
Ingenieurgesellschaft
Prof. Kobus und Partner GmbH

Wilhelm-Haas-Straße 6
70771 Leinfelden-Echterdingen
Deutschland

T +49 (0)711 400 928-0
F +49 (0)711 400 928-99
W www.kobus-partner.com

Manual für das Thermische Online-Modell (LGRBtom)

Stand: Dezember 2025

Auftraggeber: Regierungspräsidium Freiburg
79083 Freiburg i. Br.

Auftragsdatum: 31.10.2024

Auftragsnummer: A976

Berichtsnummer: A976-1

Bearbeitung: Dipl.-Ing. Bernhard Keim
Dr.-Ing. Alexander Kissinger

Leinfelden-Echterdingen, 22.12.2025



Bernhard Keim



Dr. Alexander Kissinger

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	II
TABELLENVERZEICHNIS	V
ANLAGENVERZEICHNIS	VI
ANHANGVERZEICHNIS	VII
1 Einleitung.....	1
2 Tutorial	3
2.1 Anlegen von Projekten und Modellen	3
2.2 Modellübersicht	5
2.3 Eingabe Modellinput.....	6
2.3.1 Betrachtungszeitraum und Diskretisierung	7
2.3.2 Strömung	8
2.3.3 Modellschichten.....	9
2.3.4 Anlagen / Brunnen	12
2.3.5 Dispersion.....	18
2.4 Modellprüfung.....	19
2.5 Modellrechnung und Visualisierung der Ergebnisse.....	20
2.6 Ergebnisbericht.....	23
3 Grundlagen der Wärmeausbreitung und Modellaufbau	26
3.1 Mechanismen der Wärmeausbreitung im Grundwasser.....	26
3.2 Simulation der Wärmeausbreitung mit DuMu ^x	30
3.3 Modellaufbau und Randbedingungen	31
3.4 Räumliche und zeitliche Diskretisierung des Modells	34
3.5 Bestimmung der Mächtigkeit des Liegenden	35
4 Fallbeispiele	37
4.1 Testfeld Aefligen.....	37
4.2 Gemeinsame Betrachtung mehrerer Anlagen	44
4.3 Einfluss der Grundwasserüberdeckung	54
4.4 Thermischer Kurzschluss – Einfluss des k _f -Wertes	59
4.5 Vergleich räumliche Diskretisierung „Standard“ vs „Hohe Auflösung“	64
4.6 Bestimmung einer ausreichenden Mächtigkeit des Liegenden.....	68
4.7 Rückgabe durch eine Rigole	70
4.8 Kleinanlagen und Einfluss der Dispersivität.....	73
4.9 Entnahmerate > Rückgaberate.....	75
LITERATURVERZEICHNIS.....	78
DANKSAGUNG	80
Anhang A Sensitivitätsbetrachtung hinsichtlich der Auswirkungen der Vernachlässigung des Speicherkoefizienten in LGRBtom.....	81
Anhang B Tabellarische Übersicht der Grenzwerte der Eingabeparameter in LGRBtom.....	88

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Neues Projekt erstellen und auswählen.....	3
Abbildung 2:	Neues Modell erstellen.....	4
Abbildung 3:	Modellauswahl	4
Abbildung 4:	Übersicht der Bearbeitungsschritte	5
Abbildung 5:	Modellinput	6
Abbildung 6:	Betrachtungszeitraum und Modellqualität	7
Abbildung 7:	Strömung.....	8
Abbildung 8:	Fall 1 Unterste Modellschicht ist Grundwasserleiter (oben) und Fall 2 unterste Modellschicht ist Grundwassergeingleitern (unten).....	10
Abbildung 9:	Modellschichten: Weiter zu Anlagen / Brunnen.....	11
Abbildung 10:	Anlagen / Brunnen: Erstellen einer neuen Anlage.....	12
Abbildung 11:	Anlagen / Brunnen: Erstellen eines neuen Brunnens	13
Abbildung 12:	Anlagen / Brunnen: Eingabe der Brunnen- und Betriebsdaten.....	13
Abbildung 13:	Anlagen / Brunnen: Weiter zu Dispersion.....	17
Abbildung 14:	Dispersion	18
Abbildung 15:	Modellprüfung starten.....	19
Abbildung 16:	Ergebnis der Modellprüfung	19
Abbildung 17:	Modellrechnung starten.....	20
Abbildung 18:	Ergebnis der Modellrechnung	21
Abbildung 19:	Darstellung von Ganglinien nach abgeschlossener Modellrechnung.....	22
Abbildung 20:	Download des Ergebnisberichts	23
Abbildung 21:	Auszug des Ergebnisberichts	24
Abbildung 22:	Ablauf der Strömungs- und Transportsimulation in DuMu ^x für einen Zeitschritt.....	30
Abbildung 23:	Aufsicht auf das Modellgebiet mit Randbedingungen.....	32
Abbildung 24:	Hydrogeologische Einheiten; Transportprozesse und vertikale Randbedingungen für Strömung und Transport in LGRBtom.....	34
Abbildung 25:	Lageplan Testfeld Aefligen (Kobus 1992)	37

Abbildung 26:	Rückgabebrunnen und hydrogeologische Situation (Kobus, 1992)	38
Abbildung 27:	Gemessene Infiltrations-Temperaturdifferenz und Monatsmittelwerte für die Eingabe in LGRBtom.....	39
Abbildung 28:	Auszug aus standardisiertem Ergebnisbericht für den Modellinput für das Modell Aefligen.....	40
Abbildung 29:	Temperaturdifferenz gemessen und berechnet für Messstelle TO915 37 m Abstand vom Rückgabebrunnen	42
Abbildung 30:	Temperaturdifferenz gemessen und berechnet für Messstelle TO508 105 m Abstand vom Rückgabebrunnen	42
Abbildung 31:	Temperaturdifferenz gemessen und berechnet für Messstelle WAT48 200 m Abstand vom Rückgabebrunnen	43
Abbildung 32:	Maximale Abkühlung im Betrachtungszeitraum über alle Tiefen aus dem automatisierten Modellbericht.....	44
Abbildung 33:	Anordnung der vier Anlagen. Blau sind Entnahmebrunnen und orange Rückgabebrunnen.....	45
Abbildung 34:	Auszug aus standardisiertem Ergebnisbericht für den Modellinput für Fallbeispiel 2: Hydrogeologisches Modell	46
Abbildung 35:	Maximale Temperaturerhöhung im Simulationszeitraum über alle Tiefen (Abbildung 2.5 im standardisierten Bericht).	48
Abbildung 36:	Maximale Temperaturabsenkung im Simulationszeitraum über alle Tiefen (Abbildung 2.4 im standardisierten Bericht).	49
Abbildung 37:	Oben: Ganglinien im Abstrom a1_RB2 von Anlage 1. Unten: Position der Beobachtungspunkte im Lageplan (Abbildung 2.9 im standardisierten Bericht)	50
Abbildung 38:	Temperaturzunahme am Entnahmebrunnen von Anlage 2 (entspricht Abbildung 2.18 im standardisierten Bericht).	51
Abbildung 39:	Temperaturzunahme am Entnahmebrunnen von Anlage 1 (entspricht Abbildung 2.17 im standardisierten Bericht).	51
Abbildung 40:	Stationäre Wasserbilanz für das automatisch erstellte Modellgebiet (entspricht Abbildung 2.6 im standardisierten Bericht).....	52
Abbildung 41:	Bilanz der durch die Anlagen verursachten Energieströme. Positiv ist ein Energieeintrag, negativ ein Energieaustausch aus dem Modell. (entspricht Abbildung 2.7 im standardisierten Bericht).....	52

Abbildung 42:	Variantenberechnung Fallbeispiel 2 mit Vergleich der +1 K Isotherme nach 5 und 30 Jahren.....	53
Abbildung 43:	Variantenberechnung Fallbeispiel 2 mit Bilanz der durch die Anlagen verursachten Energieströme bei 30 Jahren Betrachtungszeit. Positiv ist ein Energieeintrag, negativ ein Energieaustrag aus dem Modell.....	54
Abbildung 44:	Hydrogeologisches Konzeptmodell (Szenario 3c) (Abbildung bereit gestellt durch das LGRB, verändert)	55
Abbildung 45:	Vergleich der Fahnenlängen zwischen Fallbeispielen 3a wassergesättigt, 3b ungesättigt und 3c Mittelung ungesättigter Schichten	57
Abbildung 46:	Vergleich der anthropogenen Energieströme für Fallbeispiel 3a gesättigt (oben), Fallbeispiel 3b ungesättigt (Mitte) und Fallbeispiel 3c Mittelung ungesättigter Schichten (unten)	59
Abbildung 47:	Maximale Ausbreitung der Temperaturfahnen für die Fälle „kf-niedrig“ (oben) und „kf-hoch“ (unten).....	62
Abbildung 48:	Beeinflussung am Entnahmestollen EB1. Oben Fall „kf-niedrig“ und unten Fall „kf-hoch“ (aus: Anlage 6 und 7).....	63
Abbildung 49:	Energiebilanz mit den anthropogenen Energieströmen für den Fall „kf-niedrig“ (oben) und den Fall „kf-hoch“ (unten).....	64
Abbildung 50:	Maximale Ausbreitung der Temperaturfahne für den Fall "Standard" (oben) und den Fall "Hohe Auflösung" (unten).....	67
Abbildung 51:	Umsetzung der Rigole mit Brunnen. Links: Fall mit 3 Brunnen und einem Abstand von 5 m. Rechts Fall mit 5 Brunnen und einem Abstand von 2,5 m.....	71
Abbildung 52:	Vergleich der maximalen Ausbreitung der Temperaturfahnen für den Basisfall. Entnommen aus dem automatisierten Bericht (Abb. 2.4). Oben: Rigole umgesetzt mit 3 Rückgabebrunnen und einem Abstand zwischen den Brunnen von jeweils 5 m. Unten: Rigole umgesetzt mit 5 Rückgabebrunnen und einem Abstand zwischen den Brunnen von jeweils 2,5 m.....	72
Abbildung 53:	Konturen der 1 K-Isotherme	73
Abbildung 54:	Vergleich der anthropogenen Energieströme für Fallbeispiel 8a „Dispersivität al 3,4 & at 0,34“ (oben) und Fallbeispiel 8b „Dispersivität al 7,5 & at 0,75“ (unten).....	75
Abbildung 55:	Oben: Vergleich der Konturen der 1 K Isotherme der Szenarien 9a & 9b. Unten: Absenkung/Aufstau der Szenarien 9a und 9b	77

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Anlagen / Brunnen: Brunnendaten der Beispielbrunnen "EB1", "RB1" und "RB2"	16
Tabelle 2.2:	Anlagen / Brunnen: Betriebsdaten der Beispielbrunnen "EB1", "RB1" und "RB2". Negative Temperaturdifferenzen entsprechen einem Heizbetrieb positive Werte einem Kühlbetrieb	17
Tabelle 3.1:	Klassifizierung der longitudinalen Dispersivität anhand des Grads der Heterogenität, entnommen und angepasst aus Zech et al. (2022)	28
Tabelle 3.2:	Thermohydraulische Eigenschaften des Untergrundes gemäß Tabelle 1 der Richtlinie VDI 4640 Blatt 1	29
Tabelle 4.1:	Modellinput der Grundwasserüberdeckung für die drei Fälle	56
Tabelle 4.2:	Variationen (rot) vom Basisfall und ermittelte Längen:	69

ANLAGENVERZEICHNIS

- Anlage 1: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 1
- Anlage 2: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 2
- Anlage 3: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 3a
- Anlage 4: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 3b
- Anlage 5: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 3c
- Anlage 6: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 4a
- Anlage 7: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 4b
- Anlage 8: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 5a
- Anlage 9: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 5b
- Anlage 10: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 6a
- Anlage 11: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 6a
- Anlage 12: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 7a
- Anlage 13: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 7b
- Anlage 15: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 8a
- Anlage 15: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 8b
- Anlage 16: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 9a
- Anlage 17: Standardisierter Modellbericht Fallbeispiel 9b

ANHANGVERZEICHNIS

Anhang A: Sensitivitätsbetrachtung hinsichtlich der Auswirkungen der Vernachlässigung des Speicherkoeffizienten in LGRBtom

Anhang B: Tabellarische Übersicht der Grenzwerte der Eingabeparameter in LGRBtom

1 Einleitung

Das Thermische Online-Modell (LGRBtom) ist eine hydrogeologische Fachanwendung des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) im Regierungspräsidium Freiburg. LGRBtom ermöglicht die Berechnung von Absenkungen, Aufhöhungen und Temperaturfeldausbreitungen bei thermischen Grundwassernutzungen (Heizen und Kühlen) in Baden-Württemberg.

LGRBtom ermöglicht eine 3D-Prognose des Strömungs- und Temperaturfelds von mehreren sich gegenseitig beeinflussenden geothermischen Anlagen im Rahmen einer Prinzipmodellierung. Die hydrogeologischen Verhältnisse werden dabei vereinfacht abgebildet. Die Anwendung erfordert umfassendes hydrogeologisches Fachwissen um geothermische Nutzungen und hiermit verbundene Fragestellungen, jedoch nur begrenzt modelltechnisches Wissen.

LGRBtom soll Gutachtern und Behörden eine vergleichsweise schnelle und kostengünstige Abschätzung der Ausbreitung von Temperaturfeldern bei der geothermischen Nutzung von oberflächennahen Grundwasserleitern ermöglichen. Anstelle der Installation einer Simulations-Software erfolgt die Bedienung „Online“ über einen Web-Browser. Da die Simulation auf einer Cloud erfolgt, müssen vom Anwender keine Rechenressourcen bereitgestellt werden.

Zur Simulation wird der numerische Simulator DuMu^x herangezogen, welcher seit 2007 vorrangig am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung an der Universität Stuttgart entwickelt wird (Flemisch et al., 2011). DuMu^x ist ein Open-Source Simulator, der Strömung und Wärmetransport in porösen Medien in 3D berechnet.

Alle Eingangsparameter und eine standardisierte Auswertung der Ergebnisse können nach dem Simulationsende vom Nutzer heruntergeladen werden. Somit sind die Eingaben und Ergebnisse vollständig transparent und können als Teil eines hydrogeologischen Gutachtens von einer Behörde geprüft werden.

In LGRBtom werden die zuvor in einem hydrogeologischen Konzeptmodell (HKM) ermittelten hydrogeologischen Parameter sowie die anlagenspezifischen zeitlich variablen Entnahme- und Rückgaberaten eingegeben. Basierend auf diesen Eingaben generiert LGRBtom ein numerisches Modell, berechnet Absenkungen/Aufhöhungen und Temperaturfelder und wertet diese aus. Die benötigten Eingaben sind so einfach wie möglich gehalten, um der prinzipiellen Annäherung an den betrachteten Fall gerecht zu werden (z. B. homogene Verteilung der kf-Werte, einheitliche Dispersivität im Modell und einheitliche Porosität je Modellschicht, etc.).

Es liegt in der Verantwortung des Anwenders, Standort bezogen geeignete hydrogeologische und thermohydraulische Parameter zu wählen, die Ergebnisse von LGRBtom hydrogeologisch zu interpretieren und auf die Vor-Ort-Verhältnisse zu übertragen. Weiterhin muss er beurteilen können, ob die in LGRBtom getroffenen hydrogeologischen Vereinfachungen für den jeweiligen Anwendungsfall zulässig sind.

LGRBtom ersetzt kein detailliertes numerisches Modell, da es auf einer vereinfachten Vorstellung des Untergrunds basiert (homogene Parametrisierung des Untergrunds und einfache Grundwasserfließrichtung). In vielen hydrogeologischen Situationen kann dieser Ansatz ausreichend sein, um geplante Anlagen zu beurteilen. Bei komplexeren hydrogeologischen Randbedingungen, z. B. bei einer stark heterogenen k_f -Wert-Verteilung oder wenn der Austausch mit Fließgewässern die Strömungsrichtungen in der Nähe der Anlage maßgeblich beeinflusst, kann LGRBtom nur erste Anhaltspunkte liefern und sollte durch ein kalibriertes Planungsmodell gemäß DVGW W107 (A) ergänzt werden (Ohmer et al., 2022).

Die Berechnung der Auswirkungen von thermischen Grundwassernutzungen kann aber auch in komplexeren Situationen vom Einsatz von LGRBtom profitieren, da z. B. maßgebliche numerische Vorgaben wie die erforderliche Diskretisierungslänge (räumliche Auflösung) im Bereich der Fahne ermittelt und in einem Planungsmodell berücksichtigt werden können.

Dieses Manual behandelt die wesentlichen physikalischen Grundlagen des Wärmetransports sowie das in LGRBtom eingesetzte Modellierungskonzept. Darüber hinaus werden die Schritte vom Modellaufbau bis zur Auswertung der Ergebnisse beschrieben. Das Manual wird ergänzt durch die FAQs auf der LGRBtom Homepage (tom.lgrb-bw.de).

Einen schnellen Einstieg in die Bedienung von LGRBtom ermöglicht das Tutorial in Kapitel 2. In Kapitel 3 werden die Grundlagen der Wärmeausbreitung im Grundwasser und das Modellierungskonzept erläutert. Kapitel 4 enthält verschiedene Fallbeispiele, welche einen Überblick über die Anwendungsbereiche von LGRBtom geben. Weiterhin wird die Sensitivität relevanter Parameter auf die resultierenden Temperaturfahnen aufgezeigt.

2 Tutorial

In diesem Tutorial wird ein Beispielszenario, von der Erstellung des Projektes bis zur Ausgabe des Ergebnisberichtes, Schritt für Schritt durchgegangen. In den grauen Boxen sind allgemeine Informationen dargestellt. Zuvor müssen Sie sich einloggen, geben Sie hierfür folgende Adresse in Ihren Browser ein:

tom.lgrb-bw.de

Danach melden Sie sich mit Ihren Anmeldedaten an bzw. führen zuvor die Registrierung durch. Für die Durchführung dieses Tutorials ist es notwendig, dass der Anwender über ausreichend Rechenzeit verfügt. Die Beschaffung von Rechenzeit wird in den FAQ von LGRBtom erläutert.

2.1 Anlegen von Projekten und Modellen

Neues Projekt erstellen:

1. Geben Sie "Beispielprojekt" als Namen in das Eingabefeld ein.

Baden-Württemberg
Regierungspräsidium
Freiburg | Landesamt für Geologie,
Rohstoffe und Bergbau

Startseite Projektauswahl Benutzerdaten Rechenzeitverwaltung Support

Startseite > Projektauswahl

Projektauswahl

Bitte wählen Sie im ersten Schritt ein vorhandenes Projekt aus oder erstellen ein neues

Projektauswahl

Projekt 3. 4.
Beispielprojekt → Mit Auswahl starten

Löschen

Neues Projekt erstellen

Name 1.
Erlaubte Zeichen: Buchstaben, Zahlen, Leerzeichen, Bindestriche und Unterstriche

Erstellen 2.

2. Klicken Sie auf **Erstellen**
3. Wählen Sie das erstellte Projekt aus (ein Projekt kann mehrere Modelle enthalten).
4. Klicken Sie auf **→ Mit Auswahl starten**

Abbildung 1: Neues Projekt erstellen und auswählen.

Neues Modell erstellen:

1.

2.

Abbildung 2: Neues Modell erstellen

1. Geben Sie "Modellbeispiel" als Namen in das Eingabefeld ein.

2. Klicken Sie auf

Erstellen

! Es besteht die Möglichkeit die Konfigurationen von bereits bestehenden Modellen zu übernehmen. Setzen Sie dazu den Haken bei "**Bestehende Konfigurationen übernehmen**" und wählen sie das Modell aus, von dem Sie die Konfigurationen übernehmen wollen. Alle Eingabeparameter werden dann aus der Vorlage übernommen.

Startseite > Projektauswahl > Modellauswahl

Modellauswahl

Im zweiten Schritt wählen Sie ein Modell oder erstellen Sie ein neues Modell. Wenn der Homepage LGRBtom.

Modellauswahl

Modell

3.

4.

→ Mit Auswahl starten

Löschen

Name

Modellbeispiel

Umbenennen

3. Wählen Sie das erstellte Modell aus.

4. Klicken Sie auf

→ Mit Auswahl starten

Abbildung 3: Modellauswahl

! Falls Sie den Namen eines Modelles ändern wollen, wählen Sie das Modell aus, dessen Namen Sie ändern wollen und geben Sie den neuen Namen in das Eingabefeld ein. Klicken Sie anschließend auf "**Umbenennen**".

2.2 Modellübersicht

Eine Übersicht der Bearbeitungsschritte ist in Abbildung 4 gegeben.

Modell		
Bearbeitungsschritt	Status	Aktion
1 Modellinput	unvollständig: GW-Referenzpunkt fehlt, Keine thermischen Anlagen definiert	<button>Bearbeiten</button>
2 Modellprüfung	ungeprüft	<button>Starten</button>
3 Modellrechnung	Modell noch nicht geprüft	<button>Starten</button>
4 Ergebnisbericht		<button>Download</button>

[← Zurück](#)

Unter "**1 Modellinput**" werden alle Angaben zum hydrogeologischen Modell und den Betriebsdaten gemacht.

Nach vollständiger Eingabe des Modellinputs folgt, durch das Klicken auf den "**Starten**"-Button neben "**2 Modellprüfung**", die Prüfung und Erstellung des Modells. Dabei wird das Modellnetz erzeugt und im Anschluss mit den erstellten Brunnen auf der Karte angezeigt.

In "**3 Modellrechnung**" wird durch Betätigung des "**Starten**"-Buttons die Modellrechnung gestartet.

Abbildung 4: Übersicht der Bearbeitungsschritte

Berechnet werden Piezometerhöhen, Absenkung/Aufstau und Temperaturdifferenzen im Modellgebiet im angegebenen Simulationszeitraum.

Durch Klicken auf den "**Download**"-Button unter "**4 Ergebnisbericht**", wird, nach Abschluss der Modellrechnung, der standardisierte Modellbericht mit einer Auflistung des Modellinputs und der relevanten Ergebnisse erstellt und heruntergeladen.

2.3 Eingabe Modellinput

1.

Modell

Sie sind nun auf der Modellseite, die vier Bearbeitungsschritte umfasst. 2-4 durchführen. Zum Starten einer Modellberechnung benötigen Sie Verfügbare Stunden: 10 Std. 39 Min.

Bearbeitungsschritt	Status	Aktion
1 Modellinput	unvollständig: GW-Referenzpunkt fehlt, Keine thermischen Anlagen definiert	Bearbeiten 1.
2 Modellprüfung	ungeprüft	Starten
3 Modellrechnung	Modell noch nicht geprüft	Starten
4 Ergebnisbericht		Download

← Zurück

Klicken Sie auf

Bearbeiten

Abbildung 5: Modellinput

2.3.1 Betrachtungszeitraum und Diskretisierung

Betrachtungszeitraum und Diskretisierung

3.

Strömung
Modellschichten
Anlagen / Brunnen
Dispersion

1. Betrachtungszeitraum [a]

2 Bitte geben Sie die gewünschte Dauer des Betrachtungszeitraums in Jahren an.

Experteneinstellungen aktivieren

Räumliche Diskretisierung

2. Hoch aufgelöst

Bitte speichern Sie regelmäßig Ihre Eingaben.

Speichern Zurück

Abbildung 6: Betrachtungszeitraum und Modellqualität

1. Geben Sie für den Betrachtungszeitraum 2 Jahre ein.
2. Wählen Sie die Modellqualität "Hoch aufgelöst" aus.
3. Klicken Sie anschließend auf "Strömung" um zum nächsten Menüpunkt zu gelangen.

! Die einzugebenden Parameter des Modellinputs werden mit Hilfetexten erklärt. Falls unzulässige Werte eingetragen werden, wird das entsprechende Feld rot markiert und ein Hinweis zum zulässigen Wertebereich angezeigt. Eine Übersicht der zulässigen Grenzwerte befindet sich in Anhang B.

! **Räumliche Diskretisierung:** Hier gibt es zwei Stufen zur Auswahl „Standard“ und „Hoch aufgelöst“. Die Qualität bezieht sich hierbei auf die Diskretisierungslänge im Verfeinerungsbereich für den thermischen Transport. Die Diskretisierungslänge in der Stufe „Hoch aufgelöst“ ist um einen Faktor 2 kleiner als in der Stufe „Standard“. Dies führt zu einer Rechenzeiterhöhung um etwa einen Faktor 4. Die Stufe „Standard“ ist i.d.R. ausreichend. Es wird daher empfohlen Modelle mit der Einstellung „Standard“ laufen zu lassen und nur in Sonderfällen die Einstellung „Hoch aufgelöst“ zu wählen. Weitere Details hierzu finden sich in Kapitel 3.4 sowie anhand eines Fallbeispiels in Kapitel 4.5.

2.3.2 Strömung

Betrachtungszeitraum und Diskretisierung

Strömung

Modellschichten 6.

Anlagen / Brunnen

Dispersion

Speichern Zurück

Bitte speichern Sie regelmäßig Ihre Eingaben.

Strömungsrichtung [$^{\circ}$] 1.	60,0	hydraulischer Gradient [-] 2.	0,0050
Bitte geben Sie einen Wert für die gewünschte Strömungsrichtung in Grad an. 0° entspricht einer Strömung nach Norden, 90° einer Strömung nach Osten, 180° einer Strömung nach Süden usw.		Bitte geben Sie einen Wert für den hydraulischen Gradienten an.	
Grundwasserstand [m NHN] 3.	200,0	X UTM [m] 4.	414380,00
Bitte geben Sie einen gemessenen repräsentativen Wert für den Grundwasserstand am Bezugspunkt an. Auf dieses Niveau werden die berechneten Piezometerhöhen bezogen.		Bitte geben Sie die X-Koordinate des Bezugspunkts an: ETRS89, Universale Transversale Mercatorprojektion (UTM), in BW Zone (zn) 32. EPSG:25832.	
Y UTM [m] 5.	5317025,00	Bitte geben Sie die Y-Koordinate des Bezugspunkts an: ETRS89, Universale Transversale Mercatorprojektion (UTM), in BW Zone (zn) 32. EPSG:25832.	

Abbildung 7: Strömung

1. Geben Sie für die Strömungsrichtung 60° ein. 0° entspricht einer Strömung nach Norden, 90° einer Strömung nach Osten, 180° einer Strömung nach Süden usw.

2. Geben Sie für den hydraulischen Gradienten 0,005 ein.

!

Eingabe von Zahlenwerten: Zahlenwerte können sowohl mit Punkt als auch mit Komma als Dezimaltrennzeichen eingegeben werden. Dargestellt werden diese Zahlen nach Speichern des Modellinputs immer mit einem Komma als Dezimaltrenner. Auch die Eingabe von Zahlen in wissenschaftlicher Notation ist möglich, z.B. „ $1e-3$ “ für 0,001.

3. Geben Sie für den Grundwasserstand am Bezugspunkt 200 m ü. NHN ein. Der Wert des Grundwasserstandes sollte ein gemessener repräsentativer Wert für das Modellgebiet sein. Der Bezugspunkt sollte in der Nähe der Anlagen liegen. Als Bezugspunkt bietet sich beispielsweise ein Entnahme- oder Rückgabebrunnen an, für den ein repräsentativer (mittlerer) Grundwasserstand bekannt ist. Der m ü. NHN-Bezug dient nur Darstellungszwecken und ist nicht relevant für die Konfiguration der Brunnen.

4. Geben Sie für die X-Koordinate des Bezugspunktes in UTM-Koordinaten 414380 m ein.

5. Geben Sie für die Y-Koordinate des Bezugspunktes in UTM-Koordinaten 5317025 m ein.

!

Die X- und Y-Koordinaten müssen als Universale Transversale Mercatorprojektion (UTM) im Europäischen Terrestrischen Referenzsystem 1989 (ETRS89) angegeben werden.

6. Klicken Sie anschließend auf "**Modellschichten**" um zum nächsten Menüpunkt zu gelangen.

2.3.3 *Modellschichten*

In den folgenden Schritten werden die hydrogeologischen und thermohydraulischen Parameter der Modellschichten festgelegt (Abbildung 8).



Die Berechnung der Grundwasserströmung in LGRBtom erfolgt vereinfacht mit konstanter Transmissivität. In der obersten Modellschicht (Grundwasserüberdeckung), welche einem Grundwassergeingleiter (gespannte Verhältnisse) oder der ungesättigten Zone (ungespannte Verhältnisse) entsprechen kann, erfolgt der Wärmetransport rein konduktiv. Für die Grundwasserüberdeckung müssen somit nur die Mächtigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität angegeben werden. Bei ungespannten Verhältnissen ist unter Umständen eine Mittelung der thermischen Parameter der Grundwasserüberdeckung notwendig, Die zweite Modellschicht entspricht immer einem Grundwasserleiter (oberer Grundwasserleiter).

Die unterste Modellschicht mit der Bezeichnung „Liegendes“ kann in LGRBtom sowohl:

1. einen weiteren Grundwasserleiter mit entsprechend hoher Durchlässigkeit darstellen.
2. einen Grundwassergeingleiter darstellen.

Im 1. Fall kann eine Ausbreitung der Wärme mit der Strömung (Advektion), durch Dispersion und durch Konduktion stattfinden. Im 2. Fall ist für die Ausbreitung nur die Konduktion relevant. Für diesen Fall ist eine analytische Abschätzung der Mächtigkeit des Liegenden (Konduktionslänge) anhand der gegebenen thermohydraulischen Parameter möglich. Eine Erläuterung dieser Abschätzung mit Beispiel ist in Kapitel 3.5 sowie anhand eines Fallbeispiels in Kapitel 4.6 gegeben.

Wenn es sich beim Liegenden um einen Grundwassergeingleiter handelt, besteht die Möglichkeit, die Mächtigkeit dieser gering durchlässigen Schicht über eine in LGRBtom eingebaute Funktion berechnen zu lassen. Hierzu klicken sie auf den Button „Mächtigkeit berechnen“ (Abbildung 8 unten).

Im Falle dieses Tutorials liegt ein Grundwasserleiter vor, daher soll an dieser Stelle nur beispielhaft auf die Möglichkeit zur Verwendung dieser Funktion hingewiesen werden.

Bezeichnung	1. Mächtigkeit [m]	2. kf-Wert [m/s]	3. Porosität [-]	4. Wärmeleitfähigkeit poröses Medium [W/m*K] ⓘ	5. Volumenbezogene spez. Wärmekapazität poröses Medium [MJ/(m³*K)] ⓘ
Grundwasserüberdeckung	5,0	-	-	0,5	1,6
Grundwasserleiter	20,0	0,0015	0,15	1,8	2,4
Grundwasserleiter	5,0	0,00025	0,15	1,8	2,4
Wenn Sie die Mächtigkeit des Liegenden auf 0,0m setzen, ist diese Formation im Modell nicht vorhanden.					
Bezeichnung	Mächtigkeit [m]	kf-Wert [m/s]	Porosität [-]	Wärmeleitfähigkeit poröses Medium [W/m*K] ⓘ	Volumenbezogene spez. Wärmekapazität poröses Medium [MJ/(m³*K)] ⓘ
Grundwasserüberdeckung	5,0	-	-	0,5	1,6
Grundwasserleiter	20,0	0,0015	0,15	1,8	2,4
Grundwassergeringleiter	10			1,8	2,4
Mächtigkeit berechnen					
Wenn Sie die Mächtigkeit des Liegenden auf 0,0m setzen, ist diese Formation im Modell nicht vorhanden.					

Abbildung 8: Fall 1 Unterste Modellschicht ist Grundwasserleiter (oben) und Fall 2 unterste Modellschicht ist Grundwassergeringleitern (unten)

Im Rahmen dieses Turorials wird die unterste Modellschicht als weiterer Grundwasserleiter angenommen (Fall 1).

1. Geben Sie für die Mächtigkeit der Deckschicht 5 m, für den Oberen Grundwasserleiter 20 m und für die unterste Modellschicht 5 m ein.
2. Geben Sie für den kf-Wert des Oberen Grundwasserleiters 0,0015 m/s und für die unterste Modellschicht 0,00025 m/s ein.
3. Geben Sie für die effektive Porosität in den beiden Grundwasserleitern jeweils 0,15 ein.
- 4a. Geben Sie für die Wärmeleitfähigkeit der Grundwasserüberdeckung 0,5 W/(m*K) ein.
- 4b. Geben Sie für die Wärmeleitfähigkeit der weiteren beiden Grundwasserleiter jeweils 1,8 W/(m*K) ein.
- 5a. Geben Sie für die Wärmekapazität der Grundwasserüberdeckung 1,6 MJ/(K*m³) ein.

5b. Geben Sie für die Wärmekapazität der weiteren beiden Grundwasserleiter jeweils $2,4 \text{ MJ}/(\text{K}^*\text{m}^3)$ ein.



Literaturwerte für die thermohydraulischen Gesteinsparameter lassen sich z.B. aus der VDI 4640 Blatt 1 (hier vor allem Tabelle 1) (VDI, 2010) entnehmen.

Betrachtungszeitraum und Diskretisierung

Strömung

Modellschichten

Anlagen / Brunnen **6.**

Dispersion

Speichern

Zurück

Bitte speichern Sie regelmäßig Ihre Eingaben.

6. Klicken Sie anschließend auf "Anlagen / Brunnen", um zum nächsten Menüpunkt zu gelangen.

Abbildung 9: Modellschichten: Weiter zu Anlagen / Brunnen

2.3.4 Anlagen / Brunnen

In diesem Abschnitt werden die Stamm- und Betriebsdaten der verschiedenen Brunnen angegeben. Bevor ein Brunnen angelegt werden kann, muss eine Anlage erstellt werden, zu welcher dieser zuzuordnen ist. Für jede Anlage können mehrere Entnahme- bzw. Rückgabebrunnen erstellt werden. Es können verschiedene Anlagen pro Modell erstellt werden.

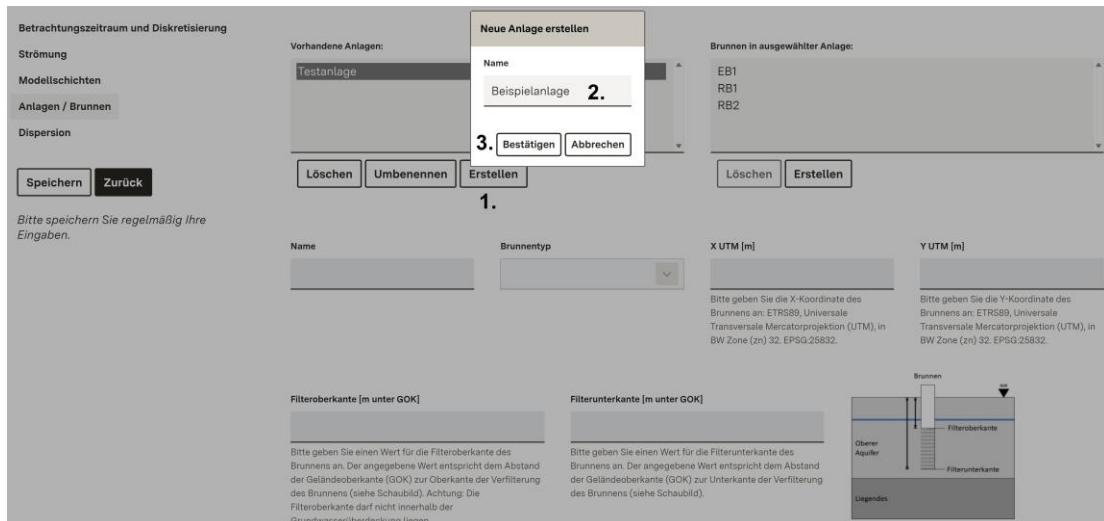


Abbildung 10: Anlagen / Brunnen: Erstellen einer neuen Anlage

1. Klicken Sie auf Erstellen

Es erscheint das Eingabefeld "**Neue Anlage erstellen**".

2. Geben Sie "Beispielanlage" als Namen in das Eingabefeld ein.

3. Klicken Sie auf Bestätigen

Betrachtungszeitraum und Diskretisierung

Strömung
Modellschichten
Anlagen / Brunnen
Dispersion

Vorhandene Anlagen:
Testanlage

Neuen Brunnen erstellen

Name: EB1
6.

7. Bestätigen
Abbrechen

Löschen
Umbenennen
Erstellen

Brunnen in ausgewählter Anlage:
EB1
RB1
RB2

Löschen
Erstellen

Bitte speichern Sie regelmäßig Ihre Eingaben.

Speichern Zurück

Name: EB1
Brunnentyp: Entnahmeh Brunnen

X UTM [m]: 414400,00
Y UTM [m]: 5316990,00

Filteroberkante [m unter GOK]: 10,50
Filterunterkante [m unter GOK]: 16,50

Brummen
Oberer Aquifer
Liegender

Bitte geben Sie einen Wert für die Filteroberkante des Brunnens an. Der angegebene Wert entspricht dem Abstand der Geländeoberkante (GOK) zur Oberkante der Verfiltrung des Brunnens (siehe Schaubild). Achtung: Die Filteroberkante darf nicht innerhalb der Grundwasserüberdeckung liegen.

Bitte geben Sie einen Wert für die Filterunterkante des Brunnens an. Der angegebene Wert entspricht dem Abstand der Geländeoberkante (GOK) zur Unterkante der Verfiltrung des Brunnens (siehe Schaubild).

Abbildung 11: Anlagen / Brunnen: Erstellen eines neuen Brunnens

4. Wählen Sie die erstellte Anlage aus.

5. Klicken Sie auf **Erstellen**

Es erscheint das Eingabefeld "Neuen Brunnen erstellen".

6. Geben Sie "EB1" als Namen in das Eingabefeld ein.

7. Klicken Sie auf **Bestätigen**

Vorhandene Anlagen:
Testanlage

Brunnen in ausgewählter Anlage:
EB1
RB1
RB2

Löschen
Umbenennen
Erstellen

Löschen
Erstellen

Name: EB1
Brunnentyp: 9. Entnahmeh Brunnen

10. X UTM [m]: 414400,00
11. Y UTM [m]: 5316990,00

12. Filteroberkante [m unter GOK]: 10,50
13. Filterunterkante [m unter GOK]: 16,50

Brummen
Oberer Aquifer
Liegender

Bitte geben Sie einen Wert für die Filteroberkante des Brunnens an. Der angegebene Wert entspricht dem Abstand der Geländeoberkante (GOK) zur Oberkante der Verfiltrung des Brunnens (siehe Schaubild). Achtung: Die Filteroberkante darf nicht innerhalb der Grundwasserüberdeckung liegen.

Bitte geben Sie einen Wert für die Filterunterkante des Brunnens an. Der angegebene Wert entspricht dem Abstand der Geländeoberkante (GOK) zur Unterkante der Verfiltrung des Brunnens (siehe Schaubild).

Betriebsdaten Brunnen EB1:

konstant Monatswerte

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Entnahme [l/s]	14. 6,02	5,56	4,61	4,61	2,31	4,98	4,98	4,98	2,08	3,47	4,81	5,56
Temperaturdifferenz [K]												

Bitte geben Sie (positive) Werte für die Raten des Brunnens des jeweiligen Monats an.

Abbildung 12: Anlagen / Brunnen: Eingabe der Brunnen- und Betriebsdaten

8. Wählen Sie den erstellten Brunnen aus.

9. Wählen Sie als Brunnentyp "**Entnahme**" aus.
10. Geben Sie für die X-Koordinate des Brunnens in UTM-Koordinaten 414400 m ein.
11. Geben Sie für die Y-Koordinate des Brunnens in UTM-Koordinaten 5316990 m ein.

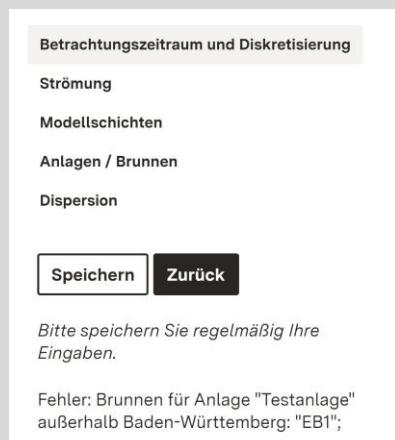


Fehlermeldungen in LGRBtom:

Es gibt verschiedene Fehlermeldungen in LGRBtom, welche bei ungültigen Eingaben im Modellinput auftreten können. Eine Übersicht der Grenzwerte für verschiedene Parameter ist in Anhang B gegeben. Wird z.B. eine Entnahmerate außerhalb des in Anhang B gegebenen zulässigen Bereichs eingegeben, lässt sich die Eingabe nicht speichern und es wird direkt ein Fehler angezeigt (rot umrandetes Kästchen). Es gibt jedoch auch komplexere Grenzwerte, welche sich durch eine Kombination aus verschiedenen Eingabeparametern ergeben. Hier erscheint eine Fehlermeldung erst beim Speichern des Modellinputs. Der Fehler wird sowohl auf der Modellinputseite angezeigt als auch auf der Modellseite unter 1. Modellinput.

Beispiel Fehler im Modellinput:

Die Koordinate (X- & Y-Wert) der eingegebenen Brunnen muss in Baden-Württemberg liegen, ansonsten wird eine Fehlermeldung im Navigationsbereich des Modellinputs und in der Modellübersicht angezeigt, siehe Abbildung unten.



Modell

Sie sind nun auf der Modellseite, die vier Bearbeitungsschritte umfasst. Um die Schritte 2-4 durchzuführen, [Zum Starten einer Modellberechnung benötigen Sie eine aktive Internetverbindung](#).
Verfügbare Stunden: 10 Std. 32 Min.

Bearbeitungsschritt	Status	Aktion
1 Modellinput	unvollständig: Fehler: Brunnen für Anlage "Testanlage" außerhalb Baden-Württemberg: "EB1";	Bearbeiten
2 Modellprüfung	ungeprüft	Starten
3 Modellrechnung	Modell noch nicht geprüft	Starten
4 Ergebnisbericht		Download

[← Zurück](#)

12. Geben Sie für die Filteroberkante 10,50 m unter GOK ein.

13. Geben Sie für die Filterunterkante 16,50 m unter GOK ein.



Der angegebene Wert für die Filteroberkante entspricht dem Abstand der Geländeoberkante (GOK) zur Oberkante der Verfilterung des Brunnens. Der angegebene Wert für die Filterunterkante entspricht dem Abstand der Geländeoberkante (GOK) zur Unterkante der Verfilterung des Brunnens.
Achtung: Die Filteroberkante darf nicht innerhalb der Grundwasserüberdeckung, d.h. oberhalb des Grundwasserspiegels liegen. Der Filter kann auch teilweise oder komplett in der untersten Modellschicht liegen.

14. Geben Sie die Werte der Rate des jeweiligen Monats von Entnahmebrunnen "EB1" aus Tabelle 2.2 ein. *Hinweis zur Beschleunigung der Eingabe: Nach Eingabe eines Wertes gelangt man durch Drücken der TAB-Taste in das nächste Feld.*

Erstellen Sie zusätzlich zum Entnahmebrunnen "EB1" zwei Rückgabebrunnen mit den Namen "RB1" und "RB2". Wiederholen Sie dazu die Schritte 5. bis 14. und geben Sie für die jeweiligen Angaben die Werte aus Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 ein.

Tabelle 2.1: Anlagen / Brunnen: Brunnendaten der Beispielbrunnen "EB1", "RB1" und "RB2"

Name	EB1	RB1	RB2
Brunnentyp	Entnahme	Rückgabe	Rückgabe
X UTM [m]	414400	414380	414415
Y UTM [m]	5316990	5317025	5317025
Filteroberkannte [m unter GOK]	10,50	5,00	5,00
Filterunterkannte [m unter GOK]	16,50	19,00	19,00

Tabelle 2.2: Anlagen / Brunnen: Betriebsdaten der Beispielbrunnen "EB1", "RB1" und "RB2". Negative Temperaturdifferenzen entsprechen einem Heizbetrieb positive Werte einem Kühlbetrieb

	Entnahmestellen EB1		Rückgabebrunnen RB1		Rückgabebrunnen RB2	
	Rate [l/s]	Temperaturdifferenz [K]	Rate [l/s]	Temperaturdifferenz [K]	Rate [l/s]	Temperaturdifferenz [K]
Januar	6,02	-	3,01	-4	3,01	-4
Februar	5,56	-	2,78	-4	2,78	-4
März	4,51	-	2,26	-4	2,26	-4
April	4,51	-	2,26	-3	2,26	-3
Mai	2,31	-	1,16	3	1,16	3
Juni	4,98	-	2,49	4	2,49	4
Juli	4,98	-	2,49	4	2,49	4
August	4,98	-	2,49	4	2,49	4
September	2,08	-	1,04	0	1,04	0
Oktober	3,47	-	1,74	-4	1,74	-4
November	4,51	-	2,26	-4	2,26	-4
Dezember	5,56	-	2,78	-4	2,78	-4



Falls sich die Betriebsdaten (Raten und Temperaturdifferenzen) eines Brunnens über das gesamte Jahr nicht unterscheiden, kann man diese durch die jeweilige Eingabe des entsprechenden Wertes angeben. Wählen Sie dazu "konstant" bei den Betriebsdaten des entsprechenden Brunnens aus und geben Sie die Werte ein, die für das gesamte Jahr gelten.

Betrachtungszeitraum und Diskretisierung	
Strömung	
Modellschichten	
Anlagen / Brunnen	
Dispersion	15.
Speichern	Zurück
<i>Bitte speichern Sie regelmäßig Ihre Eingaben.</i>	

15. Klicken Sie anschließend auf "Dispersion", um zum nächsten Menüpunkt zu gelangen.

Abbildung 13: Anlagen / Brunnen: Weiter zu Dispersion

2.3.5 Dispersion

Betrachtungszeitraum und Diskretisierung

Strömung

Modellschichten

Anlagen / Brunnen

Dispersion

1.

2. 3.

Speichern **Zurück**

Bitte speichern Sie regelmäßig Ihre Eingaben.

Dispersivität longitudinal [m]

7,5

Bitte geben Sie einen Wert für die longitudinale Dispersivität an.

Dispersivität transversal [m]

0,75

Bitte geben Sie einen Wert für die transversale Dispersivität an.

Abbildung 14: Dispersion

1. Behalten Sie die voreingestellten Standardwerte für die longitudinale und transversale Dispersivität von 7,5 und 0,75 m bei.
2. Klicken Sie auf **Speichern**
3. Klicken Sie auf **Zurück** um die Eingabe des Modellinputs zu verlassen.

2.4 Modellprüfung

Bei der Modellprüfung werden das Modellnetz sowie die Eingabedateien für den Simulator DuMu^x generiert.

Modell

Sie sind nun auf der Modellseite, die vier Bearbeitungsschritte umfasst. Zum Starten einer Modellberechnung benötigen Sie einen ausreichenden Token.
Verfügbare Stunden: 10 Std. 39 Min.

Bearbeitungsschritt	Status	Aktion
1 Modellinput	vollständig	<button>Bearbeiten</button>
2 Modellprüfung	ungeprüft	<button>Starten 1.</button>
3 Modellrechnung	Modell noch nicht geprüft	<button>Starten</button>
4 Ergebnisbericht		<button>Download</button>

[← Zurück](#)

1. Klicken Sie auf

Starten

Nach erfolgreicher Modellprüfung werden auf der Karte das errechnete Modellnetz sowie die Rückgabe- und Entnahmestellen angezeigt.

Klicken Sie auf ein Brunnensymbol auf der Karte, um die Betriebsdaten der Brunnen anzuzeigen (siehe Abbildung 16.).

Abbildung 15: Modellprüfung starten

Modell

Sie sind nun auf der Modellseite, die vier Bearbeitungsschritte umfasst. Bitte beginnen Sie mit 1 Modellinput und speichern Sie die Eingaben nach jedem Bearbeitungsschritt. Danach können Sie die Schritte 2-4 durchführen. Zum Starten einer Modellberechnung benötigen Sie einen ausreichenden Token.
Verfügbare Stunden: 10 Std. 39 Min.

Bearbeitungsschritt	Status	Aktion
1 Modellinput	vollständig	<button>Bearbeiten</button>
2 Modellprüfung	Modell bereit	<button>Starten</button>
3 Modellrechnung	Geschätzte Rechenzeit: 0 Std. 5 Min.	<button>Starten</button>
4 Ergebnisbericht		<button>Download</button>

[← Zurück](#)

Kartenlegende

- Allgemein
- Modellumrandung
- Modellnetz
- Rückgabebrunnen
- Entnahmestellen

The map displays the city of Freiburg with various streets and landmarks. A large blue grid represents the calculated model network, centered around the city center. Several orange dots represent extraction wells, located in specific areas of the city and its surroundings.

Abbildung 16: Ergebnis der Modellprüfung

2.5 Modellrechnung und Visualisierung der Ergebnisse

Die prognostizierte Dauer der Modellrechnung wird nach erfolgreicher Modellprüfung angezeigt. Sie können nun die Modellrechnung starten.

1. Klicken Sie auf
Starten

Modell

Sie sind nun auf der Modellseite, die vier Bearbeitungsschritte umfasst. Zum Starten einer Modellberechnung benötigen Sie Verfügbare Stunden: 10 Std. 39 Min.

Bearbeitungsschritt	Status	Aktion
1 Modellinput	vollständig	Bearbeiten
2 Modellprüfung	Modell bereit	Starten
3 Modellrechnung	Geschätzte Rechenzeit: 0 Std. 5 Min.	Starten 1.
4 Ergebnisbericht		Download

← Zurück

Abbildung 17: Modellrechnung starten

Während die Modellrechnung läuft, werden kontinuierlich die Ergebnisse aktualisiert. Zuerst wird das Modell „**Stationär mit Brunnen**“, welches die stationäre Strömung mit mittleren Brunnenentnahmen berechnet, dargestellt. Danach wird das **Transportmodell** (Berechnung Strömung + Transport auf Monatsbasis) gestartet.

Sobald das stationäre Modell abgeschlossen ist, werden die Isolinien der Piezometerhöhen unter **Modellergebnisse bei Modell: „Stationär mit Brunnen“** angezeigt und das instationäre Transportmodell gestartet. Die Ergebnisse des Transportmodells werden für jeden berechneten Monat automatisch aktualisiert.

Unter **Modellergebnisse bei Modell: "Transportmodell"** werden die Ergebnisse des Transportmodells angezeigt. Verschieben Sie die Regler „**Tiefe unter GOK**“ und „**Monat**“ am unteren linken Bildrand der Karte, um die Temperaturdifferenz über die Tiefe bzw. den Betrachtungszeitraum anzeigen zu lassen (siehe Abbildung 18). Die Abstufung des Tiefenreglers folgt der automatisch durch das Programm vorgenommenen vertikalen Diskretisierung im numerischen Modell. Die zeitlich variablen Piezometerhöhen sowie die Werte für Absenkung/Aufstau können über den Monatsregler variiert werden. Der Tiefenregler hat für diese beiden Größen keine Bedeutung, die Ergebnisse stammen aus der obersten Modellschicht im Oberen Grundwasserleiter.

Nach abgeschlossener Modellrechnung können die Ergebnisse als Shapefiles exportiert werden. Hierfür können Sie den „Export Shapefiles“ Button drücken. In den Shapefiles enthalten sind die stationären Piezometerhöhen mit Brunnenbetrieb (mittlere Raten), Werte für den maximalen Aufstau und die maximale Absenkung sowie für die maximale Abkühlung und maximale Erwärmung über alle Tiefen im Modellgebiet während des Simulationszeitraums. Die Konturen in den Shapefiles sind identisch mit den Konturen im standardisierten Ergebnisbericht.

Weiterhin können Sie sich bei aktiviertem Modellnetz durch Klicken auf einen Punkt im Modellgebiet Ganglinien von Piezometerhöhe, Absenkung/Aufstau und Temperaturdifferenz an dieser Position anzeigen lassen (Abbildung 19.). Bitte beachten Sie, dass hierfür auch die gewünschte Tiefe mit dem Regler gewählt werden muss. Weiterhin müssen, sofern Sie einen Punkt innerhalb einer Ergebnisgeometrie wählen, die Geometrien „Absenkung/Aufstau“ und „Temperaturdifferenz“ abgewählt sein.

Modell

Sie sind nun auf der Modellseite, die vier Bearbeitungsschritte umfasst. Bitte beginnen Sie mit 1 Modellinput und speichern Sie die Eingaben nach jedem Bearbeitungsschritt. Danach können Sie die Schritte 2-4 durchführen. Zum Starten einer Modellberechnung benötigen Sie einen ausreichenden Token. Verfügbare Stunden: 10 Std. 32 Min.

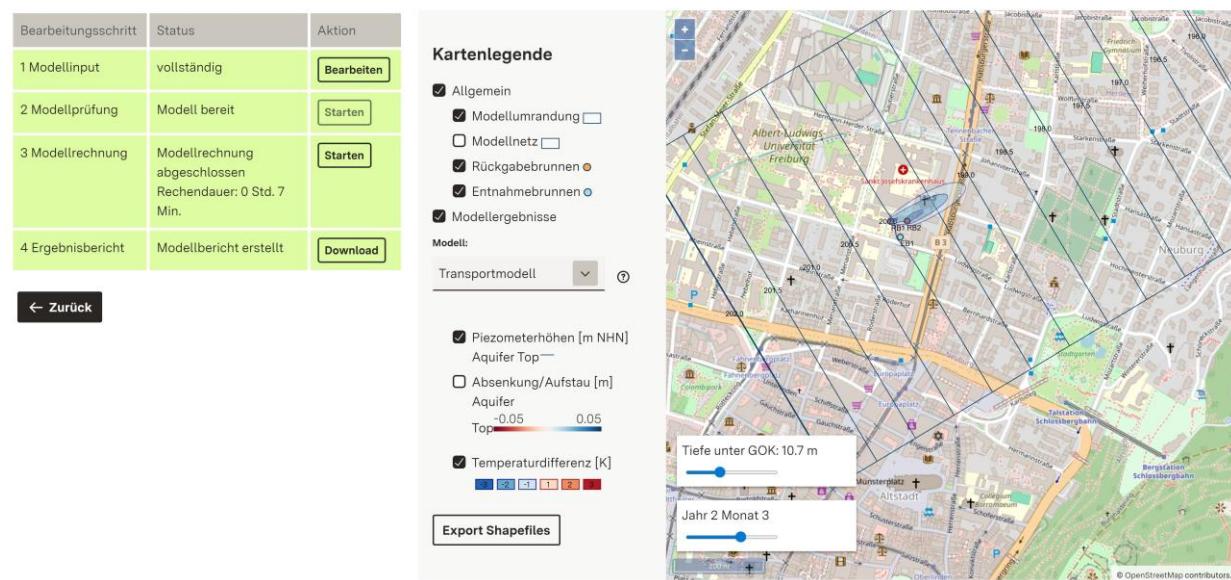


Abbildung 18: Ergebnis der Modellrechnung



! Es können die Ergebnisse der stationären Strömungssimulation oder der instationären Strömungs- und Transportsimulation angezeigt werden.

Das Anzeigen der Ergebnisse (Piezometerhöhe, Aufstau/Absenkung, Temperaturdifferenz) lässt sich durch Setzen oder Entfernen der Haken steuern.

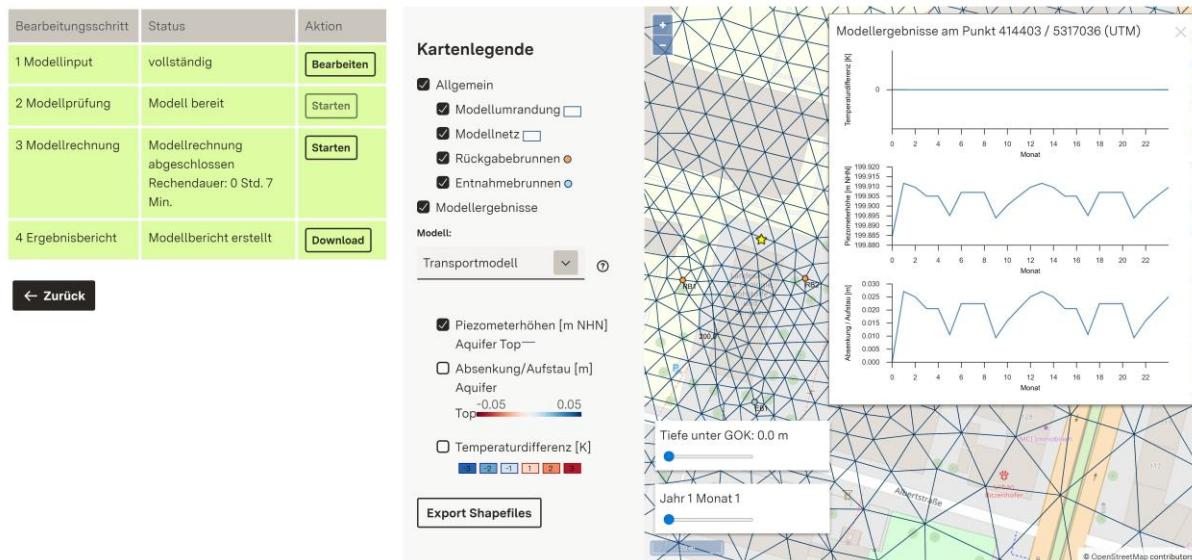


Abbildung 19: Darstellung von Ganglinien nach abgeschlossener Modellrechnung

! Es ist zu beachten, dass Piezometerhöhen sowie Absenkungen und Aufstau in unmittelbarer Nähe der Brunnen unterschätzt werden, da die Diskretisierungsweite nicht für diesen Zweck ausgelegt ist und Brunnenverluste im Modell nicht berücksichtigt werden.

2.6 Ergebnisbericht

Modell

Sie sind nun auf der Modellseite, die vier Bearbeitungsschritte umfasst. Bitte beginnen Sie mit 1 Modellinput und speichern Sie die Eingaben nach jedem Bearbeitungsschritt. Danach können Sie die Schritte 2-4 durchführen. Zum Starten einer Modellberechnung benötigen Sie einen ausreichenden Token. Verfügbare Stunden: 10 Std. 32 Min.

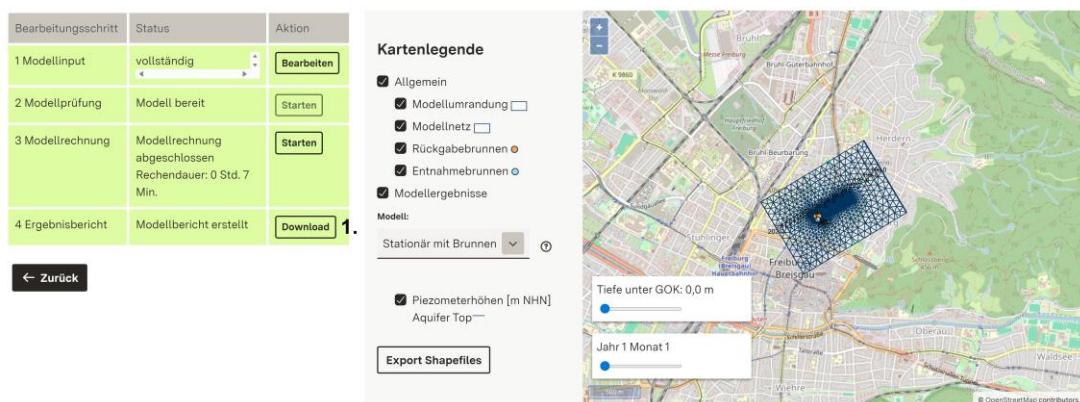


Abbildung 20: Download des Ergebnisberichts

1. Klicken Sie auf **Download**

Der Ergebnisbericht wurde bereits im Voraus im Zuge der Modellrechnung automatisch erstellt und erscheint direkt bei den Downloads.

2. Klicken Sie auf "Öffnen mit" und wählen Sie ein Programm, mit dem Sie den Bericht öffnen wollen (z. B. Adobe Reader).

3. Klicken Sie auf **OK**

LGRBtom: Ergebnisbericht des Modells Modellbeispiel

1. Modellinput

1.1 Betrachtungszeitraum und Diskretisierung

- Betrachtungszeitraum (Jahre): 2 - Räumliche Diskretisierung: Hoch aufgelöst

1.2 Strömung

- Strömungsrichtung: 60.0 ° - Hydraulischer Gradient: 0.005

Angaben zum Bezugspunkt für den Grundwasserstand:

- Grundwasserstand Bezugspunkt: 200.0 m ü.NN - Bezugspunkt X UTM: 562380.00 m - Bezugspunkt Y UTM: 5347023.00 m

1.3 Modellschichten

Berechnung mit konstanter Transmissivität

Tab. 1.1: Modellschichten und deren Eigenschaften

Bezeichnung	Mächtigkeit [m]	Kf-Wert [m/s]	Porosität [-]	Abstandsgeschwindigkeit [m/d]	Wärmeleitfähigkeit poröses Medium [W/m*K]	Volumenbezogene spez. Wärmekapazität poröses Medium [MJ/(m³*K)]
Grundwasser-überdeckung	5.0	-	-	-	0.5	1.6
Oberer Aquifer	20.0	0.0015	0.15	4.32	1.8	2.4
Liegendes	5.0	0.00025	0.15	0.72	1.8	2.4

1.4 Dispersion

- Dispersion longitudinal: 7.5 m - Dispersion transversal: 0.75 m

1.5 Anlagen / Brunnen

Tab. 1.2: Übersicht der Eigenschaften der Anlagen und Brunnen

Anlage	Brunnen	Brunnentyp	Tiefe Filter-oberkante [m]	Tiefe Filter-unterkante [m]	Mittlere Rate [l/s]	X UTM [m]	Y UTM [m]
Beispielanlage	EB1	Entnahme	10.5	16.5	4.46	562380.00	5347023.00
Beispielanlage	RB1	Rückgabe	5.0	19.0	2.23	562510.95	5346924.04
Beispielanlage	RB2	Rückgabe	5.0	19.0	2.23	562496.96	5346949.03

Abbildung 21: Auszug des Ergebnisberichts

!

Der Ergebnisbericht enthält im Inputteil eine Übersicht über alle Inputparameter sowie die Betriebsdaten aller Brunnen. Im Ergebnisteil werden anhand von Kartenausschnitten die stationären Piezometerhöhen mit Brunnen, der maximale Aufstau und die maximale Absenkung sowie die maximale Abkühlung und maximale Erwärmung über alle Tiefen im Modellgebiet während des Simulationszeitraums veranschaulicht. Anschließend werden die Strömungs- und Energiestrombilanzen dargestellt. Schließlich werden ausgewählte Temperaturganglinien im Abstrom der Brunnen und Temperaturganglinien an den Entnahmestellen angezeigt. Temperaturganglinien an den Entnahmestellen dienen zur Überprüfung, ob es zu einer Beeinflussung durch andere Brunnen kommt. In Kapitel 4.2 wird anhand eines Fallbeispiels ausführlicher auf die Ergebnisse im standardisierten Bericht eingegangen.

Bitte beachten Sie, dass bei einem thermischen Kurzschluss innerhalb einer Anlage eine verlässliche Temperaturfeldberechnung mit LGRBtom nicht mehr möglich ist, da der Effekt der Rückkopplung der beeinflussten Temperaturen im Entnahmestellen nicht zu einer Temperaturveränderung im Rückgabebrunnen führt. Der thermische Kurzschluss kann somit von LGRBtom detektiert werden, jedoch nicht abschließend quantifiziert werden.

3 Grundlagen der Wärmeausbreitung und Modellaufbau

3.1 Mechanismen der Wärmeausbreitung im Grundwasser

Zur Berechnung der Strömungsverhältnisse in Porengrundwasserleitern wird in den meisten Fällen die Darcy-Gleichung herangezogen:

$$v_f = k_f \cdot I \quad Gl. 1$$

mit:

v_f = Filtergeschwindigkeit [$m s^{-1}$]

I = Hydraulischer Gradient [-]

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserleiters [$m s^{-1}$]

Eine wichtige Größe zur Abschätzung des Einflusses eines Brunnens auf ein Strömungsfeld ist die sogenannte Entnahmehöhe bzw. Infiltrationsbreite. Diese lässt sich aus der Darcy- und Kontinuitätsgleichung herleiten und ist wie folgt definiert:

$$b = \frac{Q}{mk_f I} \quad Gl. 2$$

mit:

b = Entnahmehöhe bzw. Infiltrationsbreite [m]

Q = Entnahme bzw. Infiltrationsrate [$m^3 s^{-1}$]

m = Mächtigkeit des Grundwasserleiters [m]

Wird ein Stoff in einer Grundwasserströmung transportiert, erfolgt dies nur im durchflusswirksamen Porenraum. Die Transport- bzw. Abstandsgeschwindigkeit ergibt sich somit unter Berücksichtigung der durchflusswirksamen oder effektiven Porosität (Hohlraumanteil) zu:

$$v_a = \frac{v_f}{n} \quad Gl. 3$$

mit:

v_a = Abstandsgeschwindigkeit [$m s^{-1}$]

n_e = effektive Porosität [-]

Die Ausbreitung eines Stoffes mit der Abstandsgeschwindigkeit wird auch als Advektion bezeichnet.

Weiterhin unterliegt ein im Porenraum transportierter Stoff einer Vermischung, welche vor allem auf mikro- und makroskalige Inhomogenitäten des Untergrunds zurückzuführen ist (Söll 1988, Rausch et. al. 2005). Diese Vermischungsprozesse werden durch die sogenannte hydrodynamische Dispersion beschrieben. Die hydrodynamische Dispersion ist eine Funktion der Abstandsgeschwindigkeit und der sogenannten Dispersivität. Es wird unterschieden zwischen longitudinaler Dispersion (in Strömungsrichtung) und transversaler Dispersion (quer zur Strömungsrichtung):

$$D_L = v_a \cdot \alpha_L$$

Gl. 4

$$D_T = v_a \cdot \alpha_T$$

mit:

D_L = longitudinale Dispersion [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]

D_T = transversale Dispersion [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]

α_L = longitudinale Dispersivität [m]

α_T = transversale Dispersivität [m]

Die Abschätzung der longitudinalen und auch der transversalen Dispersivitäten für einen Standort ist mit großen Unsicherheiten verknüpft, wenn keine zusätzlichen Messdaten vorliegen, wie es meist der Fall ist. Auf der hier relevanten Makroskala ist vor allem der Grad der Inhomogenität für die Größe der Dispersion relevant. Um den Anwendern von LGRBtom geeignete Werte für die Dispersivität an die Hand zu geben, wird hier der in Zech et al. (2022) formulierten Klassifizierung in schwach, mittel und stark heterogene Systeme gefolgt, welche auf der Auswertung verschiedener als valide befundener Feldexperimente aus der Literatur basiert. Zech et al. (2015) zeigen, dass kein allgemeiner Zusammenhang zwischen longitudinaler Dispersivität und Gebietsgröße besteht, wie er von Gelhar et al. (1992) postuliert wurde. Daher wird in dieser Arbeit der von Zech et al. (2022) vorgeschlagenen Klassifizierung gefolgt. Eine Übersicht der Einteilung der longitudinalen Dispersivitäten ist in Tabelle 3.1 aufgeführt. Der in LGRBtom hinterlegte Standardwert für die longitudinale Dispersivität basiert auf der Annahme eines Systems mit hoher Dispersivität.

Die Auswertung der in Gelhar et al. (1992) sowie Zech et al. (2022) untersuchten Feldexperimente zeigt, dass die transversale Dispersivität deutlich geringer ist als die longitudinale. Da in den meisten Anwendungsfällen keine konkreten Ergebnisse vorliegen, wird die transversale Dispersivität oft um einen Faktor von 10 kleiner als die longitudinale Dispersivität angenommen.

Tabelle 3.1: Klassifizierung der longitudinalen Dispersivität anhand des Grads der Heterogenität, entnommen und angepasst aus Zech et al. (2022)

Grad der Heterogenität	Anzahl Feldexperimente	Mittelwert α_L (m)	Beschreibung
1—schwach	13	1,1	Geeignet für sandige Grundwasserleiter mit einem kleinen Anteil an Schluff/Ton und/oder Kies.
2—mittel	10	3,2	Grundwasserleiter mit Materialien von Kies bis Sand und etwas Schluff/Ton.
3—hoch	7	7,5	Grundwasserleiter mit einer großen Vielfalt an Materialien – von Kies bis Schluff/Ton – in ähnlichen Anteilen.

Bei der Wärmeausbreitung in Grundwasserleitern sind grundsätzlich folgende Mechanismen beteiligt:

- Ausbreitung mit der Abstandsgeschwindigkeit (Advektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Vermischung durch Wärmeleitung (Konduktion)
- Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst

Im Gegensatz zum Stofftransport ist beim Wärmetransport zusätzlich die Wärmeleitung (Konduktion λ in $J\ s^{-1}\ K^{-1}\ m^{-1}$) zu berücksichtigen, welche ähnlich wie die hydrodynamische Dispersion zu einer Vermischung in Strömungsrichtung und quer zur Strömungsrichtung führt.

Die Konduktion führt auch dazu, dass sich die Wärme im Korngerüst ausbreiten kann, was zu einer verlangsamten Ausbreitung der Wärme im Grundwasser (Retardation) im Vergleich zum Stofftransport führt. Die Transportgeschwindigkeit der Temperatur mit Retardation ist wie folgt definiert:

$$v_T = \frac{v_a}{R} \quad \text{Gl. 5}$$

mit:

v_T = Transportgeschwindigkeit Temperatur [$m\ s^{-1}$]

R = Retardationsfaktor [-]

Die Retardation ist eine Funktion der spezifischen Volumenwärme des Wassers und des Gesteins (Korngerüst):

$$R = \frac{nc_w + (1 - n)c_s}{nc_w} \quad \text{Gl. 6}$$

mit:

c_w = Spezifische Volumenwärme Wasser [$\text{J K}^{-1} \text{ m}^{-3}$]

c_s = Spezifische Volumenwärme Gestein [$\text{J K}^{-1} \text{ m}^{-3}$]

n_e = effektive Porosität [-]

Eine Zusammenstellung der entsprechenden geohydraulischen Kennwerte findet sich beispielsweise in Tabelle 1 der Richtlinie VDI 4640 Blatt 1. Daraus geht hervor, dass die Kennwerte für verschiedene Gesteine erheblich schwanken. Tabelle 3.2 zeigt die Bandbreite dieser Unterschiede. Für den Retardationsfaktor R (Gl. 6) ergibt sich somit nach Tabelle 3.2 eine Bandbreite von 2 bis 4. Dies bedeutet, dass sich die Wärme um einen Faktor 2 bis 4 langsamer ausbreitet als ein gelöster Stoff im Grundwasser.

Tabelle 3.2: Thermohydraulische Eigenschaften des Untergrundes gemäß Tabelle 1 der Richtlinie VDI 4640 Blatt 1

Kennwerte	Wasser	Gestein
Volumenbezogene spezifische Wärmekapazität [$\text{MJ K}^{-1} \text{ m}^{-3}$]	4,2	1,0 - 3,0
Wärmeleitfähigkeit [$\text{J s}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-1}$]	0,6	0,4 - 4,1

Zur Bestimmung des durch die Einspeisung verursachten netto Energiestroms aus der Infiltrationsrate und Temperaturdifferenz zwischen Einleittemperatur und Grundwassertemperatur kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$\Delta \dot{E} = c_w Q \Delta T \quad \text{Gl. 7}$$

Mit:

$\Delta \dot{E}$ = Netto Energiestrom [J/s]

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen Einleittemperatur und Grundwassertemperatur [K]

Aus experimentellen Studien stehen häufig nur phasengemittelte Werte der thermohydraulischen Parameter des Untergrunds für verschiedene Gesteinstypen zur Verfügung, d. h. es werden Werte für verschiedene Gesteinstypen abhängig vom Sättigungsgrad angegeben, z. B. Sand trocken, Sand feucht oder Sand wassergesättigt. Aus diesem Grund erfolgt die Eingabe der thermohydraulischen Parameter in LGRBtom mit phasengemittelten Werten und ist somit direkt kompatibel

zu den in Tabelle 1 der Richtlinie VDI 4640 Blatt 1 aufgeführten Werten der Wärmeleitfähigkeit und der volumenbezogenen spezifische Wärmekapazität verschiedener Gesteinstypen. Im Modellinput in LGRBtom sowie in den folgenden Ausführungen werden diese phasengemittelten Parameter als „Wärmeleitfähigkeit poröses Medium“ bzw. „Volumenbezogene spezifische Wärmekapazität poröses Medium“ bezeichnet.

3.2 Simulation der Wärmeausbreitung mit DuMu^x

Zur Simulation der Wärmeausbreitung wird der numerische Simulator DuMu^x herangezogen, welcher seit 2007 vorrangig am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung an der Universität Stuttgart entwickelt wird (Flemisch et. al, 2011, <https://dumux.org>). DuMu^x ist ein Open-Source Simulator, der die Strömung und Wärmetransport in porösen Medien in 3D berechnet. Das Ziel ist die Entwicklung eines nachhaltigen und konsistenten Rahmens für die Implementierung und Anwendung von Modellkonzepten.

Für LGRBtom werden in DuMu^x ein Strömungs- und ein Wärmetransportmodell verwendet. In jedem Zeitschritt wird zuerst das Strömungsmodell aufgerufen. Das berechnete Strömungsfeld wird dann an das Wärmetransportmodell übergeben. Eine Rückkopplung von Transport zu Strömung findet nicht statt, da die Annahme getroffen wird, dass der Wärmetransport sich nicht auf die Strömung auswirkt (isotherme Strömung, das heißt keine temperaturabhängige Dichte oder Viskosität des Grundwassers). Der Simulationsprozess für einen Zeitschritt ist in Abbildung 22 veranschaulicht.



Abbildung 22: Ablauf der Strömungs- und Transportsimulation in DuMu^x für einen Zeitschritt

In LGRBtom kommt das folgende, in DuMu^x implementierte Strömungsmodell zum Einsatz (Abbildung 22):

- Ein-Phasen-Modell (1p-Modell) mit Wasser als einziger Fluid-Phase
- Konstante Transmissivität unabhängig vom Grundwasserstand
- Berechnung monatlich varierender Brunnenraten
- Berechnung von stationärem Strömungsfeld für jeden Monat im Betrachtungszeitraum (siehe zu dieser Annahme weitere Ausführungen in Anhang A)

Im Wärmetransportmodell werden folgende Prozesse beim Transport berücksichtigt:

- Advektion
- Hydrodynamische Dispersion
- Wärmeleitung in Gestein und Fluid (Konduktion)
- Wärmespeicherung in Gestein und Fluid

3.3 Modellaufbau und Randbedingungen

In diesem Abschnitt werden der Modellaufbau und die Randbedingungen von LGRBtom beschrieben. Abbildung 23 zeigt eine Draufsicht des Modellgebiets mit den Randbedingungen. Zu- und Abstromrand im Modellgebiet sind Festpotentialränder (konstante Piezometerhöhe und konstante Temperaturdifferenz). Energie- und Massenströme werden über diese Ränder in das Modell ein- bzw. ausgetragen. Der Unterschied der Piezometerhöhen am Zu- und Abstromrand wird durch den im Modellinput gegebenen hydraulischen Gradienten festgelegt (Kapitel 2.3.2).

Die Temperaturdifferenz (Abweichung der Grundwassertemperatur im Modell von der unbeeinflussten Grundwassertemperatur) liegt am Zustromrand konstant bei 0 K. Im Abstrom Rand verlässt der Wärmefluss über eine sogenannte „Outflow“ Randbedingung das Modellgebiet.

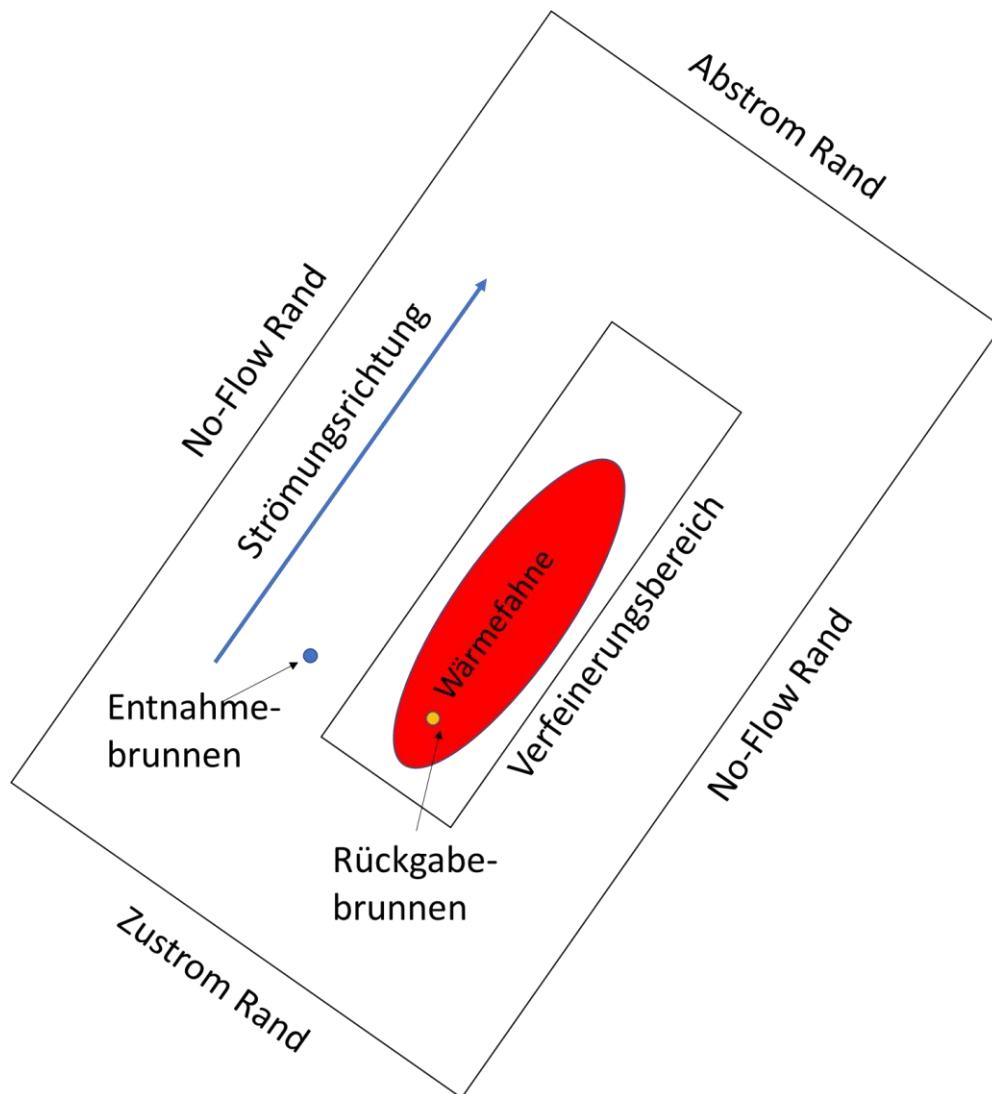


Abbildung 23: Aufsicht auf das Modellgebiet mit Randbedingungen

Die Ränder parallel zur Strömungsrichtung sind sogenannte „No-Flow-Ränder“, d. h. sie sind geschlossen und es findet kein Austausch von Masse oder Energie über diese Ränder statt.

Wie in Abbildung 23 dargestellt, enthält das Modell einen automatisch erzeugten Verfeinerungsbereich. Hier wird das Modellnetz verfeinert, um die Wärmetransportprozesse numerisch korrekt abbilden zu können. Der Bereich wird über Abschätzungen der Fahnenlänge und -breite mittels einer analytischen Lösung bestimmt. Bei der hierfür herangezogenen analytischen Lösung handelt es sich um das in Popilliat et. al. (2018) erläuterte „planar advective heat transport model“ (PAHM). Das PAHM geht vom Energieeintrag über eine Linienquelle und nicht von einer Punktquelle aus. Die Länge der Linienquelle kann an die Entnahmebreite (siehe Gl. 2) angepasst werden. Dies hat den Vorteil, dass auch Situationen mit hoher Entnahmebreite zuverlässig abgeschätzt werden können.

Die laterale Ausdehnung des Modellgebiets wird anhand der Fahnenlänge (1 K Isotherme) sowie der Entnahmebreite (siehe Gl. 2) der Anlagen abgeschätzt.

Im Falle eines Wärmeeintrags (Erwärmung des Grundwassers) wird die Wärme im Modell gespeichert, zusätzlich kann abhängig von der Parametrisierung des Modells ein Wärmeaustausch über beeinflusste Entnahmestellen, den Austausch mit der Atmosphäre oder über den Abstromrand erfolgen. Dies gilt mit umgekehrten Vorzeichen auch für eine Abkühlung des Grundwassers.

Abbildung 24 zeigt schematische Schnitte durch mögliche Modellgebiete. Das Modellgebiet setzt sich neben der Grundwasserüberdeckung aus zwei hydrogeologischen Einheiten zusammen, dem oberen Grundwasserleiter und dem Liegenden, welches ein Grundwasserleiter oder ein Grundwassergeringleiter sein kann. Ist das Liegende ein Grundwasserleiter, werden Strömungs- und Transportprozesse analog zum oberen Grundwasserleiter berücksichtigt. Die Brunnen können sowohl im oberen Grundwasserleiter als auch im Liegenden verfiltert sein. Ist das Liegende ein Grundwassergeringleiter, erfolgt nur ein konduktiver Wärmeaustausch vom oberen Grundwasserleiter zum Liegenden. Aufgrund der No-Flow Randbedingung an der Basis des Liegenden erfolgt kein weiterer Wärmeaustausch mit tieferen Schichten.

Der obere Grundwasserleiter wird von der Grundwasserüberdeckung überlagert, bei der es sich um eine Deckschicht oder den ungesättigten Teil des Grundwasserleiters bzw. eine Kombination aus beidem handeln kann (siehe hierzu Fallbeispiele in Kapitel 4.5). In der Grundwasserüberdeckung finden keine Strömungsprozesse statt, es erfolgt ein rein konduktiver Wärmeaustausch mit der Atmosphäre.

Die vertikalen Randbedingungen und schichtbezogenen thermohydraulischen Prozesse der Modelle in LGRBtom sind in Abbildung 24 ergänzend mit dargestellt. Masse und Energie können das System nicht über die Basis des Liegenden verlassen (No-Flow-Randbedingung). Energie kann über den Modelltop rein konduktiv ein- bzw. ausgetragen werden. Hierfür ist ein Festpotentialrand mit einer konstanten Temperaturdifferenz von 0 K am Übergang zur Atmosphäre implementiert. Masse kann nicht über die Modelloberkante ausgetragen werden.

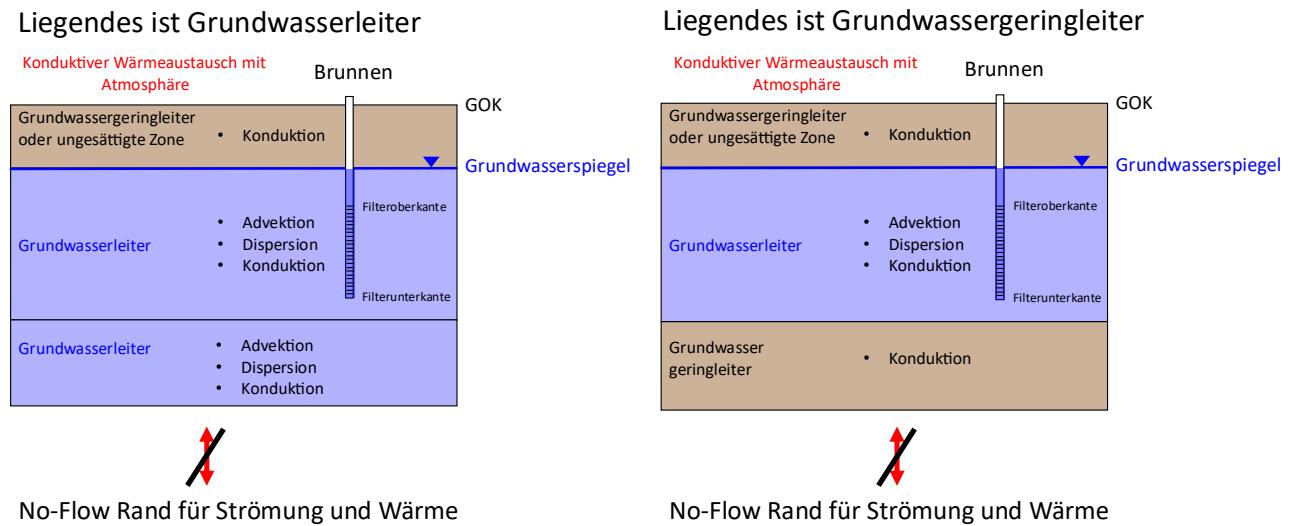


Abbildung 24: Hydrogeologische Einheiten; Transportprozesse und vertikale Randbedingungen für Strömung und Transport in LGRBtom.

3.4 Räumliche und zeitliche Diskretisierung des Modells

DuMu^x verwendet die sog. Box-Methode für die räumliche Diskretisierung (Helmig, 1997). Dabei handelt es sich um eine knotenzentrierte Finite-Volumen Methode, welche unstrukturierte Modellnetze wie bei Verwendung der Finite-Elemente Methode erlaubt. Die für den Transport notwendige Diskretisierungslänge innerhalb des Verfeinerungsbereichs (Abbildung 23) wird mit Hilfe der Gitter-Peclet Zahl bestimmt. Die dimensionslose Gitter-Peclet Zahl (Pe) setzt die advektiven und diffusiven Anteile des Transports in Relation:

$$Pe = \frac{v_a L_{ch}}{\alpha_L v_a + \lambda/c} \quad Gl. 8$$

mit:

v_a = Abstandsgeschwindigkeit [m s⁻¹]

L_{ch} = Charakteristische Länge, hier: Kantenlänge der Dreieckselemente [m]

α_L = Longitudinale Dispersivität [m]

λ = Wärmeleitfähigkeit poröses Medium [W K⁻¹ m⁻¹]

c = Volumenbezogene spez. Wärmekapazität poröses Medium [J K⁻¹ m⁻³]

Der Zähler enthält die advektiven Anteile (Abstandsgeschwindigkeit) und der Nenner die diffusiven bzw. konduktiven Anteile (Dispersion $\alpha_L v_a$ + Konduktion λ/c). Die Konduktion wird dabei aus dem Quotienten der Wärmeleitfähigkeit poröses Medium (λ) und der volumenbezogenen spez. Wärmekapazität poröses Medium (c) für das mit Grundwasser gesättigte Gestein gebildet. Die Gitter-Peclet Zahl sollte, um

Oszillationen in der Transportlösung zu vermeiden, ≤ 2 sein (z. B. Kinzelbach und Rausch, 1995). Bei vorgegebener Gitter-Peclet Zahl kann die notwendige Diskretisierungslänge L_{ch} im Verfeinerungsbereich bestimmt werden.

In LGRBtom ist eine Gitter-Peclet Zahl von 2 voreingestellt („Standard“). Im Modellinput kann die räumliche Diskretisierung bei Bedarf auch auf „Hoch aufgelöst“ gestellt werden, dies entspricht einer Gitter-Peclet Zahl von 1 (Kapitel 2.3.1). Daraus folgt, dass die Modellqualität „Standard“ eine doppelte so große Diskretisierungslänge L im Verfeinerungsbereich aufweist, wie die Modellqualität „Hoch aufgelöst“. Dies bedeutet weiterhin, dass die Diskretisierung „Hoch aufgelöst“ ungefähr die vierfache Zahl an Elementen hat und damit auch etwa die vierfache Rechenzeit benötigt, wie die Diskretisierung „Standard“. In der Praxis zeigt sich, dass die Diskretisierung „Standard“ in den meisten Fällen ausreichend ist. Ein Vergleich der Diskretisierung mit „Standard“ und „Hoch aufgelöst“ ist im Fallbeispiel in Kapitel 4.5 gegeben.

Die vertikale Diskretisierung wird automatisch so eingestellt, dass die Modellschichten (Grundwasserüberdeckung, Oberer Grundwasserleiter und Liegendes) in 3 m Abständen unterteilt werden. Haben die entsprechenden Schichten eine Mächtigkeit geringer als 3 m, erfolgt automatisch eine feinere Unterteilung. Die Brunnen werden automatisch den nächsten Knoten innerhalb der vom Nutzer angegebenen Filterstrecke zugewiesen. Diese Modellvereinfachungen können vom Anwender nicht modifiziert werden.

Es ist zu beachten, dass Piezometerhöhen sowie Absenkungen und Aufstau in unmittelbarer Nähe der Brunnen unterschätzt werden, da die Diskretisierungsweite nicht für diesen Zweck ausgelegt ist und Brunnenverluste im Modell nicht berücksichtigt werden.

DuMu^x verwendet eine automatische Zeitschrittsteuerung, welche die Zeitschritte gemäß dem Konvergenzverhalten steuert. Die betrieblichen Randbedingungen (Raten, Temperaturdifferenzen) werden monatlich variiert.

3.5 Bestimmung der Mächtigkeit des Liegenden

Bei geringen Abstandsgeschwindigkeiten im Liegenden ($< 0,1$ m/Tag) ist die Wärmeausbreitung mit der Strömung (Advektion) und damit auch die disperse Vermischung vernachlässigbar. Die Wärmeausbreitung findet über Wärmeleitung (Konduktion) statt. Um für diesen Fall eine sinnvolle Abschätzung der benötigten Mächtigkeit des Liegenden zu erhalten, kann die Konduktionslänge herangezogen werden. Mit ihr lässt sich die Wärmeausbreitung in der vertikalen Richtung abschätzen:

$$L = \sqrt{\frac{\lambda}{c} \cdot t} \quad \text{Gl. 9}$$

mit:

L = Konduktionslänge [m]

λ = Wärmeleitfähigkeit poröses Medium [$\text{W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$]

c = Volumenbezogene spez. Wärmekapazität poröses Medium [$\text{J K}^{-1} \text{ m}^{-3}$]

t = Betrachtungszeitraum [s]

Die Konduktionslänge L muss noch mit dem Verhältnis aus anstehender Temperaturänderung an der Basis des Oberen Grundwasserleiters und der gesuchten Isotherme (z. B. ± 1 K Isotherme) skaliert werden. Für die anstehende Temperaturänderung kann z. B. die Temperaturdifferenz am Rückgabebrunnen herangezogen werden. Gl. 9 kann hierfür wie folgt angepasst werden:

$$L_{Mod} = \sqrt{\frac{\Delta T_E \lambda}{\Delta T c} \cdot t} \quad \text{Gl. 10}$$

mit:

ΔT_E = Unterschied Einleittemperatur und Grundwassertemperatur [K]

ΔT = Gesuchte Isotherme [K]

L_{Mod} = Um Verhältnis aus Einleittemperatur und gesuchter Isotherme modifizierte Konduktionslänge L [m]

Für Fälle, bei denen das Liegende einen Grundwassergeingleiter darstellt, gibt es in LGRBtom die Möglichkeit, sich die zu berücksichtigende Mächtigkeit des Liegenden automatisch mit Hilfe der Konduktionslänge aus Gl. 10 berechnen zu lassen. Hierfür wird vereinfachend ein Verhältnis $\frac{\Delta T_E}{\Delta T}$ von 4 angenommen. Diese Annahme beruht auf den in Kapitel 4.6 durchgeführten Simulationsläufen für verschiedene hydrogeologische Situationen. Dabei wurden für die jeweilige Situation zwei Simulationsläufe mit (i) einer durch LGRBtom automatisch nach Gleichung Gl. 10 berechneten Mächtigkeit des Liegenden und (ii) mit einer Mächtigkeit des Liegenden von 50 m durchgeführt. Bei (ii) kann eine Beeinflussung der No-Flow Randbedingung an der Modellbasis auf die Temperaturentwicklung ausgeschlossen werden. Der Vergleich zeigt, dass die Unterschiede der Fahnenlängen bei einem Verhältnis $\frac{\Delta T_E}{\Delta T}$ von 4 sehr gering sind und die Abschätzung der benötigten Mächtigkeit des Liegenden somit eine gute Näherung darstellt.

4 Fallbeispiele

Die in diesem Kapitel gezeigten Fallbeispiele beruhen z. T. auf umgesetzten Projekten. Zu diesen Lokalitäten besteht keinerlei realer Bezug bzgl. der gewählten Parametrisierung oder der Anlagengestaltung. Zur Veranschaulichung bestimmter Sachverhalte wurden mit LGRBtom neun Fallbeispiele berechnet, z. T. mit Untervarianten, deren Ergebnisberichte in den Anlagen 1-15 dokumentiert sind.

4.1 Testfeld Aefligen

Zur Veranschaulichung der Übereinstimmung der Ergebnisse aus LGRBtom mit vor Ort gemessenen Temperaturen in einem realen Anwendungsfall wird hier das Testfeld Aefligen als realistisches Fallbeispiel herangezogen, da hier öffentlich zugängliche Daten zu einer Kaltwasserinfiltration vorliegen, welche in Kobus (1992) und Söll (1988) detailliert dokumentiert sind. Die Federführung der Untersuchungen erfolgte durch das Wasser- und Energiewirtschaftsamt Bern/Schweiz in den Jahren 1980 bis 1986. Die Ausbreitung der Temperaturfahne aus kaltem Wasser wurden über Messungen in mehreren Grundwassermessstellen erfasst. Im Folgenden wird die Kaltwasserausbreitung mit LGRBtom simuliert und mit den Messwerten verglichen.

Der komplette, mit LGRBtom automatisch erstellte Bericht zu diesem Fallbeispiel befindet sich in Anlage 1.

Im Testfeld gibt es drei Messstellen (siehe Lageplan in Abbildung 25):

- TO915 (37 m Entfernung zum Rückgabebrunnen)
- TO508 (105 m Entfernung zum Rückgabebrunnen)
- WAT48 (200 m Entfernung zum Rückgabebrunnen)

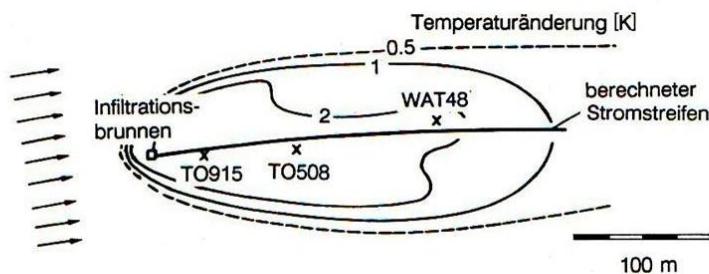


Abbildung 25: Lageplan Testfeld Aefligen (Kobus 1992)

Der Grundwasserleiter hat eine Mächtigkeit von ca. 20 m und ist heterogen aufgebaut, wie die vertikale k_f -Wert Verteilung in Abbildung 26 zeigt. Der tiefengemittelte k_f -Wert liegt bei $5,9 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Bereichsweise nimmt der gemessene k_f -Wert aber auch

Werte von ca. 2 bis 3×10^{-2} m/s an. Der hydraulische Gradient liegt bei $2,5 \times 10^{-3}$ und die effektive Porosität bei 0,15. Daraus lässt sich eine tiefengemittelte Abstandsgeschwindigkeit von 8,5 m/Tag bestimmen. Die ungestörte Grundwassertemperatur liegt bei ca. 10°C.

Der Grundwasserleiter hat eine Überdeckung von 2,5 m Mächtigkeit. In LGRBtom wird die Wärmeausbreitung im Liegenden durch eine 40 m mächtige hydraulisch gering durchlässige Schicht abgebildet.

Die Infiltrationsphase dauerte vier Monate, von Dezember 1982 bis einschließlich März 1983. Der zeitliche Verlauf der Infiltrations-Temperaturdifferenz (Differenz zur mittleren Grundwassertemperatur) ist in Abbildung 27 dargestellt (blaue Punkte). Die Monatsmittelwerte der Infiltrationsdifferenztemperatur schwankten zwischen -4 und -7,5°.

Für die Eingabe in LGRBtom wurden Monatsmittelwerte für die Monate Januar bis einschließlich April verwendet (orange Linien in Abbildung 27). Die Infiltrationsrate lag im Mittel bei 16,7 l/s und wurde als konstant in LGRBtom für die Monate Januar bis April angenommen (siehe Tab. 1.3 und 1.7 in Anlage 1).

Ausgehend vom hydrogeologischen Modell und der Infiltrationsrate wurde die longitudinale und transversale Dispersivität in LGRBtom (siehe Kapitel 2.3.5) mit 3,4 m bzw. 0,34 m angesetzt. Die gewählten Dispersivitätswerte entsprechen einem mittleren Grad an Heterogenität in Tabelle 3.1.

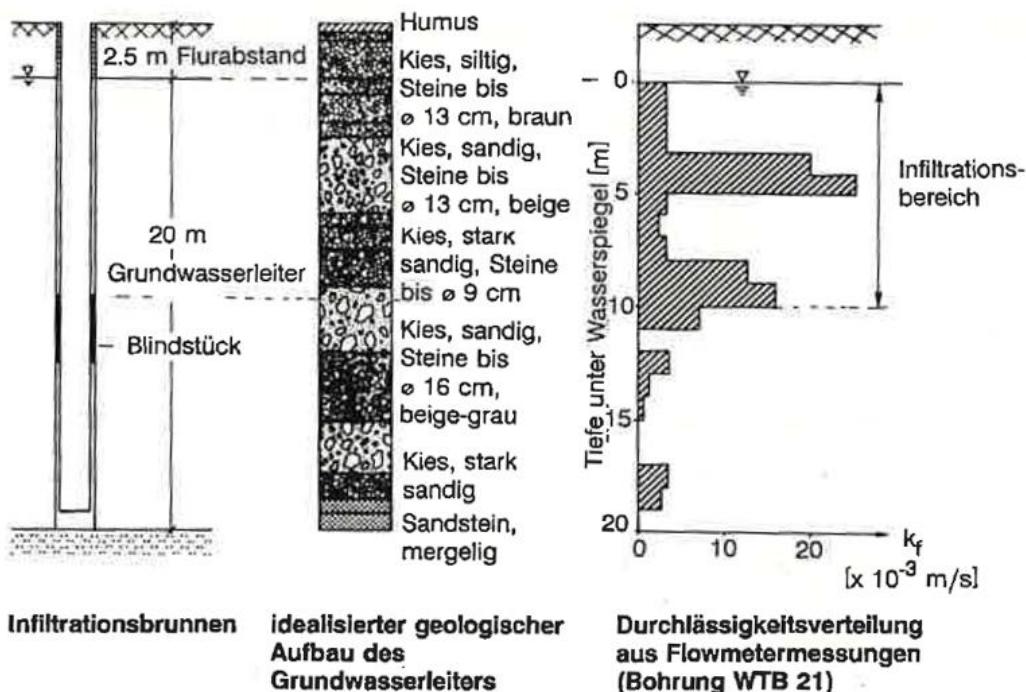


Abbildung 26: Rückgabebrunnen und hydrogeologische Situation (Kobus, 1992)

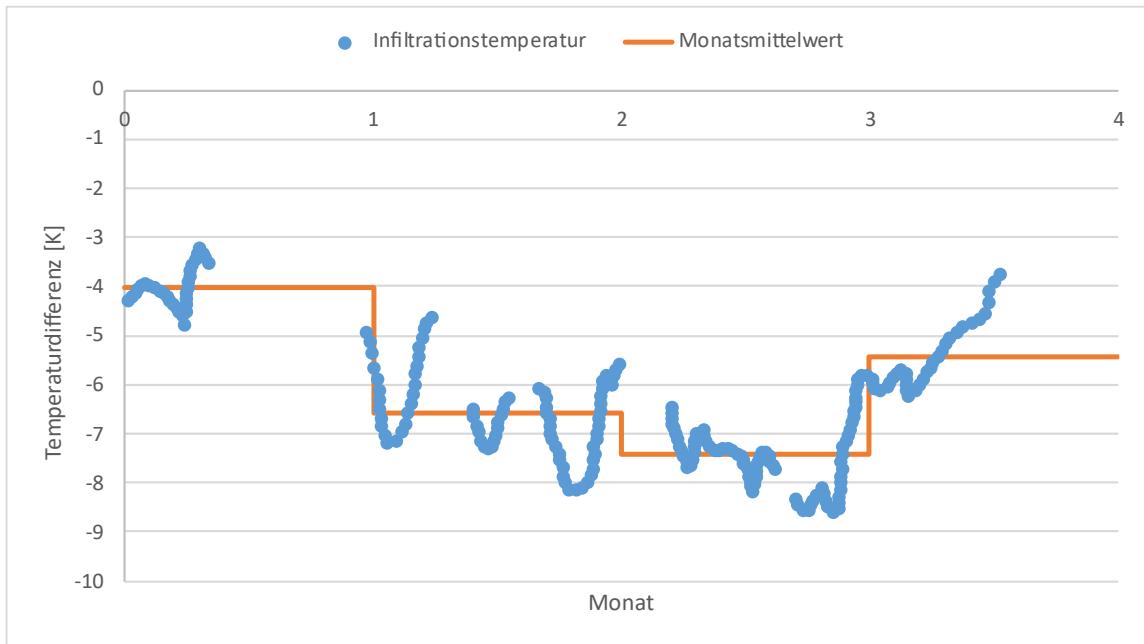


Abbildung 27: Gemessene Infiltrations-Temperaturdifferenz und Monatsmittelwerte für die Eingabe in LGRBtom.

Die Parametrisierung der Strömung und der hydrogeologischen Schichten ist in einem Auszug aus dem standardisierten Ergebnisbericht von LGRBtom in Abbildung 28 zusammengefasst.

LGRBtom: Ergebnisbericht des Modells: 1 Testfeld Aefligen

1. Modellinput

1.1 Betrachtungszeitraum und Diskretisierung

- Betrachtungszeitraum (Jahre): 1 - Räumliche Diskretisierung: Standard

1.2 Strömung

- Strömungsrichtung: 0.0 ° - Hydraulischer Gradient: 0.0025

Angaben zum Bezugspunkt für den Grundwasserstand:

- Grundwasserstand Bezugspunkt: 200.0 m ü.NN - Bezugspunkt X UTM: 562380.00 m - Bezugspunkt Y UTM: 5347023.00 m

1.3 Modellschichten

Berechnung mit konstanter Transmissivität

Tab. 1.1: Modellschichten und deren Eigenschaften

Bezeichnung	Mächtigkeit [m]	kf-Wert [m/s]	effektive Porosität [-]	Abstandsgeschwindigkeit [m/d]	Wärmeleitfähigkeit poröses Medium [W/m*K]	Volumenbezogene spez. Wärmekapazität poröses Medium [MJ/(m³*K)]
Grundwasser-überdeckung	2.5	-	-	-	0.5	1.6
Grundwasser-leiter	20.0	0.0059	0.15	8.5	1.8	2.4
Grundwasser-geringleiter	40.0	-	-	-	1.8	2.4

1.4 Dispersivität

- Dispersivität longitudinal: 3.4 m - Dispersivität transversal: 0.34 m

1.5 Anlagen / Brunnen

Tab. 1.2: Übersicht der Eigenschaften der Anlagen und Brunnen

Anlage	Brunnen	Brunnentyp	Tiefe Filter-oberkante [m]	Tiefe Filter-unterkante [m]	Mittlere Rate [l/s]	X UTM [m]	Y UTM [m]
Kaltwassereinl	Entnahmebrunne	Entnahme	2.5	12.5	5.57	562880.00	5347023.00
Kaltwassereinl	TO508	Entnahme	2.5	22.5	0.00	562380.00	5347128.00
Kaltwassereinl	TO915	Entnahme	2.5	22.5	0.00	562380.00	5347060.00
Kaltwassereinl	WAT48	Entnahme	2.5	22.5	0.00	562380.00	5347223.00
Kaltwassereinl	Schluckbrunnen	Rückgabe	2.5	12.5	5.57	562380.00	5347023.00

Abbildung 28: Auszug aus standardisiertem Ergebnisbericht für den Modellinput für das Modell Aefligen.

Wie aus dem Modellinput in Abbildung 28 (darin Tabelle 1.2) deutlich wird, wurden neben den eigentlichen Entnahme- und Rückgabebrunnen drei weitere Entnahmebrunnen (TO915, TO508 und WAT48) mit einer Entnahme von 0 l/s hinzugefügt. Diese Brunnen übernehmen hier die Funktion der gleich benannten Messstellen in Testfeld Aefligen (Abbildung 25). Sie wurden in dieser Art zum Modellinput in LGRBtom hinzugefügt, da für jeden Entnahmebrunnen im standardisierten Bericht eine Temperaturdifferenzganglinie ausgegeben wird (siehe

Abbildungen 2.10 bis 2.12 in Anlage 1) und somit der Vergleich mit den vorhandenen Messdaten ermöglicht wird.

Der Vergleich zwischen Messung und Simulation mit LGRBtom für die drei Messstellen ist in Abbildung 29, Abbildung 30 und Abbildung 31 dargestellt. Die im automatisierten Bericht gegebene maximale Ausbreitung der Kaltwasserfahne ist in Abbildung 32 gegeben.

Für die zum Rückgabebrunnen nächst gelegene Messstelle TO915 gibt es eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Sowohl der zeitliche Verlauf als auch die Temperaturabsenkung können gut mit LGRBtom abgebildet werden. Auch für die Messstelle TO508 gibt es eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Auch für die vom Rückgabebrunnen am weitesten entfernte Messstelle WAT48 wird noch eine gute Übereinstimmung erreicht. Hier eilt der Abfall der Temperaturen der Messungen den berechneten Werten der Simulation voraus, die minimale Temperatur ist jedoch in guter Übereinstimmung mit der Simulation.

Eine mögliche Ursache für die etwas schnellere gemessene Ausbreitung der Fahne in Messstelle WAT48 liegt in der Heterogenität der k_f -Werte. Wie oben beschrieben, gibt es im Infiltrationsbereich Zonen, in denen der gemessene k_f -Wert um einen Faktor von ca. 3 bis 5 über dem tiefengemittelten k_f -Wert liegt. Somit muss davon ausgegangen werden, dass es Zonen gibt, in welchen sich die Kältefahne in der Realität etwas schneller ausbreitet, als mit LGRBtom berechnet wird, weil dort ein homogener tiefengemittelter k_f -Wert im Grundwasserleiter angenommen wurde.

Die Qualität der Simulation ist auch vor dem Hintergrund zu bewerten, dass keine Kalibrierung von Parametern stattgefunden hat, sondern ermittelte k_f -Werte direkt in LGRBtom übertragen wurden. Im konkreten Anwendungsfall wird dem Nutzer in den wenigsten Fällen eine derartige Datengrundlage mit gemessenen Durchbruchskurven zur Verfügung stehen.

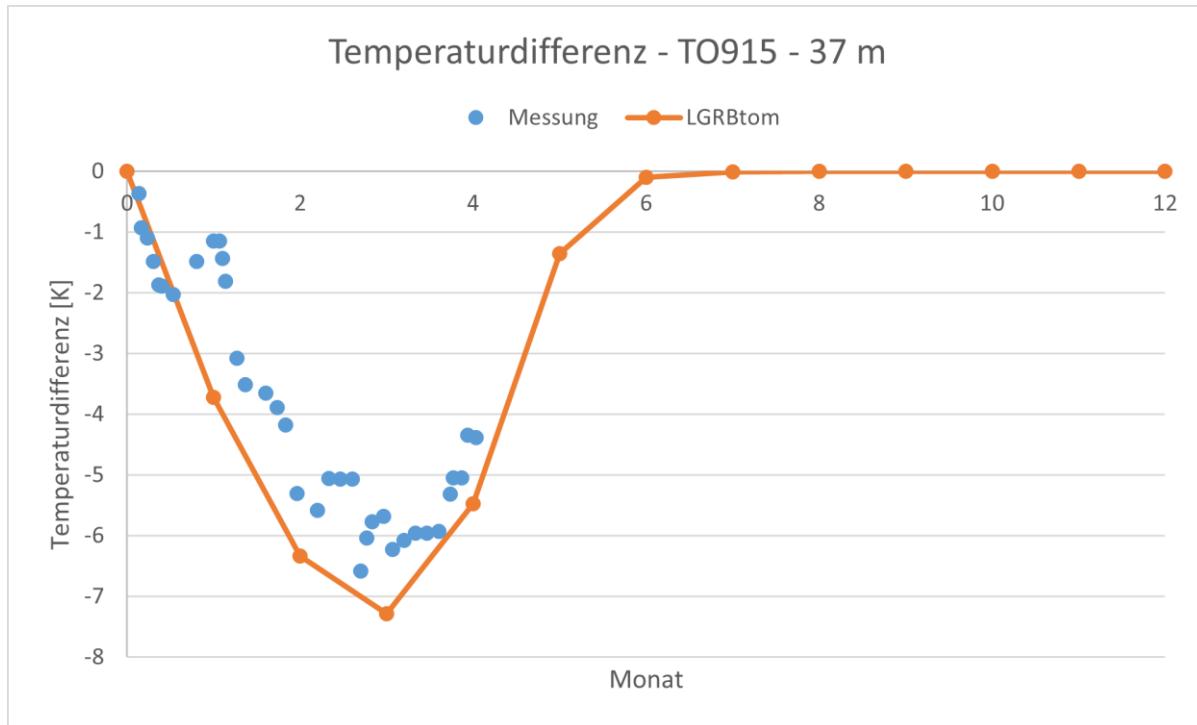


Abbildung 29: Temperaturdifferenz gemessen und berechnet für Messstelle TO915 37 m Abstand vom Rückgabebrunnen

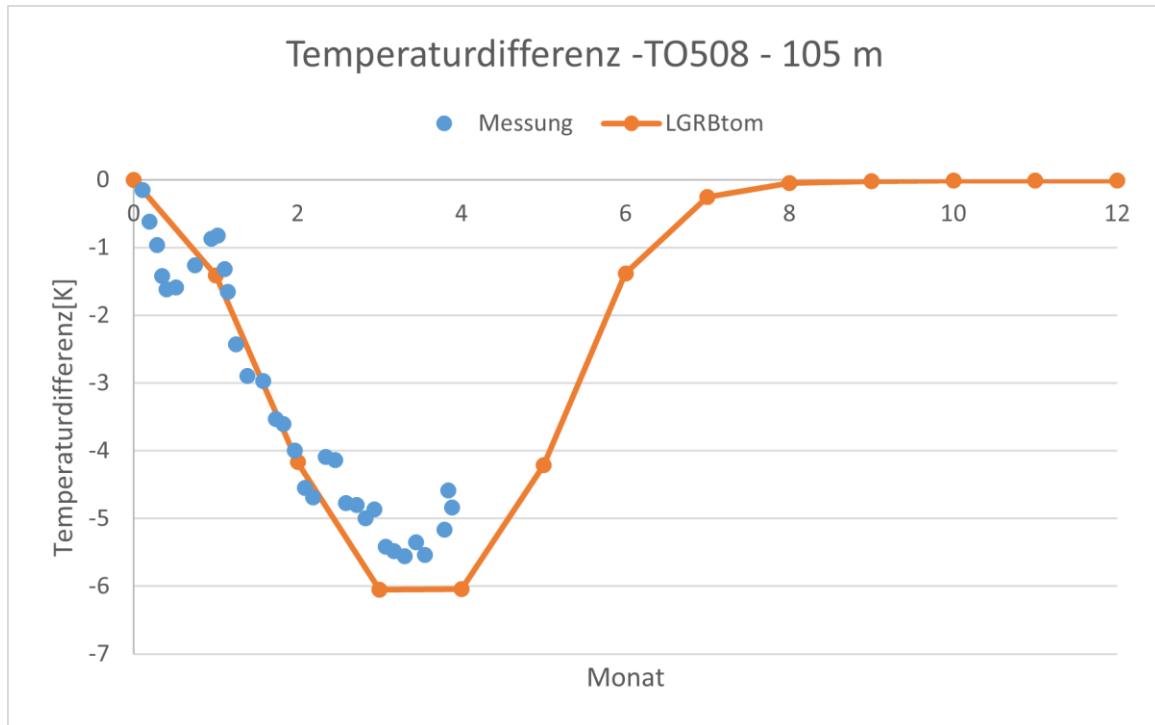


Abbildung 30: Temperaturdifferenz gemessen und berechnet für Messstelle TO508 105 m Abstand vom Rückgabebrunnen

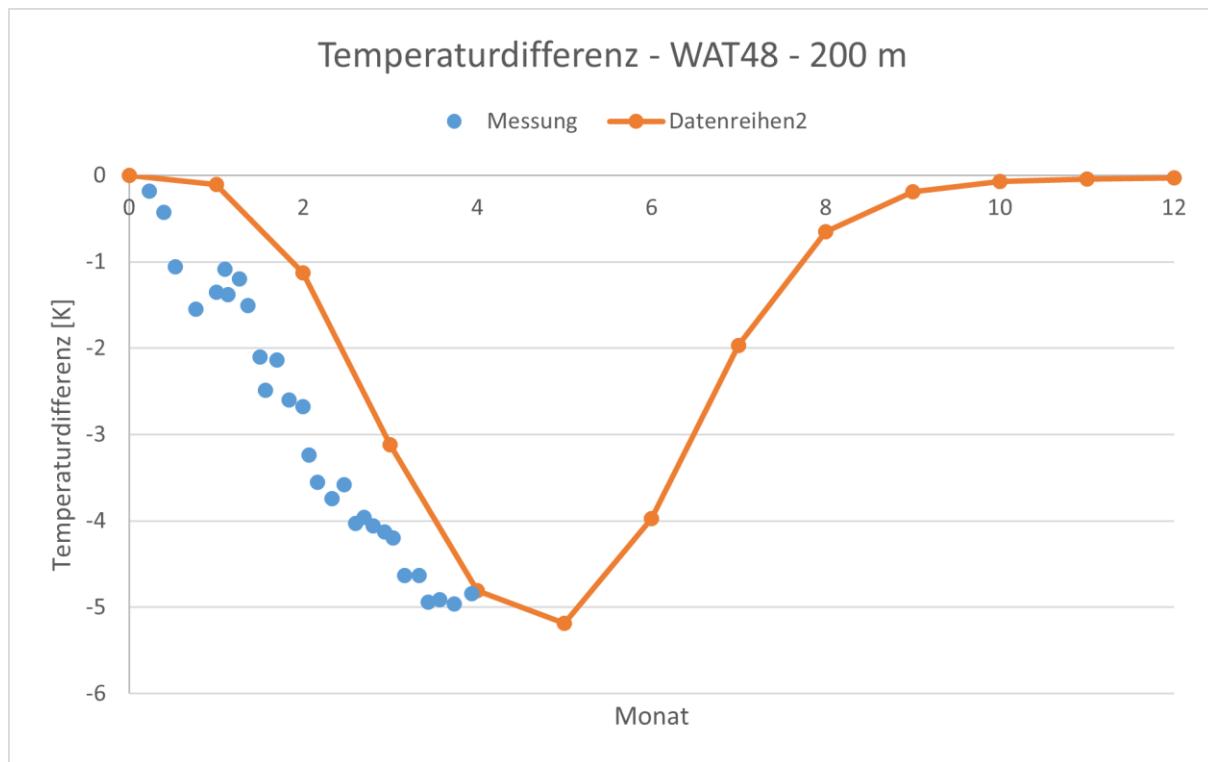


Abbildung 31: Temperaturdifferenz gemessen und berechnet für Messstelle WAT48
200 m Abstand vom Rückgabebrunnen

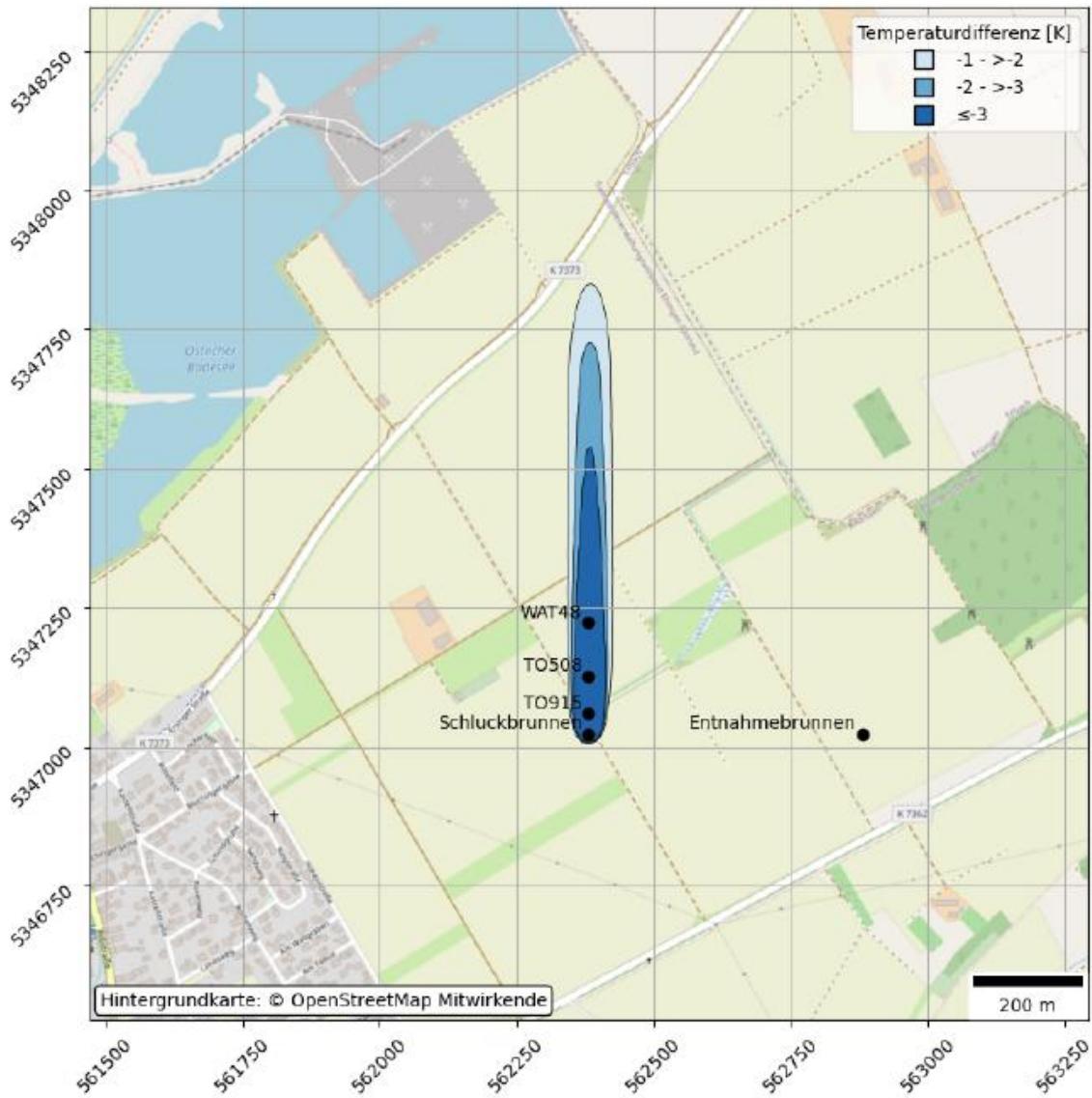


Abbildung 32: Maximale Abkühlung im Betrachtungszeitraum über alle Tiefen aus dem automatisierten Modellbericht

4.2 Gemeinsame Betrachtung mehrerer Anlagen

In diesem Fallbeispiel wird eine fiktive Kombination von mehreren Anlagen mit unterschiedlichen Betriebsarten erstellt. Das Fallbeispiel dient primär dazu, die gegenseitige Beeinflussung von verschiedenen Anlagen mittels der im standardisierten Bericht gegebenen Ergebnisse aufzuzeigen.

Der komplette standardisierte Bericht zu diesem Fallbeispiel befindet sich in Anlage 2.

Vier Anlagen mit den folgenden Nutzungen werden betrachtet:

1. Anlage:
 - Kühlung im Sommer und Heizung im Winter

- Jahresmittelwert Entnahme/Rückgabe 4,5 l/s
- Temperaturdifferenz zur mittleren Grundwassertemperatur +4 K im Sommer, -4 K im Winter

2. Anlage:

- Kühlung im Sommer (Aufwärmung des Grundwassers)
- Jahresmittelwert Entnahme/Rückgabe 2 l/s
- Temperaturdifferenz zur mittleren Grundwassertemperatur +4 K

3. Anlage:

- Ganzjährige Kühlung (Aufwärmung des Grundwassers)
- Jahresmittelwert Entnahme/Rückgabe 15 l/s
- Temperaturdifferenz zur mittleren Grundwassertemperatur +7 K

4. Anlage:

- Ganzjährige Heizung (Abkühlung des Grundwassers)
- Jahresmittelwert Entnahme/Rückgabe 1,5 l/s
- Temperaturdifferenz zur mittleren Grundwassertemperatur -4 K

Die räumliche Anordnung der vier Anlagen ist in Abbildung 33 dargestellt.

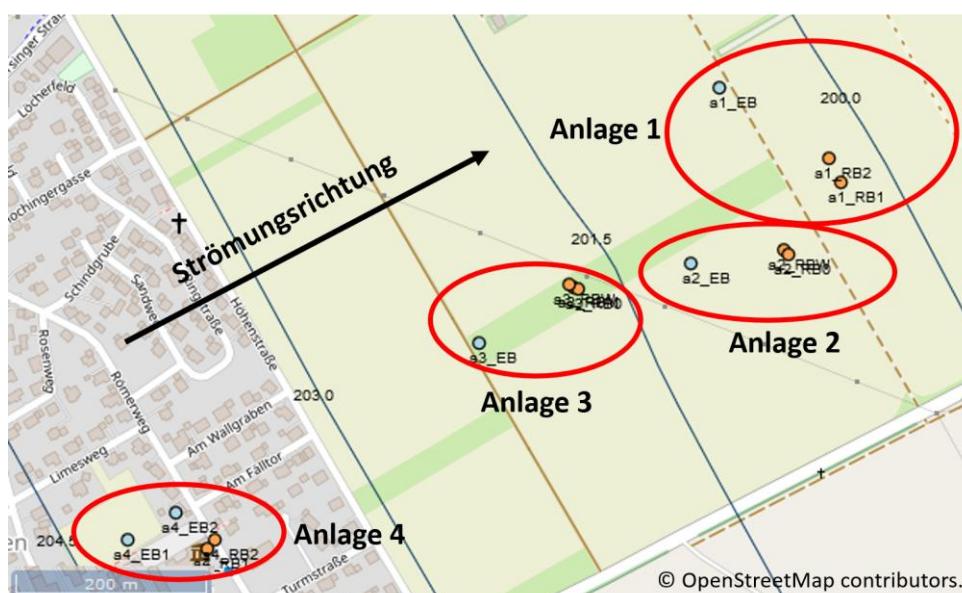


Abbildung 33: Anordnung der vier Anlagen. Blau sind Entnahmebrunnen und orange Rückgabebrunnen

Das hydrogeologische Modell besteht aus einem 20 m mächtigen oberen Grundwasserleiter, welcher von einer 5 m mächtigen Grundwasserüberdeckung überlagert ist. Alle Brunnen sind im oberen Grundwasserleiter verfiltert. Das Liegende bildet in diesem Fall ebenfalls einen weiteren Grundwasserleiter mit einer Mächtigkeit von 40 m ab. Eine Zusammenstellung der Parametrisierung des Modells ist in Abbildung 34 anhand eines Auszugs aus dem standardisierten Ergebnisbericht gegeben.

1. Modellinput

1.1 Betrachtungszeitraum und Diskretisierung

1.2 Strömung

- Strömungsrichtung: 60.0 ° - Hydraulischer Gradient: 0.005

Angaben zum Bezugspunkt für den Grundwasserstand:

- Grundwasserstand Bezugspunkt: 200.0 m ü.NN - Bezugspunkt X UTM: 562380.00 m - Bezugspunkt Y UTM: 5347023.00 m

1.3 Modellschichten

Berechnung mit konstanter Transmissivität

Tab. 1.1: Modellschichten und deren Eigenschaften

Bezeichnung	Mächtigkeit [m]	Kf-Wert [m/s]	Porosität [-]	Abstandsgeschwindigkeit [m/d]	Wärmeleitfähigkeit poröses Medium [W/m ² K]	Volumenbezogene spez. Wärmekapazität poröses Medium [MJ/(m ³ K)]
Grundwasser-überdeckung	5.0	-	-	-	0.5	1.6
Grundwasser-leiter	20.0	0.0015	0.15	4.32	1.8	2.4
Grundwasser-leiter	40.0	0.00025	0.15	0.72	1.8	2.4

1.4 Dispersion

Abbildung 34: Auszug aus standardisiertem Ergebnisbericht für den Modellinput für Fallbeispiel 2: Hydrogeologisches Modell

Abbildung 35 zeigt die maximale Temperaturerhöhung im Modellgebiet während des Simulationszeitraums. Es wird deutlich, dass das System durch Anlage 3 dominiert wird. Die Bereiche, in denen eine Abkühlung durch die Anlagen 1 und 2 stattfindet, sind dagegen deutlich weniger stark ausgeprägt (siehe Abbildung 36).

Abbildung 37 zeigt beispielhaft die Entwicklung der Temperatur im Abstrom des Rückgabebrunnens a1_RB2 von Anlage 1, wie sie im standardisierten Bericht gegeben ist. In dieser Art wird für jeden Rückgabebrunnen eine Abbildung erzeugt. Ziel dieser Abbildungen ist es, die zeitliche Entwicklung der Ausbreitung der Temperaturfahne für jeden Rückgabebrunnen zu visualisieren. Anlage 1 läuft, wie oben beschrieben, im Wechselbetrieb (Aufwärmung des Grundwassers im Sommer, Abkühlung im Winter), was sich auch am Temperatursignal im Abstrom deutlich bemerkbar macht („schwingende“ Temperaturen). Mit zunehmender Distanz zum Rückgabebrunnen lassen sich folgende (zu erwartende) Effekte beobachten:

- Die Ankunft der Temperaturfahne verzögert sich.

- Die Amplitude der Schwingungen wird geringer.
- Die Schwingungen sind phasenverschoben.

Weiterhin ist für die fiktiven Beobachtungspunkte im Abstrom des Rückgabebrunnens erkennbar, dass ein positiver Trend bzw. ein Temperaturanstieg die Schwingungen überlagert. Dieser Trend erklärt sich durch den Einfluss der weiter im Oberstrom gelegenen Anlage 3, deren Warmwasserfahne sich mit der Temperaturfahne der Anlage 1 überlagert.

Die Anlagen 1 und 2 befinden sich im Abstrom von Anlage 3 und werden von dieser beeinflusst. Am stärksten beeinflusst wird der Entnahmestrom von Anlage 2 (Abbildung 38). Für jeden Entnahmestrom wird im standardisierten Bericht eine Temperaturganglinie gezeigt. Ist der Entnahmestrom beeinflusst durch Rückgabebrunnen der gleichen oder einer anderen Anlage, so wird dies im standardisierten Bericht neben der jeweiligen Temperaturganglinie des Entnahmestroms angezeigt. Für den Brunnen der Anlage 2 steigt die Temperatur um mehr als 3 K (Abbildung 38). Da Anlage 2 ausschließlich zu Heizzwecken eingesetzt wird, ist die Erhöhung der Temperatur positiv zu bewerten. Wie Abbildung 39 zeigt, wird der Entnahmestrom von Anlage 1 (a1_EB) nicht von Anlage 2 beeinflusst.

Abbildung 40 zeigt die stationäre Wasserbilanz für das Modellgebiet. Es zeigt sich, dass der Zustrom in das Modellgebiet bzw. Abstrom aus dem Modellgebiet wesentlich größer ist als die Entnahme- bzw. Rückgaberraten der Brunnen.

Abbildung 41 zeigt die Bilanz der durch die Anlagen im Modellgebiet verursachten Energieströme. In der grünen Linie sind alle Zugaben an kaltem Wasser (Heizzwecke) und warmem Wasser (Kühlzwecke) subsummiert. Die positiven Werte zeigen, dass insgesamt beträchtlich Energie in das Modellgebiet über die Anlagen eingetragen wird (grüne Linie).

Energieflüsse aus dem Modell (negative Werte) erfolgen über den Austausch mit der Atmosphäre (rote Linie) und Brunnenentnahmen (orange gestrichelte Linien); die Entnahme von Energie über Brunnen aus dem Modell kann hier nur deshalb erfolgen, weil die Anlage 2 in der Temperaturfahne der Anlage 3 liegt. In diesem Fall kommt es zu keinem Energieaustausch über den Abstromrand (blaue Linie)

Weiterhin zeigt sich, dass der Energiestrom in die Atmosphäre noch anhaltend zunimmt, je größer die Warmwasserfahne wird (d.h. Energie durch Einleitung an warmem Wasser in Anlage 3 verlässt das Modellgebiet über die Oberfläche noch mit steigendem Trend; ein Gleichgewichtszustand zwischen Größe der Fahne und Energieaustausch zur Oberfläche ist noch nicht erreicht).

Auch die oben beschriebene Beeinflussung des Entnahmehbrunnens der Anlage 2 wird in der Abbildung als Energieaustausch über die Entnahmehbrunnen deutlich. Die Bilanzierung der Energieströme dient hier in erster Linie der Plausibilisierung der Modelleingaben. Aber auch Effekte, wie der Ein- und Austausch von Energieströmen über die Modellränder oder der Austausch mit der Atmosphäre können hier gut nachvollzogen werden.



Abbildung 35: Maximale Temperaturerhöhung im Simulationszeitraum über alle Tiefen (Abbildung 2.5 im standardisierten Bericht).

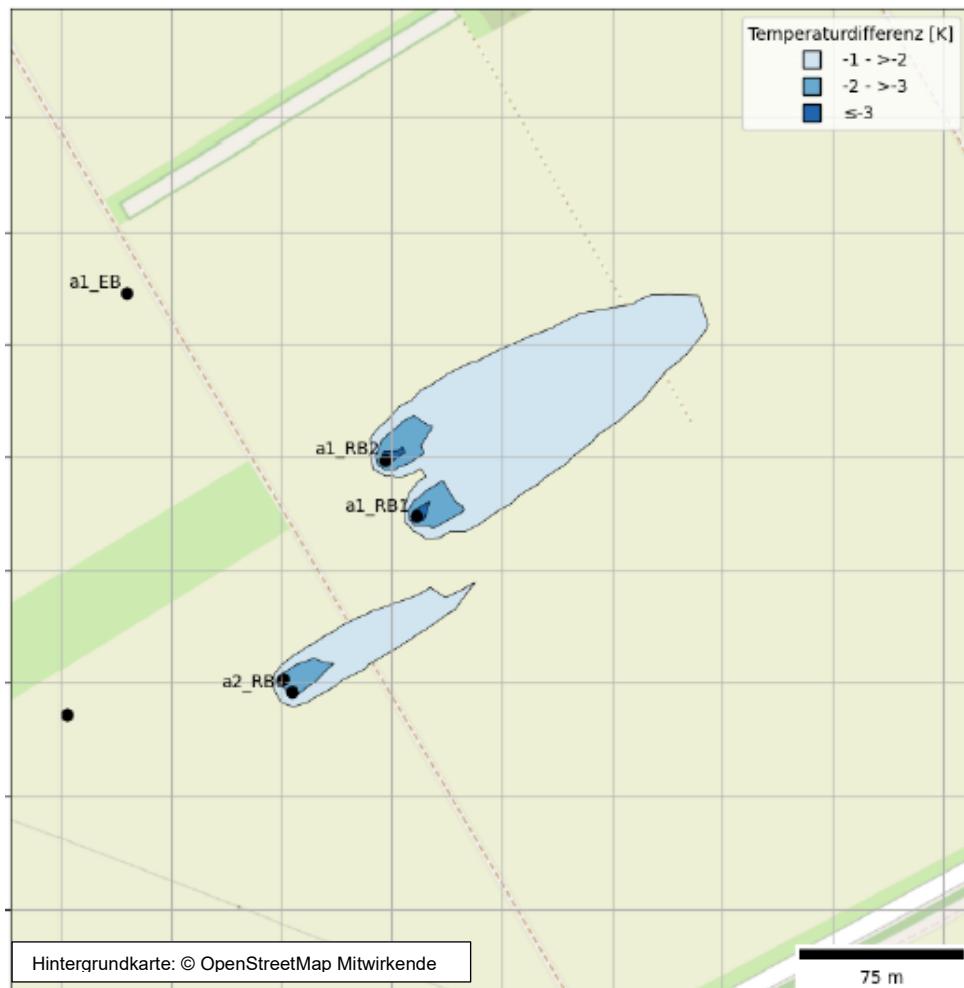


Abbildung 36: Maximale Temperaturabsenkung im Simulationszeitraum über alle Tiefen (Abbildung 2.4 im standardisierten Bericht).

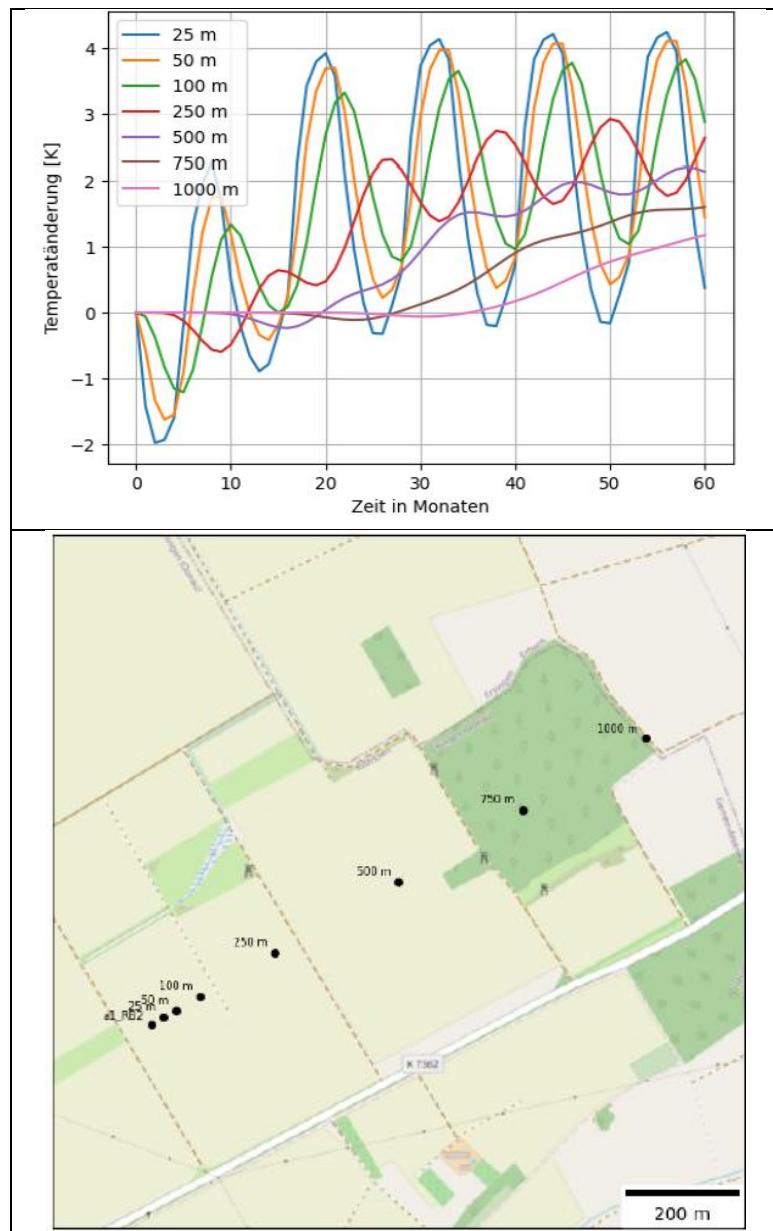


Abbildung 37: Oben: Ganglinien im Abstrom a1_RB2 von Anlage 1. Unten: Position der Beobachtungspunkte im Lageplan (Abbildung 2.9 im standardisierten Bericht)

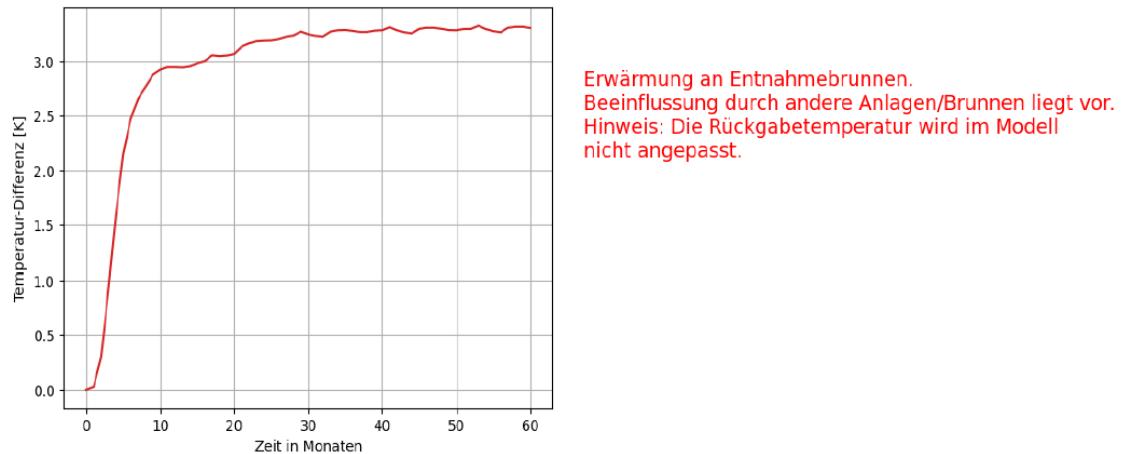


Abbildung 38: Temperaturzunahme am Entnahmestelle von Anlage 2 (entspricht Abbildung 2.18 im standardisierten Bericht).

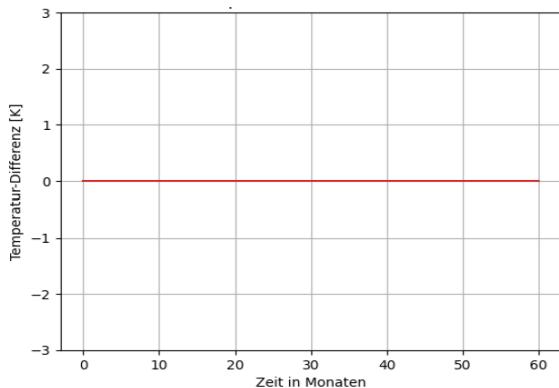


Abbildung 39: Temperaturzunahme am Entnahmestelle von Anlage 1 (entspricht Abbildung 2.17 im standardisierten Bericht).

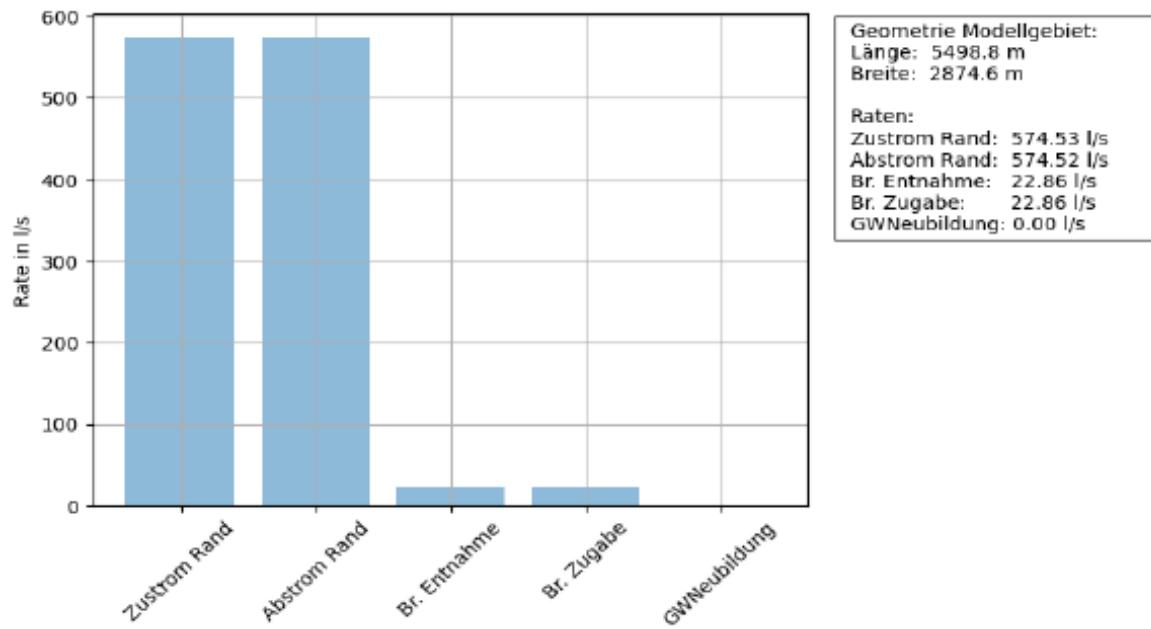


Abbildung 40: Stationäre Wasserbilanz für das automatisch erstellte Modellgebiet (entspricht Abbildung 2.6 im standardisierten Bericht).

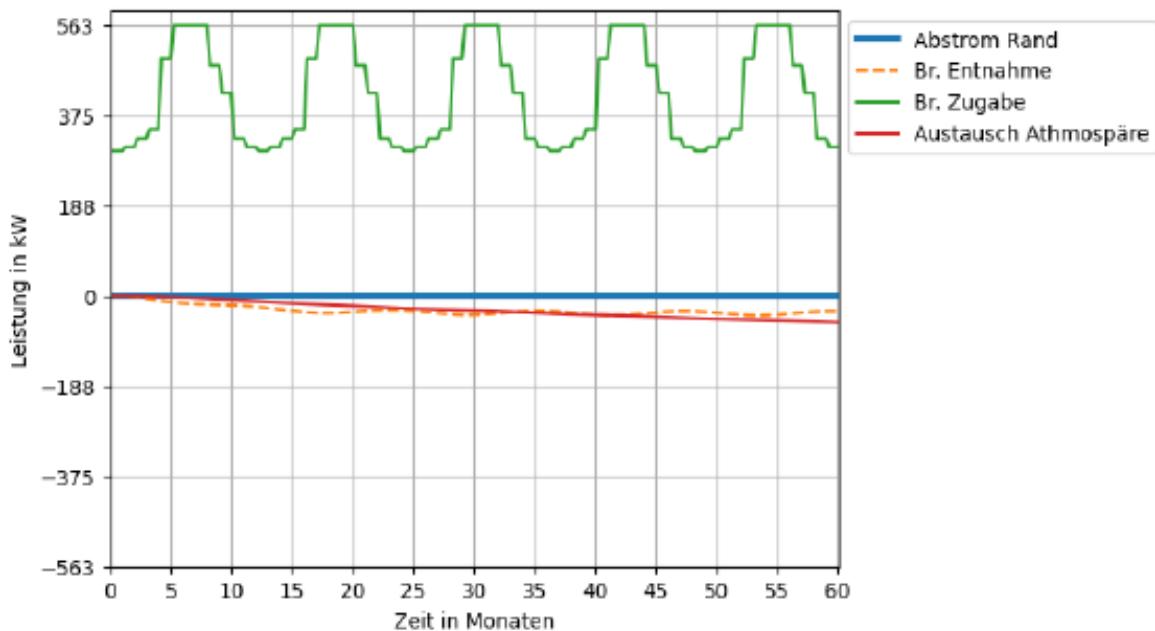


Abbildung 41: Bilanz der durch die Anlagen verursachten Energieströme. Positiv ist ein Energieeintrag, negativ ein Energieaustrag aus dem Modell. (entspricht Abbildung 2.7 im standardisierten Bericht).

Für die Konfiguration des Fallbeispiels 2 wurde neben dem oben dargestellten Lauf mit einem Betrachtungszeitraum von 5 Jahren auch ein Lauf für den in LGRBtom maximal möglichen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren durchgeführt. Abbildung 42

zeigt den Vergleich der +1 K Isotherme nach 5 und nach 30 Jahren. Es wird deutlich, dass die Fahne der Anlage 3 mit der größten Entnahme-/Rückgaberrate nach 30 Jahren noch deutlich größer geworden ist. In Abbildung 43 ist die Energiebilanz dargestellt. Da der Austausch mit der Atmosphäre kontinuierlich über die Zeit anwächst, ist noch keine quasistationäre Ausdehnung der 1 K Isotherme erreicht worden.

Der Rechenlauf mit 30 Jahren benötigt ca. 30 Stunden. Im Vergleich dazu benötigt der Rechenlauf für 5 Jahre nur ca. 2 Stunden. Es wird somit deutlich, dass die Rechenzeit überproportional anwächst. Grund hierfür ist, dass das benötigte Modellgitter für den 30-Jahresfall wesentlich größer ist als für den 5-Jahresfall, da die 1 K-Fahne mit zunehmender Betrachtungszeit noch kontinuierlich wächst. In der Praxis sollten daher Simulationen zur Optimierung der Anlage, z. B. zur Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen oder Sensitivitätstests zunächst mit kurzen Betrachtungszeiträumen (z. B. 1 bis 5 Jahre) durchgeführt werden, da sich ungünstige Situationen hinsichtlich einer gegenseitigen Beeinflussung i.d.R. bereits bei diesen vergleichsweise kurzen Betrachtungszeiträumen zeigen.

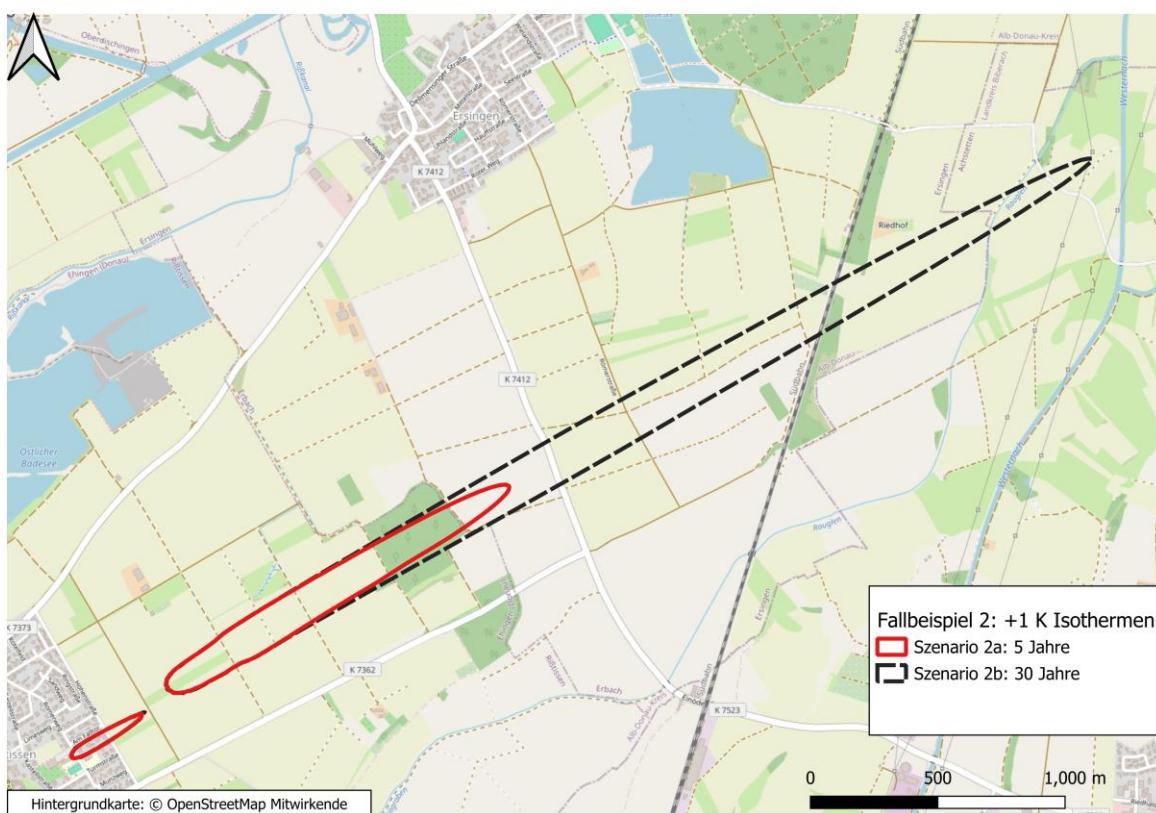


Abbildung 42: Variantenberechnung Fallbeispiel 2 mit Vergleich der +1 K Isotherme nach 5 und 30 Jahren

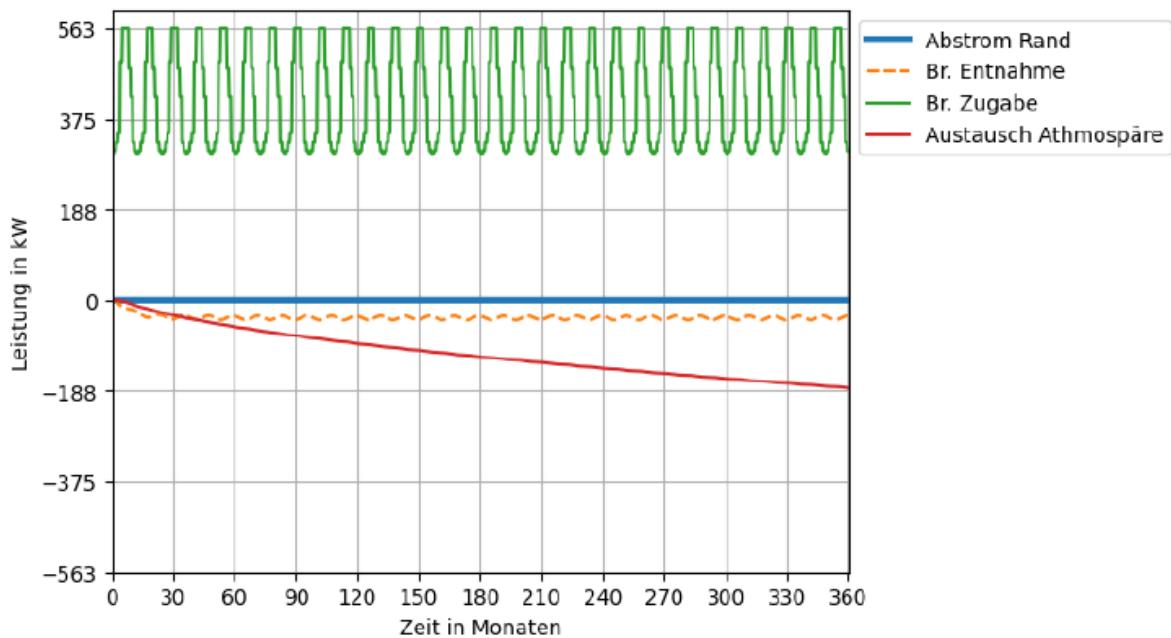


Abbildung 43: Variantenberechnung Fallbeispiel 2 mit Bilanz der durch die Anlagen verursachten Energieströme bei 30 Jahren Betrachtungszeit. Positiv ist ein Energieeintrag, negativ ein Energieaustrag aus dem Modell.

4.3 Einfluss der Grundwasserüberdeckung

In diesem Abschnitt wird die Bedeutung der Parametrisierung der Grundwasserüberdeckung im Modellaufbau (siehe Modellschichten, Kapitel 2.3.3) diskutiert. Hierzu werden drei Szenarien betrachtet:

- Szenario 3a mit gesättigter Grundwasserüberdeckung
- Szenario 3b mit ungesättigter Grundwasserüberdeckung
- Szenario 3c mit Deckschicht und ungesättigtem Bereich des oberen Grundwasserleiters und deren Zusammenfassung in eine homogene Parametrisierung für die Grundwasserüberdeckung. In Abbildung 44 ist eine hydrogeologische Situation bzgl. der Grundwasserüberdeckung abgebildet, welche der Situation in diesem Szenario entspricht.

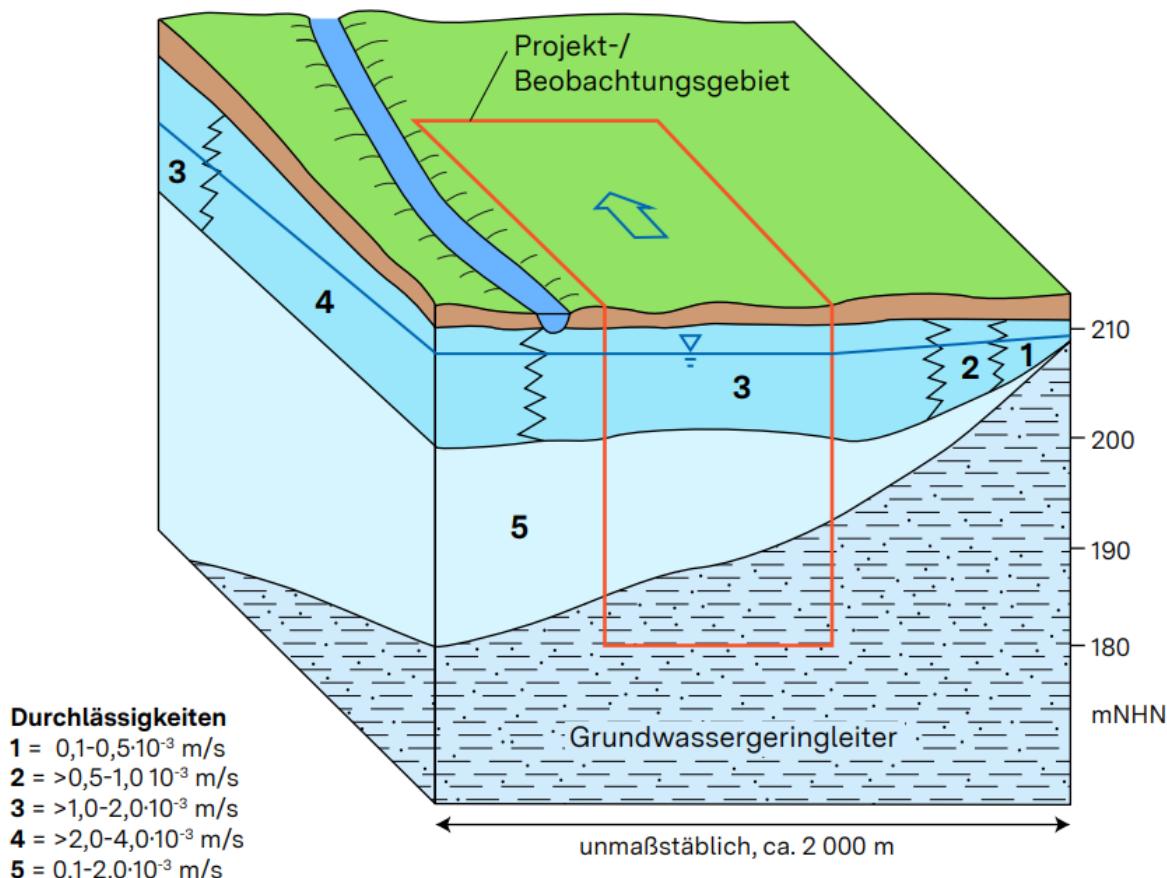


Abbildung 44: Hydrogeologisches Konzeptmodell (Szenario 3c) (Abbildung bereit gestellt durch das LGRB, verändert)

Alle drei Szenarien sind bis auf die Parametrisierung der Grundwasserüberdeckung identisch. Die Grundwasserüberdeckung hat eine Mächtigkeit von 5 m. Dem oberen Grundwasserleiter wurden ein k_f -Wert von $1,0 \cdot 10^{-3}$ m s $^{-1}$ und eine Mächtigkeit von 7 m zugewiesen. Unterlagert wird der obere Grundwasserleiter von einem um eine Zehnerpotenz geringerer durchlässigen Grundwasserleiter (k_f -Wert $1,0 \cdot 10^{-4}$ m s $^{-1}$) mit einer Mächtigkeit von 12 m.

In allen drei Fällen gibt es einen Entnahme- und einen Rückgabebrunnen mit einer im Jahresgang konstanten Rate von 5 l/s, welche jeweils komplett im oberen Grundwasserleiter verfiltert sind. Die vorgegebene Temperaturdifferenz im Rückgabebrunnen beträgt konstant +5 K.

In Tabelle 4.1 sind die Werte der Grundwasserüberdeckung aus dem Modellinput der drei Szenarien dargestellt. Vor allem beim Parameter „Wärmeleitfähigkeit“ ist zu erkennen, dass bei gleichem Gesteinstyp der Sättigungsgrad einen deutlichen Einfluss auf den Wert des Parameters hat. So ist der gesättigte Wert für die angegebenen Gesteinstypen um ca. einen Faktor 3 größer als der ungesättigte Wert.

Für Szenario 3c wird in Tabelle 4.1 die Parametrisierung einer Grundwasserüberdeckung, welche anteilig aus einer Deckschicht und dem ungesättigten Teil des oberen Grundwasserleiters besteht, dargestellt. Dabei werden effektive Werte für die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität gebildet, indem eine mit der anteiligen Mächtigkeit gewichtete arithmetische Mittelung durchgeführt wird.

Tabelle 4.1: Modellinput der Grundwasserüberdeckung für die drei Fälle

Szenario	Gesteinstyp*	Mächtigkeit [m]	Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]*	Volumenbezogene spez. Wärmekapazität [$\text{MJ}/(\text{m}^3\text{K})$]*
3a: gesättigt	Ton/Schluff wassergesättigt	5	1,80	2,00
3b: un- gesättigt	Ton/Schluff trocken	5	0,50	1,50
3c: Mittelung un- gesättigter Schichten	Ton/Schluff trocken,	2	0,50	1,50
	Kies/Steine trocken	3	0,40	1,30
Effektive Werte		5	0,44	1,38

* Werte aus Tabelle 1 VDI 4640 Blatt 1

Die resultierenden Fahnenlängen der drei Szenarien sind in Abbildung 45 dargestellt. Die resultierende Fahnenlage für Szenario 3a ist kürzer als in Szenario 3b und 3c. Durch die höhere Wärmeleitfähigkeit der Grundwasserüberdeckung (Faktor 3 bis 4) ist der in der Grundwasserüberdeckung stattfindende konduktive Austausch mit der Atmosphäre deutlich erhöht, so dass weniger Energie im Grundwasserleiter verbleibt.

Der erhöhte Wärmeaustausch mit der Atmosphäre ist anhand der im automatisierten Modellbericht gegebenen Bilanz der anthropogenen Energieflüsse deutlich zu sehen. Für den gesättigten Fall ist der Austausch mit der Atmosphäre deutlich höher als bei den beiden ungesättigten Fällen, siehe Abbildung 46. Für die Fälle 3b und 3c ergeben sich hingegen kaum Unterschiede, da sich die effektiven Werte der Wärmeleitfähigkeiten nur geringfügig unterscheiden.

Die automatisierten Modellberichte mit dem Modellinput für Fallbeispiel 3a (wassergesättigt), Fallbeispiel 3b (ungesättigt) und Fallbeispiel 3c (Mittelung ungesättigter Schichten) sind in den Anlagen 3, 4 und 5 gegeben.

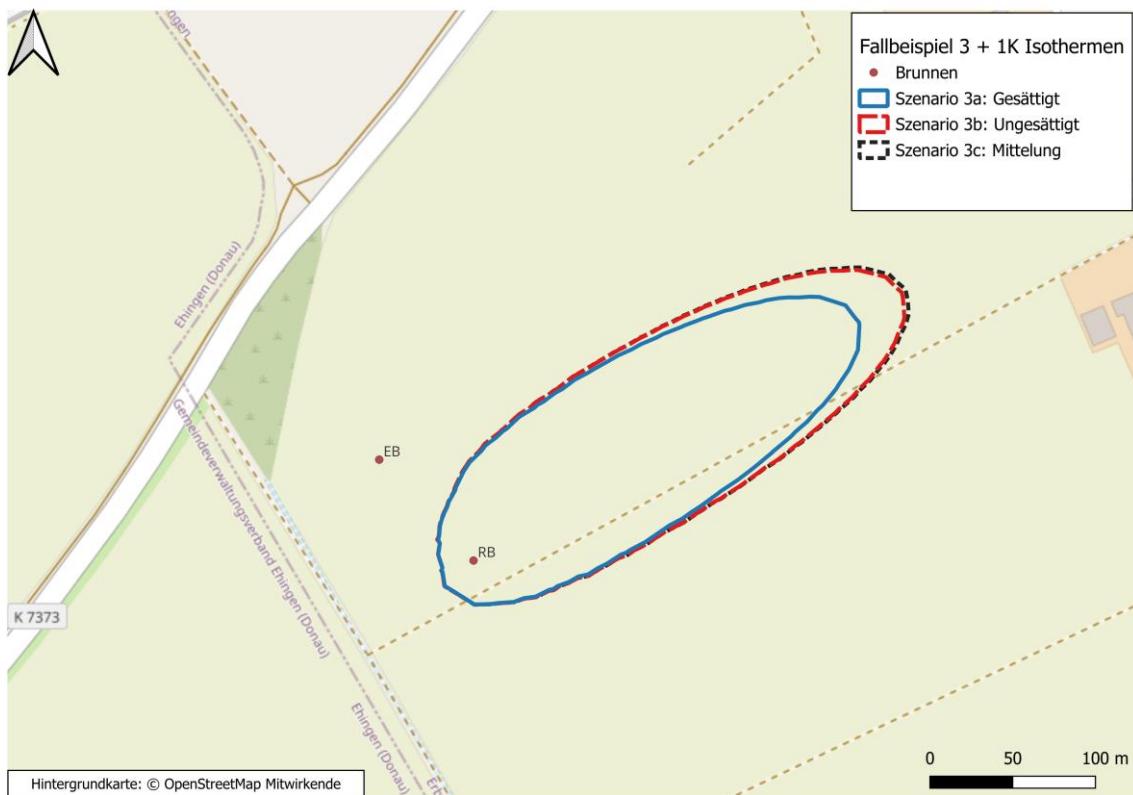


Abbildung 45: Vergleich der Fahnenlängen zwischen Fallbeispielen 3a wassergesättigt, 3b ungesättigt und 3c Mittelung ungesättigter Schichten

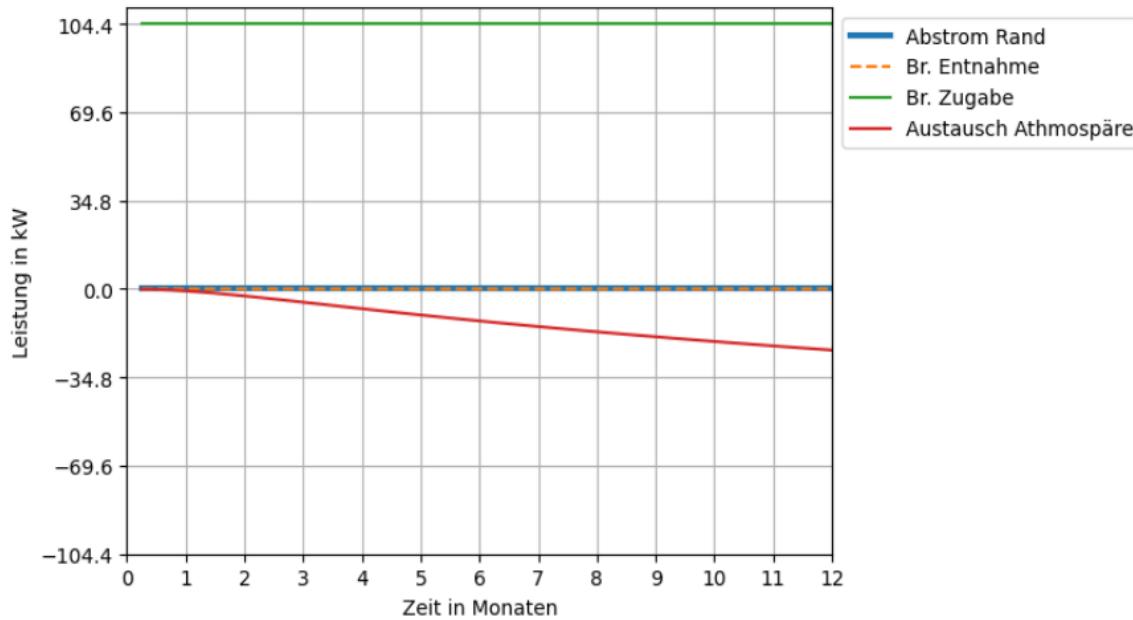


Abb. 2.6: Bilanz der anthropogenen, d. h. durch die geothermischen Anlagen verursachten Energieströme. Positive Werte bedeuten einen Energieeintrag in das Grundwassерmodell, negative Werte einen Energieaustrag aus dem Grundwassерmodell

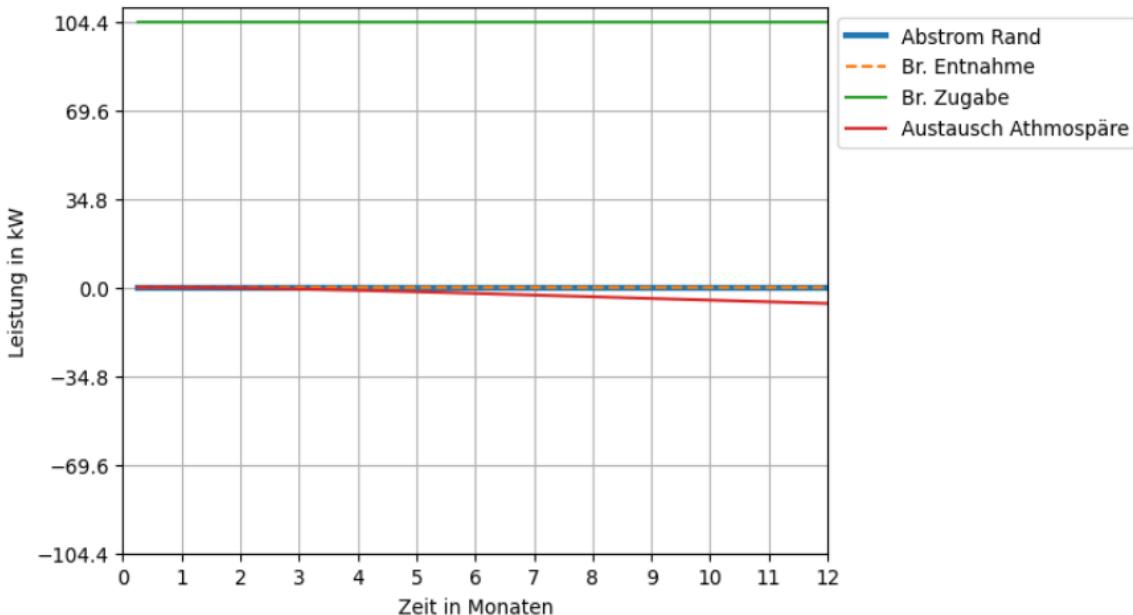


Abb. 2.6: Bilanz der anthropogenen, d. h. durch die geothermischen Anlagen verursachten Energieströme. Positive Werte bedeuten einen Energieeintrag in das Grundwassermmodell, negative Werte einen Energieaustrag aus dem Grundwassermmodell

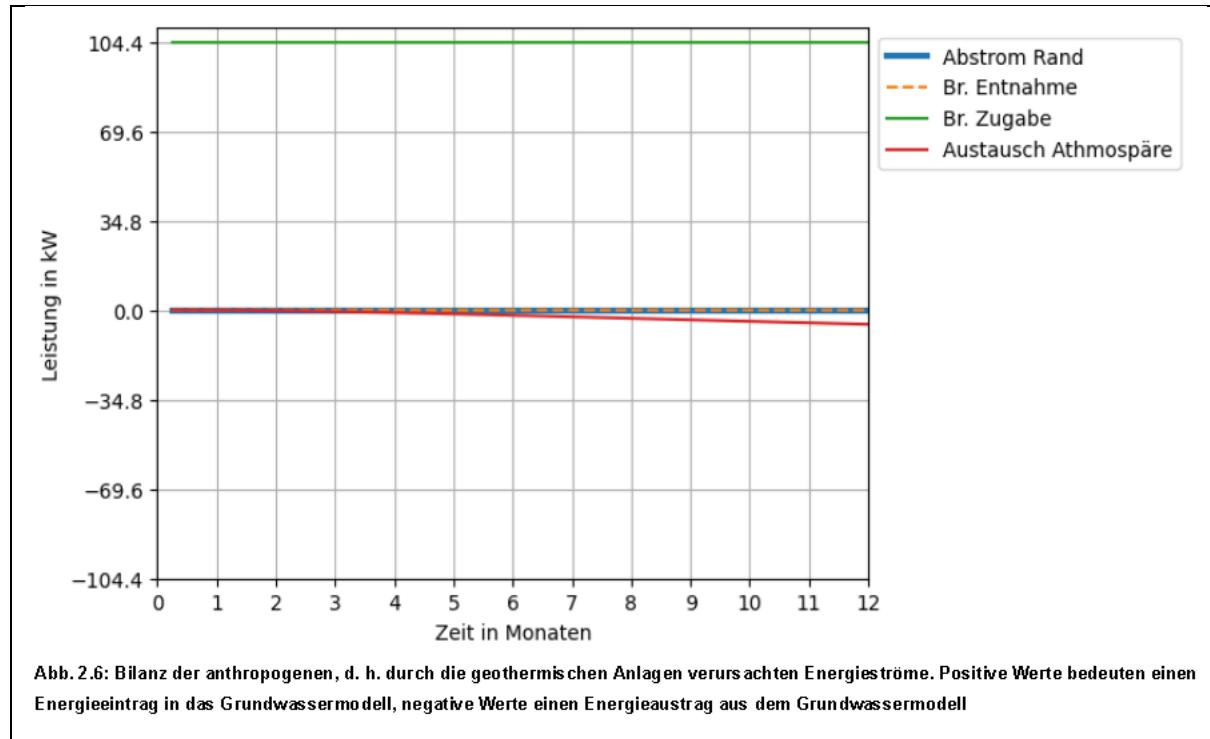


Abbildung 46: Vergleich der anthropogenen Energieströme für Fallbeispiel 3a gesättigt (oben), Fallbeispiel 3b ungesättigt (Mitte) und Fallbeispiel 3c Mittelung ungesättigter Schichten (unten)

4.4 Thermischer Kurzschluss – Einfluss des k_f -Wertes

Der k_f -Wert ist aufgrund seiner großen möglichen Variabilität der am meisten sensitive und gleichzeitig auch der unsicherste Parameter für die Auslegung von geothermischen Anlagen (Russo et al., 2012). In diesem Kapitel werden zwei Fälle gegenübergestellt, in denen sich die k_f -Werte des oberen Grundwasserleiters um einen Faktor von zwei unterscheiden. Im Falle des niedrigeren k_f -Werts kommt es zu einem thermischen Kurzschluss innerhalb der Anlage (d.h. Entnahmestellen wird durch die Rückgabe an thermisch verändertem Grundwasser durch den Rückgabebrunnen beeinflusst). In diesem Kapitel wird erläutert, welche große Sensitivität der k_f -Wert bei der Berechnung von Temperaturfeldern hat und wie in LGRBtom auf einen thermischen Kurzschluss hingewiesen wird. Aufgrund einer in LGRBtom angenommenen Vereinfachung kann ein thermischer Kurzschluss zwar erkannt werden (Erhöhung der Temperatur am Entnahmestellen), er wird aber für die weitere Berechnung im Sinne einer daran gekoppelten automatischen Erhöhung der Rückgabedurchflussrate nicht berücksichtigt.

Betrachtet wird eine Anlage mit drei Entnahmestellen und drei Rückgabebrunnen. Der obere Grundwasserleiter hat eine Mächtigkeit von 30 m, alle Brunnen sind darin vollständig verfiltert. Entnahmestellen- und Rückgaberaten sind zeitlich konstant bei 10 l/s. Die Spreizung bei der thermischen Nutzung des Grundwassers beträgt + 3 K. Der

hydraulische Gradient liegt bei 0,001. Ausgehend von den oben genannten Parametern werden zwei Fälle miteinander verglichen. Im ersten Fall („ k_f -niedrig“) liegt der k_f -Wert bei 0,002 m/s im oberen Grundwasserleiter, im zweiten Fall („ k_f -hoch“) ist der k_f -Wert um den Faktor 2 erhöht und beträgt 0,004 m/s. Die automatisierten Ergebnisberichte für die Fälle „ k_f -niedrig“ und „ k_f -hoch“ sind in den Anlagen 6 bzw. 7 gegeben sowie in Auszügen in den Abbildungen Abbildung 48 und Abbildung 49 dargestellt.

In Abbildung 47 ist die maximale Ausbreitung der Temperaturfahnen nach drei Jahren für die beiden Fälle dargestellt, wie sie auch im automatisierten Ergebnisbericht (Abbildung 2.5 in den Anlagen 6 und 7) zu finden ist. Wie zu erwarten, führt der Fall „ k_f -niedrig“ zu einer breiteren Fahne im Vergleich zum Fall „ k_f -hoch“, da die Entnahmew bzw. Infiltrationsbreite (siehe Gl. 2), aufgrund des um den Faktor 2 geringeren k_f -Werts doppelt so groß ist, wie im Fall „ k_f -hoch“.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die +1 K-Isotherme für den Fall „ k_f -niedrig“ bis zu den Entnahmestellen EB1 und EB2 reicht. Die Beeinflussung des Entnahmestellen EB1 ist auch in Abbildung 48 dargestellt, welche ebenfalls aus dem automatisierten Modellbericht entnommen ist (jeweils Abbildung 2.11 in Anlage 6 und 7). Im automatisierten Modellbericht wird die Temperaturentwicklung an den Entnahmestellen dargestellt. Liegt eine Beeinflussung durch einen Rückgabestellen vor, wird ein entsprechender roter Warntext ausgegeben (siehe Text in Rot in Abbildung 48). Der Grad der Beeinflussung ist hier auch im Zusammenhang mit der folgenden Diskussion der Energiebilanz vom Anwender zu interpretieren.

Auch in der Energiebilanz im automatisierten Modellbericht ist die thermische Beeinflussung der Brunnen ersichtlich (Abbildung 49, gestrichelte orange Linie). Ein nicht unerheblicher Teil der eingetragenen Energie an den Rückgabestellen verlässt im Fallbeispiel mit dem vergleichsweise niedrigen k_f -Wert das Modell über die Entnahmestellen. In einer realen Anlage würde dies zu einer Erhöhung der Einleittemperatur führen (und gegebenenfalls zu einem sich verstärkenden Temperatureffekt, der u.U. zum Versagen der Anlage führen kann). Diese Rückkopplung auf die geothermische Anlage ist jedoch nicht in LGRBtom implementiert. Die Rückgaberate und Temperaturdifferenz bleiben somit unbeeinflusst von der Temperaturentwicklung am Entnahmestellen auf den im Modellinput eingegebenen Werten.

Bei Hinweisen auf einen thermischen Kurzschluss in einer Anlage sind weitergehende Maßnahmen notwendig, z. B. Änderung der Lage der Brunnen, Anpassung der Förderraten, etc. **Bei thermischen Kurzschlägen innerhalb einer Anlage ist eine verlässliche Temperaturfeldberechnung daher mit LGRBtom nicht möglich.**

Der Anwender trägt die Verantwortung, die Unsicherheit im k_f -Wert, welche auch nach einer Erkundung mit Pumpversuchen bestehen bleibt, durch geeignete Variationsrechnungen abzubilden.



Abbildung 47: Maximale Ausbreitung der Temperaturfahnen für die Fälle „ k_f -niedrig“ (oben) und „ k_f -hoch“ (unten)

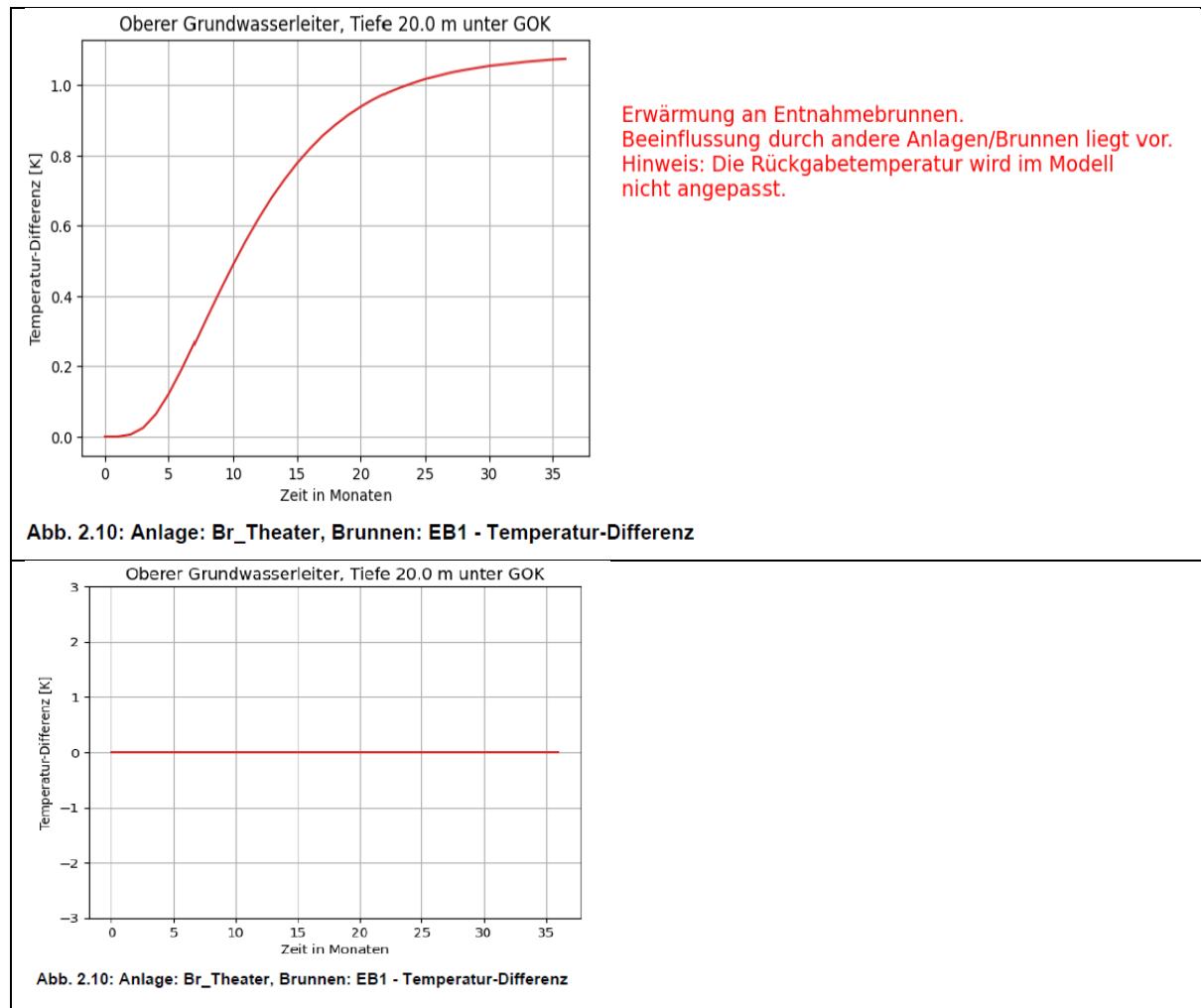


Abbildung 48: Beeinflussung am Entnahmestellen EB1. Oben Fall „ k_f -niedrig“ und unten Fall „ k_f -hoch“ (aus: Anlage 6 und 7).

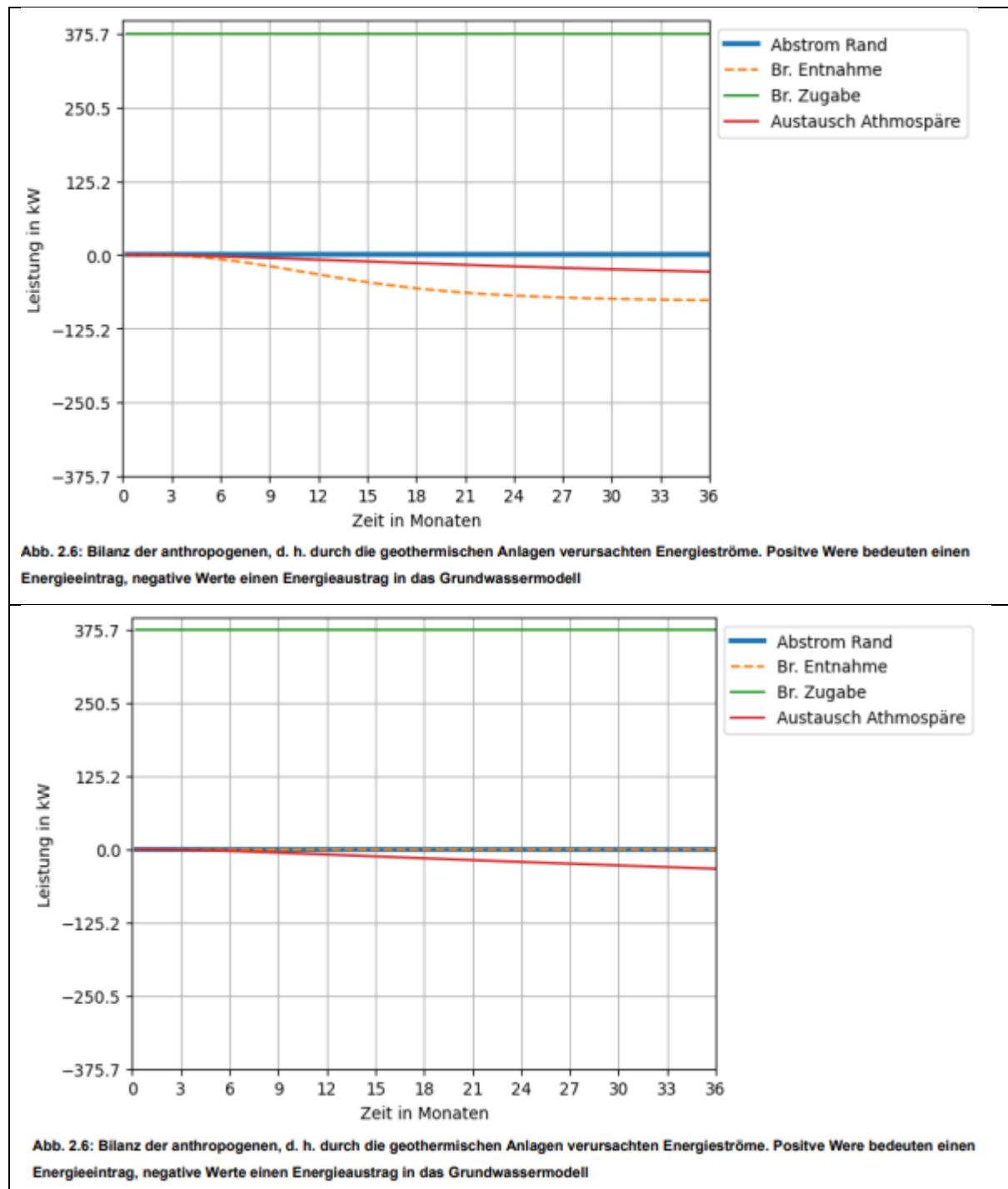


Abbildung 49: *Energiebilanz mit den anthropogenen Energieströmen für den Fall „k_f-niedrig“ (oben) und den Fall „k_f-hoch“ (unten)*

4.5 Vergleich räumliche Diskretisierung „Standard“ vs „Hohe Auflösung“

Dieses Kapitel behandelt den Parameter „Räumliche Diskretisierung“, für welchen der Anwender im Modelinput die Auswahl zwischen „Standard“ oder „Hohe Auflösung“ (in LGRBtom: „Experteneinstellungen aktivieren“) hat (siehe hierzu Kapitel 2.3.1 und Kapitel 3.3). Wie zuvor beschrieben, kann die Rechendauer eines Modells mit der räumlichen Diskretisierung „Hohe Auflösung“ um einen Faktor von 4 höher sein als bei

einem identischen Modell mit der Einstellung „Standard“ (siehe Kapitel 3.3). In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen der Wahl der räumlichen Diskretisierung bei der Modellierung mit LGRBtom auf die Ergebnisse genauer betrachtet werden.

In der Ausbreitung der Temperaturfahnen macht sich eine „grobe“ räumliche Diskretisierung im Wesentlichen über zwei Effekte bemerkbar im Vergleich zu einer höher aufgelösten räumlichen Diskretisierung:

- flachere Temperaturgradienten, verursacht durch eine zusätzliche Vermischung als Folge der sogenannten numerischen Dispersion,
- mögliche Oszillationen im Ergebnis, d.h. es können Temperaturmaxima oder -minima an Stellen auftreten, die nicht physikalisch begründet sind (siehe numerisches Stabilitätskriterium Gitter-Peclet Zahl in Kapitel 3.3)

Wie im Kapitel zuvor wird eine Anlage mit drei Entnahme- und drei Rückgabebrunnen betrachtet. Der obere Grundwasserleiter hat eine Mächtigkeit von 30 m, alle Brunnen sind darin vollständig verfiltert. Entnahme- und Rückgaberaten sind zeitlich konstant bei 10 l/s. Die Temperaturdifferenz an den Rückgabebrunnen ist ebenfalls konstant bei +3 K. Der hydraulische Gradient liegt bei 0,001. Ausgehend von den oben genannten Parametern werden zwei Fälle („Standard“ und „Hohe Auflösung“) miteinander verglichen. Die automatisierten Modellberichte sind in den Anlagen 8 und 9 gegeben.

Abbildung 50 zeigt die maximale Ausbreitung der Temperaturfahnen, entnommen aus dem automatisierten Modellbericht für die beiden Fälle. Die Einstellung „Standard“ (oben) zeigt für Temperaturdifferenzen zwischen 2 und 3 K eine gröbere und unrunde Abgrenzung der Fahne im Vergleich zur Einstellung „Hohe Auflösung“ (unten). Weiterhin kommt es im Fall „Standard“ in der Nähe des Rückgabebrunnens RB1 zu einem Bereich mit Temperaturdifferenzen >3 K, welcher im Fall „Hohe Auflösung“ nicht vorhanden ist. Hierbei handelt es sich um den oben genannten Effekt von numerischen Oszillationen, aufgrund der groben Diskretisierung.

Vergleicht man die Ausdehnung der Fahnen, vor allem der 1 K-Isothermen in Abbildung 50, so zeigt sich, dass die Fahnen in Länge und Breite nur sehr geringfügig voneinander abweichen, d.h. der Effekt der oben genannten numerischen Dispersion ist auch bei der Einstellung „Standard“ vernachlässigbar gering. Die Abweichungen sollten vor allem in Relation zu wesentlich gravierenderen Unsicherheiten, z. B. bezüglich der Wahl des k_f -Werts (siehe Kapitel 4.4) bewertet werden.

Es wird daher empfohlen, Simulationen mit LGRBtom generell mit der Einstellung „Standard“ durchzuführen, da die Rechendauer etwa um einen Faktor 4 geringer ist als mit der Einstellung „Hohe Auflösung“ und die Auswirkungen auf die Berechnung der Länge der Temperaturfahne vernachlässigbar sind. Eine Durchführung mit einer

räumlichen Diskretisierung „Hohe Auflösung“ ist nur in Sonderfällen in Erwägung zu ziehen, wenn die zu erwartenden Rechenzeiten vertretbar sind.



Abbildung 50: Maximale Ausbreitung der Temperaturfahne für den Fall "Standard" (oben) und den Fall "Hohe Auflösung" (unten)

4.6 Bestimmung einer ausreichenden Mächtigkeit des Liegenden

Um den hydrogeologischen Aufbau für die Temperaturfeldberechnung in Situationen mit gering durchlässigem Liegenden und daraus resultierenden geringen Abstandsgeschwindigkeiten (< 10 cm/Tag) angemessen zu berücksichtigen, ist die Wahl der richtigen Konduktionslänge für die thermische Beeinflussung des Liegenden notwendig. Die Konduktionslänge lässt sich exakt nur numerisch berechnen; sie kann jedoch vorab analytisch von LGRBtom abgeschätzt werden.

Zur Sensitivitätsprüfung solcher Abschätzungen werden in diesem Kapitel verschiedene Simulationen mit LGRBtom und deren resultierende Temperaturausbreitungen im Liegenden mit der Abschätzung mittels der Konduktionslänge in Gl. 10 verglichen.

Die Auswertung und Diskussion in diesem Kapitel findet unter der Annahme statt, dass das Liegende im hydrogeologischen Modell als hydraulisch undurchlässig angenommen wird und der Wärmetransport im Liegenden rein konduktiv stattfindet. Ist die Modellschicht unterhalb des oberen Grundwasserleiters hydraulisch durchlässig (z. B. ein zweiter Grundwasserleiter), ist der Ansatz zur Ermittlung der Konduktionslänge nach Gl. 10 nicht zulässig, da die vertikale Ausbreitung der Wärme von der Advektion und der hydromechanischen Dispersion dominiert wird.

Wenn das Liegende ebenfalls ein Grundwasserleiter ist, wird für die Modellierung mit LGRGtom empfohlen, die Mächtigkeit des Liegenden gleich der gesamten Mächtigkeit des zweiten Grundwasserleiters zu setzen, siehe z. B. das Fallbeispiel in Kapitel 4.2.

Ausgangslage zur Prüfung der Sensitivität der analytischen Abschätzung der Konduktionslänge ist die im automatischen Modellbericht in Anlage 10 dokumentierte Situation. Der obere Grundwasserleiter hat eine Mächtigkeit von 10 m und einen k_f -Wert von 0,001 m/s. Ein Rückgabebrunnen ist komplett im oberen Grundwasserleiter verfiltert. Die Rückgaberate beträgt konstant 5 l/s mit einem Temperaturunterschied von +5 K zur unbeeinflussten Grundwassertemperatur. Das Liegende wird als Grundwassergeingleiter eingestuft und es wird eine Mächtigkeit von 50 m angesetzt, so dass mögliche Einflüsse der Randbedingung an der Basis des Liegenden (siehe Kapitel 3.3) keinen Einfluss haben (Anlage 10). Parallel dazu wird eine Simulation für den gleichen Fall durchgeführt, bei der die Mächtigkeit des Liegenden von LGRBtom automatisch mit 10 m gemäß Gl. 10 bestimmt wird (Anlage 11). Dabei wird für die interne Berechnung in LGRBtom vereinfachend, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, ein Verhältnis der Einleittemperatur zur gesuchten Isotherme ($\frac{\Delta T_E}{\Delta T}$) von 4 in Gl. 10 angesetzt.

Aufbauend auf der oben beschriebenen Basis-Situation wurden verschiedene Parameter-Variationen mit LGRBtom simuliert (Variation von Einleittemperatur, Rückgaberate, kf-Wert, Betrachtungszeitraum). Es wurden analog zum Basisfall jeweils zwei Rechenläufe durchgeführt; ein Referenzlauf mit einer Mächtigkeit des Liegenden von 50 m und ein Rechenlauf mit einer von LGRBtom bestimmten Mächtigkeit.

Für jede Variante wurde die Fahnenlänge bei einer Mächtigkeit des Liegenden von 50 m mit der Fahnenlänge der Läufe unter Verwendung der „Mächtigkeit berechnen“-Funktion verglichen. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 4.2 in der Spalte „Differenz Fahnenlänge“ dargestellt. Wie in der Tabelle zu sehen ist, liegt die größte Differenz der Fahnenlängen für die betrachteten Läufe bei 3,50 m beim Fall „T_10“ und ist somit in Relation zur Gesamtlänge der Fahne, vernachlässigbar klein. Somit ist die getroffene Abschätzung der in LGRBtom implementierten „Mächtigkeit berechnen“-Funktion ausreichend, um den Einfluss der Randbedingung an der Basis des Liegenden auf die maximale Temperaturfahnenlänge gering zu halten.

Tabelle 4.2: Variationen (rot) vom Basisfall und ermittelte Längen:

Lauf	ΔT_E [K]	Q [l/s]	k _f [m/s] Grund- wasser- leiter	t [a]	L _{Mod} [m]* mit „Mächtigkeit berechnen“- Funktion aus Modellinput	L [m] (simuliert, 50 m Mächtigkeit Liegendes)	Differenz Fahnenlänge [m] **
Basisfall	5	5	0,001	1	10	8,8	1,85
T_10	10	5	0,001	1	10	11,8	3,50
T_2.5	2,5	5	0,001	1	10	5,9	0,90
T_1.25	1,2 5	5	0,001	1	10	2,5	-0,50
k _f _5e-4	5	5	5·10 ⁻⁴	1	10	8,8	0,95
k _f _2e-3	5	5	0,002	1	10	8,8	2,20
k _f _4e-3	5	5	0,004	1	10	6,5	-0,80
Q_10	5	10	0,001	1	10	8,8	2,50
t_2a	5	5	0,001	2	14	14,7	0,90
t_4a	5	5	0,001	4	19	17,6	1,00
t_8a	5	5	0,001	8	28	23,5	-2,50

* L_s wurde hier mit der „Mächtigkeit berechnen“-Funktion von LGRBtom basierend auf Gl. 10 mit einem konstanten Verhältnis von $\frac{\Delta T_E}{\Delta T} = 4$ berechnet

** Differenz Fahnenlänge = Fahnenlänge aus Lauf mit berechneter Mächtigkeit (s. L_{Mod} Tabelle 4-1) – Fahnenlänge aus identischem Lauf aber mit einer pauschalen Mächtigkeit von 50 m

4.7 Rückgabe durch eine Rigole

Die Rückgabe des thermisch genutzten Wassers erfolgt bei manchen Anlagen über sogenannte Rigolen. Das Wasser wird dabei über einen Graben oder ein horizontal verlegtes Rohr in der ungesättigten Zone versickert und nicht über einen im Grundwasser verfilterten Rückgabebrunnen. Ob diese Art der Rückgabe möglich ist, muss vorab hydrogeologisch bewertet werden. Bei gespannten Systemen mit mächtigen gering durchlässigen Deckschichten ist der Bau von Rigolen eher nicht möglich. Bei ausreichend durchlässigen sowie gering durchlässigen Grundwasserüberdeckungen können Rigolen u. U. geeignet zur Rückgabe sein.

Um diese Art von System mit LGRBtom abbilden zu können, müssen einige Vereinfachungen angenommen werden:

- Eine Versickerung in der ungesättigten Zone ist in LGRBtom nicht implementiert. Es kann hilfsweise und vereinfachend die Filterstrecke im ersten Meter des oberen Grundwasserleiters angenommen werden. Dies führt zu einer unverzüglichen Infiltration des Rückgabewassers und vernachlässigt den verzögernden Effekt der Versickerung in der ungesättigten Zone. Dadurch wird auch der Energieeintrag bzw. -austausch in die Atmosphäre verringert. Es lässt sich somit festhalten, dass dem oberen Grundwasserleiter mehr Energie zugegeben bzw. entnommen wird und somit die Temperaturfahne überschätzt wird.
- Der Versickerungsgraben bzw. das horizontale Rohr einer Rigole können in LGRBtom mittels einer Reihe von Brunnen entlang des Graben- bzw. Rohrverlaufs angenähert werden.

In diesem Kapitel werden zwei Simulationen mit LGRBtom durchgeführt, in denen eine Rückgabe von erwärmtem Wasser über eine linienförmige Rigole mit einer Länge von 15 m erfolgt. Die Rückgaberate liegt für dieses Fallbeispiel bei 5 l/s mit einem ΔT_E von +3 K. Die beiden Simulationen unterscheiden sich in der Anzahl an Brunnen und dem Abstand zwischen den Brunnen, mit denen die Rigole vereinfacht nachgebildet wird.

In der ersten Simulation wird die Rigole mit drei Brunnen und einem jeweiligen Abstand von 5 m abgebildet (dokumentiert in Anlage 12). Im zweiten Fall wird die Anzahl der Brunnen auf fünf erhöht, bei jeweiligem Abstand von 2,5 m (dokumentiert in Anlage 13). Die Rate von 5 l/s wird zu gleichen Teilen auf die drei bzw. fünf Brunnen aufgeteilt. Die Lage der Rückgabeburnnen für die beiden Fälle ist in Abbildung 51 gegeben.



Abbildung 51: Umsetzung der Rigole mit Brunnen. Links: Fall mit 3 Brunnen und einem Abstand von 5 m. Rechts Fall mit 5 Brunnen und einem Abstand von 2,5 m

Die maximale Temperaturausbreitung im oberen Grundwasserleiter für die beiden Fälle ist in Abbildung 52 gegenübergestellt. Die Abbildungen sind dem automatisierten Modellbericht in Anlage 12 bzw. 13 entnommen. Es zeigt sich, dass die beiden Fäden nahezu identisch sind. Somit lässt sich festhalten, dass ein Abstand von 5 m zwischen den Brunnen ausreichend ist, um die Rigole in LGRBtom abzubilden. Von einem zu feinen Abstand < 2,5 m zwischen den Brunnen wird abgeraten, da dies zu Problemen bei der Gittererstellung führen kann.



Abbildung 52: Vergleich der maximalen Ausbreitung der Temperaturfahnen für den Basisfall. Entnommen aus dem automatisierten Bericht (Abb. 2.4). Oben: Rigole umgesetzt mit 3 Rückgabebrunnen und einem Abstand zwischen den Brunnen von jeweils 5 m. Unten: Rigole umgesetzt mit 5 Rückgabebrunnen und einem Abstand zwischen den Brunnen von jeweils 2,5 m.

4.8 Kleinanlagen und Einfluss der Dispersivität

Die Anforderungen zur Berechnung der Temperaturfelder für sogenannte Kleinanlagen sind im Leitfaden des Umweltministeriums (2009) beschrieben. Wenn solche Berechnungen alternativ mit LGRBtom durchgeführt werden, müssen die Vorgaben zur Ermittlung der Dispersivität berücksichtigt werden. In diesem Kapitel soll der Einfluss der Dispersion auf die Wärmeausbreitung bei kleinen thermischen Anlagen mit geringer Entnahmemenge betrachtet werden. Die Entnahme und Rückgaberate entsprechen dabei 0,3 l/s. Es werden zwei Szenarien betrachtet:

- Szenario 8a mit einer longitudinalen Dispersivität von 3,4 m und einer transversalen Dispersivität von 0,34 m (Bericht Anlage 14)
- Szenario 8b mit einer longitudinalen Dispersivität von 7,5 m und einer transversalen Dispersivität von 0,75 m, gemäß der in LGRBtom standardmäßig angesetzten Dispersivitäten, siehe hierzu auch Tabelle 3.1 (Bericht Anlage 15)

Bei Szenario 8b werden die beiden als Standardwerte eingesetzten Dispersivitäten angewendet, welche einem stark heterogenen Untergrund entsprechen. Szenario 8a bildet einen mittleren Grad der Inhomogenitäten ab (s. Kapitel 3.1). Weiterhin wird die longitudinale Dispersion als zehnfaches der transversalen Dispersion angenommen.

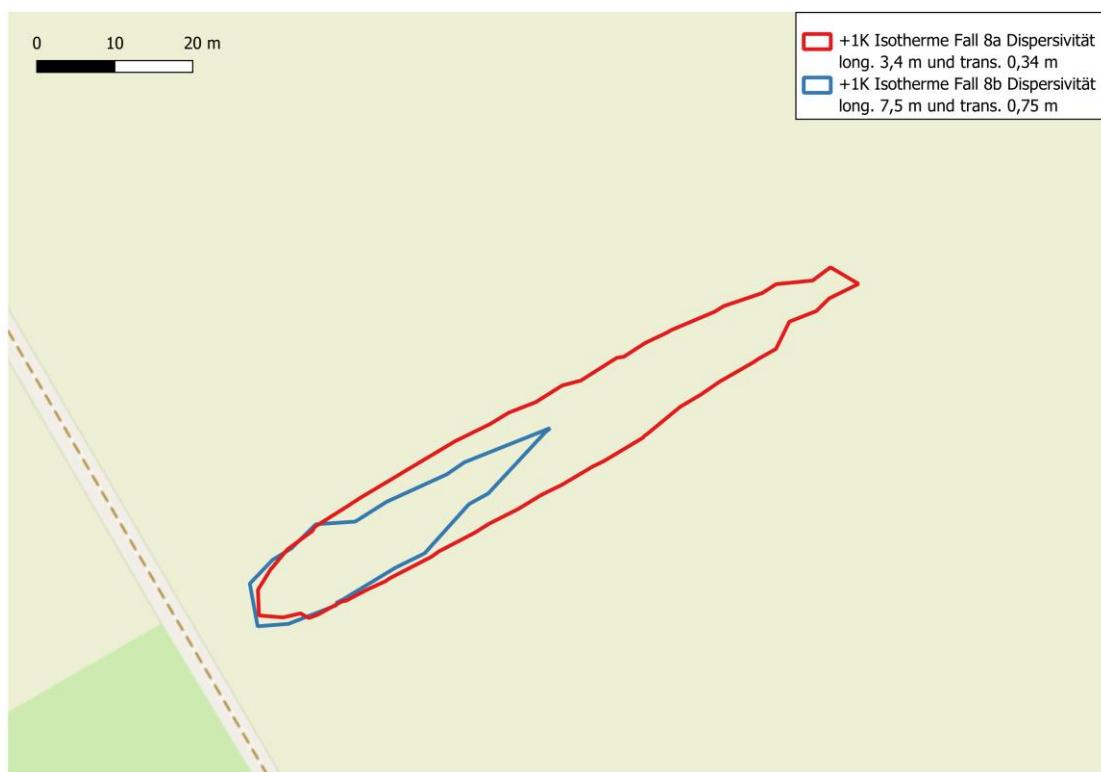


Abbildung 53: Konturen der 1 K-Isotherme

Abbildung 53 zeigt, dass die +1 K Isotherme im Fall der niedrigen Werte der Dispersivität viel weiter reicht als im Fall mit höherer Dispersion. Eine Erhöhung der Dispersivität führt zu einer Erhöhung der Durchmischung über die Flanken der Temperaturfahne, was zu einer geringeren Fahnenlänge führt. In beiden Fällen wird aufgrund der geringen Leistung der Anlage ein quasistationäres Temperaturfeld innerhalb von ca. 2 Jahren erreicht, wie aus dem Vergleich der anthropogenen Energieströme in Abbildung 54 erkennbar ist. Aus der Energiebilanz wird weiterhin deutlich, dass ein Großteil des Energiestroms das Modellgebiet über den Abstromrand verlässt. Dies liegt daran, dass zur Abbildung der 1 K Isotherme, welche für die Gebietsgrößenbestimmung herangezogen wird, siehe Kapitel 3.3, nur ein vergleichsweise kleines Modellgebiet für eine kleine Anlage benötigt wird. Temperaturdifferenzen < 1 K können somit den Abstromrand des Modells erreichen.

Die Energieströme in Abbildung 54 sind trotz der unterschiedlichen Ausbreitung der 1 K Isotherme nahezu identisch. Bei den Transportmechanismen handelt es sich um lineare Prozesse, so dass der Austausch mit der Atmosphäre bei kleineren Temperaturdifferenzen (Fall 8b größere Dispersivität) auf einer größeren Fläche stattfindet und identisch ist mit dem Austausch bei größeren Temperaturdifferenzen auf einer kleineren Fläche (Fall 8a kleinere Dispersivität). Da in beiden Fällen ein quasistationäres Temperaturfeld erreicht wird und die Modellgebiete eine ähnliche Größe aufweisen, muss folglich auch der Austrag über den Modellrand annähernd gleich sein.

Dieses Beispiel zeigt, dass LGRBtom auch für die Berechnung von Temperaturfeldern bei Kleinanlagen herangezogen werden kann, wenn eine standortangepasste hydrogeologische Abschätzung der Dispersivität erfolgt.

Weiterhin veranschaulicht dieses Beispiel grundsätzlich (sowohl für kleine als auch große Anlagen) die hohe Sensitivität der Dispersion für Temperaturfeldberechnungen und hier insbesondere die Berechnung der Fahnenlängen. Die Dispersivität an einem Standort ist in der Regel nicht bekannt und lässt sich in der Regel auch nicht mit überschaubarem Aufwand ermitteln (wie es z. B. für die k_f -Werte mittels Pumpversuchen möglich wäre). Die Dispersion muss daher hydrogeologisch abgeschätzt werden. Die in LGRBtom als Standardwert hinterlegten Dispersivitäten (longitudinal: 7,5 m, transversal 0,75 m) repräsentieren einen hohen Grad an Heterogenität und erscheinen für die in Baden-Württemberg auftretenden Kiesgrundwasserleiter entlang von Rhein, Neckar und Donau als gute erste Näherung. Wenn Hinweise auf einen mittleren Grad an Heterogenität vorliegen, sind geringere Dispersivitäten (longitudinal: 3,2 m, transversal 0,32 m) zu empfehlen.

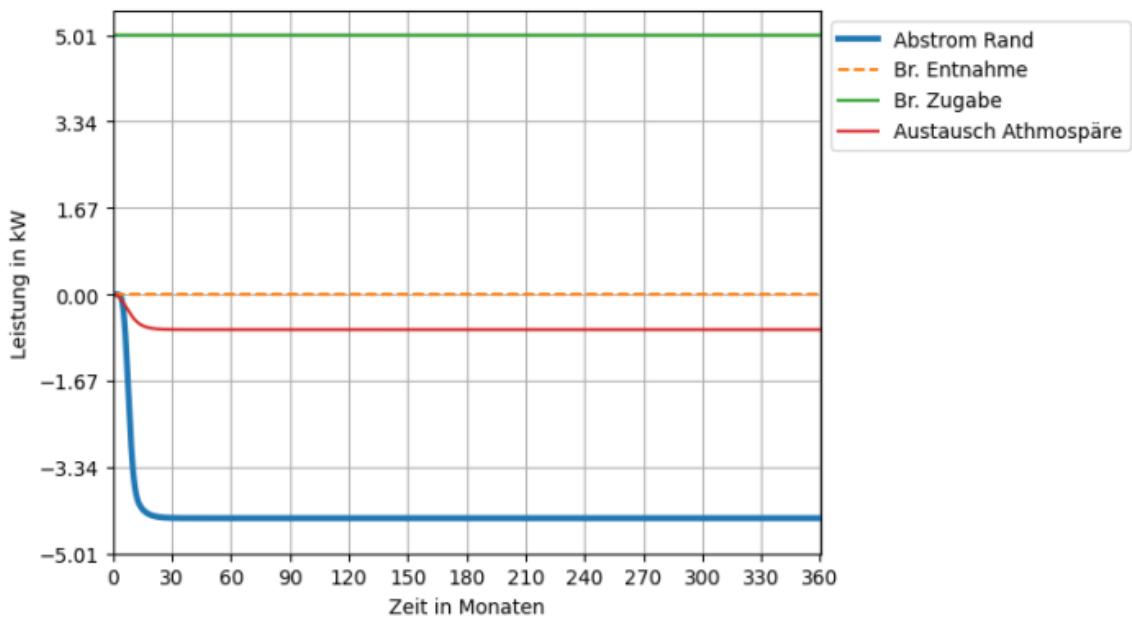


Abb. 2.4: Bilanz der anthropogenen, d. h. durch die geothermischen Anlagen verursachten Energieströme. Positive Werte bedeuten einen Energieeintrag in das Grundwassermodell, negative Werte einen Energieaustrag aus dem Grundwassermodell

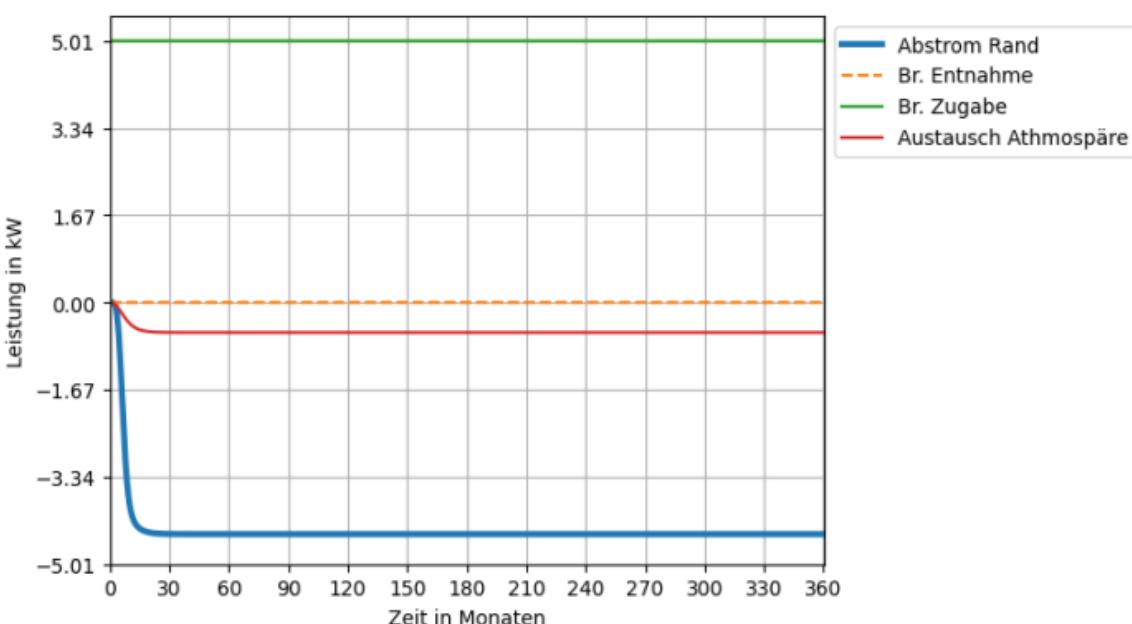


Abb. 2.4: Bilanz der anthropogenen, d. h. durch die geothermischen Anlagen verursachten Energieströme. Positive Werte bedeuten einen Energieeintrag in das Grundwassermodell, negative Werte einen Energieaustrag aus dem Grundwassermodell

Abbildung 54: Vergleich der anthropogenen Energieströme für Fallbeispiel 8a „Dispersivität al 3,4 & at 0,34“ (oben) und Fallbeispiel 8b „Dispersivität al 7,5 & at 0,75“ (unten)

4.9 Entnahmerate > Rückgaberate

Bei Berechnungen mit LGRBtom sollen die Grundwasserentnahmen- und Rückgaben nach Möglichkeit ausgeglichen sein. Bei einer unausgeglichenen Wasserbilanz zw.

Entnahme- und Rückgabebrunnen sowie bei einer großen Distanz zwischen Entnahme- und Rückgabebrunnen bestehen u.U. Einschränkungen bei den Modellergebnissen bzgl. dem hydraulischen Einflussbereich der Anlage. Dies betrifft Modellierungen bei denen der hydraulische Einflussbereich die Modellränder trifft (vgl. Anhang A)

In diesem Fallbeispiel wird eine fiktive Brunnenanlage mit unausgeglicherner Bilanz zwischen Entnahme und Rückgabe betrachtet. Hierfür wird die Entnahmerate gegenüber der Rückgaberate erhöht, wie es z. B. bei einer zusätzlichen Brauchwasserentnahme der Fall wäre. Es werden zwei Szenarien betrachtet:

- Szenario 9a mit einer Entnahme (3,3 l/s), die um 10 % größer ist als die Rückgaberate (3 l/s) (Bericht Anlage 16)
- Szenario 9b mit einer ausgeglichenen Bilanz (Entnahme und Rückgabe jeweils 3 l/s) (Bericht Anlage 17)

Die Temperaturdifferenz zwischen Einleittemperatur und Grundwassertemperatur ΔT beträgt 3 K und die k_f -Werte sowie die weiteren Parameter sind dabei in den beiden Szenarien gleich.

In Abbildung 55 unten ist der Unterschied der Aufstau- und Absenktrichter für die beiden Szenarien dargestellt. Während in Szenario 9b, bei gleicher Entnahme- und Rückgaberate Aufstau und Absenkung gleich groß sind, ist in Szenario 9a durch die um 10 % erhöhte Entnahmerate der Absenktrichter am Entnahmebrunnen deutlich größer als in Szenario 9b.

Anhand der Ergebnisse der Temperaturfahnen ist in Abbildung 55 zwischen den Szenarien 9a und 9b nur ein geringfügiger Unterschied in der Ausbreitung der 1 K Isotherme zu erkennen. Die Temperaturfahne in Szenario 9a wird erwartungsgemäß etwas stärker vom Entnahmebrunnen beeinflusst.

Vergleicht man die Ergebnisse von Szenario 9a mit Fall 3 aus der Sensitivitätsstudie in Anhang A, so sind die Auswirkungen auf Absenkung und Aufstau qualitativ vergleichbar.

Hinweis: Die in Anlage 16 und 17 jeweils in Abb.2.4 dargestellte 3 K Isotherme weist eine „eckige“ Form auf. Dies ist mit den in Kapitel 4.5 dargestellten Diskretisierungseffekten zu begründen. Eine Berechnung mit der Diskretisierung „hohe Auflösung“ würde für die 3 K Isotherme „rundere“ Form ergeben. Die Ausbreitung und Form der i.d.R. relevanten 1 K Isothermen ist jedoch weitestgehend unbeeinflusst von diesen Effekten.

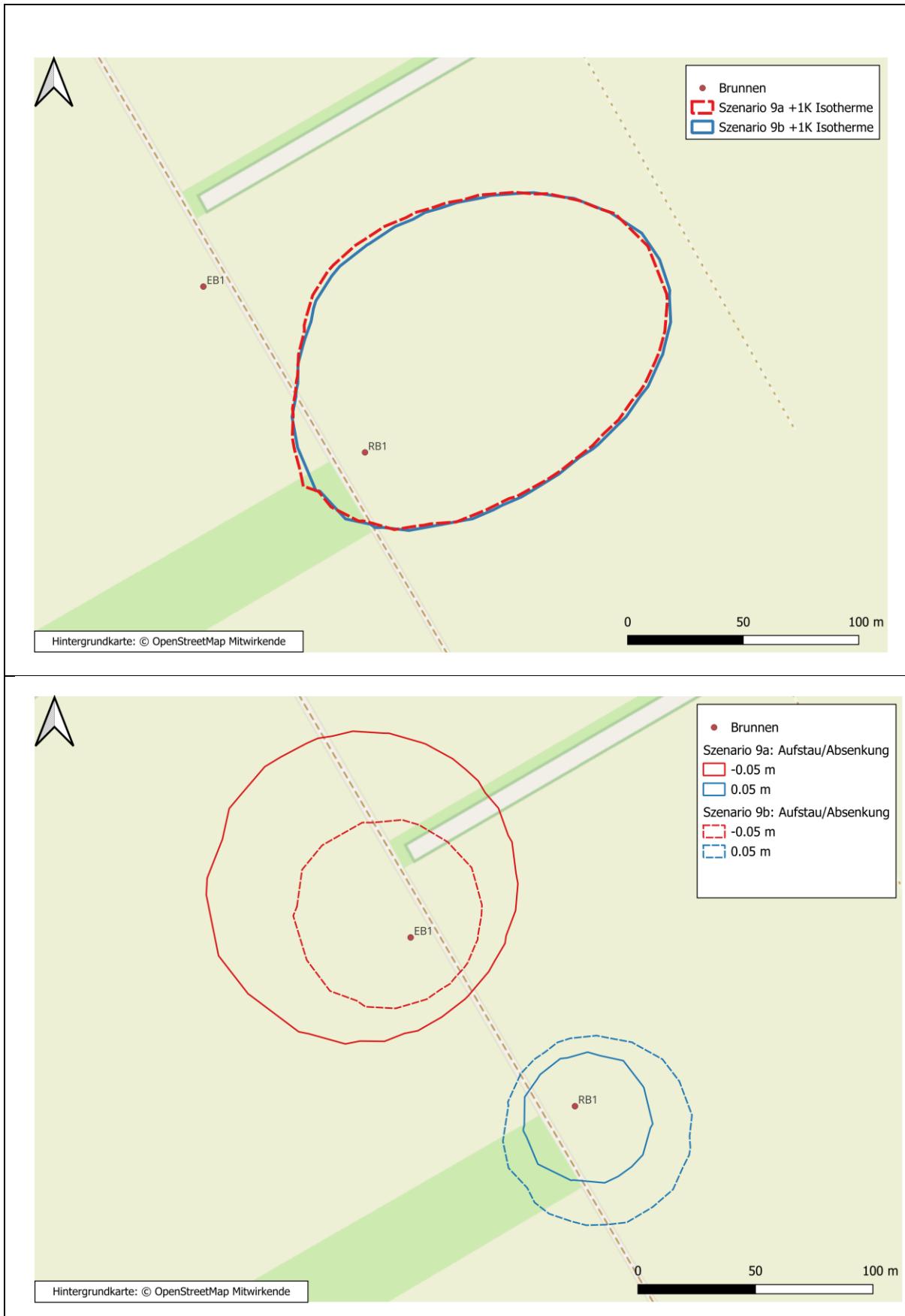


Abbildung 55: Oben: Vergleich der Konturen der 1 K Isotherme der Szenarien 9a & 9b. Unten: Absenkung/Aufstau der Szenarien 9a und 9b

LITERATURVERZEICHNIS

DVGW. (2016): Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 107 (A) - Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodele in Wassergewinnungsgebieten.

Flemisch, B., Darcis, M., Erbertseder, K., Faigle, B., Lauser, A., Mosthaf, K., Müthing, S., Nuske, P., Tatomir, A., Wolff, M. and R. Helmig (2011): DuMux: DUNE for Multi-{Phase, Component, Scale, Physics, ...} Flow and Transport in Porous Media. Advances in Water Resources 34(9): 1102-1112.

Gelhar, L. W., Welty, C., und Rehfeldt, K. R. (1992): A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 28(7), 1955–1974, doi:10.1029/92WR00607.

Helmig, R. (1997): Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface: A Contribution to the Modeling of Hydrosystems, Springer, New York

Kinzelbach, W. & Rausch, R. (1995): Grundwasser-Modellierung - Eine Einführung mit Übungen. Berlin –Stuttgart (Gebrüder Bornträger Verlagsbuchhandlung)

Kobus, H. [Hrsg.] (1992): Schadstoffe im Grundwasser / DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Band 1. Wärme- und Schadstofftransport im Grundwasser. Weinheim (VCH Verlagsgesellschaft mbH)

kup (2008): Thermische Nutzung von Grundwasser durch Wärmepumpen: Prinzipstudie zur Berechnung von Temperaturfeldern für kleine Anlagen mit Energieentzug kleiner 45.000 kWh/Jahr für charakteristische Situationen

Odenwald, B., Hekel U., Thormann H. (2017): Grundbau-Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren 8. Auflage: Grundwasserströmung Grundwasserhaltung.

Ohmer, M., Klester, A., Kissinger, A., Mirbach, S., Class, H., Schneider, M., Lindenlaub, M., Bauer, M., Liesch, T., Menberg, K., Blum, P. (2022): Calculation of temperature plumes in groundwater with analytical and numerical models. *Grundwasser* 27, 113–129. <https://doi.org/10.1007/s00767-022-00509-2>

Pophillat, W., Attard, G., Bayer, P., Hecht-Mendez, J., Blum, P. (2018): Analytical solutions for predicting thermal plumes of groundwater heat pump systems. *Renewable Energy* Volume 147, Part 2:, March 2020, Pages 2696-2707.

Rausch, R., Schäfer, W., Therrien, R., Wagner, C. (2005): Solute Transport Modelling, An Introduction to Models and Solution Strategies; Berlin –Stuttgart (Gebrüder Bornträger Verlagsbuchhandlung)

Russo S.L., Taddia G., Verda V. (2012): Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: a sensitivity analysis, Geothermics 43 (2012), Pages 66-74

Söll T. (1988): Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser; Stuttgart (Eigenverlag des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart)

Umweltministerium Baden-Württemberg (2009a): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser oder Anlagen mit Energieentzug bis zirka 45.000 kWh pro Jahr

Umweltministerium Baden-Württemberg (2009b): Arbeitshilfe zum Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser oder Anlagen mit Energieentzug bis zirka 45.000 kWh pro Jahr

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2010): VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1. Thermische Nutzung des Untergrunds: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte

Zech, A., Attinger S., Cvetkovic V., Dagan G., Dietrich P., Fiori A., Rubin Y., und Teutsch, G. (2015): Is unique scaling of aquifer macrodispersivity supported by field data? Water Resource Research 51, no. 9: 7662–7679. <https://doi.org/10.1002/2015WR017220>

Zech, A., Attinger, S., Bellin, A., Cvetkovic, V., Dagan, G., Dietrich, P., Fiori, A. und Teutsch, G. (2022): Evidence Based Estimation of Macrodispersivity for Groundwater Transport Applications. Groundwater, 61: 346-362. <https://doi.org/10.1111/gwat.13252>

DANKSAGUNG

Der Arbeitskreis „Grundwasserwärmepumpen >45.000 kWh/a“ wurde 2017 vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg initiiert. Die Idee für ein Thermisches Online Modell wurde im Rahmen einer Expertenrunde an den Arbeitskreis herangetragen, dort weiterentwickelt und schließlich wurde die Firma Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH (kup) vom Ministerium für die Umsetzung beauftragt.

Die Fachanwendung LGRBtom sowie das vorliegende Manual sind das Ergebnis der intensiven Zusammenarbeit von Fachleuten aus Ministerium, Fachbehörden, Verwaltung und Forschung.

Die Mitglieder des Arbeitskreises haben die Entwicklungen zu LGRBtom intensiv, kritisch und konstruktiv begleitet. Weiterhin wurden die Autoren des Manuals durch ein kleines Redaktionsteam aus dem Arbeitskreis (Herr Prof. Dr. Philipp Blum, Karlsruher Institut für Technologie, Angewandte Geowissenschaften und Herr Tropf, Stadt Karlsruhe, Umwelt und Arbeitsschutz) sowie vom LGRB unterstützt.

Allen Mitwirkenden aus dem Arbeitskreis, dem Redaktionsteam sowie allen nicht näher genannten Personen, die dem Arbeitskreis Unterstützung, wertvolle Beiträge und fachlichen Input lieferten, gebührt seitens kup großer Dank für ihre Mitwirkung und ihren Einsatz.

Großer Dank gebührt insbesondere Herrn Dr. Schneider und Herrn Prof. Dr. Class vom Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung an der Universität Stuttgart für die Mitwirkung an LGRBtom im Rahmen der Entwicklung und Bereitstellung des Simulations-Tools Dumux.

Anhang A Sensitivitätsbetrachtung hinsichtlich der Auswirkungen der Vernachlässigung des Speicherkoeffizienten in LGRBtom

LGRBtom beinhaltet zwei wesentliche hydraulische Vereinfachungen, deren Einfluss für die Zielstellung von Temperaturfeldberechnungen in der Skalierung einer Prinzipmodellierung nachfolgend näher beschrieben wird:

Vereinfachungen in LGRBtom

1. Annahme einer konstanten Transmissivität
2. Vernachlässigung des Speicherkoeffizienten

Eine weitere wesentliche Vereinfachung betrifft die Temperatur des aus dem Entnahmeh Brunnen geförderten Grundwassers, die als konstant angenommen wird (näher erläutert in Kapitel 4.4). Thermohydraulische Kurzschlüsse können daher mit LGRBtom zwar erkannt werden. Es erfolgt jedoch keine Rückkopplung über die Rückgabeterminatur.

Konstante Transmissivität und Vernachlässigung des Speicherkoeffizienten

Das in LGRBtom implementierte Strömungsmodell mit konstanter Transmissivität vernachlässigt den Speicherkoeffizienten. Somit wird für jeden Monat ein stationärer Strömungszustand berechnet. Die Entnahme- und Rückgaberaten können dabei von Monat zu Monat variieren. Im Folgenden soll anhand analytischer Betrachtungen untersucht werden, welche Auswirkungen diese Vereinfachung mit sich bringt. Es sei hier angemerkt, dass in LGRBtom in dem auf dem Strömungsmodell aufbauenden Wärme-Transportmodell eine instationäre Ausbreitung des Temperaturfelds durchgeführt wird.

Bei einer konstanten Entnahme gibt es in einem unendlich ausgedehnten Grundwasserleiter ohne begrenzende Randbedingungen (Gewässer, weitere Brunnen) etc. keinen stationären Zustand, d.h. der Absenktrichter bzw. Aufstau (Rückgabekegel) breitet sich mit der Zeit immer weiter aus. In stationären numerischen Modellen mit einer Brunnenentnahme werden die Absenkung bzw. der Aufstau durch innere Randbedingungen wie Gewässer oder weitere Brunnen begrenzt und/oder aber durch die äußeren Randbedingungen, d.h. durch die Modellränder.

Im Folgenden wird ein System bestehend aus einem Entnahme- und einem Rückgabebrunnen untersucht. Durch Superposition der analytischen Lösungen der einzelnen Brunnen soll untersucht werden, unter welchen Bedingungen die Vereinfachung einer stationären Strömungslösung zulässig ist, d.h. wie stark sich der

Einfluss auf den Absenktrichter bzw. den Aufstau darstellt. Hierfür wurden verschiedene Größenordnungen des Speicherkoeffizienten betrachtet. Der hier gewählte Betrachtungszeitraum entspricht 1 Monat, welcher dem in LGRBtom implementierten Ausgabeintervall entspricht. In LGRBtom werden monatlich variierende Raten für Entnahme/Rückgabe und die Spreizung vorgegeben.

Die analytische Berechnung wird mit der Formel für die Brunnenströmung im gespannten Grundwasserleiter durchgeführt¹, d.h. es wird hier die Annahme getroffen, dass die Entnahme bzw. Rückgabe zu einer vernachlässigbaren Änderung der Transmissivität führt. Diese Annahme wird auch im Strömungsmodell von LGRBtom getroffen.

$$\begin{aligned} \text{Absenkung/Aufstau} &= -\frac{Q}{4\pi T} W(u) \\ \text{mit } u &= \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot t \cdot T} \\ \text{und mit } W(u) &= -0,5772 - \ln(u) + \frac{u}{1 \cdot 1!} - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \dots \end{aligned}$$

Für die Betrachtung werden folgende Parameter vorgegeben:

m (Mächtigkeit Grundwasserleiter)	= 10 m
k_f (Hydraulische Durchlässigkeit)	= 1e-3 m s ⁻¹
T (Transmissivität)	= $m * k_f$
Q (Entnahme- bzw. Rückgaberate)	= 5 l s ⁻¹
S (Speicherkoeffizient)	= 0,2, 0,02, 0,002 [-]

Distanz zwischen Entnahme- und Rückgabebrunnen = 150 m

Die Speicherkoeffizienten werden über 3 Größenordnungen variiert (0,002 bis 0,2), wobei der größte Speicherkoeffizient einer effektiven Porosität von 20 % entspricht, was ein charakteristischer Wert für einen freien Grundwasserleiter ist. Ein Wert von 0,002 entspricht hingegen der Größenordnung wie sie in einem gespannten Grundwasserleiter vorzufinden wäre. Der betrachtete Wertebereich von 0,002 bis 0,2 ist charakteristisch für oberflächennahe Grundwasservorkommen.

1. Fall: Identische Entnahme und Rückgaberate bei einem Abstand der Brunnen von 150 m und einer Rate von 5 l/s

Abbildung A 1 zeigt die Ergebnisse für den 1. Fall mit einer identischen Entnahme- und Rückgaberate von 5 l/s. Aus der flächigen Darstellung der Absenktrichter nach einem Monat wird deutlich, dass Absenktrichter und Aufstau größer werden, je kleiner der

¹ Aus Grunda-Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren 8. Auflage: Grundwasserströmung Grundwasserhaltung; Odenwald, Hekel, Thormann Kapitel 1.6.2.1

Speicherkoeffizient wird. Wichtig ist die ausgleichende Wirkung von Entnahme und Rückgabe, welche die Ausdehnung von Absenktrichter und Aufstau reduziert, siehe hierzu auch Fall 3, wo Entnahmee- und Rückgaberate sich unterscheiden. Aus der Abbildung ersichtlich ist auch, dass die Ergebnisse für verschiedene Speicherkoeffizienten im Betrachtungsbereich zwischen den Brunnen nahezu identisch sind.

Die Ganglinien Darstellungen in Abbildung A 1 zeigen den zeitlichen Verlauf an zwei Punkten (roter und blauer Stern) für die verschiedenen Speicherkoeffizienten. Es ist zu erkennen, dass sich die verschiedenen Verläufe mit zunehmender Zeit angleichen und dass nach ca. einem Monat nur noch Unterschiede im Millimeterbereich zu erkennen sind. Unabhängig von der Höhe des Speicherkoeffizienten kann somit nach einmonatiger Betrachtungszeit in allen Fällen vereinfachend von einem quasistationären Fließzustand ausgegangen werden.

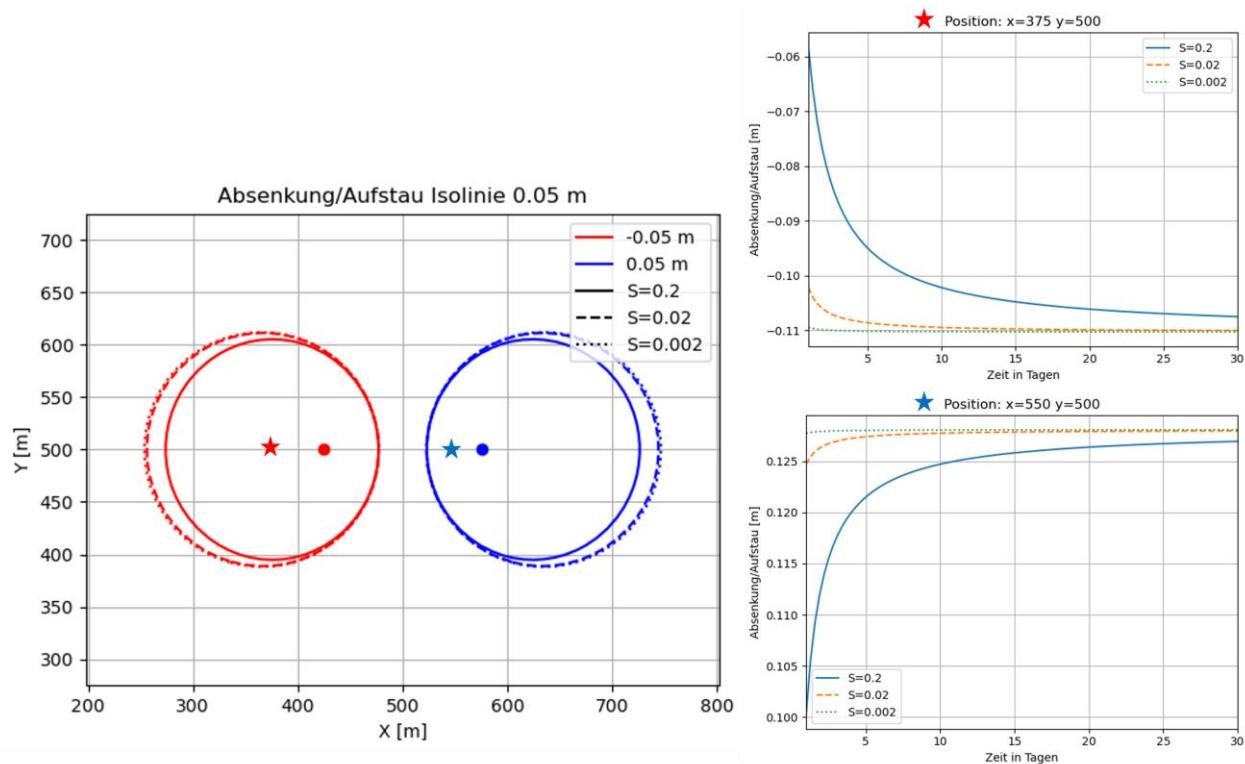


Abbildung A 1: Links Absenkung und Aufstau nach 1 Monat für verschiedene Speicherkoeffizienten. Roter Punkt Entnahmestelle, blauer Punkt Rückgabestelle. Rechts: Zeitliche Entwicklung von Absenkung und Aufstau an ausgewählten Positionen (roter und blauer Stern)

2. Fall: Identische Entnahme und Rückgabe bei einem Abstand der Brunnen von 150 m und einer Halbierung der Rate von 5 aus 2,5 l/s

Abbildung A 2 zeigt die Ergebnisse für den 2. Fall mit einer identischen Entnahmee- und Rückgaberate von 2,5 l/s. Aus der flächigen Darstellung der Absenktrichter nach

einem Monat wird deutlich, dass Absenktrichter und Aufstau in diesem Fall für verschiedene Speicherkoeffizienten fast identisch sind. Die Größe der Absenktrichter bzw. des Aufstaus ist um einen Faktor von 2 (proportional zur Reduzierung der Rate) kleiner als in Fall 1. Analog zu Fall 1 ist auch hier die ausgleichende Wirkung von Entnahme und Rückgabe zu erwähnen, welche die Ausdehnung von Absenktrichter und Aufstau reduziert, siehe hierzu auch Fall 3.

Die Ganglinien Darstellungen in Abbildung A 2 zeigt den zeitlichen Verlauf an zwei Punkten (roter und blauer Stern) für die verschiedenen Speicherkoeffizienten. Es ist zu erkennen, dass sich die verschiedenen Verläufe angleichen und dass nach ca. einem Monat nur noch Unterschiede im Millimeterbereich zu erkennen sind.

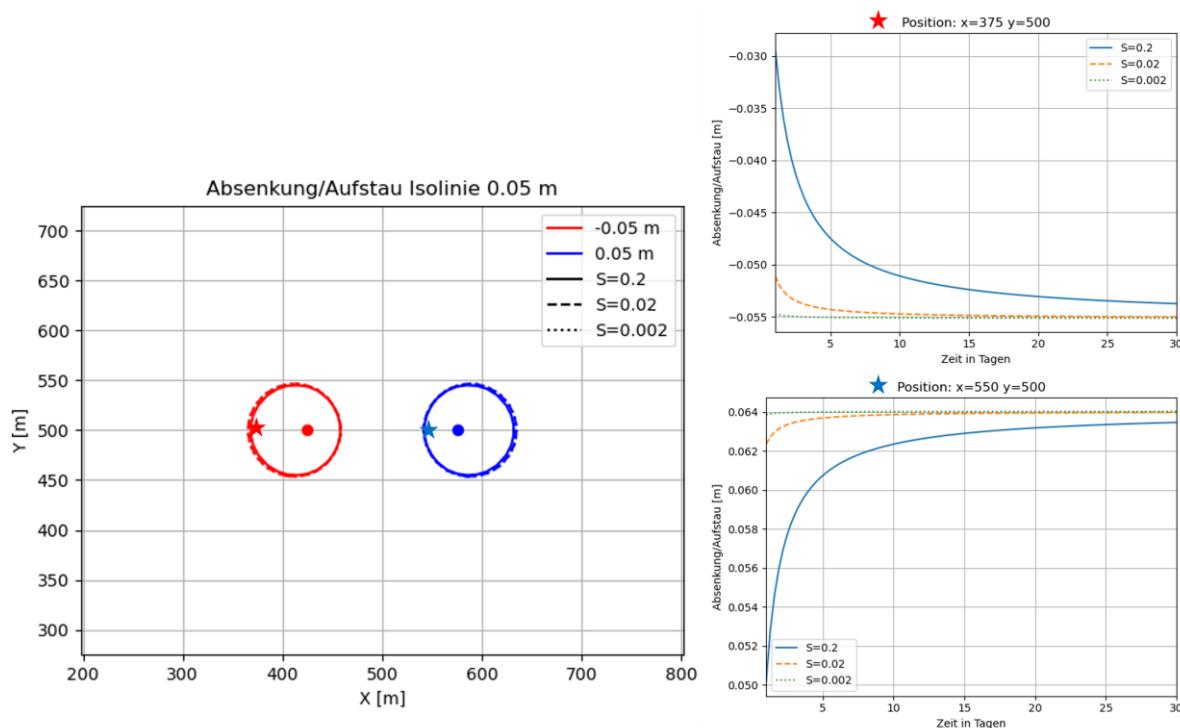


Abbildung A 2: Links Absenkung und Aufstau nach 1 Monat für verschiedene Speicherkoeffizienten. Roter Punkt Entnahmestellen, blauer Punkt Rückgabestellen. Rechts: Zeitliche Entwicklung von Absenkung und Aufstau an ausgewählten Positionen (roter und blauer Stern)

3. Fall: Erhöhung der Entnahmerate um 10 % im Vergleich zur Rückgaberate bei einem Abstand der Brunnen von 150 m

Abbildung A 3 zeigt die Ergebnisse für den 3. Fall mit einer um 10 % erhöhten Entnahmerate gegenüber der Rückgaberate von 5,0 l/s. Aus der flächigen Darstellung der Absenktrichter nach einem Monat wird deutlich, dass Absenktrichter und Aufstau sich deutlich unterscheiden. Die ausgleichende Wirkung von Entnahme und Rückgabe

ist nicht mehr gegeben. Dies spiegelt sich auch im zeitlichen Verlauf der Ganglinien in Abbildung A 3 für die verschiedenen Speicherkoefizienten wider. Es ist zu bemerken, dass die Unterscheide in dem für die Ausbreitung der Fahne relevanten Bereich zwischen den Entnahme- und Rückgabebrunnen im Millimeterbereich liegen, so dass die Ausbreitung der Temperaturfahne nicht wesentlich beeinflusst ist. In LGRBtom wird eine Warnung ausgegeben, sollten sich Entnahme- und Rückgaberaten nicht ausgleichen.

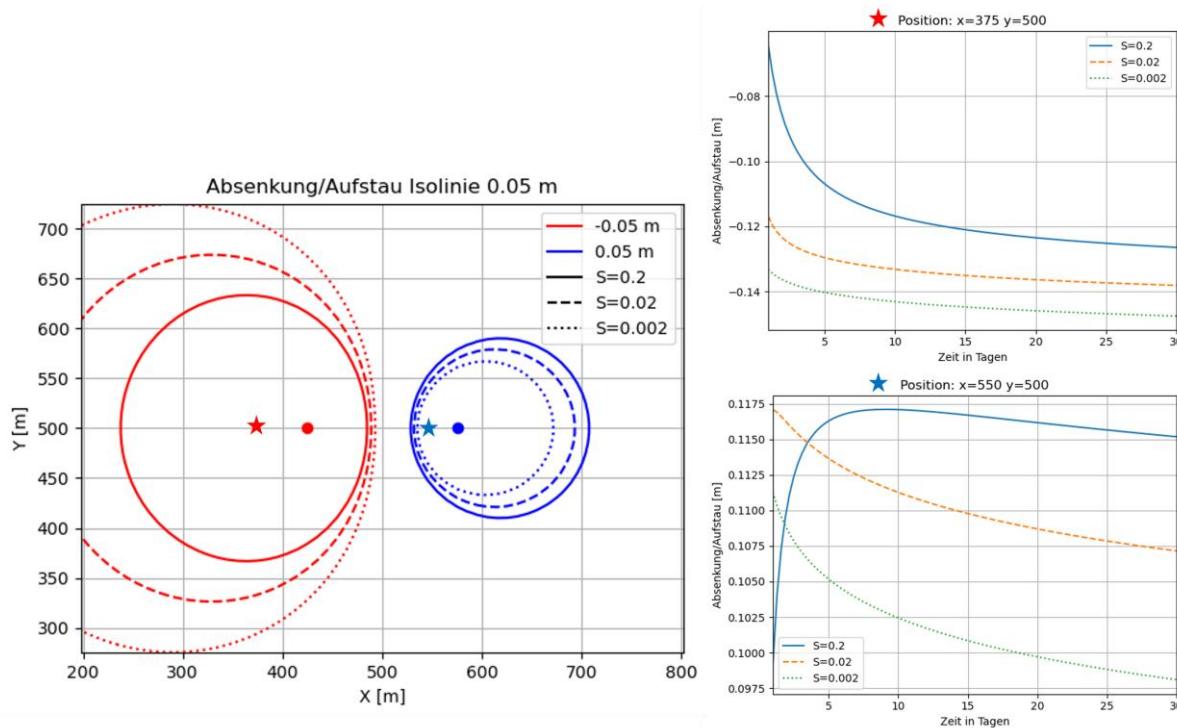


Abbildung A 3: Links Absenkung und Aufstau nach 1 Monat für verschiedene Speicherkoefizienten. Roter Punkt Entnahmestelle, blauer Punkt Rückgabestelle. Rechts: Zeitliche Entwicklung von Absenkung und Aufstau an ausgewählten Positionen (roter und blauer Stern)

4. Fall: Erhöhung des Abstands der Brunnen auf 300 m bei identischen Rückgabe- und Entnahmeraten

Abbildung A 4 zeigt die Ergebnisse für 4. Fall. Hier wurde im Vergleich zum 1. Fall der Abstand zwischen Entnahme- und Rückgabebrunnen von 150 m auf 300 m verdoppelt bei einer identischen Rückgabe- und Entnahmerate. Aus der flächigen Darstellung der Absenktrichter bzw. des Aufstaus nach einem Monat wird deutlich, dass die Größe der Absenktrichter und Aufstaus mit Abnahme des Speicherkoefizienten zunimmt. Die ausgleichende Wirkung von Entnahme und Rückgabe ist aber gegeben, so dass Absenkung und Aufstau zwischen den Brunnen nahezu identisch sind. In diesem Bereich kann somit von einer Quasistationarität ausgegangen werden.

Die Ganglinien Darstellungen in Abbildung A 2 zeigt, dass es nach einem Monat im Bereich zwischen den Brunnen zu Unterschieden im Millimeterbereich kommt. Die in LGRBtom getroffene Vereinfachung der Vernachlässigung des Speicherkoeffizienten führt somit analog zu den Ergebnissen mit kleinen Speicherkoeffizienten (0,02 und 0,002) zu einer Überschätzung der Ausdehnung des Absenktrichters bzw. des Aufstaus. Es ist auch hier zu bemerken, dass die Unterschiede in dem für die Ausbreitung der Fahne relevanten Bereichen zwischen den Entnahmee- und Rückgabebrunnen gering sind, so dass der Einfluss auf die Ausbreitung der Fahne insgesamt gering ist.

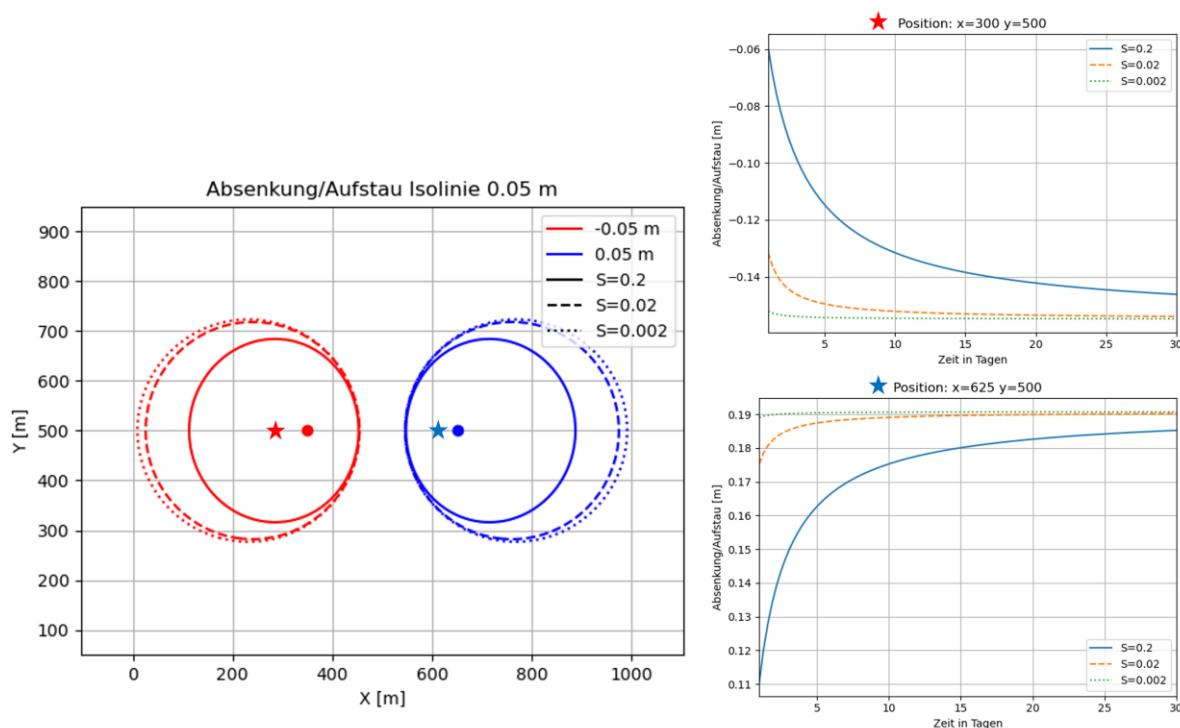


Abbildung A 4: Links Absenkung und Aufstau nach 1 Monat für verschiedene Speicherkoeffizienten. Roter Punkt Entnahmeh Brunnen, blauer Punkt Rückgabebrunnen. Rechts: Zeitliche Entwicklung von Absenkung und Aufstau an ausgewählten Positionen (roter und blauer Stern)

Zusammenfassung der Sensitivitätsstudie

Das in LGRBtom aktuell implementierte Modell mit konstanter Transmissivität, welches den Speicherkoeffizienten vernachlässigt (stationäre Strömung), liefert i.d.R. eine konservative Abschätzung des Absenktrichters bzw. des Aufstaus, d.h. einen größeren Absenktrichter bzw. Aufstau im Vergleich zu einer Betrachtung bei welcher der Speicherkoeffizient berücksichtigt wird. Dies wurde im Rahmen dieser

Sensitivitätsstudie nochmal mit einer vom numerischen Modell unabhängigen Methodik durch die Superposition von analytischen Brunnenlösungen untersucht.

Wie aus den vier betrachteten Fällen deutlich wird, führt die Annahme einer stationären Strömung bei betrachteten Zeiträumen von 1 Monat zu vergleichbaren Ergebnissen von Absenktrichter und Rückgabekegel für unterschiedliche Größenordnungen des Speicherkoeffizienten, wenn die Entnahme- und Rückgaberate den gleichen Wert aufweisen. Vor allem zwischen Entnahme- und Rückgabebrunnen sind in diesen Fällen die Absenkung bzw. der Aufstau nahezu identisch.

Wenn Entnahme- und Rückgaberate sich nicht ausgleichen, unterscheiden sich Absenktrichter und Aufstaubereich für die verschiedenen Speicherkoeffizienten. Allerdings liegen Absenkung/Aufstau zwischen Rückgabe- und Entnahmehbrunnen im Millimeterbereich. Dennoch wird von LGRBtom eine Warnung ausgegeben, wenn sich Rückgabe- und Entnahmeraten bei einer Anlage unterscheiden.

Wie in allen vier Fällen erkennbar, liegen die Unterschiede zwischen berechneter Absenkung bzw. berechnetem Aufstau für die verschiedenen Speicherkoeffizienten zwischen Entnahme und Rückgabebrunnen im Millimeterbereich. In Relation zu anderen Unsicherheiten hinsichtlich Wahl der hydraulischen Durchlässigkeiten bzw. der Dispersivitäten spielt die in LGRBtom getroffene Vereinfachung der Annahme einer stationären Strömung mit monatlich wechselnden Brunnenraten eine untergeordnete Rolle.

Auf die Ausbreitung der Temperaturfahne ist die Auswirkung der unterschiedlichen Absenktrichter bzw. des Aufstaus gering.

Anhang B Tabellarische Übersicht der Grenzwerte der Eingabeparameter in LGRBtom

Grenzwerte	Minmalwert	ggf. Warnwert	Maximalwert	Kommentar
Koordinaten Brunnen und Referenzpunkte X, Y	-	-	-	Koordinaten müssen in Baden-Württemberg liegen
Maximale prognostizierte Rechenzeit [h]			96	Wird in Schritt 2 „Modellprüfung“ ermittelt
Anzahl Anlagen	1		10	
Anzahl Brunnen (alle Anlagen)	2		40	
Anzahl Entnahmestellen	1			
Anzahl Rückgabebrunnen	1			
Summe Entnahmestellenbreite aller Anlagen [m]	0	500	750	
Abstand zwischen Brunnen aller Anlagen [m]	2		2000	
Abstand Brunnen in einer Anlage	2		1000	
Betrachtungszeitraum [a]	1		30	
Strömungsrichtung [°]	0		360	
Disp. Alpha L [m]	1		10	
Disp. Alpha T [m]	0.1		1	
hydraulischer Gradient [-]	5.00E-04		0.05	
Mächtigkeit Grundwasserüberdeckung [m]	1		50	
Mächtigkeit Oberer Grundwasserleiter [m]	3		50	
Mächtigkeit Liegendes [m]	0		50	
k_f Oberer Grundwasserleiter [$m s^{-1}$]	1.00E-05		5.00E-02	

Grenzwerte	Minmalwert	ggf. Warnwert	Maximalwert	Kommentar
k_f Liegendes [$m s^{-1}$]	0.00E+00		5.00E-02	
Porosität [-]	0.05		0.4	
Wärmeleitfähigkeit Poröses Medium [$W s^{-1} K^{-1} m^{-1}$]	0.4		5	
Wärmekapazität Poröses Medium [$MJ K^{-1} m^{-3}$])	1		3	
Entnahme-/Rückgaberate einzelne Brunnen [$I s^{-1}$]	0		30	
Temperaturdifferenz [K]	-10		10	