine Informationen vor. Die Potentiale in den Oberflächengewässern können darum nur als Näherung betrachtet werden. Ein zukünftiger Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserstände und -temperaturen wurde bei den Variantenberechnungen nicht berücksichtigt. Im Bereich des neuen Stadtteils Dietenbach beträgt die Abweichung der berechneten von den gemessenen Grundwasserständen $< 0,5$ m. Bei den weiteren Planungen könnte daher ein Sicherheitszuschlag berücksichtigt werden.

Bei Vorlage von zusätzlichen Daten, wie z.B. von k_f -Werten aus Pumpversuchen oder nach durchgeführten Infiltrationsversuchen sowie Grundwasserstandsdaten, ist es aus unserer Sicht sinnvoll, das Grundwassermodell zu überprüfen und ggfls. anzupassen, bzw. bereichsweise nachzukalibrieren. Weiterhin können sich aus der Gestaltung der Regenwasserbewirtschaftung des Bebauungsgebietes (Gründächer, lokale Versickerungen, Versickerungsbecken, Grünflächen) Auswirkungen auf den Wasserhaushalt ergeben, die zu berücksichtigen sind.

7 Bewertung der Ergebnisse

7.1 Grundsätzliche Bewertung

Das aktualisierte Grundwassermodell stellt eine deutliche Verbesserung des Gesamtverständnisses der Grundwassersituation und der Komplexität am Standort dar. Im Vergleich zur Machbarkeitsstudie wurde das Modellgebiet in Abstimmung mit dem LGRB sowohl horizontal als auch vertikal vergrößert, um numerische Effekte der Randbedingungen auszuschließen. Oberflächengewässer wurden in das Modell eingebunden und für die instationäre Kalibrierung und Variantenberechnungen eine instationäre Grundwasserneubildung implementiert. Ebenfalls wurde der GWL Haupttrogenstein im Modell abgebildet. Das kalibrierte Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell erlaubt somit mit dem aktuellen Datenstand belastbare Aussagen zu Grundwasserhydraulik und Grundwassertemperaturen.

Im Ergebnis der Modellierung steht ausreichend Grundwasser im oberen GWL zur geplanten Nutzung als Wärmequelle für den Stadtteil Dietenbach zur Verfügung. Eine nachteilige Veränderung des mengenmäßigen Zustands des Grundwassers und eine Minderung des nutzbaren Grundwasserdargebots [D 48] liegt nicht vor. Die Beeinflussung aller drei Varianten EH40 ABL (BA 1-6, BA 1-4 v1 und BA 1-4 v2) auf die Grundwasserhydraulik beträgt zwischen wenigen Dezimetern bis zu ca. 2 m im Bereich der Brunnen bei Spitzenlast. Der Wärmetransport verhält sich wie erwartet: Im Abstrom der Infiltration findet nach 20 Jahren eine geringe Abkühlung um wenige Grad statt. Der Haupttrogenstein wird dabei nur vernachlässigbar beeinflusst. Nach Auswertung der durchgeführten Modellberechnungen ist die geplante Grundwasserwärmenutzung für alle drei Varianten grundsätzlich umsetzbar. Nach einer erforderlichen Optimierung der Brunnenstandorte, vor allem der Infiltrationsbrunnen im Bereich der Versickerungs- und Regenbecken, können die letzten offenen Fragestellungen aus unserer Sicht gelöst werden.

Das Setzungsrisiko durch die geplante geothermische Anlage für den Stadtteil Rieselfeld ist so minimal, dass es als vernachlässigbar anzusehen ist.

7.2 Beeinflussung umliegender Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden

Aus Anlage 7.1.1 wird ersichtlich, dass die Temperaturfahne südlich von Umkirch verläuft. Innerhalb dieser Temperaturfahne befinden sich einige Grundwasserwärmepumpen-Anlagen sowie Erdwärmesonden ([D 39] und siehe Abbildung 7). Lediglich ein kleiner Teil von Umkirch wird durch die Temperaturfahne erfasst. Die berechnete Temperatur nach 20 Jahren Betrieb beträgt bei Umkirch für die Variante BA 1-6 ca. 12 °C, was einer Abkühlung von 0,7 K entspricht. Auf Grund der sehr geringen Temperaturbeeinflussung von 0,7 K bei gemessenen natürlichen Grundwasserschwankungen zwischen 1,1 K und 5,4 K [D 63] ist die Temperaturbeeinflussung auf die Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden von Umkirch gering und tolerierbar [D 58]. Zudem gilt diese Temperaturbeeinflussung nur für den oberen GWL und fällt mit zunehmender Tiefe geringer aus, wie aus den Profilschnitten mit der vertikalen Temperaturverteilung (Anlage 7.1.3) ersichtlich ist.

7.3 Auswirkungen auf die Entwässerungsplanung

In diesem Kapitel werden Auswirkungen auf die Entwässerungsanlagen anhand der Modellierungsergebnisse herausgearbeitet. Die Bewertung der Funktionsfähigkeit der Entwässerungsanlagen wird nachträglich durch die Stadtentwässerung Freiburg i. Br. geprüft.

Variante EH40, ABL, BA 1-6

An der Versickerungsanlage im Hardacker (Am Frohnholz) wird der MHGW 2019 in den Modellberechnungen nicht überschritten. Eine Erhöhung der Grundwasserstände am südlichsten Punkt des Beckens um bis zu ca. 0,3 m im Vergleich zum Referenzzustand sowie kleinräumige Flurabstände < 1,5 m sind jedoch zu erwarten. Insgesamt sind negative Auswirkungen auf die Versickerungsanlage als gering zu bewerten.

Da der MHGW 2019 am Regenwasserbecken Mundenhof laut Modellberechnungen an bis zu ca. 3 Wochen im Winter überschritten wird und die Grundwasserstände kurzzeitig die Sohllage des Beckens überschreiten, ist eine funktionsfähige Regenwasserbehandlung durch die belebte Bodenzone in den Zeiträumen der maximalen Infiltration nicht gewährleistet. Grund für die starke Grundwassererhöhung sind die im Zustrom

unmittelbar angrenzenden Infiltrationsbrunnen. Da der MHGW 2019 am vom Regenwasserbecken Mundenhof ableitenden Graben voraussichtlich an wenigen Tagen im Jahr jeweils im Winter überschritten wird, ist ein Konflikt mit der Entwässerungsplanung auch hier nicht auszuschließen.

Die geplante dezentrale Versickerungsanlage grenzt an den Infiltrationsbrunnen IB 28, was zu einer dauerhaften Überschreitung des MHGW 2019 in den Wintermonaten führt. Dies führt voraussichtlich zu einem Konflikt mit der Entwässerungsplanung. Die dezentralen Versickerungsflächen, insb. die westlich gelegene Fläche, grenzen ebenfalls an Infiltrationsbrunnen. Eine Bewertung, ob durch die großflächigen Grundwassererhöhungen von > 1 m sowie die regelmäßigen Überschreitungen des MHGW 2019 die Funktionsfähigkeit der dezentralen Versickerungsflächen eingeschränkt ist, erfolgt durch die Stadtentwässerung Freiburg i. Br.

Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1

Wie nach Bauzustand 6 wird nach Bauzustand 4 an der Versickerungsanlage Am Frohnholz der MHGW 2019 in den Modellberechnungen nicht überschritten. Eine Erhöhung der Grundwasserstände am südlichsten Punkt des Beckens um bis zu ca. 0,25 m im Vergleich zum Referenzzustand sowie kleinräumige Flurabstände $< 1,5$ m sind jedoch zu erwarten. Die Auswirkungen auf die Versickerungsanlage unterscheiden sich demnach nur geringfügig von Variante BA 1-6. Da der Mühlbach/Dietenbach bei erhöhten Grundwasserständen drainierend wirkt, sind negative Auswirkungen auf die Versickerungsanlage als gering zu bewerten. Für eine detaillierte Bewertung wird auf die Stadtentwässerung Freiburg i. Br. verwiesen.

Der MHGW 2019 wird bei Variante BA 1-4 v1 am Regenwasserbecken Mundenhof laut Modellberechnungen an sehr wenigen Tagen im Winter überschritten. Die Grundwasserstände überschreiten nur sehr selten kurzzeitig die Sohllage des Beckens. Ob eine Regenwasserbehandlung in den Zeiten der höchsten Grundwasserstände (höchste Infiltration \rightarrow niedrigste Außentemperaturen) nötig ist und damit die Funktionsfähigkeit des Regenwasserbeckens eingeschränkt ist, kann nicht abschließend bewertet werden. Grund für die Grundwassererhöhung sind die im Zustrom unmittelbar angrenzenden Infiltrationsbrunnen. Da der MHGW 2019 am vom Regenwasserbecken Mundenhof ableitenden Graben voraussichtlich bei Variante BA 1-4 v1 nicht überschritten wird, ist die Grundwassererhöhung in diesem Bereich als unkritisch zu bewerten.

Bei Variante BA 1-4 v1 wird der MHGW 2019 in den Wintermonaten im Bereich der dezentralen Versickerungsanlage trotz reduzierter Förderrate im Vergleich zu BA 1-6 regelmäßig überschritten. Ein Konfliktpotential ist somit gegeben. Eine Bewertung, ob durch die großflächigen Grundwassererhöhungen von > 1 m sowie die regelmäßigen Überschreitungen des MHGW 2019 die Funktionsfähigkeit der dezentralen Versickerungsflächen eingeschränkt ist, erfolgt durch die Stadtentwässerung Freiburg i. Br.

Variante EH40, ABL, BA 1-4 v2

Die Auswirkungen auf die Versickerungsanlage Am Frohnholz unterscheiden sich nur geringfügig von Variante BA 1-4 v1. Da der Mühlbach/Dietenbach bei erhöhten Grundwasserständen drainierend wirkt, sind negative Auswirkungen auf die Versickerungsanlage als gering zu bewerten.

Die Auswirkungen der Grundwasserwärmenutzung auf das Regenwasserbecken Mundenhof sowie die dezentrale Versickerungsanlage und -flächen entspricht in etwa den Auswirkungen der Variante BA 1-4 v1.

7.4 Bewertung Mundenhofer Parkplatz

Variante EH40, ABL, BA 1-6

In den aktuellen Modellberechnungen (Variante EH40, ABL, BA 1-6) überschreiten die Grundwasserstände im Bereich des Mundenhofer Parkplatzes am Beobachtungspunkt Nr. 6 die Geländeoberkante zu keinem Zeitpunkt. Es werden minimale kurzzeitige Flurabstände von bis zu ca. 0,15 m u. GOK erreicht. Durch den Betrieb der Grundwasserwärmenutzung nach Abschluss des Bauabschnitts 6 ist basierend auf den Modellergebnissen eine Überflutung des Parkplatzes durch hoch anstehendes Grundwasser nicht unmittelbar gegeben. Aufgrund der sehr geringen minimalen Flurabstände ist jedoch eine Vernässung des Untergrunds in den Zeiträumen sehr hoher Grundwasserstände nicht auszuschließen.

Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1

In den Modellberechnungen der Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 überschreiten die Grundwasserstände im Bereich des Mundenhofer Parkplatzes am Beobachtungspunkt

Nr. 6 die Geländeoberkante zu keinem Zeitpunkt. Es werden minimale kurzzeitige Flurabstände von bis zu ca. 0,8 m u. GOK erreicht. Durch den Betrieb der Grundwasserwärmenutzung nach Abschluss des Bauabschnitts 4 ist basierend auf den Modellergebnissen ein Überfluten des Parkplatzes durch hoch anstehendes Grundwasser nicht gegeben. Eine Vernässung des Untergrunds in den Zeiträumen sehr hoher Grundwasserstände wird als unwahrscheinlich bewertet.

Variante EH40, ABL, BA 1-4 v2

Da sich die Grundwasserstände wie bei Variante BA 1-4 v1 größtenteils zwischen 2 m und 1,5 m u. GOK bewegen, nur kurzzeitig Flurabstände von bis zu ca. 0,8 m u. GOK erreicht werden, sowie keine negativen Flurabstände zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme/Infiltration berechnet wurden, wird eine Überflutung bzw. Vernässung des Parkplatzes Mundenhof als unwahrscheinlich bewertet.

7.5 Auswirkungen auf angrenzende Schutzgebiete und das Langmattenwäldchen

Im vorliegenden Bericht wird beschrieben, ob Auswirkungen auf die umliegenden Schutzgebiete durch Grundwasserstandsänderungen infolge der Grundwasserwärmenutzung zu erwarten sind. Eine Prüfung nach Auswahl der Vorzugsvariante durch einen Baumphysiologen für den Bereich Langmattenwäldchen wird empfohlen.

Variante EH40, ABL, BA 1-6

Da das Naturschutzgebiet Rieselfeld nur sehr kleinräumig (ca. 2 ha) von Grundwasserabsenkungen $> 0,25$ m (max. ca. 0,6 m) betroffen ist, sind durch die Grundwasserentnahme keine negativen Auswirkungen auf das Biotop, wie z.B. Austrocknen oder Verlust des Grundwasseranschlusses, zu erwarten. Die Grundwassererhöhungen wirken sich hingegen voraussichtlich positiv auf das Naturschutzgebiet aus, da unter anderem durch den Klimawandel tendenziell sinkende Grundwasserstände in der Zukunft erwartet werden [D 10].

Das Landschaftsschutzgebiet Mooswald sowie das Vogelschutzgebiet Mooswälder bei Freiburg sind ebenfalls von steigenden Grundwasserständen durch die Grundwasserinfiltration betroffen. Diese Erhöhungen wirken sich ebenfalls vor dem Hintergrund des Klimawandels und der voraussichtlich zukünftigen geringeren Grundwasserneubildung positiv auf die Schutzgebiete aus. Die kleinräumigen und geringen Grundwasserabsenkungen von max. 0,5 m im südöstlichen Bereich des Landschaftsschutzgebiets, nahe der Entnahmefrünnen EB26, EB27 und EB28, werden als nicht signifikant bewertet, da sie nur kurzzeitig in den Wintermonaten auftreten.

Bereiche des Langmattenwäldchens befinden sich im Einflussbereich der Entnahmefrünnen mit Grundwasserabsenkungen bis zu 1,5 m im Zeitraum der max. Grundwasserentnahme im Januar. Negative Auswirkungen auf den Baumbestand durch einen erhöhten Flurabstand im Winter (Verlust der Grundwasseranbindung der Baumwurzeln) sind darum durch die Grundwasserentnahme insbesondere im Nahbereich der Entnahmefrünnen nicht auszuschließen. In größerer Entfernung zu den Entnahmefrünnen (Beobachtungspunkt Nr. 7) betragen die maximalen Grundwasserabsenkungen im Januar nur ca. 0,5 m für die Dauer eines Monats. Negative Auswirkungen auf den Baumbestand sind hier nicht wahrscheinlich. Eine Prüfung durch einen Baumphysiologen für den Bereich Langmattenwäldchen nach Festlegung einer Vorzugsvariante wird empfohlen.

Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 sowie BA 1-4 v2

Da das Naturschutzgebiet Rieselfeld in den Varianten BA 1-4 v1 und BA 1-4 v2 nur sehr kleinräumig (ca. 2 ha) von Grundwasserabsenkungen $>0,25$ m (max. ca. 0,6 m) betroffen ist, sind durch die Grundwasserentnahme keine negativen Auswirkungen zu erwarten. Die Grundwassererhöhungen wirken sich hingegen voraussichtlich positiv auf das Naturschutzgebiet aus, da unter anderem durch den Klimawandel tendenziell sinkende Grundwasserstände in der Zukunft erwartet werden [D 10].

Das Landschaftsschutzgebiet Mooswald sowie das Vogelschutzgebiet Mooswälder sind ebenfalls in den Varianten BA 1-4 von steigenden Grundwasserständen durch die Grundwasserinfiltration betroffen. Diese Erhöhungen wirken sich vor dem Hintergrund des Klimawandels und der voraussichtlich zukünftigen geringeren Grundwasserneubildung

positiv auf die Schutzgebiete aus. Die kleinräumigen und sehr geringen Grundwasserabsenkungen von $< 0,25$ m im südöstlichen Bereich des Landschaftsschutzgebiets, nahe der Entnahmebrunnen EB26, EB27 und EB28, werden als nicht signifikant bewertet.

Bereiche des Langmattenwäldchens befinden sich für beide Varianten BA 1-4 im Einflussbereich der Entnahmebrunnen mit Grundwasserabsenkungen bis zu 1,5 m im Zeitraum der max. Grundwasserentnahme im Januar. Negative Auswirkungen auf den Baumbestand durch einen erhöhten Flurabstand im Winter sind darum durch die Grundwasserentnahme insbesondere im Nahbereich der Entnahmebrunnen nicht auszuschließen. In größerer Entfernung zu den Entnahmebrunnen (Beobachtungspunkt Nr. 7) betragen die maximalen Grundwasserabsenkungen im Januar $< 0,5$ m für die Dauer weniger Wochen. Negative Auswirkungen auf den Baumbestand sind hier nicht wahrscheinlich. Eine Prüfung durch einen Baumphysiologen für den Bereich Langmattenwäldchen nach Festlegung einer Vorzugsvariante wird empfohlen.

7.6 Auswirkungen auf Straßenbegleitbäume

Variante EH40, ABL, BA 1-6

Da durch die Grundwasserwärmenutzung der Grundwasserschwankungsbereich am nördlichsten Punkt des Stadtteils Rieselfeld an der Mundenhofer Straße um bis zu einem Monat um max. 0,5 m im Winter unterschritten werden kann, sind negative Auswirkungen auf die bestehenden Straßenbegleitbäume nicht zu erwarten. Im Umfeld der Entnahmebrunnen wird sich ein Absenkrichter $> 1,5$ m ausbilden. Verbunden mit der Erhöhung der Geländeoberkante betragen die Grundwasserflurabstände laut Modellberechnungen zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserentnahme in diesen Bereichen > 6 m, insbesondere in den Wintermonaten. Dies ist bei der Artenauswahl der Straßenbegleitbäume zu berücksichtigen.

Variante EH40, ABL, BA 1-4 v1 sowie BA 1-4 v2

Da durch die Grundwasserwärmenutzung der Grundwasserschwankungsbereich am nördlichsten Punkt des Stadtteils Rieselfeld an der Mundenhofer Straße bei Variante BA 1-4 v1 um bis zu ca. 3 Wochen um max. 0,5 m im Winter unterschritten werden kann, sind

negative Auswirkungen auf die bestehenden Straßenbegleitbäume nicht zu erwarten. Wie bei Variante BA 1-6 wird sich bei den Varianten BA 1-4 v1 und v2 im Umfeld der Entnahmebrunnen ein Absenktrichter $> 1,5$ m ausbilden. Verbunden mit der Erhöhung der Geländeoberkante betragen die Grundwasserflurabstände laut Modellberechnungen zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserentnahme in diesen Bereichen bei > 6 m. Dies ist bei der Artenauswahl der Straßenbegleitbäume zu berücksichtigen.

7.7 Temperatur-Beeinflussung TB Schorren

Allgemein gilt für alle Varianten gleichermaßen, dass die Temperaturbeeinflussung in der Neuenburg-Formation (oberer GWL) mit einer Temperaturdifferenz von 5 K am höchsten ist, da die Brunnen für die geothermische Anlage ausschließlich in der Neuenburg-Formation implementiert wurden. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Temperaturbeeinflussung ab. Die laterale Temperaturbeeinflussung quer zur Strömungsrichtung ist aufgrund der hohen hydraulischen Durchlässigkeit und damit einhergehend hohen Grundwasserströmungsgeschwindigkeit gering. Erwartungsgemäß dominiert der konvektive Wärmetransport gegenüber dem konduktiven Wärmetransport.

Die Gegenüberstellung der Temperaturbeeinflussung ist in Tabelle 12 zusammengefasst. Erwartungsgemäß wurde die größte Temperaturbeeinflussung bei der Variante BA 1-6 mit den größten Energiemengen berechnet. Diese ist am TB Schorren mit einer Abkühlung von 0,7 K sehr gering. Für den Zustand BA 1-4 wird ersichtlich, dass bei der Variante BA1-4 v2 mit weniger Infiltrationsbrunnen im Vergleich zur Variante BA 1-4 v1 die Temperaturbeeinflussung geringfügig kleiner ausfällt. Ursache sind die fehlenden Infiltrationsbrunnen weiter abstromig nordwestlich der Energiezentrale.

Es ist zu beachten, dass analog zu den Modellberechnungen der Machbarkeitsstudie [D 22] keine geothermische Tiefenstufe und kein Wärmestrom berücksichtigt wurde und somit ein konservativer Ansatz verfolgt wurde, da die Anfangstemperatur im Modell geringer angesetzt wurde und die Wärmezufuhr aus den tieferen Schichten fehlt. Somit findet keine thermische Regeneration im Modell statt. Durch die fehlende regenerierende Wirkung des geothermischen Wärmestroms aus größerer Tiefe wurde die berechnete Temperatur deshalb in den tieferen Schichten des Modells (z.B. Haupttrogenstein) tendenziell unterschätzt.

Eine nachteilige Beeinflussung des vom TB Schorren geförderten Grundwassers aufgrund der Abkühlung durch die Grundwasserwärmenutzung in Dietenbach ist demnach nicht zu erwarten.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels mit tendenziell steigenden Temperaturen ist die ausschließliche Abkühlung des Grundwassers ein positiver Aspekt. Bereits die langjährigen Temperaturmessungen an sieben GWM in Dietenbach zeigen eine steigende Tendenz.

Tabelle 12: Zusammenfassung Temperaturergebnisse nach 20 Jahren Betrieb Ende Januar 2043 ausgehend von einer ungestörten Temperatur von 12,7 °C

Temperaturbeeinflussung	BA1-6	BA1-4_v1	BA1-4_2
Fahnenlänge* [km]	5**	4,5	4,7
Fahnenbreite* [km]	1,6	1,6	1,6
T min. Hauptrogenstein [°C]	11,6	12,0	11,8
T min. TB Schorren [°C]	12,0	12,3	12,2

*12,5 °C-Isotherme

**Temperaturfahne außerhalb des Modellgebietes

7.8 Setzungsrisiko Bestandsbebauung Rieselfeld

Die Grundwasserabsenkungen im Bereich des Stadtteils Rieselfeld durch die geothermische Nutzung betragen im Winter für alle drei Varianten ca. 0,25 m bis ca. 1,0 m im Vergleich zum Referenzzustand (siehe Anlage 7.2.2.). Das Setzungsrisiko wird daher an dieser Stelle für alle drei Varianten bewertet.

Gemäß den uns bisher bekannten Aufschlüssen, der Geologie der Neuenburg-Formation im Stadtteile Rieselfeld, sowie [D 44] und [D 12], ist davon auszugehen, dass alle Gebäude auf den anstehenden Kiesen gegründet worden sind. Diese sind sehr tragfähig und neigen

zu sehr geringen Setzungen. Nach [D 44] schwankt das Grundwasser im Bebauungsgebiet natürlicherweise um ca. 2,5 m. Für den überwiegenden Großteil des Stadtteils Rieselfeld liegen die berechneten zusätzlichen Grundwasserabsenkungen im Winter im Bereich von ca. $< 0,25$ m bis 1,0 m. D.h. durch die geplante geothermische Brunnenanlage kann der Grundwasserspiegel im Bereich Rieselfeld im Winter um ca. $< 0,25$ m bis 1,0 m sinken. Wenn diese Grundwasserabsenkung im üblichen Grundwasserschwankungsbereich eintritt, werden infolge eines wegfallenden Auftriebs keine Setzungen im kiesigen Baugrund ausgelöst. Nur wenn sich der Grundwasserspiegel im Winter auf einem sehr niedrigen Grundwasserstand befinden sollte, und durch die geothermische Brunnenanlage eine weitere Grundwasserabsenkung von 0,75 m bis 0,25 m eintritt, werden die entsprechenden Schichten "entwässert". Die Böden stehen dann bereichsweise nicht mehr unter Auftrieb, sondern erhalten ihre normale Wichte, wodurch rechnerisch eine Baugrundbelastung in einer Größenordnung von 10 kN/m^2 auftreten kann. Diese verursacht rechnerisch ein Setzungsmaß von $< 1 \text{ mm}$, das als vernachlässigbar zu bewerten ist. Daher ist ein Setzungsrisiko durch die geplante geothermische Anlage für den Stadtteil Rieselfeld nach derzeitigem Kenntnisstand nicht gegeben. Im Sinne einer Beweissicherung empfehlen wir, das mögliche Setzungsverhalten für den Stadtteil Rieselfeld zu monitoren und geotechnisch zu begleiten.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

8.1 Zusammenfassung

Auf Grundlage einer ausführlichen Datenrecherche und -aufbereitung wurde zunächst ein regionales hydrogeologisches Strukturmodell erstellt. Darauf basierend wurde von JIG ein Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell aufgebaut und kalibriert. Anschließend wurden Prognoseberechnungen für drei Varianten durchgeführt und ausgewertet.

- **Aufbau eines hydrogeologischen Strukturmodells:** Mit Hilfe der Datenrecherche, einer hydrostratigraphischen 3D-Modellierung und dem darauf aufbauenden hydrogeologischen Strukturmodell konnte die komplexe 3D-Situation der regionalen Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter abgebildet werden
- **Aufbau und Kalibrierung eines Grundwasserströmungsmodells:** Nach dem Modellaufbau auf Grundlage des hydrogeologischen Strukturmodells wurde das Grundwassermodell zunächst stationär anhand einer Stichtagsmessung für den quartären GWL (Mai 2016) sowie anhand der Stichtagsmessung von Oktober 2012 für den Hauptrogenstein kalibriert. Anschließend wurde anhand von langjährigen Datenloggeraufzeichnungen eine instationäre Kalibrierung für den Zeitraum 2000 – 2020 durchgeführt. Im Ergebnis wird mit dem hier dokumentiertem Kalibrierungsstand des Grundwassermodells die Grundwassersituation im Bereich des Standorts Dietenbach, im Abstrom des Standorts sowie großräumig im Modellgebiet entsprechend der aktuellen Datenlage gut abgebildet.
- **Erweiterung zum Wärmetransportmodell und Variantenberechnungen:** Das kalibrierte Grundwassermodell wurde anschließend zum Wärmetransportmodell erweitert. Es wurden Prognoseberechnungen für drei abgestimmte Varianten durchgeführt:
 - EH40, ABL, Variante BA 1-6: 27 Entnahme- und 26 Infiltrationsbrunnen,
 - EH40, ABL, Variante BA 1-4_v1: 19 Entnahme- und 26 Infiltrationsbrunnen,
 - EH40, ABL, Variante BA 1-4_v2: 19 Entnahme- und 23 Infiltrationsbrunnen.

Im Ergebnis der Modellierung steht ausreichend Grundwasser im oberen GWL zur geplanten Nutzung als Wärmequelle für den Stadtteil Dietenbach zur Verfügung. Nach Auswertung der durchgeführten Modellberechnungen ist darum die geplante Grundwasserwärmenutzung für alle drei Varianten in Bezug auf die prognostizierte Grundwasserhydraulik und Temperaturänderung grundsätzlich umsetzbar. Nach einer weiteren Optimierung der Brunnenstandorte, vor allem der Infiltrationsbrunnen im Bereich der Versickerungs- und Regenbecken, können die letzten offenen Fragestellungen aus unserer Sicht gelöst werden.

Ausgehend von einem fiktiven Betriebsbeginn der geothermischen Anlage Dietenbach am 01.01.2024 wurden die Ergebnisse für Ende Januar 2043 nach 19-jährigem Betrieb für die drei Varianten ausgewertet. Erwartungsgemäß stellt sich durch den Betrieb der geothermischen Anlage Dietenbach eine Abkühlung des Grundwassers ein. Die Abkühlung im weiteren Grundwasserabstrom (ca. 2 km) von Dietenbach liegt unter < 1 K und wird aus unserer Sicht als gering bewertet.

- Die abstromig von Dietenbach bestehenden Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden unterliegen für BA 1-6 im Endzustand („Worst-Case“) nur einer geringen Temperaturbeeinflussung.
- Die Temperaturbeeinflussung am TB Schorren der Gemeinde Umkirch, welcher im Hauptrogenstein-GWL ausgebaut ist, beträgt ca. 0,7 K für die Variante BA 1-6. Da die Grundwassertemperaturen zudem im Modell tendenziell überschätzt werden, ist somit keine relevante Beeinflussung des TB Schorren durch die Grundwasserwärmenutzung Dietenbach zu erwarten.
- Generell ist festzustellen, dass sich die Grundwasserabkühlung hinsichtlich des Klimawandels mit steigenden Temperaturen positiv auf die umliegenden Schutzgüter auswirkt.

Die Ergebnisse der Grundwasserhydraulik wurden zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme/ Infiltration für Ende Januar 2034 nach 10-jährigem Betrieb für die drei Varianten ausgewertet. Im Ergebnis der Modellberechnungen wird das Grundwasser für Variante BA 1-6 im direkten Bereich der Entnahmefrünnen bei Spitzenlast um bis zu 2 m temporär abgesenkt. Im direkten Umfeld der Infiltrationsbrunnen findet bei Spitzenlast eine temporäre maximale Grundwassererhöhung um 2 m statt. Für die Varianten BA 1-4v1

sowie BA 1 -4 v2 verringern sich die Auswirkungen auf die Grundwasserstände gegenüber der Variante BA 1 -6.

- Die Absenkungen und Erhöhungen infolge der Grundwassernutzung haben Auswirkungen auf die geplanten Entwässerungsanlagen, welche sich in unmittelbarer Nähe zu den Infiltrationsbrunnen befinden. Ein Konfliktpotential wird insbesondere für das dezentrale Versickerungsbecken sowie die dezentralen Versickerungsflächen sowie das Regenwasserbecken Mundenhof gesehen. Eine detailliertere Bewertung hinsichtlich einer Gefährdung der Funktionsfähigkeit der Entwässerungsanlagen erfolgt durch die Stadtentwässerung Freiburg i. Br.
- Eine Überschreitung der Geländeoberkante des Parkplatzes Mundenhof durch hoch anstehendes Grundwasser wird als unwahrscheinlich bewertet. Aufgrund der kurzzeitig sehr geringen minimalen Flurabstände ist jedoch ein Vernässen des Untergrunds in den Zeiträumen sehr hoher Grundwasserstände für die Variante BA 1-6 nicht auszuschließen.
- Die umliegenden Schutzgebiete Naturschutzgebiet Rieselfeld, Landschaftsschutzgebiet Mooswald sowie das Natura-2000-Gebiet Mooswälder bei Freiburg werden voraussichtlich nicht negativ durch die Grundwasserwärmenutzung beeinflusst. Negative Auswirkungen auf den bestehenden Baumbestand des Langmattenwäldchens durch erhöhte Grundwasserflurabstände sind hingegen durch die Grundwasserentnahme wahrscheinlich. Eine anschließende Prüfung durch einen Baumphysiologen für den Bereich Langmattenwäldchen wird empfohlen.
- Negative Auswirkungen auf die bestehenden Straßenbegleitbäume durch die Grundwasserwärmenutzung sind eher nicht zu erwarten. Bei der Neupflanzung von Straßenbegleitbäumen und Artauswahl sind die größeren Grundwasserflurabstände im Bereich der Entnahmebrunnen zu berücksichtigen.
- Das Setzungsrisiko durch die erhöhte Grundwasserabsenkung im Winter durch die geothermische Anlage ist für den Stadtteil Rieselfeld nach derzeitigem Kenntnisstand vernachlässigbar.

Die noch offenen Fragestellungen, welche im vorliegenden Bericht herausgearbeitet wurden, können aus unserer Sicht durch eine Optimierung der Brunnenstandorte gelöst werden.

8.2 Empfehlungen

Wir empfehlen eine hydrogeologische, geotechnische und geophysikalische Erkundung des Standorts im Bereich der geplanten Entnahme- und Infiltrationsbrunnen durchzuführen. Dies beinhaltet die Errichtung von zusätzlichen GWM, Durchführung von Leistungspumpversuche und Geophysikmessungen und den Einbau von Datenloggern. Mit Hilfe dieser Daten wird eine belastbarere Datengrundlage der hydraulischen Durchlässigkeitswerte k_f sowie Daten zu Wärmeleitfähigkeit und -kapazität für eine weitere Detailplanung geschaffen. Im Bereich der geplanten Infiltrationsbrunnen sollten Auffüll-/Infiltrationsversuche durchgeführt werden, um die möglichen Infiltrationsmengen sowie die sich einstellenden Grundwassererhöhungen zu überprüfen.

Wir empfehlen, die Anzahl und Lage der Brunnenstandorte in Abstimmung mit dem Konzessionär der Wärmeversorgung, dem Umweltschutzamt Freiburg i. Br. (insb. Abteilung III/ Fachbereich Wasserwirtschaft und Bodenschutz sowie Abteilung II/ Naturschutz), dem Eigenbetrieb Stadtentwässerung Freiburg i. Br., dem Garten- und Tiefbauamt Freiburg i. Br. sowie der Projektgruppe Dietenbach zu optimieren. Durch eine Optimierung insbesondere der Lage der Infiltrationsbrunnen können z.B. mögliche offene Fragestellungen in Bezug auf die Entwässerungsplanung Dietenbachs, zu die Bestandsbebauung und den Naturschutz verringert bzw. gelöst werden.

Es wird empfohlen, die Grundwasserneubildung bzw. den Wasserhaushalt des Bebauungsgebietes unter Berücksichtigung der Entwässerungsplanung im Endzustand zu berechnen und im Modell anzupassen, da für das Neubaugebiet Dietenbach in den Variantenberechnung eine unveränderte Hydrotopstruktur und somit eine unveränderte Grundwasserneubildung im Modell angesetzt wurden. Eine Veränderung durch die Bebauung wurde bisher nicht berücksichtigt, da zum Zeitpunkt der Berechnungen keine abschließenden Informationen vorgelegen haben, wie sich die Bebauung in Dietenbach auf die Grundwasserneubildung auswirkt. Geeignete Maßnahmen (Gründächer, dezentrale Versickerung etc.) können einen ausgeglichenen Wasserhaushalt schaffen und mittels Modellierung in ihren Auswirkungen quantifiziert werden. Ein oder mehrere geeignete Klimaszenarien sollten in der weiteren Prognose der Grundwasserneubildung und der Auswirkung geothermischer Anlagen berücksichtigt werden.

Mit einer verbesserten Datengrundlage sowie nach Abstimmung mit der Projektgruppe wird empfohlen, das Grundwasserströmungsmodell anhand neuer Daten zu überprüfen

und ggfls. nachzukalibrieren, bzw. bereichsweise anzupassen. Nach erfolgter Abstimmung bezüglich möglicher Brunnenstandorte wird empfohlen, weitere Modellläufe zur Optimierung der Brunnenstandorte durchzuführen und die Prognosen an die geänderten Randbedingungen anzupassen.

Zur Optimierung des Betriebs der geothermischen Anlage (Verringerung des Energieverbrauchs durch optimierte Förderung / Infiltration) wird empfohlen, das Grundwassermodell auch betriebsbegleitend fortzuschreiben.

Zur Beurteilung der Grundwasserqualität und möglicher Wechselwirkungen mit den geplanten Anlagenkomponenten wird empfohlen, im Bereich der geplanten Brunnen Analysen auf alle Haupt-Wasserinhaltsstoffe und Parameter gemäß [D 60] durchzuführen.

Zusammenfassend werden folgende Empfehlungen ausgesprochen:

- Hydrogeologische, geotechnische und geophysikalische Erkundung im Bereich der geplanten Brunnen: Errichtung zusätzlicher Grundwassermessstellen, Durchführung von Langzeitpumpversuchen, Infiltrationsversuchen, Bestimmung mittlerer Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, Einbau von Datenloggern,
- Abstimmung mit Konzessionär und der Projektgruppe Dietenbach und Behörden über weiteres Vorgehen, i.W. zu Anzahl und Lage der Brunnen,
- Regelmäßige Abflussmessungen der Dreisam im Bereich des Modellgebietes an mehreren Querprofilen,
- Nachkalibrierung des Grundwasserströmungsmodells nach Ermittlung neuer Daten (k_f -Werte, etc.),
- Prognoserechnungen zur Optimierung der Brunnenstandorte und Förder- sowie Infiltrationsraten, z.B. bei einer Anpassung des Energiekonzeptes,
- Prognoserechnungen mit Berücksichtigung des Klimawandels,
- Erstellung eines Wasserhaushaltsmodells für Dietenbach mit Berücksichtigung der geplanten Bebauung, dezentrale Versickerungsflächen etc.,
- hydrochemische Analyse gemäß [D 59] an Grundwassermessstellen,

- Betriebsbegleitende Fortschreibung des Grundwasserströmungsmodells,
- Aufbau einer digitalen Datenbank mit allen grundwasserrelevanten Daten.

Joswig Ingenieure GmbH



Dipl.-Ing. Philipp Joswig



M.Sc. Wolfram Canzler



M.Sc. Yolanda Rohde