

**Landsratsamt Emmendingen
-Amt für Wasserwirtschaft und
Bodenschutz –
z.H. Herr Werner
Bahnhofstr. 2 - 4
79312 Emmendingen**

Donnerstag, 27. April 2023

**Grundwasserwärmepumpe Karl-Winterhalter Straße, 79346 Endingen am
Kaiserstuhl**

**Antrag auf Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis nach § 8,9 und 10 WHG
zur Grundwasserförderung aus einer Brauchwasserbrunnenanlage zum Betrieb
einer Grundwasserwärmepumpenanlage**

– Nachforderung kf-Wert Anpassung in der Modellierung -

Sehr geehrter Herr Werner,
im Auftrag von Herrn Kaltenbach reichen wir die Nachforderungen der
Antragsunterlagen, erster Antrag durch die BauGrund Süd vom 06.04.2023, mit der
Nachforderung der kf-Wert Anpassung in der Modellierung in dreifacher Ausfertigung für
die wasserrechtliche Erlaubnis zur Grundwasserförderung aus einer
Brauchwasserbrunnenanlage zum Betrieb einer Grundwasserwärmepumpenanlage.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen jederzeit gern zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

Joscha Schelhorn

Bankverbindung:

Sparkasse Freiburg n.B.
BLZ 68050101
Konto 10088878

BIC
IBAN

Geschäftsführer:

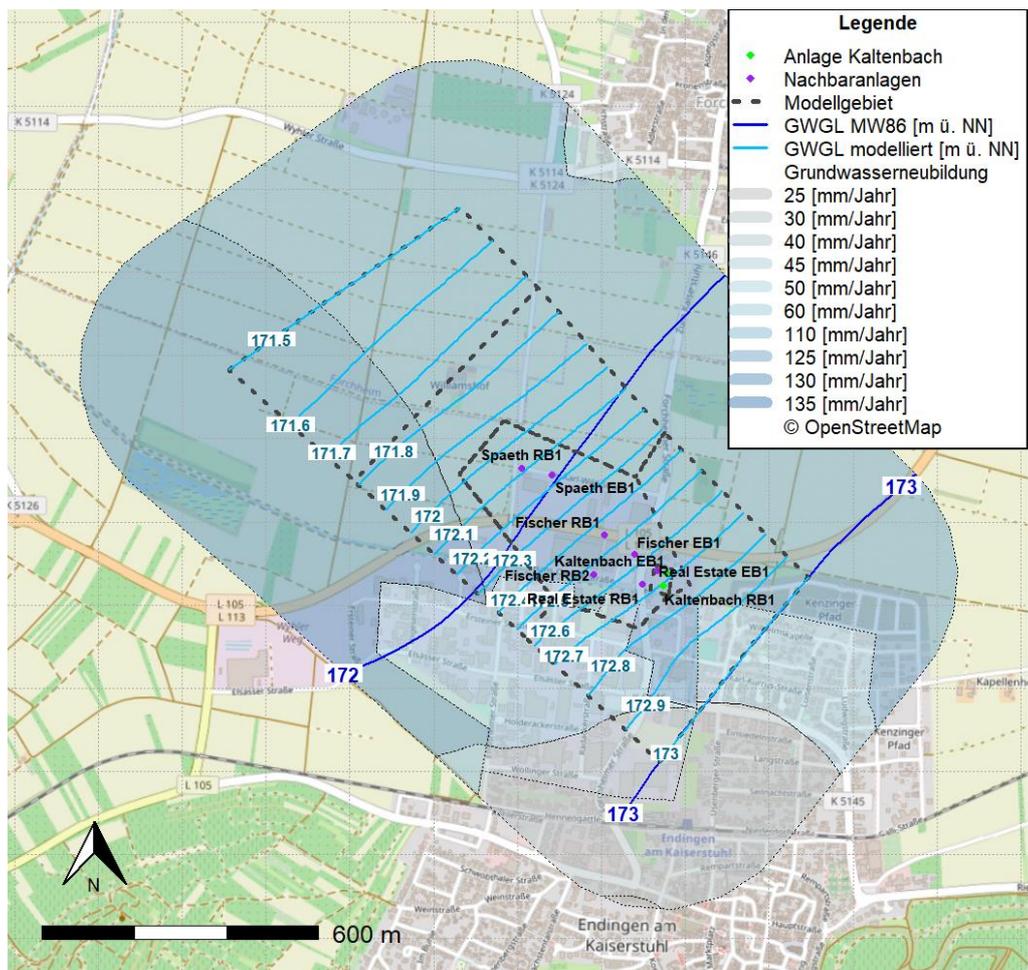
Dipl.-Hyd. Stephen Schrempf
FRSPDE66XXX
DE13680501010010088878

GIT HydroS Consult GmbH:

Steuer-Nr.: 06428/40824
Ust-Id Nr.: DE218327872
Sitz der GmbH: Freiburg i.Br.
Registergericht Freiburg, HRB 6692

Modelltechnische Untersuchung zu den Auswirkungen der Grundwasserwärmenutzung Endingen\Kaltenbach

- Mit Nachforderung kf-Wert Anpassung -



Bearbeiter: M.Sc. Hydrologie Joscha Schelhorn

Auftraggeber: Michael Kaltenbach, Albrechtstr. 15, 79346 Endingen

April 2023

GIT HydroS Consult GmbH

Bertoldstr. 61

79098 Freiburg

Tel.: +49 761 211138-10

Fax.: +49 761 211138-29

Inhalt

1	Einleitung	4
1.1	Modellgebiet	5
1.2	Hydrogeologische Situation	5
1.3	Brunnen der Grundwasserwärmenutzung	7
1.4	Grundwassernutzung zu Heiz- und Kühlzwecken	10
2	Grundwasserströmungsmodell	15
2.1	Modellaufbau	15
3	Wärmetransportmodellierung	16
3.1	Nutzungsszenarien	16
3.2	Modellierungsergebnisse	17
3.3	Abgleich gegen den "Lastfall Jahresmittel"	24
4	Zusammenfassung	26
5	Nachforderung: kf-Wert Anpassung	28
5.1	Modellanpassungen	28
5.2	Modellergebnisse	29
5.3	Fazit	32
6	Literatur	33
7	Anhang: Temperaturfelder zum Ende der Kalendermonate	35
7.1	Temperaturfelder aller Anlagen der -1 K Variante 1	35
7.2	Temperaturfelder aller Anlagen der 1 K Variante 1	36
7.3	Temperaturfelder aller der -1 K Variante 2	37
7.4	Temperaturfelder aller Anlagen der 1 K Variante 2	38
7.5	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Januar	39
7.6	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Februar	40
7.7	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende März	41
7.8	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende April	42
7.9	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Mai	43
7.10	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Juni	44
7.11	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Juli	45
7.12	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende August	46
7.13	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende September	47
7.14	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Oktober	48
7.15	Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende November	49

7.16 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Dezember 50



1 Einleitung

Auf dem Grundstück (Flurstück Nr. 11321/6) vom Bauvorhaben Kaltenbach (BV Kaltenbach), Karl-Winterhalter-Straße, 79346 Endingen am Kaiserstuhl, soll Grundwasser über Grundwasserwärmepumpen bzw. Wärmetauscher für Heiz- und Kühlzwecke genutzt werden. Im Abstrom der geplanten Anlage existieren bereits die drei Grundwasserwärmeanlagen Fischer, Real Estate und Späth. Für die modelltechnische Untersuchung der Grundwasserwärmenutzung des BV Kaltenbach in Endingen werden in diesem Modellbericht die Auswirkungen auf die Grundwassertemperatur aufgezeigt und untersucht, ob von Beeinträchtigungen oder Betroffenheiten im Grundwasser auszugehen ist.

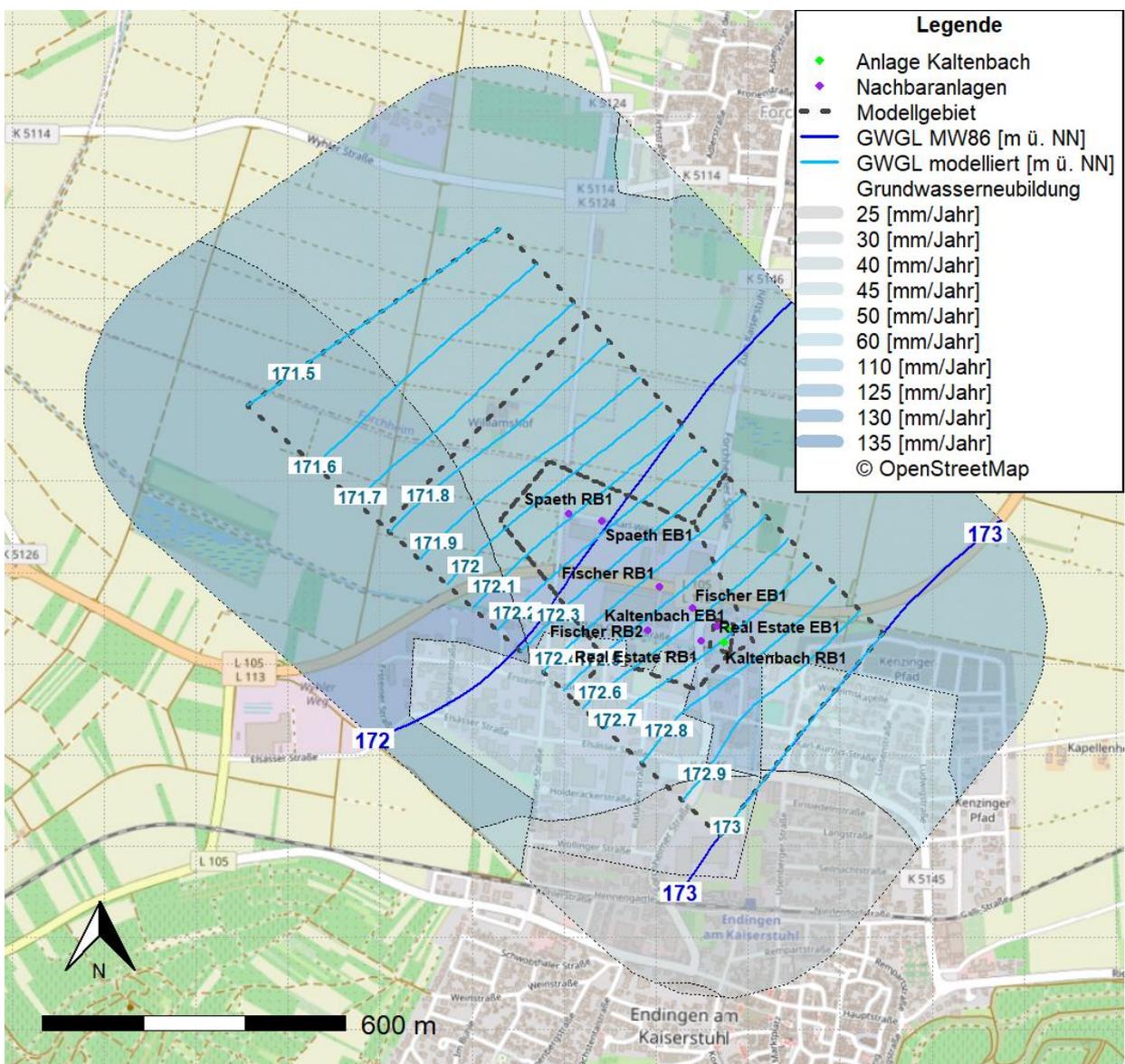


Abbildung 1: Modellgebiet mit Brunnen und Nachbaranlagen, Grundwassergleichen (MW86 und modelliert) und flächenhafte Grundwasserneubildung (GWN) nach Morhard [2022].

Im Vorfeld gab es Abstimmungen mit dem Landratsamt Emmendingen bezüglich der Vorgehensweise und der optimalen Standortortfindung. Projektstand ist, dass zum jetzigen Zeitpunkt der Bohrantrag mit einer Modellierung der Temperaturentbreitungen von den möglichen Brunnenstandorten zu stellen ist und durch das Amt der Antrag zu prüfen ist.

1.1 Modellgebiet

Das definierte Modellgebiet liegt nördlich des Kaiserstuhls, auf der Höhe von Riegel am Kaiserstuhl in der Rheinebene. Der Aufbau des Modellgebiets orientiert sich an der dortigen Grundwasserströmungsrichtung von Südost nach Nordost, welche durch den Grundwasserabstrom aus dem Elz-Glotter-Schwemmfächer beeinflusst wird. Das Modellgebiet, die Grundwassersituation und die Lage der Brunnen sind in **Abbildung 1** dargestellt.

Um störende Randeinflüsse zu minimieren, wurde das Modellgebiet ausreichend weit über die zu untersuchenden Brunnen der Wärmeanlagen Kaltenbach, Fischer, Real Estate und Späth ausgedehnt. Die SO-NW Ausdehnung des in etwa rechteckigen Modellgebiets beträgt etwa 1,6 km in der Länge und etwa 0,7 km in der Breite (SW-NO). Der Mindestabstand zur Modellgrenze beträgt im Zustrom etwa 0,3 km und im Abstrom etwa 1,3 km von den Brunnen Kaltenbach. Das Modellgebiet wurde so groß gewählt, um die drei Grundwasserwärmenachbaranlagen Fischer, Real Estate und Späth mit berücksichtigen zu können und um eine mögliche Beeinflussung bewerten zu können. In unmittelbarer Nähe zum Modellgebiet befindet sich kein Wasserschutzgebiet und es sind keine weiteren Grundwasserentnahmen im Modellgebiet bekannt.

1.2 Hydrogeologische Situation

Die Hydrogeologie bildet in diesem Bereich die Neuenburg Formation als oberste Schicht ab. Die jungquartäre, durchlässigere Neuenburg Formation, die den oberen Grundwasserleiter bildet, überlagert ohne Trennschicht die Breisgau Formation, welche den unteren Grundwasserleiter darstellt. Die Geometrie und Eigenschaften der Formationen sind in RP-LGRB [2007] detailliert beschrieben und stehen in Form von Geodatensätzen für eine direkte Nutzung im GIS zur Verfügung.

Der hochdurchlässige obere Grundwasserleiter (Neuenburg Formation) weist im Bereich der Brunnen eine Mächtigkeit von rund 33 m auf. Die Mächtigkeiten der Neuenburg Formation variieren im Modellgebiet zwischen 26 m und 38 m. Hingegen weist die Breisgau Formation als unterer Grundwasserleiter im Modellgebiet eine maximale Mächtigkeit von 58 m und eine minimale Mächtigkeit von 22 m auf. Die Geländeoberkante variiert im Modellgebiet zwischen 174 und 180 m ü. NN.

Für die Grundwassersituation wurde der Grundwassergleichenplan Mittelwasser 1986 (MW86) vom LfU [2001] herangezogen. Die Grundwasserströmung verläuft in etwa von SO nach NW mit einem Gefälle von ca. 0,9 Promille. Der

Grundwasserspiegel hat im Abstrom (NW) eine Höhe von 171,5 m ü. n NN und 173 m ü. n NN im Zustrom (SO) des Modellgebiets.

Aus den Datensätzen vom RP-LGRB [2007] ist die Durchlässigkeit des oberen Abschnittes des oberen Grundwasserleiters definiert und variiert zwischen $2,31 \cdot 10^{-3}$ m/s und $3,47 \cdot 10^{-3}$ m/s im gesamten Modellgebiet. Die kf-Wertverteilung ist in **Abbildung 2** dargestellt.

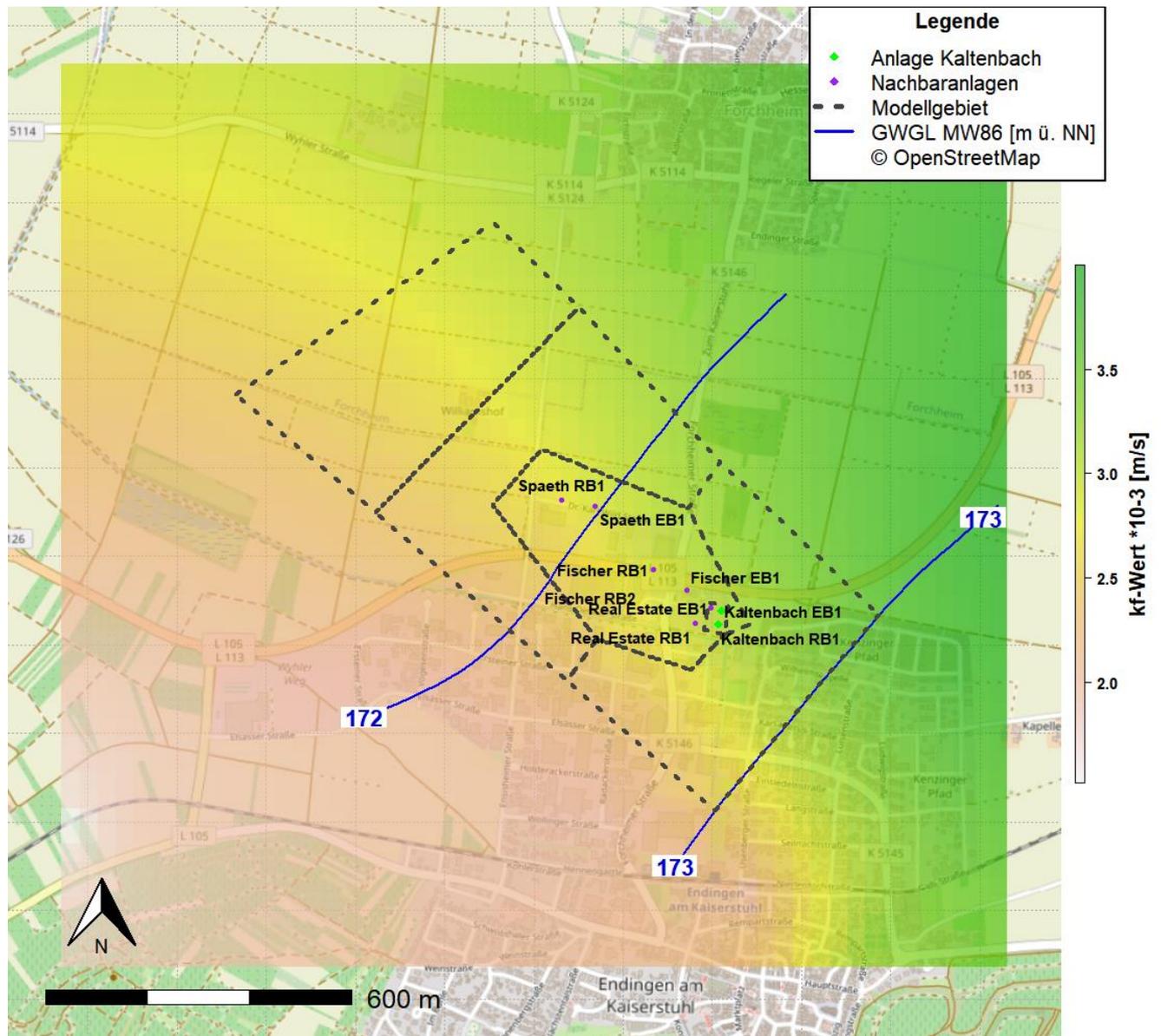


Abbildung 2: Modellgebiet mit Brunnen, Grundwassergleichen (MW86 und modelliert) und die verwendete kf-Wert Verteilung für den oberen Abschnitt des oberen Grundwasserleiters [RP-LGRB, 2007].

Bei einem mittleren kf-Wert von $2,87 \cdot 10^{-3}$ m/s für die Neuenburg Formation errechnet sich nach Marotz [1968] eine effektive Porosität von größer 0,2 und wurde aus Plausibilitätsgründen auf 0,2 festgesetzt. Daraus lässt sich eine Abstandsgeschwindigkeit im homogenen isotropen Grundwasserleiter zu

1,2 m/Tag oder 438 m/Jahr für den oberen Abschnitt des oberen Grundwasserleiters abschätzen.

Für die Durchlässigkeit des unteren Abschnittes des oberen Grundwasserleiters wurden ebenfalls die Werte vom Datensatz des RP-LGRB [2007] verwendet. Diese liegen zwischen $2,69 \cdot 10^{-3}$ m/s und $3,54 \cdot 10^{-3}$ m/s. Der untere Grundwasserleiter, Breisgau Formation, weist kf-Werte zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ m/s und $5 \cdot 10^{-3}$ m/s auf [RP-LGRB, 2007].

Die flächenhafte Grundwasserneubildung wurde aus den Berechnungsergebnissen der im Auftrag der Landesbehörden von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz durchgeführten KLIWA Langzeitsimulation 1951-2020 [Morhard, 2022] übernommen, bei der es sich um die derzeit aktuelle Fortschreibung des für den Wasser- und Bodenatlas [WaBoA, 2007] entwickelten Landesmodells der LUBW handelt. Verwendet wurde der Mittelwert für die Jahre 2001-2020, d.h. für den Zeitraum nach dem Ende der 80er- und 90er-Jahre beobachteten, markanten Temperaturanstieg („klimatischer Ist-Zustand“). Bei einer nach Landnutzung, Bodeneigenschaften und Versiegelungsgrad differenzierten Grundwasserneubildung ergibt sich für das Modellgebiet eine Grundwasserneubildung zwischen 30 und 129 mm/Jahr (**Abbildung 1**).

1.3 Brunnen der Grundwasserwärmenutzung

Auf dem Grundstück vom BV Kaltenbach soll ein Entnahmebrunnen (EB Kaltenbach, Flurstück Nr. 11321/6) und ein Rückgabebunnen (RB Kaltenbach, Flurstück Nr. 11321/6) abgeteuft werden. Da bereits 3 Grundwasserwärmepumpen im Abstrom existieren, soll die optimale Lage für den Entnahme- und Rückgabebunnen anhand einer Modellierung ausgewiesen werden, um eine Beeinträchtigung der benachbarten Anlagen ausschließen zu können.

Dafür wurden zwei unterschiedliche Standorte für die Brunnenpaare, den Entnahme- und Rückgabebunnen, in Abstimmung mit dem Landratsamt Emmendingen ausgewiesen. Die Modellergebnisse der beiden Varianten sollen die Datengrundlage liefern, um die optimalen Standorte für Entnahme- und Rückgabebunnen vorgeschlagen zu können. **Tabelle 1** gibt eine Übersicht über die Koordinaten und den Ausbau der Brunnen [Kaltenbach, 2022; LRA-EM, 2022]. In **Abbildung 3** sind alle Entnahme- und Rückgabebunnen auf der Karte dargestellt.

Der Entnahme- und der Rückgabebunnen von der geplanten Grundwasserwärmepumpe Kaltenbach sollen auf eine Endteufe von 15 m u. GOK abgeteuft werden. Die Filterstrecken werden voraussichtlich zwischen 5 und 15 m u. GOK mit einem Ausbaudurchmesser von 150 mm liegen. Dies ist unabhängig von den unterschiedlichen Brunnenstandorten.

Tabelle 1: Koordinaten und Ausbau der Brunnen Kaltenbach und die Nachbaranlagen nach Angaben von Kaltenbach und LRA-EM [2022].

	Ost UTM32 [m]	Nord UTM32 [m]	Durch- messer [mm]	Filter [m u. GOK]	Teufe [m u. GOK]	Flurstück Nr. []
EB1 Kaltenbach Variante 1	403.405,57	5.333.903,57	150	5-15	15,0	11321/6
RB1 Kaltenbach Variante 1	403.396,57	5.333.865,59	150	5-15	15,0	11321/6
EB1 Kaltenbach Variante 2	403.396,19	5.333854,07	150	5-15	15,0	11321/6
RB1 Kaltenbach Variante 2	403.378,61	5.333.857,63	150	5-15	15,0	11321/6
EB1 Fischer	403.310,61	5.333.959,55	500	8-17	17,5	14479
RB1 Fischer	403.220,64	5.334.018,53	300	5-17	17,5	14479
RB2 Fischer	403.188,66	5.333.899,58	300	5-17	17,5	14479
EB1 Real Estate	403.377,58	5.333.910,57	400	5-17	17,0	11321/5
RB1 Real Estate	403.333,60	5.333.868,59	400	18-28	28,0	11321/5

Bei der **Variante 1 (Var 1)** liegen die Brunnenstandorte an der östlichen Grenze des Flurstücks 11321/6 in einer Entfernung von etwa 40 m zueinander, wobei der Entnahmebrunnen nördlich, leicht im Abstrom vom Rückgabebrunnen liegt.

Der Entnahmebrunnen EB1 Real Estate befindet sich leicht versetzt im Abstrom zum Entnahmebrunnen EB1 Kaltenbach in etwa 29 m Entfernung. Der nächstgelegene Brunnen zum Rückgabebrunnen RB1 Kaltenbach ist ebenfalls der Entnahmebrunnen EB1 Real Estate im direkten Abstrom in etwa 49 m Entfernung (**Abbildung 3**).

Für die **Variante 2 (Var 2)** wurden die Brunnen am südlichen Rand des Flurstücks 11321/6 in einem Abstand von 18 m angeordnet, wobei sich der Rückgabebrunnen im Abstrom vom Entnahmebrunnen befindet. Im Vergleich zur Variante 1 wurde der Entnahmebrunnen um etwa 50 m und der Rückgabebrunnen um 20 m verschoben.

Vom Entnahme-/Rückgabebrunnen Kaltenbach Variante 2 aus ist der nächstgelegene Brunnen der Rückgabebrunnen RB1 Real Estate in einem Abstand von 63 bzw. 45 m. Da jedoch der Rückgabebrunnen nicht maßgeblich beeinflusst

werden kann, muss zudem der Entnahmebrunnen Real Estate betrachtet werden. Dieser liegt in einem Abstand von 52/58 m von den Entnahme-/Rückgabebrunnen von Kaltenbach (**Abbildung 3**).

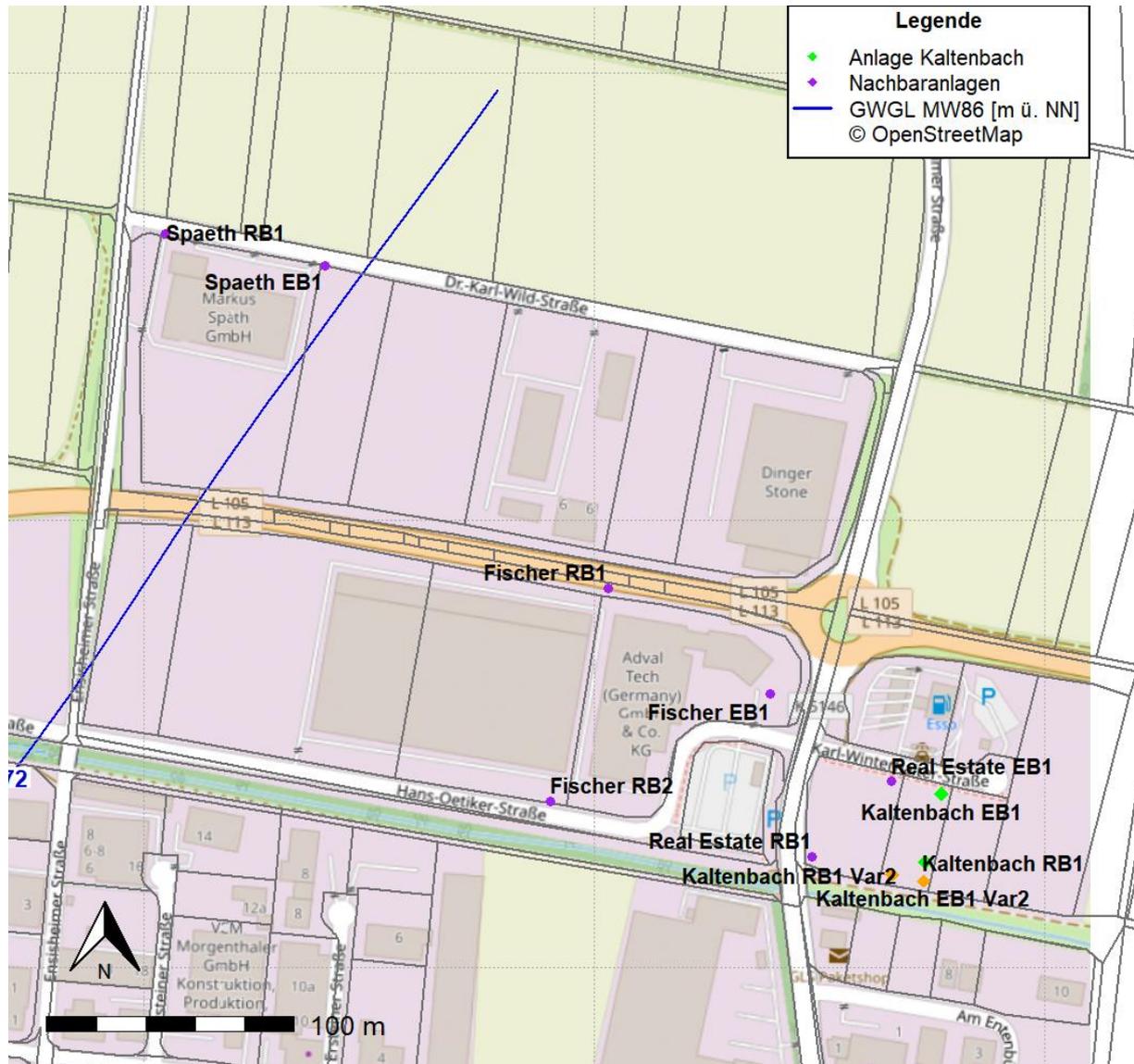


Abbildung 3: Standort der Entnahme- und Rückgabebrunnen Kaltenbach für die verschiedenen Varianten, Variante 1 (grün), Variante 2 (orange), und die Nachbaranlagen Fischer, Real Estate und Späth.

Hinweis: Bei der Standortwahl der Brunnen wurde darauf geachtet, dass die Brunnen in einem Mindestabstand von 5 m zu den Flurstücksgrenzen gewählt wurden. Die hier gewählten Koordinaten der Standorte sind nicht die finalen Koordinaten und können gegeben falls noch leicht versetzt werden. Da es sich aber nur um kleinräumige Verschiebungen handelt, können die Modellierungsergebnisse um die Differenz zum Ausgangsstandort vorschoben werden.

1.4 Grundwassernutzung zu Heiz- und Kühlzwecken

Die Kennwerte der Grundwasserwärmeanlagen Kaltenbach und der Nachbaranlagen sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. Die Kennwerte sind bei den Varianten der Brunnenstandorte gleich. Die Entnahme und Rückgabe des Grundwassers von der Anlage Kaltenbach erfolgt für den Heizbetrieb und Kühlbetrieb mit einem Volumenstrom von 1,64 l/s. Die insgesamt geförderte Menge von der bestehenden Anlage Kaltenbach beträgt pro Jahr 17.770 m³. Dies teilt sich auf in 11.810 m³ für den Heizbetrieb und 5.960 m³ für den Kühlbetrieb. In **Abbildung 4**, **Abbildung 5**, **Abbildung 6** und **Abbildung 7** sind die jährlichen Entnahmeregime aller Grundwasserwärmepumpen dargestellt.

Tabelle 2: Kennwerte der maximalen/durchschnittlichen Entnahmedauer, Volumenstrom und Gesamtentnahmemengen vom Entnahmehauptbrunnen Kaltenbach und den Nachbaranlagen nach Angaben Kaltenbach und LRA-EM, [2022].

	Volumenstrom [l/s]	Gesamtentnahme [h/Jahr]	Gesamtentnahme [m ³ /Jahr]	Max. Entnahme [m ³ /Tag]	Max. Betriebsdauer [h/Tag]	Ø-Entnahme pro Jahr [m ³ /Tag]	Ø-Entnahme pro Jahr [l/s] pro 24h	Temperatur Delta [K]
Heizung Kaltenbach	1,64	2.000	11.810	64,9	11	32,5	0,38	4
Kühlung Kaltenbach	1,64	1.010	5.960	47,2	8	16,2	0,19	4
Heizung Fischer	15,00	2.610	140.940	810,0	15	387,0	4,48	4
Kühlung Fischer	18,00	2.240	145.410	1.231,2	19	394,2	4,56	4
Heizung Real Estate	4,50	2.470	40.030	226,8	14	110,0	1,27	4
Kühlung Real Estate	5,70	2.210	45.430	369,4	18	123,1	1,42	5
Heizung Späth	1,60	2.180	12.580	69,1	12	34,6	0,40	4
Kühlung Späth	1,60	1.230	7.080	57,6	10	19,2	0,22	4

Die maximale tägliche Entnahmemenge der Anlage Kaltenbach beträgt zum Heizen 64,9 m³/Tag (11 h mit 1,64 l/s) und zum Kühlen 47,2 m³/Tag (8 h mit 1,64 l/s). Die rechnerisch mittlere Entnahme pro Jahr beträgt für die Grundwasserwärmeanlage Kaltenbach beim Heizen 32,5 m³/Tag (24 Stunden mit 0,38 l/s) und beim Kühlen 16,2 m³/Tag (24 Stunden mit 0,19 l/s). Das Temperaturdelta beträgt sowohl beim Heizen als auch beim Kühlen 4 K (**Tabelle 2**, **Abbildung 4**). Die Anlage Kaltenbach ist im Vergleich zu den Nachbaranlagen (Fischer) eine kleine Anlage.

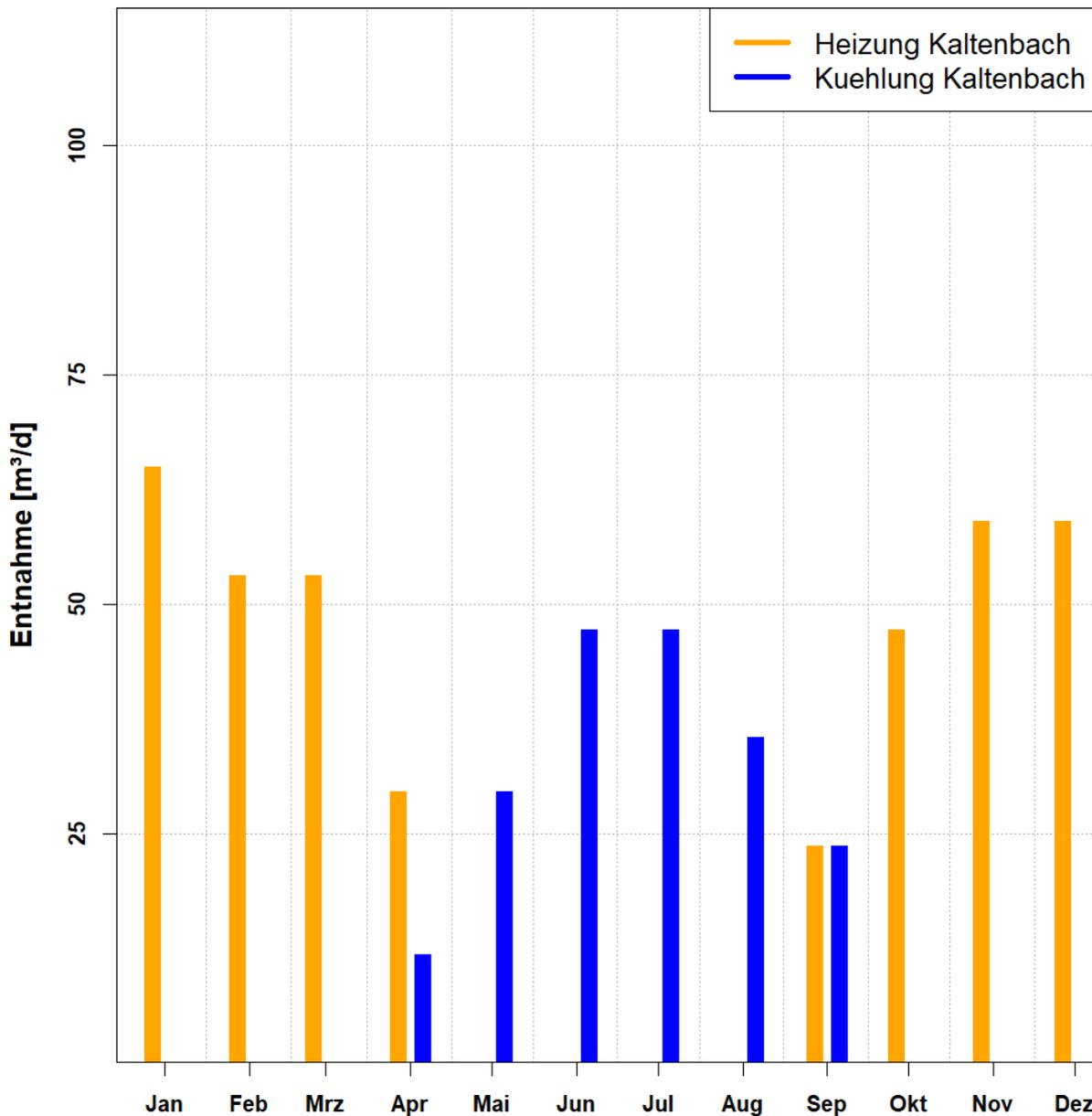


Abbildung 4: Entnahmeregime von Kaltenbach für die Grundwasserwärmeanlage nach Angaben von Kaltenbach [2022].

Die genehmigte Gesamtentnahme für die Anlage Fischer beträgt insgesamt 285.000 m³/Jahr. Diese teilt sich in 140.000 m³/Jahr fürs Heizen und 145.000 m³/Jahr fürs Kühlen auf. Für die Grundwasserwärmeanlage Fischer ist die maximale tägliche Entnahmemenge zum Heizen 810 m³/Tag (15 h mit 15 l/s) und zum Kühlen 1231 m³/Tag (19 h mit 18 l/s). Die rechnerisch mittlere Entnahme pro Jahr beträgt für die Grundwasserwärmeanlage Fischer beim Heizen 387 m³/Tag (24 Stunden mit 4,48 l/s) und beim Kühlen 394,2 m³/Tag (24 Stunden mit 4,56 l/s). Das Temperaturdelta beträgt beim Heizen und beim Kühlen 4 K (**Tabelle 2, Abbildung 5**). Die Anlage Fischer ist eine verhältnismäßig große Anlage mit einem großen Volumenstrom.

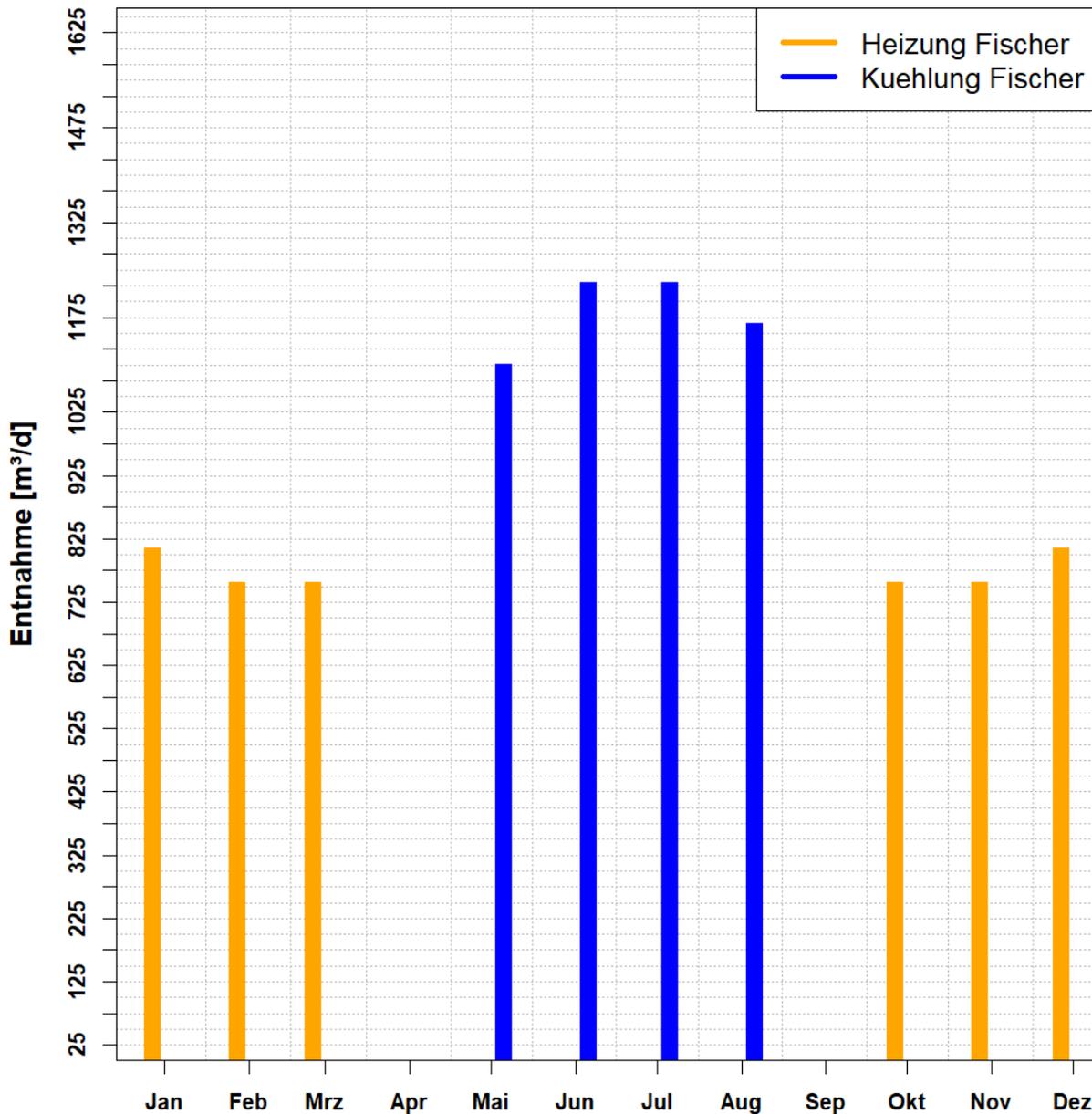


Abbildung 5: Entnahmeregime von Fischer für die Grundwasserwärmeanlage nach Angaben vom LRA-EM [2022].

Die genehmigte Gesamtentnahme für die Anlage Real Estate beträgt insgesamt 85.000 m³/Jahr. Diese teilt sich in 40.000 m³/Jahr fürs Heizen und 45.000 m³/Jahr fürs Kühlen auf. Für die Anlage Real Estate ist die maximale tägliche Entnahmemenge zum Heizen 226,8 m³/Tag (14 h mit 4,5 l/s) und zum Kühlen 369,4 m³/Tag (18 h mit 5,7 l/s). Die rechnerisch mittlere Entnahme pro Jahr beträgt für die Grundwasserwärmeanlage Real Estate beim Heizen 110,0 m³/Tag (24 Stunden mit 1,27 l/s) und beim Kühlen 123,1 m³/Tag (24 Stunden mit 1,42 l/s) (**Tabelle 2, Abbildung 6**). Die Temperaturspreizung zwischen entnommenem und wiedereingespeistem Grundwasser beträgt beim Heizen 4 K und beim Kühlen 5 K.

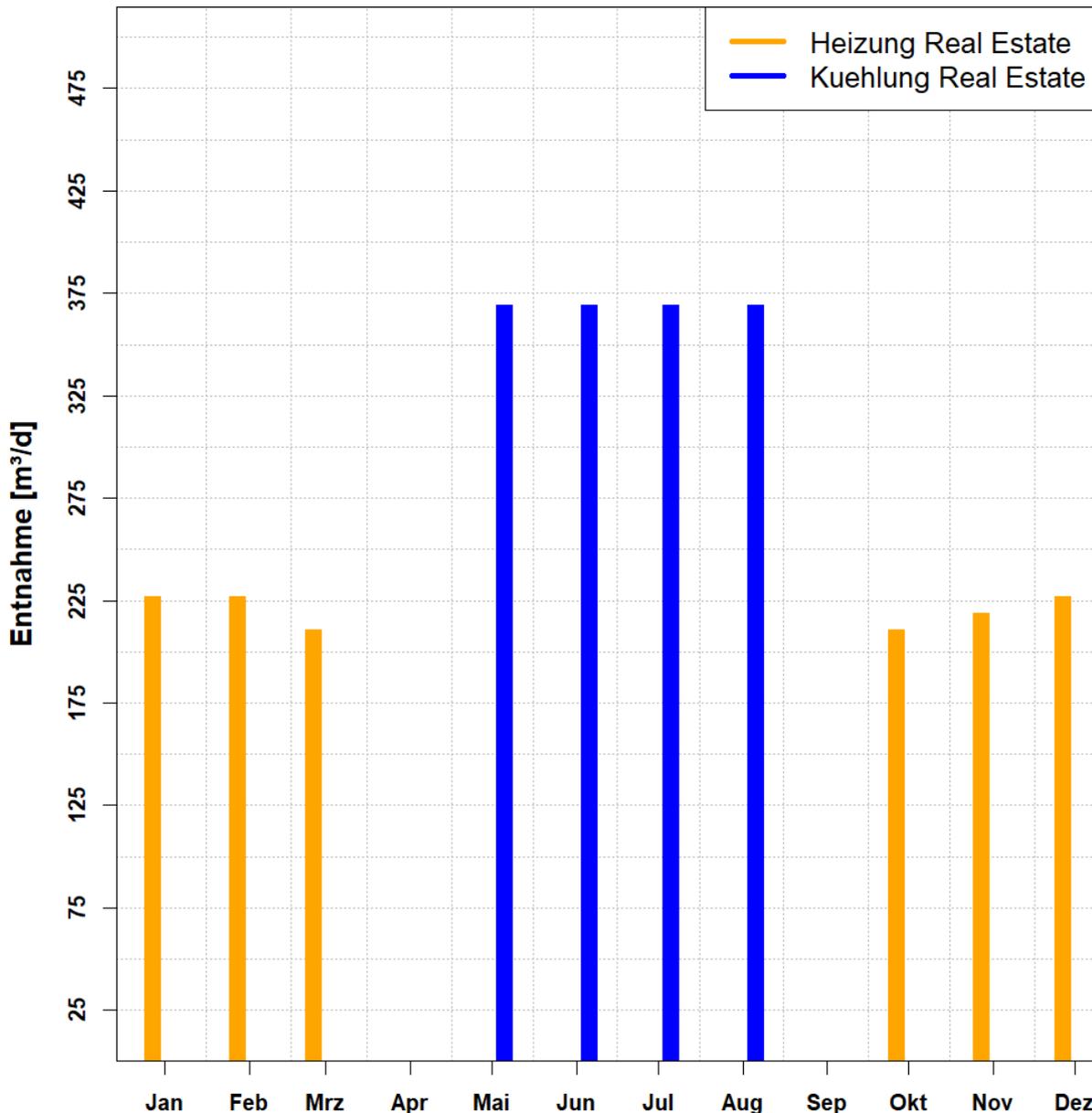


Abbildung 6: Entnahmeregime von Real Estate für die Grundwasserwärmeanlage nach Angaben vom LRA-EM [2022].

Die genehmigte Gesamtentnahme für die Anlage Späth beträgt insgesamt 19.000 m³/Jahr. Diese teilt sich in 12.000 m³/Jahr fürs Heizen und 7.000 m³/Jahr fürs Kühlen auf. Für die Anlage Späth ist die maximale tägliche Entnahmemenge zum Heizen 69,1 m³/Tag (12 h mit 1,6 l/s) und zum Kühlen 57,6 m³/Tag (10 h mit 1,6 l/s). Die rechnerisch mittlere Entnahme pro Jahr beträgt für die Grundwasserwärmeanlage Späth beim Heizen 34,6 m³/Tag (24 Stunden mit 0,4 l/s) und beim Kühlen 19,2 m³/Tag (24 Stunden mit 0,22 l/s) (**Tabelle 2, Abbildung 7**). Die Temperaturspreizung zwischen entnommenem und wiedereingespeistem Grundwasser beträgt beim Heizen 4 K und beim Kühlen 5 K.

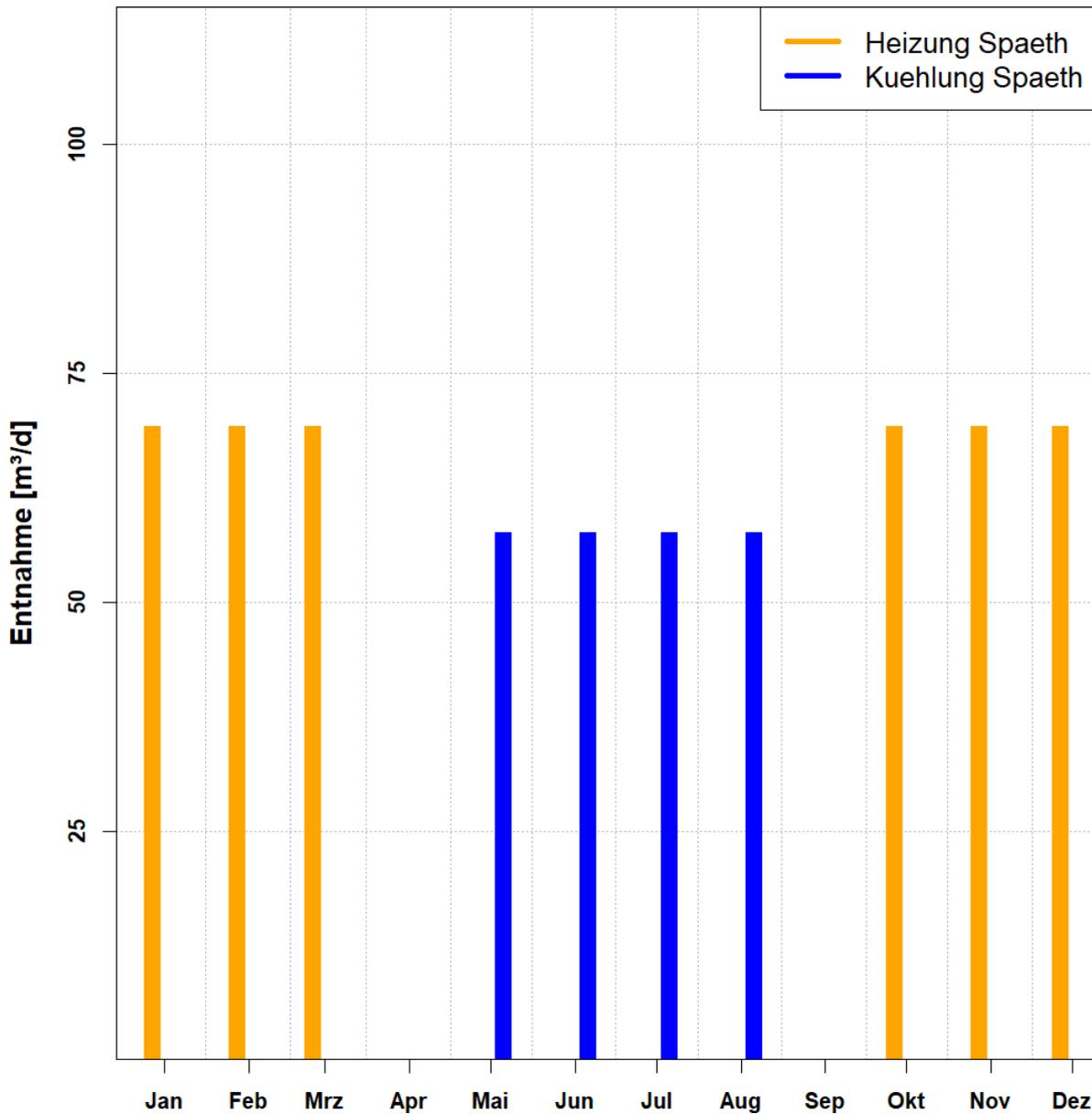


Abbildung 7: Entnahmeregime von Späth für die Grundwasserwärmeanlage nach Angaben vom LRA-EM [2022].

Hinweis: Dem Grundwasser wird in einem Primärkreislauf über einen Wärmetauscher ein Temperaturdelta entzogen und danach direkt wieder ins Grundwasser zurückgeleitet. Der Sekundärkreislauf wird beim Heizen/Kühlen verwendet und tritt nicht in direkten Kontakt mit dem Grundwasser.

2 Grundwasserströmungsmodell

Die Berechnungen wurden unter Verwendung der 3D Finite Elemente Grundwassermodellierungsplattform FEFLOW in der Version 7.5 [DHI WASY, 2022] durchgeführt. Die hydraulischen Randbedingungen wurden in Form ihrer langjährigen Mittelwerte zusammengefasst und ergeben ein quasistationäres Grundwasserströmungsmodell, auf das ein instationäres Wärmetransportmodell aufgesetzt wurde.

2.1 Modellaufbau

Das Modell wurde als 3D-Grundwasserströmungsmodell mit den Rasterdatensätzen der Neuenburg Formation und der Breisgau Formation vom LGRB [RP LGRB, 2007] in 15 Modellschichten gegliedert. Der obere Abschnitt des oberen Grundwasserleiters wurde in 8 Modellschichten mit 2,5 m Schichten unterteilt. Der untere Teil des oberen Grundwasserleiters wurde in drei weitere Schichten und die Breisgau Formation ebenfalls gleichmäßig in drei Schichten untergliedert. Durch die Schichtaufteilung ist es möglich, die Filterstrecken der Brunnen quasi exakt abzubilden und bei der anschließenden Modellierung des Wärmetransports auch in der Vertikalen eine angemessene Auflösung zu gewährleisten. Das Finite Elemente Netz wurde speziell im Bereich der Brunnen und im Abstrom der Rückgabebrunnen räumlich feiner diskretisiert, um numerische Instabilitäten zu vermeiden.

Für die Durchlässigkeitswerte wurden die räumlich interpolierten Datensätze [RP LGRB, 2007] für das Modellgebiet übernommen. Die kf-Wertverteilung ist in **Abbildung 2** dargestellt. Die Porosität wurde in Abhängigkeit vom kf-Wert nach Marotz [1968] berechnet und genauso wie die kf-Werte schichtbezogen im Modell zugewiesen. Diese variiert zwischen 0,15 und 0,2 im Modellgebiet, wobei eine maximale Porosität von 0,2 die obere Plausibilitätsgrenze bei dieser Berechnung abbildet. Bei einem mittleren kf-Wert von $2,87 \cdot 10^{-3}$ m/s für die Neuenburg Formation errechnet sich nach Marotz [1968] eine effektive Porosität von 0,2.

An den Zu- und Abstromrändern wurden Festpotentiale der Grundwassergleichen als Randbedingungen erster Art angesetzt. Der Grundwassergleichenplan MW86 LfU [2001] bildet die Grundwassersituation in der Modellierung angemessen ab. Die mittlere Grundwasserneubildung [Morhard, 2022] wurde als Randbedingung in der obersten Modellschicht angesetzt (**Abbildung 1**).

Auf Basis der verfügbaren hydrogeologischen Datengrundlage konnte ein quasistationäres Grundwassermodell erstellt werden, welches die Grundwasserströmungsverhältnisse plausibel abbildet.

3 Wärmetransportmodellierung

Das erstellte quasistationäre Grundwasserströmungsmodell wurde im nächsten Schritt zu einem instationären Wärmetransportmodell erweitert. Nach Erweiterung zum instationären Wärmetransportmodell bildet das Modell eine geeignete Grundlage zur Ausweisung der zu erwartenden Auswirkungen der geplanten Grundwasserwärmenutzung.

Aus dem Modellgebiet ausströmendes Grundwasser tritt jeweils mit seiner aktuell modellierten Temperatur aus dem Grundwasserkörper aus. An der Oberfläche des Grundwasserkörpers und an den Zustromrändern wird die mittlere Jahrestemperatur des Grundwassers mit 12 °C entsprechend den Transportrandbedingungen erster Art gesetzt.

Die aus der thermischen Nutzung resultierende Abkühlung/Erwärmung wird in den Auswertungen relativ gegenüber der angesetzten Jahresmitteltemperatur von 12 °C ausgewiesen, welche zugleich den ungestörten Ausgangszustand für die Transportmodellierung definiert. Die Parametrisierung der Dispersivität (longitudinal 5 m, transversal 0,5 m) wird auf den FEFLOW Standardeinstellungen belassen, ebenso die Wärmekapazität (fluid 4,2 MJ/m³/K, solid 2,52 MJ/m³/K) und die Wärmeleitfähigkeit der beiden Medien (fluid 0,65 J m⁻¹ s⁻¹ K⁻¹, 3,0 für die Festphase). Aufgrund der geringen Tiefe der Anlagen kann der Wärmestrom aus dem Untergrund vernachlässigt werden.

3.1 Nutzungsszenarien

Die Grundwasserentnahme von der Anlage Kaltenbach und seiner Nachbaranlagen erfolgt in Abhängigkeit vom jahreszeitlichen Bedarf nach den in **Abbildung 4**, **Abbildung 5**, **Abbildung 6** und **Abbildung 7** dargestellten Entnahmeregimen. Die Nutzung wird monatsweise in Form der täglichen Entnahme- und Rückgabemengen an den Filterstrecken der Brunnen parametrisiert, wobei die Verteilung auf die einzelnen Schichten im umgekehrten Verhältnis zu deren hydraulischer Leitfähigkeit erfolgt (multilayer well).

An den Rückgabebrunnen werden Wärmetransportrandbedingungen erster Art mit der vorgegebenen Temperaturspreizung von 4 bzw. 5 K beim Heizen und Kühlen gesetzt, d.h. ausgehend von einer mittleren Grundwassertemperatur von 12°C wird das zum Heizen abgekühlte Grundwasser mit 9/8 °C und das zum Kühlen erwärmte Grundwasser mit 15/16 °C wieder in den Grundwasserleiter eingeleitet.

Mehrjährige und saisonale Abweichungen der Grundwassertemperatur um 1 K bis 3 K gegenüber der angesetzten mittleren Grundwassertemperatur von 12°C bleiben ohne Bedeutung, solange als Ergebnis die relative Temperaturspreizung und räumliche Ausbreitung des gegenüber der Entnahmetemperatur abgekühlten Grundwassers betrachtet wird.

3.2 Modellierungsergebnisse

Die Modellergebnisse beziehen sich auf alle zwölf Monatsenden im letzten Jahr des 20-jährigen Modellzeitraums. Da sich das durch das Heizen/Kühlen abgekühlte/erwärmte Grundwasser entlang seiner Fließstrecke allmählich wieder auf die ungestörte Umgebungstemperatur einstellt, hängt der Zeitpunkt, zu dem die maximale Ausdehnung des Temperaturfelds erreicht wird, neben den hydraulischen Randbedingungen und dem Entnahmeregime der Anlage, auch von der betrachteten Isotherme, ab. Die Temperatureausbreitung wird entsprechend der Schicht mit der höchsten Ausdehnung, d.h. im unteren Bereich der Filterstrecke, abgegriffen.

Tabelle 3: Maximale Längs- und Querausdehnung der Isothermen der beiden Standortvarianten Anlage Kaltenbach nach 20 Jahren.

	Temperatur- differenz [K]	max. Längs- ausdehnung (Länge/Breite) [m]	Monat (längs)	max. Quer- ausdehnung (Länge/Breite) [m]	Monat (quer)	Tiefe [m u. GOK]
Kaltenbach Variante 1	-3	14/8	Januar	14/8	Januar	10,0
Kaltenbach Variante 1	-2	34/11	März	34/11	März	10,0
Kaltenbach Variante 1	-1	69/19	Mai	69/19	Mai	10,0
Kaltenbach Variante 1	1	42/12	September	32/14	Juli	10,0
Kaltenbach Variante 1	2	20/8	August	18/9	Juli	10,0
Kaltenbach Variante 1	3	8/5	Juli	8/5	Juli	10,0
Kaltenbach Variante 2	-3	14/6	Februar	14/6	Februar	10,0
Kaltenbach Variante 2	-2	29/9	März	28/10	Februar	10,0
Kaltenbach Variante 2	-1	61/5	Juni	58/22	April	10,0
Kaltenbach Variante 2	1	38/11	September	28/14	Juli	10,0
Kaltenbach Variante 2	2	18/7	August	16/8	Juli	10,0
Kaltenbach Variante 2	3	7/4	Juli	7/4	Juli	10,0

Die Ausdehnung der Temperaturfelder wird beginnend vom jeweiligen Rückgabebrunnen gemessen. In **Tabelle 3** werden die maximalen Längs- und Querausdehnungen der Temperaturfahrten aufgelistet. In **Tabelle 4** sind die Auswertungen der maximalen Längs- und Querausdehnungen der Nachbaranlagen aufgelistet.

Aufgrund des jährlichen Wechselbetriebs aller Anlagen mit Heizen und Kühlen gibt es keine kumulativen Effekte über mehrere Jahre hinweg und es stellt sich nach dem zweiten Modelljahr dasselbe Ergebnis ein, wie nach dem 20. Jahr.

Hinweis: In **Abbildung 8, Abbildung 9, Abbildung 10** und **Abbildung 11** sind im Anhang nochmals mit einer größeren Ausdehnung aufgeführt mit allen Nachbaranlagen inklusive Fischer und Späth.

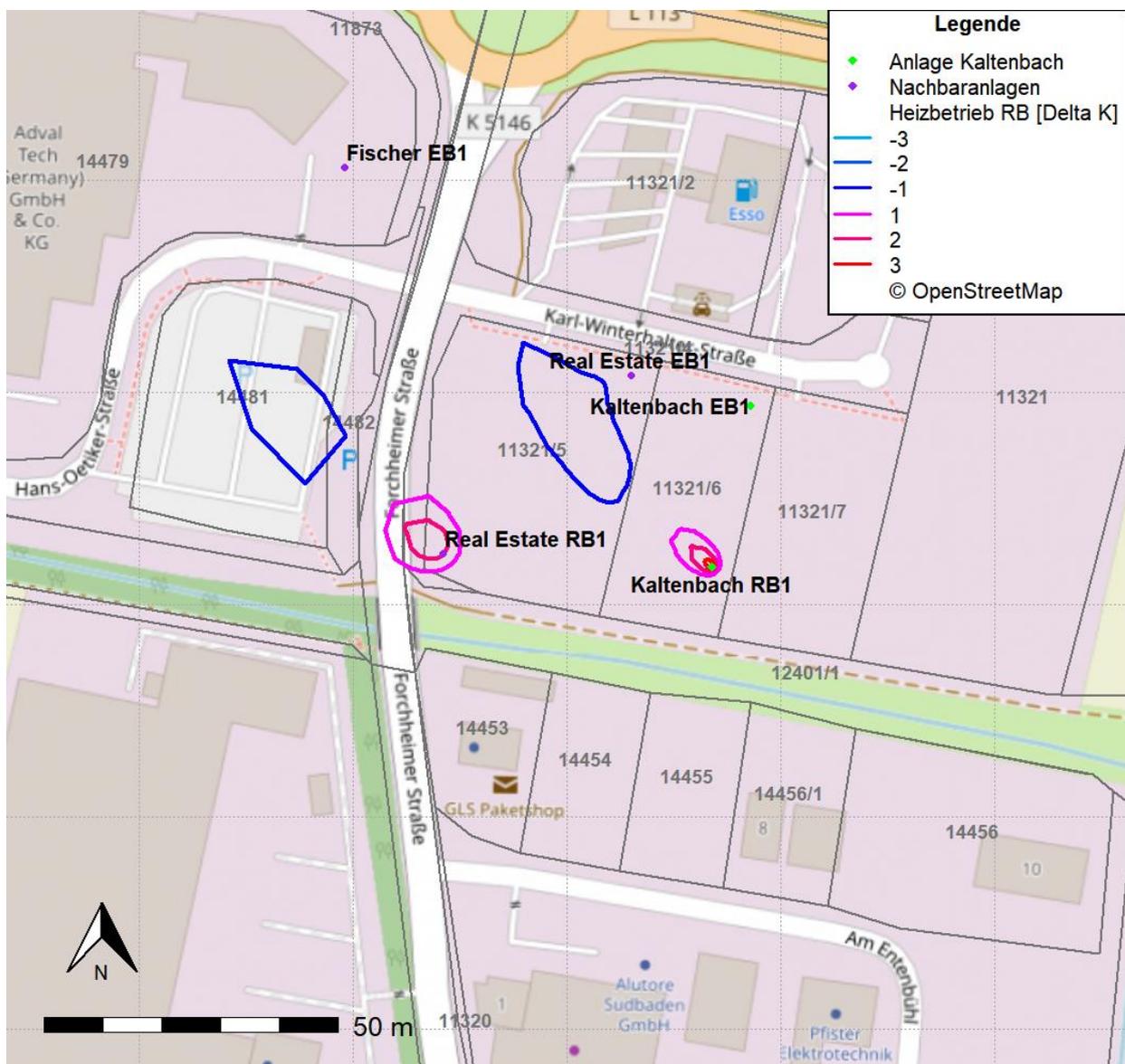


Abbildung 8: Temperaturfeld des Rückgabebrunnens Kaltenbach Variante 1 nach 20-jähriger Modellierungsdauer zum Zeitpunkt mit maximaler Ausdehnung (Mai) der $-1,0$ K Isotherme in einer Tiefe von 10 m.

Nach Analyse der Modellergebnisse der instationären Modellierung für die Anlage **Kaltenbach Variante 1** ist die maximale Ausbreitung für die $-1,0$ K Isotherme mit 69 m im Mai. **Abbildung 8** zeigt die Ausdehnung des Temperaturfeldes des Rückgabebrunnens. Diese breitet sich in der Modellierung etwa 44 m über das eigene Flurstück 11321/6 aus und beeinflusst das benachbarte Flurstück 11321/5.

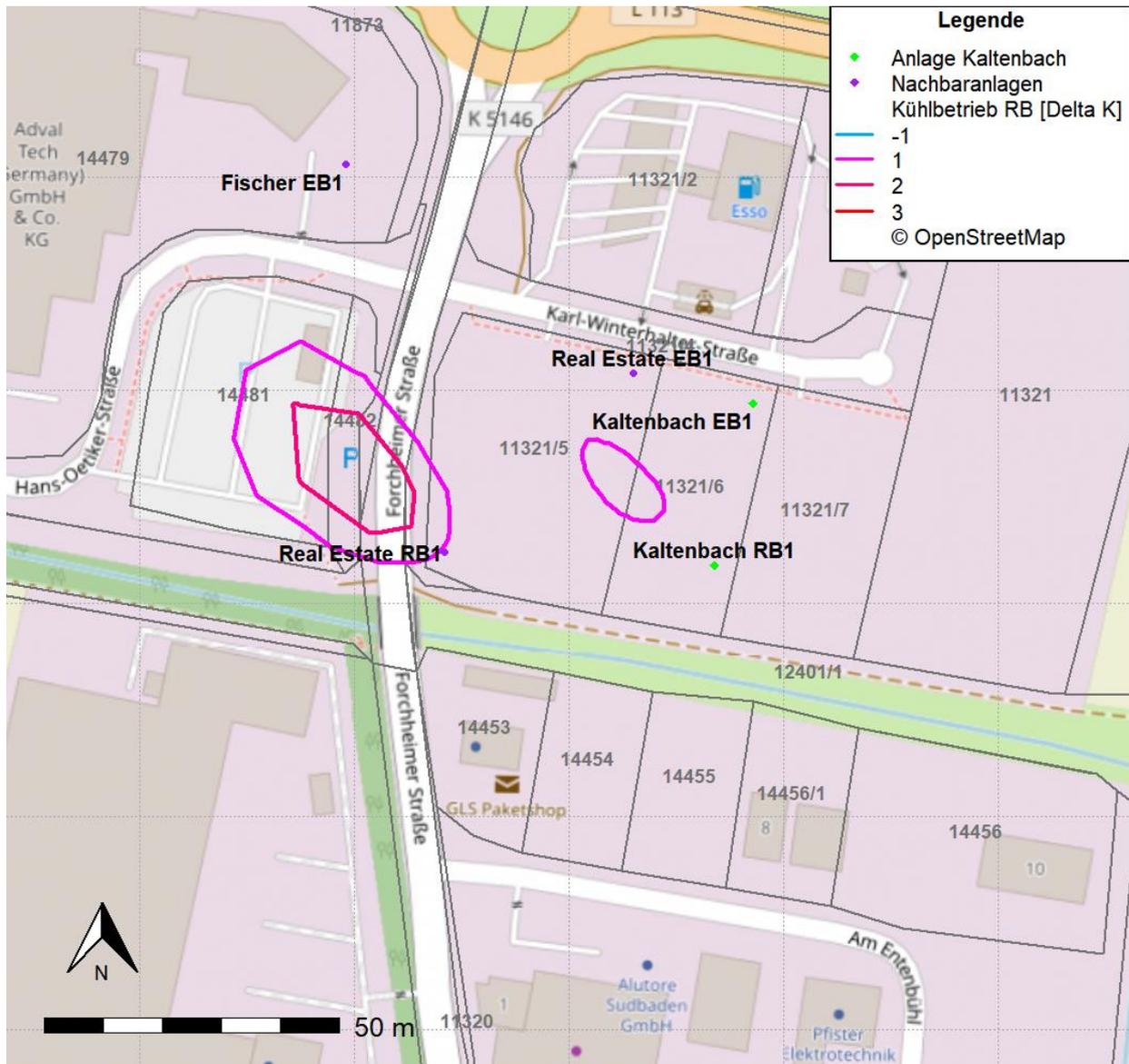


Abbildung 9: Temperaturfeld des Rückgabebrunnens Kaltenbach Variante 1 nach 20-jähriger Modellierungsdauer zum Zeitpunkt mit maximaler Ausdehnung (September) der $1,0$ K Isotherme in einer Tiefe von 10 m.

Eine direkte Beeinflussung des Entnahmebrunnens Real Estate der $-1,0$ K Isotherme ist nicht gegeben, jedoch ist zu erkennen, dass sich die Temperaturfahne minimal zum Entnahmebrunnen Real Estate hinbewegt. Der Abstand zwischen Entnahmebrunnen Real Estate und Temperaturfahne ($-1,0$ K Isotherme) beträgt lediglich 6 m. Die maximale Ausbreitung des Rückgabebrunnens Kaltenbach ist auf einer Tiefe von 10 m, etwa in der Mitte des Filterbereichs des Entnahmebrunnens Real Estate (5-17 m). Somit kann bei der

Variante 1 nicht ausgeschlossen werden, dass es zu keiner Beeinflussung des Entnahmebrunnens Real Estate kommen kann.

Die Temperaturfahnen Real Estate und Kaltenbach verlaufen etwa strömungsparallel und haben einen Abstand von 27 m zueinander. Eine Vereinigung der Temperaturfelder kann in dieser Variante ausgeschlossen werden, da diese sich mit dem Grundwasserstrom abwärts bewegen und ihre maximale Querausdehnung bereits erreicht haben. Zudem befindet sich der Filterbereich, und somit die maximalen Ausbreitungen der Temperaturfahnen, in unterschiedlichen Höhenlagen (**Tabelle 1, Tabelle 3 und Tabelle 4**). Die maximale Ausbreitung befindet sich beim Rückgabebrunnen Kaltenbach auf etwa 10 m und bei beim Rückgabenbrunnen Real Estate in 24 m Tiefe.

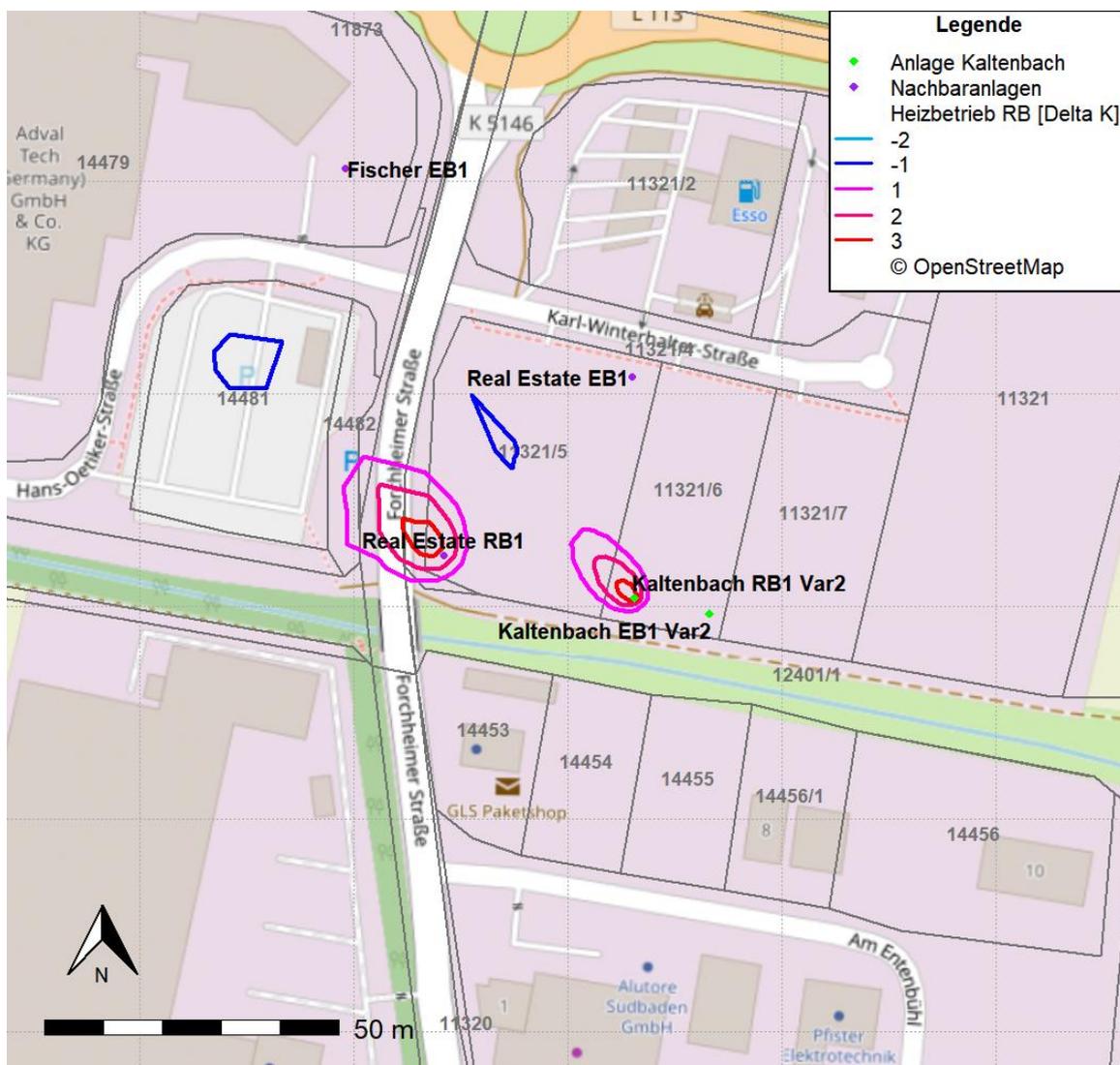


Abbildung 10: Temperaturfeld des Rückgabebrunnens Kaltenbach Variante 2 nach 20-jähriger Modellierungsdauer zum Zeitpunkt mit maximaler Ausdehnung (Juni) der -1,0 K Isotherme in einer Tiefe von 10 m.

Die maximale Ausbreitung für die 1,0 K Isotherme für die Anlage Kaltenbach **Variante 1** beträgt etwa 42 m im September. **Abbildung 9** zeigt die Ausdehnung

des Temperaturfeldes des Rückgabebrunnens. Diese breitet sich in der Modellierung etwa 16 m über das Flurstück 11321/6 bis in das Flurstück 11321/5 aus.

Da die 1,0 K Isotherme eine geringe Ausbreitung als die -1,0 K Isotherme und somit einen größeren Abstand zu den benachbarten Brunnen hat, ist auch hier von keiner Beeinflussung auszugehen.

Der Abstand der 1,0 K Isotherme beträgt etwa 18 m zum Entnahmebrunnen Real Estate und 35 m zum Rückgabebrunnen Real Estate. Durch die geringere Kühlleistung liegt die Temperaturfahne außerhalb des Absenktrichters vom Entnahmebrunnen Real Estate und bewegt sich nicht auf den Entnahmebrunnen Real Estate zu.

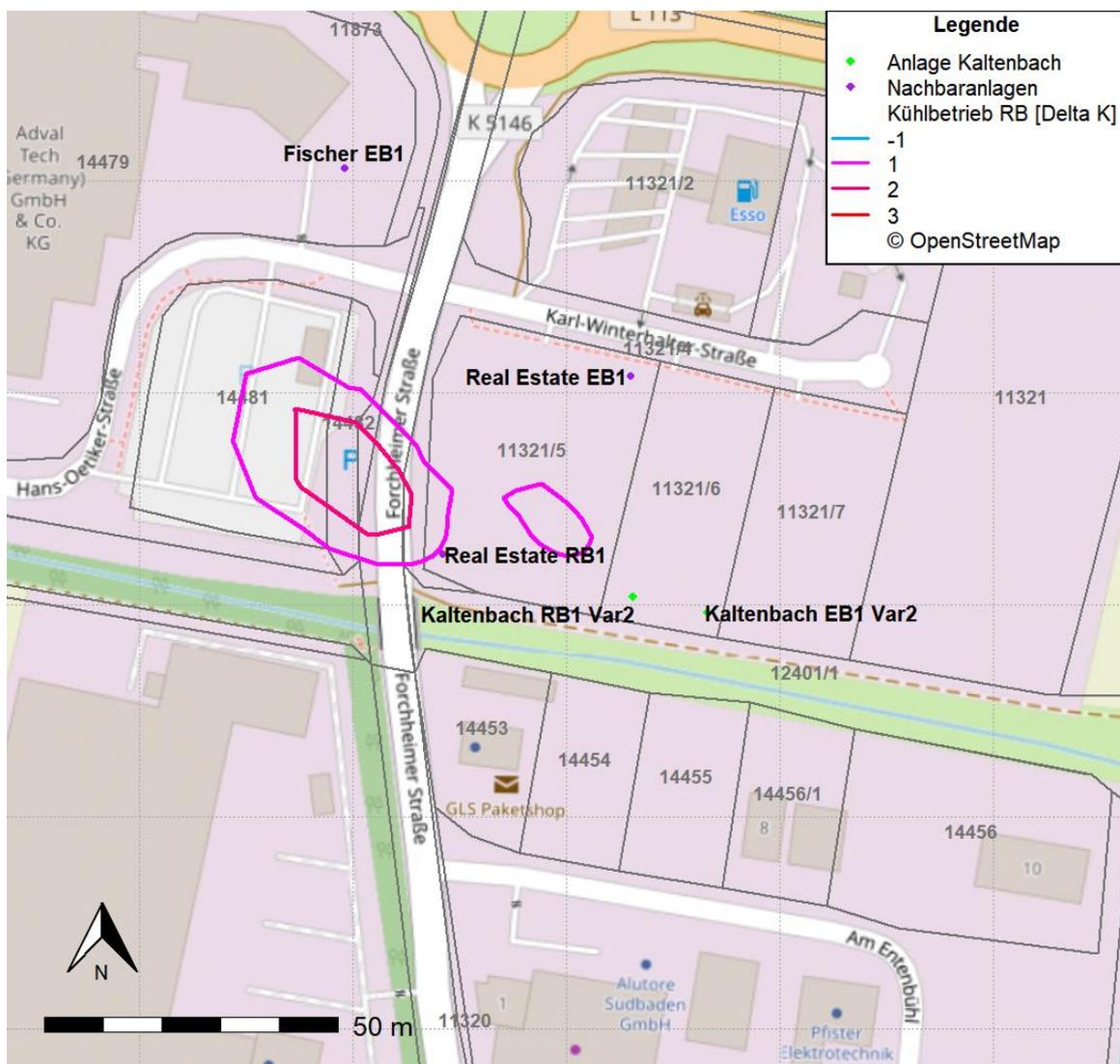


Abbildung 11: Temperaturfeld des Rückgabebrunnens Kaltenbach Variante 2 nach 20-jähriger Modellierungsdauer zum Zeitpunkt mit maximaler Ausdehnung (September) der 1,0 K Isotherme in einer Tiefe von 10 m.

Eine Beeinflussung bei der **Variante 1** der Anlage Fischer ist auszuschließen, da der Abstand zum Entnahmebrunnen beim Heizen 58 m und beim Kühlen 86 m beträgt. Genauso kann eine Beeinflussung der Anlage Späth ausgeschlossen werden, da der Abstand zwischen Entnahmebrunnen Späth und maximale

Temperatur Ausbreitung der -1 K Isotherme/1 K Isotherme über 400 m beträgt (vgl. Anhang).

Die maximale Ausbreitung für die -1,0 K Isotherme Modellierung für Anlage Kaltenbach **Variante 2** beträgt etwa 61 m im Juni. **Abbildung 10** zeigt die Ausdehnung des Temperaturfeldes des Rückgabebrunnens. Diese breitet sich in der Modellierung etwa 52 m über das Flurstück 11321/6 bis in das Flurstück 11321/5 aus.

Tabelle 4: Maximale Längs- und Querausdehnung der Isothermen aller Nachbaranlage nach 20 Jahren.

	Temperatur- differenz [K]	max. Längs- ausdehnung (Länge/Breite) [m]	Monat (längs)	max. Quer- ausdehnung (Länge/Breite) [m]	Monat (quer)	Tiefe [m u. GOK]
Fischer	-3	63/14	Mai	50/32	März	15,0
Fischer	-2	88/20	Juli	50/42	März	15,0
Fischer	-1	133/18	November	98/52	Juni	15,0
Fischer	1	115/31	März	80/71	November	15,0
Fischer	2	76/20	Dezember	48/43	August	15,0
Fischer	3	55/18	Oktober	42/30	September	15,0
Real Estate	-3	34/15	März	34/15	März	24,0
Real Estate	-2	66/15	Mai	22/51	März	24,0
Real Estate	-1	103/3	August	85/36	Mai	24,0
Real Estate	1	129/9	Mai	85/48	Oktober	24,0
Real Estate	2	87/18	Dezember	63/34	September	24,0
Real Estate	3	61/17	Oktober	46/29	August	24,0
Real Estate	4	38/10	September	36/21	August	24,0
Spaeth	-3	12/8	März	12/8	März	12,5
Spaeth	-2	26/16	März	26/16	März	12,5
Spaeth	-1	60/18	Juni	47/31	März	12,5
Spaeth	1	37/5	Oktober	37/5	Oktober	12,5
Spaeth	2	20/14	August	20/14	August	12,5
Spaeth	3	9/6	August	9/6	August	12,5

Der Abstand der Temperaturfahne der -1,0 K Isotherme zum Entnahmebrunnen Real Estate beträgt in dieser Variante 31 m und eine direkte Beeinflussung des Entnahmebrunnens ist nicht gegeben und es gibt auch keine Strömungsveränderung hin zum Entnahmebrunnen Real Estate.

Eine Vereinigung der Temperaturfahnen zwischen der Anlage Kaltenbach und Real Estate kann aus zwei Gründen ausgeschlossen werden. Erstens beträgt der Mindestabstand zwischen den Temperaturfahnen 15 m und zweitens befinden sie sich in unterschiedlichen Tiefen.

Die maximale Ausbreitung für die 1,0 K Isotherme Modellierung für Anlage **Kaltenbach Variante 2** beträgt etwa 38 m im September. **Abbildung 11** zeigt die Ausdehnung des Temperaturfeldes des Rückgabebrunnens. Diese breitet sich in der Modellierung etwa 31 m über das Flurstück 11321/6 bis in das Flurstück 11321/5 aus.

Auch bei **Variante 2** hat die 1 K Isotherme eine geringere Ausbreitung als die -1 K Isotherme. Der Abstand zum Entnahmebrunnen Real Estate vergrößert sich bei dieser Variante auf 33 m.

Die beiden Temperaturfahnen der Rückgabebrunnen von Real Estate und Kaltenbach haben einen Abstand von 12 m zueinander, während deren maximale Ausbreitungen aber in unterschiedlichen Tiefenlagen liegen.

Bei der Modellierung hat sich im Monat März gezeigt, dass sich kurzzeitig in einer Tiefe von 15 m die Temperaturfahne der Anlage Kaltenbach **Variante 2** mit der Temperaturfahne Real Estate vereint (Vgl. Anhang 6.7). Diese große Temperaturwolke löst sich jedoch im darauffolgenden Monat wieder aufgrund geringerer Rückgabemengen wieder auf und es bilden sich wieder zwei voneinander getrennten Temperaturwolken aus. Es entstehen durch die kurzzeitige Vereinigung der Temperaturwolken keine kumulativen Effekte über mehrere Jahre hinweg.

Eine Beeinflussung der Anlagen Fischer und Späth bei **Variante 2** kann aus denselben Gründen wie bei der **Variante 1** ausgeschlossen werden. Der Abstand der Temperaturfahne zum Entnahmebrunnen Fischer beim Heizen/Kühlen beträgt mindestens 60 m und zum Entnahmebrunnen Späth über 400 m (vgl. Anhang).

Hinweis: Die minimal differierenden maximalen Temperaturfahnen von **Variante 1** und **Variante 2** begründen sich dadurch, dass die Durchlässigkeitswerte [RP-LGRB, 2007] bei der **Variante 2** im Brunnenbereich minimal größer sind und dadurch das Grundwasser minimal schneller/weiter fließt, sich aber auch schneller an die Umgebungstemperatur angleicht.

Anhand dieser Datengrundlage ist ein Kurzschluss der Anlage Kaltenbach bei **Variante 1/ Variante 2** zwischen den Entnahme- und Rückgabebrunnen nach dem Verlauf der Isothermen zu keinem Zeitpunkt des Jahres zu befürchten, d.h.

abgekühltes/erwärmtes Grundwasser des Rückgabebrunnens gelangt nicht an den Entnahmebrunnen.

Die Grundwasserwärmeanlagen beeinflussen weder beim Heizen noch beim Kühlen ein Wasserschutzgebiet.

Im **Anhang** sind die Ausdehnungen der modellierten Temperaturfelder entlang eines Querprofils durch die Rückgabebrunnen und einer Ansicht von oben für alle zwölf Kalendermonate dargestellt.

3.3 Abgleich gegen den "Lastfall Jahresmittel"

Maßgeblich für das vorliegende Gutachten ist der instationäre Lastfall gemäß dem vorgesehenen, saisonal variablen Entnahmeregime der Grundwasserwärmeanlage Kaltenbach (**Abbildung 4, Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7, Kapitel 3.2**). Als ergänzende Information wird zusätzlich der in der Arbeitshilfe zum Leitfaden zur Nutzung der Erdwärme mit Grundwasserwärmeanlagen [2009] beschriebene "Lastfall Jahresmittelwert" betrachtet.

Bei gleichmäßiger Aufteilung der vorgesehenen Entnahme der Anlage Kaltenbach beim Heizen von 11.810 m³ pro Jahr und beim Kühlen von 5.960 m³ pro Jahr ergibt sich auf die 365 Tage des Jahres für die stationäre Modellierung eine konstante Entnahme im Heizbetrieb von 16,2 m³/Tag.

Für die stationäre Modellierung der Anlage Fischer ergibt sich bei gleichmäßiger Aufteilung der vorgesehenen Entnahme von 140.940 m³ pro Jahr beim Heizen und 145.410 m³ pro Jahr beim Kühlen auf die 365 Tage des Jahres eine konstante Entnahme im Kühlbetrieb von 13,1 m³/Tag.

Für die stationäre Modellierung der Anlage Real Estate ergibt sich bei gleichmäßiger Aufteilung der vorgesehenen Entnahme von 40.030 m³ pro Jahr beim Heizen und 45.430 m³ pro Jahr beim Kühlen auf die 365 Tage des Jahres eine konstante Entnahme im Kühlbetrieb von 7,2 m³/Tag.

Für die stationäre Modellierung der Anlage Späth ergibt sich bei gleichmäßiger Aufteilung der vorgesehenen Entnahme von 12.580 m³ pro Jahr beim Heizen und 7.080 m³ pro Jahr beim Kühlen auf die 365 Tage des Jahres eine konstante Entnahme im Heizbetrieb von 15,4 m³/Tag.

Da in der Praxis nicht das ganze Jahr über gleichmäßig geheizt und gekühlt wird, handelt es sich dabei allerdings um ein theoretisches/weniger realistisches Szenario. Die in **Tabelle 5** zusammengestellten Ergebnisse der Temperaturentwicklungen und Entnahmeraten basieren auf der Modellvariante "Lastfall Jahresmittel".

Die Ausdehnung des Temperaturfeldes der -1,0 K Isotherme des Rückgabebrunnens Kaltenbach beträgt bei der **Variante 1** 31 m und bei der **Variante 2** 33 m.

Tabelle 5: Maximale Längs- und Querausdehnung der Isothermen beim "Lastfall Jahresmittel" nach 20 Jahren Modellierungsdauer.

	Temperatur- differenz [K]	mittlere Längs- ausdehnung [m]	mittlere Quer- ausdehnung [m]	Tiefe [m u. GOK]	Jahres- mittel- Gesamt [m ³ /Tag]
Kaltenbach Variante 1	-3	2,0	1,5	10,0	16,2
Kaltenbach Variante 1	-2	9,0	3,5	10,0	16,2
Kaltenbach Variante 1	-1	31,0	9,0	10,0	16,2
Kaltenbach Variante 2	-3	2,0	1,0	10,0	16,2
Kaltenbach Variante 2	-2	9,0	4,0	10,0	16,2
Kaltenbach Variante 2	-1	33,0	9,5	10,0	16,2
Fischer	1	14,0	6,0	15,0	7,2
Fischer	2	5,0	3,0	15,0	7,2
Fischer	3	2,0	1,0	15,0	7,2
Real Estate	1	26,0	12,0	24,0	13,1
Real Estate	2	12,0	6,0	24,0	13,1
Real Estate	3	4,0	3,0	24,0	13,1
Real Estate	4	1,0	2,0	24,0	13,1
Spaeth	-1	16,0	10,0	12,5	15,4
Spaeth	-2	6,0	3,0	12,5	15,4
Spaeth	-3	1,5	1,0	12,5	15,4

Diese Ausbreitungen der Temperaturfahnen sind geringer als bei der Ausführung in **Kapitel 3.2** und somit ist eine Beeinflussung des nächstgelegenen Entnahmebrunnens Real Estate auszuschließen. Eine Vereinigung der Temperatur der Rückgabebrunnen Kaltenbach und Real Estate ist nicht möglich, da in der Modellvariante „Lastfall Jahresmittel“ die Anlage Kaltenbach im Heizbetrieb und die Anlage Real Estate im Kühlbetrieb ist.

Da bei der stationären Modellierung für den "Lastfall Jahresmittel" die Entnahmen gleichmäßig über das Jahr verteilt sind und die Heizungs- und Kühlleistung aufgerechnet werden, ist die berechnete Reichweite des Temperaturfeldes kleiner als bei jener weitaus realistischeren, instationären Modellierung (**Kapitel 3.2**).

4 Zusammenfassung

Bei der Modellerstellung für die Grundwasserwärmanlage Kaltenbach in Endingen wurden, soweit möglich, öffentlich zugängliche und gut belegte, bevorzugt von den zuständigen Fachbehörden erarbeitete Datengrundlagen zu Geometrie und Eigenschaften des Grundwasserleiters sowie den maßgeblichen hydraulischen Randbedingungen verwendet. Die Durchlässigkeitswerte wurden aus den Datensätzen [RP LGRB, 2007; WaBoA, 2007] entnommen. Bei guter Übereinstimmung zwischen modellierten und beobachteten Grundwassergleichen kann die Grundwasserströmungssituation MW86 [LfU, 2001] unter Berücksichtigung der für die hydraulische Durchlässigkeit verbleibenden Unsicherheit nach aktuellem Kenntnisstand als bestmöglich erfasst betrachtet werden (**Abbildung 1**).

Darauf aufbauend ist davon auszugehen, dass das Modell die Dimension des durch die thermische Grundwassernutzung induzierten Temperaturfeldes mit hoher Genauigkeit wiedergibt. Gleichwohl sollte aufgrund stets verbleibender Modellunsicherheiten sowie der Heterogenität des Grundwasserleiters bei der Interpretation der Ergebnisse eine gewisse Unschärfe einkalkuliert werden.

Die Modellrechnungen wurden mit für die Anlagen Kaltenbach, Fischer, Real Estate und Späth spezifizierten Entnahmeregimen (**Abbildung 4, Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7**) durchgeführt. Die Ausdehnung der berechneten Temperaturfelder hängt dabei im Wesentlichen von der entnommenen Grundwassermenge, der Temperaturspreizung zwischen Entnahme und Wiedereinspeisung (4/5 K beim Heizen und Kühlen), von den Wasserumsätzen und der Fließgeschwindigkeit im Grundwasserkörper ab.

Um die optimalen Standorte für den Entnahme- und Rückgabebrunnen von der Anlage Kaltenbach für eine positive Bescheidung ausweisen zu können, wurden zwei Standortvarianten modelliert, welche die Grundlage für die Entscheidungsfindung für den optimalen Standort liefern sollen.

Bei der **Variante 1** liegen der Entnahme- und Rückgabebrunnen an der östlichen Grenze des Flurstücks 11321/6 und bei **Variante 2** liegt das Brunnenpaar an der südlichen Grenze (**Abbildung 3**).

Die durch das Heizen induzierte -1,0 K Isotherme vom Rückgabebrunnen der Anlage Kaltenbach **Variante 1**, bezogen auf eine Grundwassertemperatur von 12 °C, breitet sich im Mai rund 69 m (**Tabelle 3, Abbildung 8**) aus. Die modellierten Grundwassertemperaturveränderungen von - 1,0 K breiten sich 44 m über das Flurstück 11321/6 aus. Der Abstand zum Entnahmebrunnen Real Estate beträgt bei der maximalen Ausbreitung lediglich 6 m und eine Beeinflussung des Entnahmebrunnen Real Estate kann nicht ausgeschlossen werden.

Die durch das Kühlen induzierte 1,0 K Isotherme vom Rückgabebrunnen der Anlage Kaltenbach **Variante 1**, bezogen auf eine Grundwassertemperatur von 12 °C, breitet sich im September rund 42 m (**Tabelle 3, Abbildung 9**) aus. Die

modellierten Grundwassertemperaturveränderungen breiten sich 16 m über das Flurstück 11321/6 aus. Durch den Abstand der 1 K Isolinie von 18 m zum Entnahmebrunnen Real Estate ist keine Beeinflussung zu befürchten.

Die durch das Heizen induzierte -1,0 K Isotherme vom Rückgabebrunnen der Anlage Kaltenbach **Variante 2**, bezogen auf eine Grundwassertemperatur von 12 °C, breitet sich im Mai rund 61 m (**Tabelle 3, Abbildung 10**) aus. Die modellierten Grundwassertemperaturveränderungen von - 1,0 K breiten sich 52 m über das Flurstück 11321/6 aus. Von einer Beeinflussung des Entnahmebrunnens Real Estate durch die -1,0 K Isotherme ist aufgrund des Abstands von 31 m nicht auszugehen. Im Jahresverlauf vereinigen sich kurzzeitig die Temperaturfahnen der Rückgabebrunnen Kaltenbach und Real Estate zu einer großen Temperaturfahne. Diese löst sich jedoch aufgrund eines geringeren Entnahmeregimes beider Anlagen wieder auf und es entstehen keine kumulativen Effekte über mehrere Jahre hinweg.

Die durch das Kühlen induzierte 1,0 K Isotherme vom Rückgabebrunnen der Anlage Kaltenbach **Variante 2**, bezogen auf eine Grundwassertemperatur von 12 °C, breitet sich im September rund 38 m (**Tabelle 3, Abbildung 11**) aus. Die modellierten Grundwassertemperaturveränderungen breiten sich 31 m über das Flurstück 11321/6 aus.

Der Abstand zwischen Entnahmebrunnen Real Estate und der 1 K Isotherme beträgt 33 m und es ist keine Beeinflussung des Entnahmebrunnens anzunehmen. Zudem kommt es zu keiner Vereinigung der Temperaturfahnen von den beiden Entnahmebrunnen Kaltenbach und Real Estate.

Die Reichweite der messbaren Temperaturbeeinflussung von maximal 69 m beim Heizen und 42 m beim Kühlen liegt im vorliegenden Fall weit unter der abgeschätzten jährlichen Fließstrecke des Grundwassers von etwa 438 m/Jahr. Dies ist auf den geringen Betriebsvolumenstrom und die vergleichsweise hohen kf-Werte zurückzuführen.

Mit den verwendeten kf-Werten und dem Entnahmeregime kommt es in den 20-jährigen Modellzeitraum zu keinem Kurzschluss der Anlage Kaltenbach. Die Grundwasserwärmeanlage beeinflusst kein Wasserschutzgebiet. Eine weitere Beeinträchtigung zusätzlicher benachbarter Anlagen kann aufgrund dieser Datengrundlage ausgeschlossen werden.

Fazit: Aus gutachterlicher Sicht ist somit die **Variante 2** zu empfehlen, da die Modellierung bei dieser Variante gezeigt hat, dass es unter den zugrundeliegenden Daten zu keiner Beeinflussung des Entnahmebrunnens Real Estate kommt. Es verbleibt ein Mindestabstand von 31 m zwischen - 1K Isotherme und Entnahmebrunnen Real Estate.

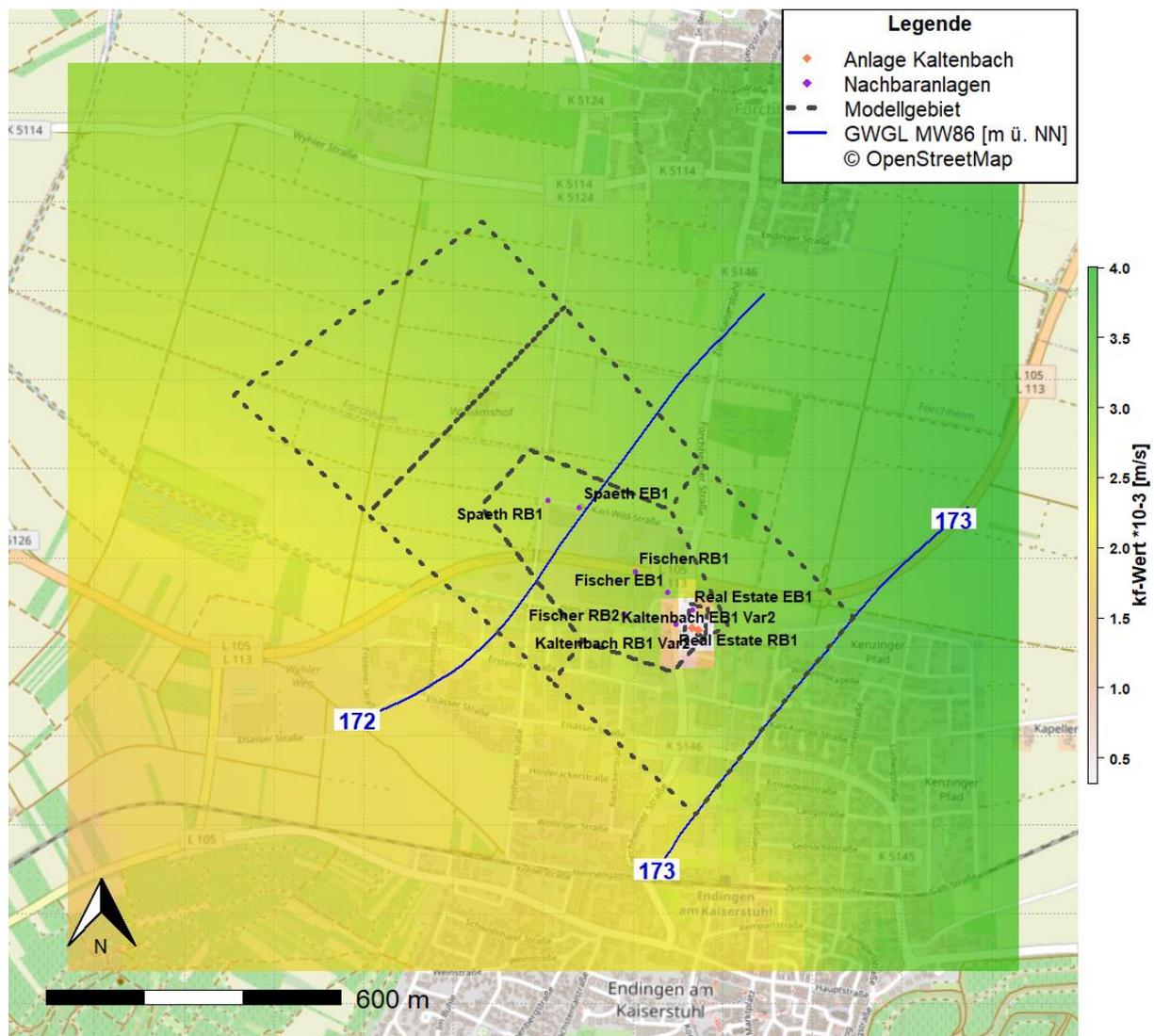
Hingegen ist **Variante 1** aus gutachterlicher Sicht nicht zu empfehlen, da die Modellierung mit den zugrundeliegenden Daten gezeigt hat, dass aufgrund des geringen Abstands von nur 6 m zwischen -1K Isotherme und Entnahmebrunnen Real Estate eine Beeinflussung nicht auszuschließen ist.

5 Nachforderung: kf-Wert Anpassung

In der wasserrechtlichen Erlaubnis der Brunnenbohrung vom 22.12.2023 [LRA-EM, 2022a] wurde die Genehmigung erteilt die zwei Brunnenbohrungen für die Grundwasserwärmeanlage Kaltenbach nach Variante 2 dieses Berichts durchzuführen.

Da die Modellierung für die Anlage Kaltenbach vor den Bohrungen durchgeführt wurde, gab es für die Modellierung noch keine brunnenspezifischen kf-Werte. Die ermittelten kf-Werte der durchgeführten Kurzpumpversuche sollen nachfolgend in die Modellierung miteinbezogen werden, um die Modellergebnisse mit diesen neuen Werten zu überprüfen und Betroffenheiten anderer Anlagen weiterhin ausschließen zu können.

5.1 Modellanpassungen



Die Modellanpassungen wurden auf Grundlage der Variante 2 aus diesem Bericht mit folgenden Anpassungen durchgeführt. Im Gutachten BauGrund Süd [2023] wurde der Durchlässigkeitsbeiwert von $3,4 \cdot 10^{-4}$ m/s für den Entnahmekostenbrunnen in einen Kurzpumpversuch mit 3 Pumpstufen bestimmt.

Im Zuge dessen wurde für die Modellierung die kf-Wertverteilung für den oberen Bereich des oberen Grundwasserleiter im Bereich der Brunnen angepasst, wie in **Abbildung 12** zu sehen. Für den Entnahmekostenbrunnen und den Rückgabekostenbrunnen wurde der gleiche kf-Wert von $3,4 \cdot 10^{-4}$ m/s verwendet und räumlich interpoliert. Die Differenz zwischen dem kf-Wert vom RP LGRB [2007] (Modellgebiet zwischen $2,31 \cdot 10^{-3}$ und $3,47 \cdot 10^{-3}$ m/s) und den Kurzpumpversuchen beträgt etwa eine Potenz und kann auf lokale Gegebenheiten des räumlich heterogenen Schotterkörpers oder auf die begrenzte Belastbarkeit der Kurzpumpversuche BauGrund Süd [2023] zurückzuführen sein.

Zudem wurden die Brunnenausbauten aus BauGrund Süd [2023] übernommen und dementsprechend in das Modell implementiert. Der Entnahmekostenbrunnen hat eine Endteufe von 14 m u. GOK mit einem Filterbereich zwischen 6 bis 12 m u. GOK und 13 und 14 m u. GOK. Aus modelltechnischen Gründen wurde dies jedoch im Modell als eine Filterstrecke implementiert und hat auf die Ergebnisse nur einen untergeordneten Einfluss. Der Rückgabekostenbrunnen hat eine Endteufe von 13 m mit einer Verfilterung zwischen 6 und 13 m u. GOK. Alle anderen Modelleinstellungen, die Anlagensteuerung der Wärmepumpe (**Tabelle 2, Abbildung 4**) und alle weiteren Parameterverteilungen wurde auf den oben beschriebenen Werten belassen (vgl. vorherige Kapitel).

5.2 Modellergebnisse

Die Temperaturschichtausbreitung wird entsprechend der Schicht mit der höchsten Ausdehnung, d.h. im unteren Bereich der Filterstrecke, in diesem Fall in einer Tiefe von 10 m abgegriffen. Die Ausdehnung der Temperaturfelder wird beginnend vom Rückgabekostenbrunnen EB1 Kaltenbach gemessen.

Nach Analyse der Modellergebnisse der instationären Modellierung mit den angepassten kf-Werten für die Anlage **Kaltenbach Variante 2** ist die maximale Ausbreitung für die $-1,0$ K Isotherme mit 33 m im Juli. Die Breite des Temperaturfeldes erhöht sich auf 25 m. **Abbildung 13** zeigt die Ausdehnung des Temperaturfeldes. Diese breitet sich in der Modellierung etwa 22 m über das eigene Flurstück 11321/6 aus und beeinflusst das benachbarte Flurstück 11321/5 im Jahresverlauf. Der Abstand des Temperaturfeldes beträgt zum Entnahmekostenbrunnen Real Estate EB1 etwa 27 m und zum Rückgabekostenbrunnen Real Estate RB1 etwa 21 m. Die Temperaturfelder vom Entnahmekostenbrunnen Real Estate EB1 und Rückgabekostenbrunnen Kaltenbach vereinigen sich nicht.

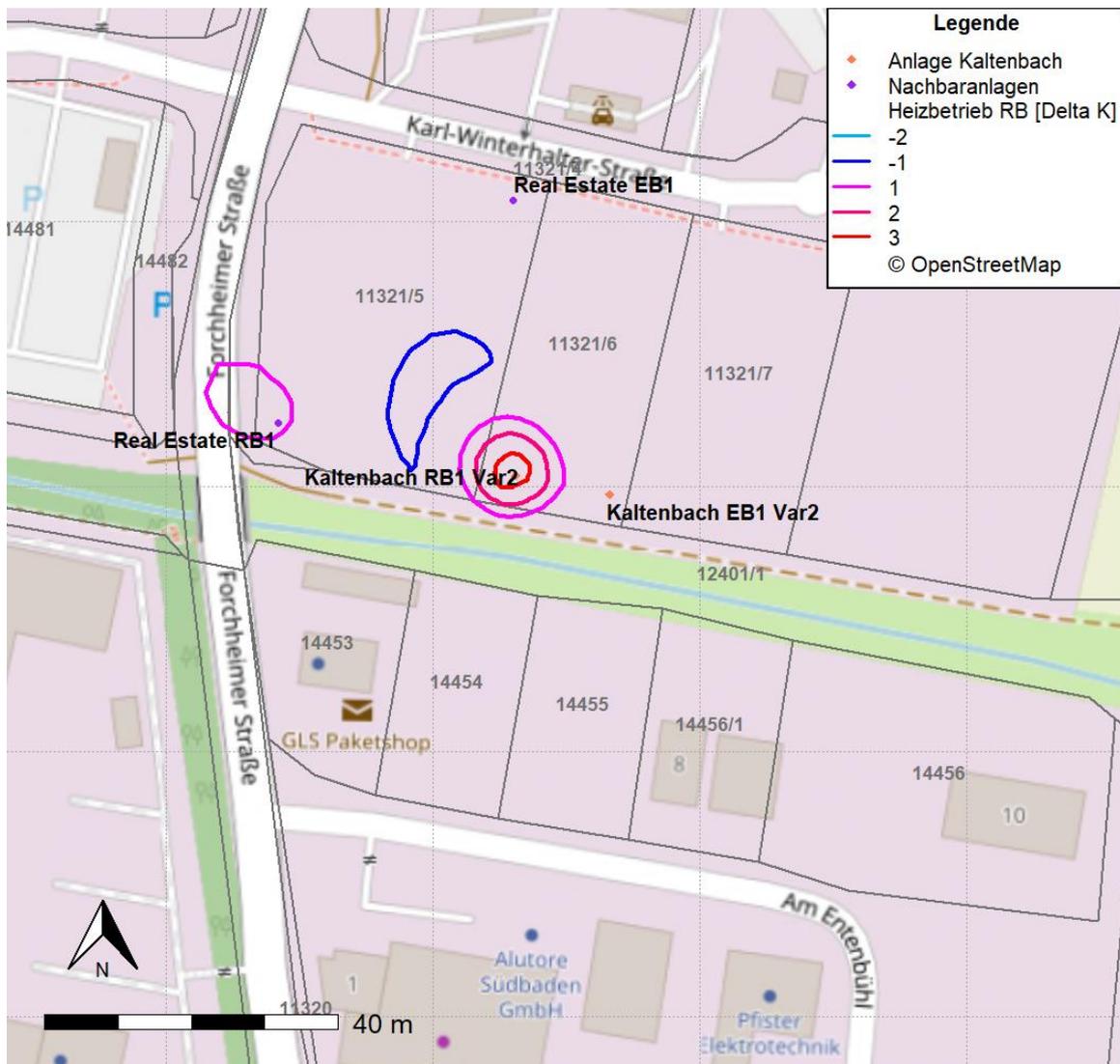


Abbildung 13: Temperaturfeld des Rückgabebrunnens Kaltenbach Variante 2 nach 20-jähriger Modellierungsdauer zum Zeitpunkt mit maximaler Ausdehnung (Juli) der -1,0 K Isotherme in einer Tiefe von 10 m.

Beim Kühlen der Anlage **Kaltenbach** beträgt die maximale Ausbreitung für die -1,0 K Isotherme 18 m im September. Die Breite des Temperaturfeldes erhöht sich auf 21 m. **Abbildung 14** zeigt die Ausdehnung des Temperaturfeldes. Diese breitet sich in der Modellierung etwa 7 m über das eigene Flurstück 11321/6 aus und beeinflusst das benachbarte Flurstück 11321/5 im Jahresverlauf. Der Abstand der Temperaturfelder zum Entnahmebrunnen Real Estate EB1 und Rückgabebrunnen Real Estate RB1 vergrößert sich auf 37 bzw. 33 m.

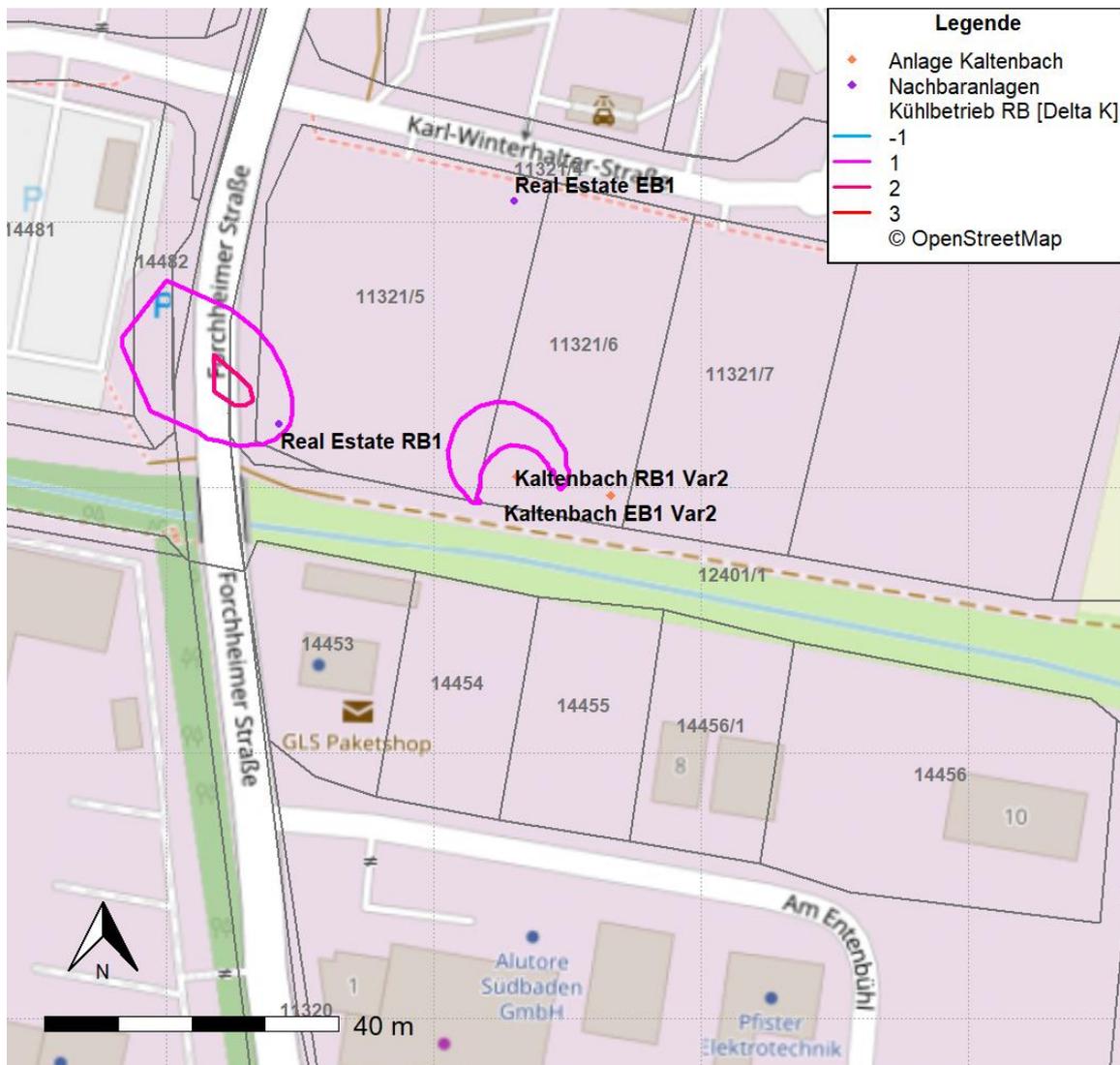


Abbildung 14: Temperaturfeld des Rückgabebrunnens Kaltenbach Variante 2 nach 20-jähriger Modellierungsdauer zum Zeitpunkt mit maximaler Ausdehnung (September) der 1,0 K Isotherme in einer Tiefe von 10 m.

Da die Temperaturfelder mit den angepassten k_f -Werten geringere Ausbreitungen haben, wurde auf die Modellierung des Abgleichs „Lastfall Jahresmittel“ verzichtet, da nochmal geringere Ausbreitungen das Ergebnis wären. Dort „worst case“ Fall wurde somit betrachtet.

Da sich nur im Umfeld der Brunnen Kaltenbach die Temperaturfelder verkleinert haben und im Abstrom sich keine Veränderungen ergeben haben, gelten die Ergebnisse und Darstellungen der Nachbaranlagen aus dem Hauptbericht.

6 Fazit

Bei der Modellerstellung für die Grundwasserwärmeanlage Kaltenbach in Endingen wurden, soweit möglich, öffentlich zugängliche und gut belegte, bevorzugt von den zuständigen Fachbehörden erarbeitete Datengrundlagen zu Geometrie und Eigenschaften des Grundwasserleiters sowie den maßgeblichen hydraulischen Randbedingungen verwendet und im zweiten Schritt die ermittelten Durchlässigkeiten von BauGrund Süd [2023] in das Modell implementiert.

Durch die kf-Wert Anpassung ist weiterhin davon auszugehen, dass das Modell die Dimension des durch die thermische Grundwassernutzung induzierten Temperaturfeldes mit hoher Genauigkeit wiedergibt. Gleichwohl sollte aufgrund stets verbleibender Modellunsicherheiten sowie der Heterogenität des Grundwasserleiters bei der Interpretation der Ergebnisse eine gewisse Unschärfe einkalkuliert werden.

Durch die geringeren kf-Werte im Brunnenbereich ist die Fließgeschwindigkeit lokal verringert. Somit breitet sich das Grundwasser am Rückgabebrunnen weniger schnell in Fließrichtung aus. Es erhöht sich die Ausbreitung der Temperaturfelder in der Breite auf Höhe der Brunnen (**Abbildung 13, Abbildung 14**). Es entstehen nur lokale Veränderungen der Temperaturfelder von den Brunnen Kaltenbach, die Nachbaranlagen im Abstrom sind nicht betroffen.

Dadurch ist die insgesamt geringere maximale Temperatursausbreitung von maximal 33 m beim Heizen im Gegensatz zu den bisherigen Ergebnissen zu begründen. Durch die größeren Ausbreitungen in der Breite von bis 25 m entstehen keine negativen Entwicklungen. Die Nachbaranlage von Real Estate hat einen Mindestabstand zum Temperaturfeld von 27 m zum Entnahmebrunnen Real Estate EB1 und 21 m zum Rückgabebrunnen Real Estate RB1.

Durch die geringere maximale Ausbreitung der Temperaturveränderung im Grundwassermodell mit den angepassten kf-Werten können Betroffenheiten von Nachbaranlagen ausgeschlossen werden. Mit den verwendeten/ angepassten kf-Werten und dem Entnahmeregime kommt es in den 20-jährigen Modellzeitraum zu keinem Kurzschluss der Anlage Kaltenbach. Die Grundwasserwärmeanlage beeinflusst kein Wasserschutzgebiet.

7 Literatur

BauGrund Süd [2023]: Antrag auf Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis nach § 8,9 und 10 WHG zur Grundwasserförderung aus einer Brauchwasserbrunnenanlage um Betrieb einer Grundwasserwärmepumpenanlage, AZB 2105083, BauGrund Süd Gesellschaft für Geothermie mbH, Zeppelinstr. 10, 88410 Bad Wurzach, Hydrogeologische Stellungnahme, 14.04.2023.

DHI WASY [2022]: FEFLOW DHI-WASY GmbH, Berlin, FEFLOW Version 7.5, FEPEST Version 7.5. <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>

Kaltenbach [2022]: Unterlagen zur Grundwasserwärmenutzung Endingen/Kaltenbach

Marotz G. [1968]: Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. Schriftenreihe KWK, 18, Hamburg. [zitiert in Frieg B. [1987]: Hydrogeologie und Grundwasserhydraulik des Einzugsgebietes des Wasserwerkes Endingen-Ebnet. Dissertation, Universität Heidelberg]

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft [2009]: Leitfaden zur Nutzung der Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/presse-service/publikation/did/leitfaden-zur-nutzung-der-erdwaerme-mit-grundwasserwaerme-pumpen/>

Morhard [2022]: Langzeitsimulation von Bodenwasserhaushalt und flächenhafter Grundwasserneubildung 2001-2020 für die Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. GIT HydroS Consult GmbH, Endingen.

LfU [2001]: Grundwasserüberwachungsprogramm. Grundwasser Oberfläche im Oktober 1986, April 1988 und September 1991 im Oberrheingraben zwischen Karlsruhe und Basel. Erläuterungen und Karten, Grundwasserschutz 18. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.

LGRB [2022]: Kartenviewer online, <https://maps.lgrb-bw.de/>

LRA-EM [2022], Dateneinsicht im Landratsamt Emmendingen bei Herr Werner am 05.10.2022.

LRA-EM [2022a], Wasserrechtlichen Erlaubnis zu Brunnenbohrung und zum Pumpversuch; Errichtung von einem Entnahmehauptbrunnen und einem Schluckbrunnen zum späteren Bau und Betrieb einer Grundwasserwärmepumpenanlage auf dem Grundstück Flst. Nr. 113321/6, Gemarkung Endingen a.K. Datum 22.12.2022.

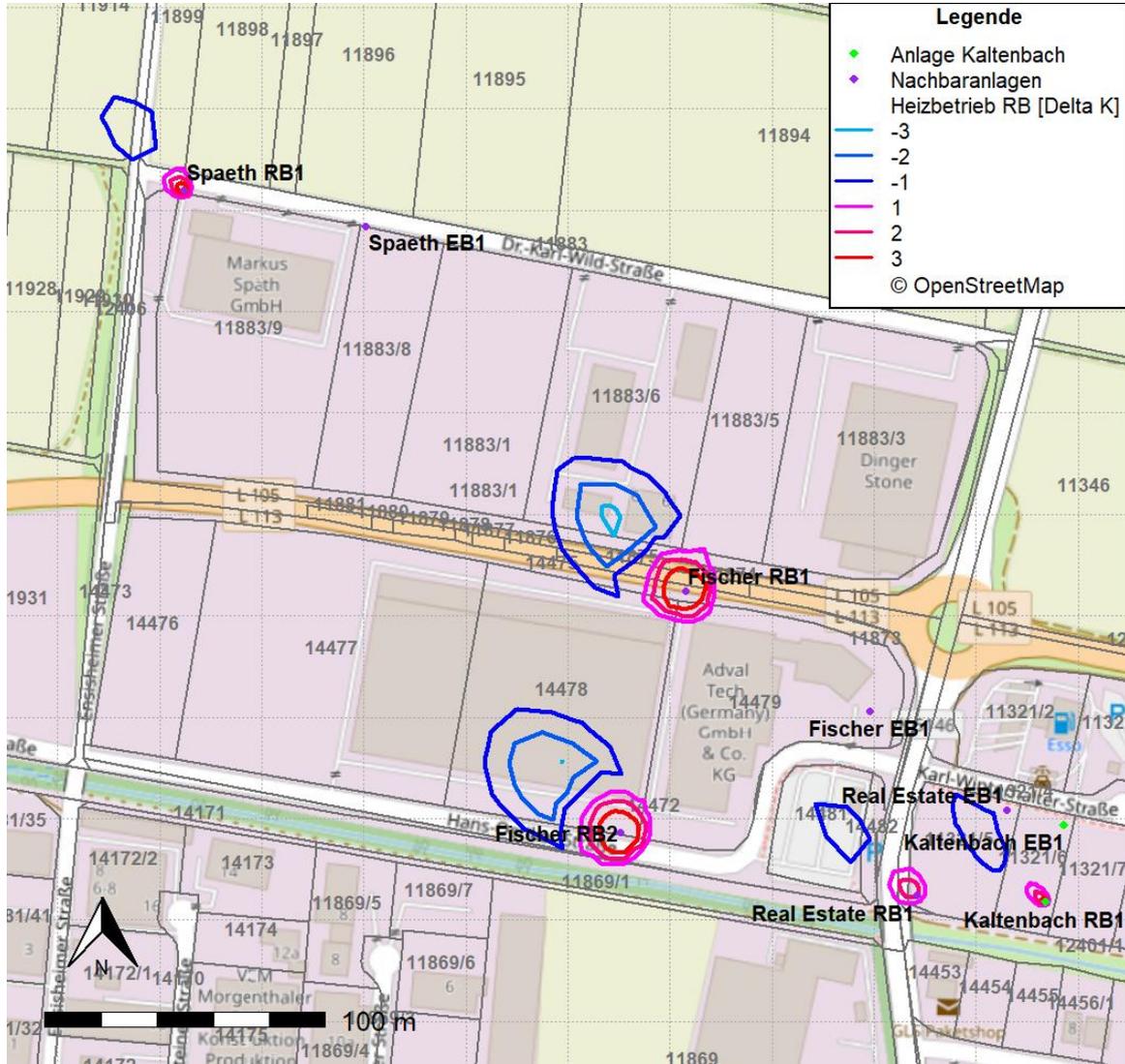
LUBW [2019]: Stehendes Gewässer (1:10.000) - AWGN, Stehendes Gewässer (1:200.000) - WaBoA, Überarbeitung 31.05.2019.

RP LGRB [2007]: Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Freiburg.

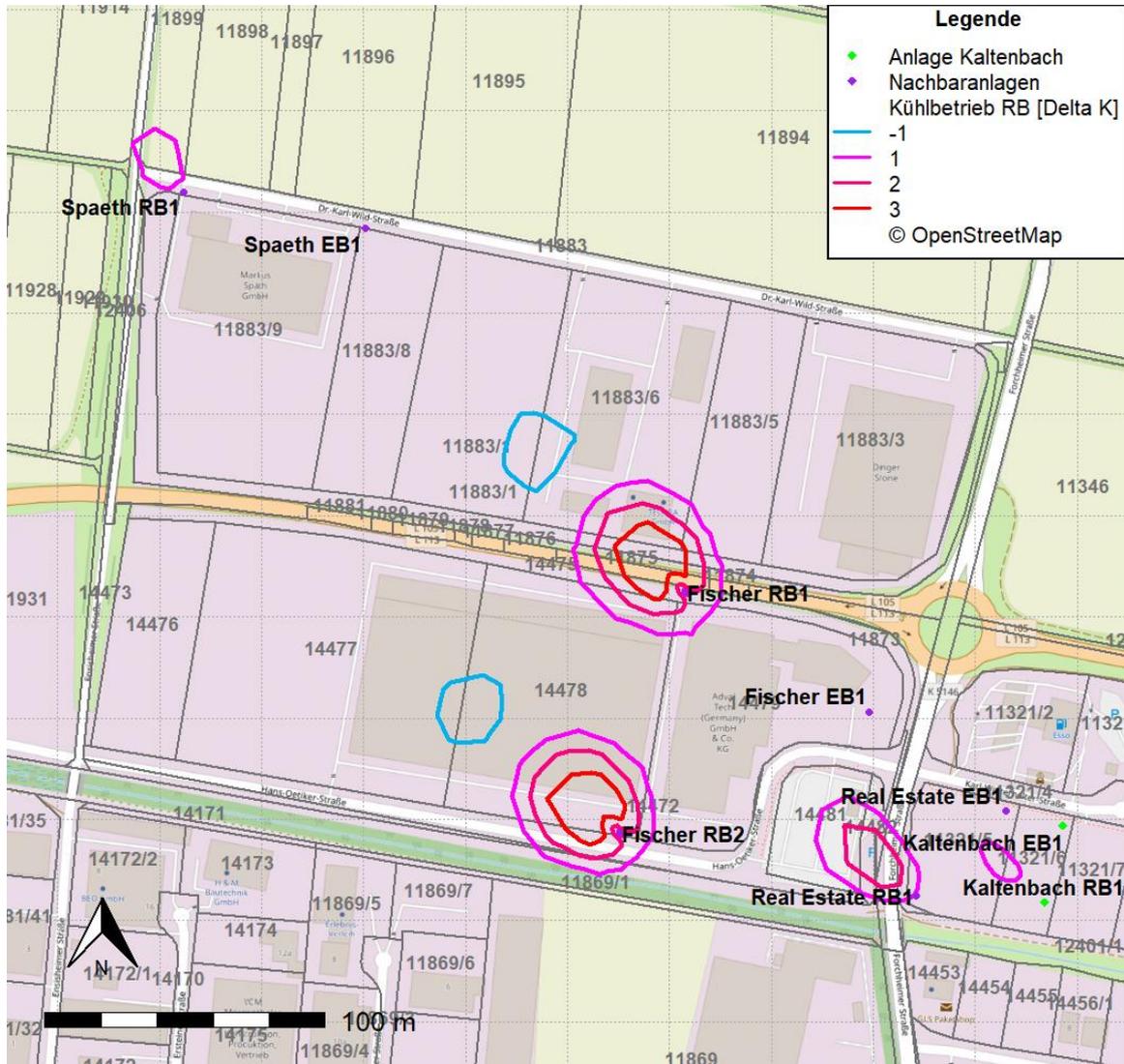
WaBoA [2007]: Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. Herausgegeben vom Umweltministerium Baden-Württemberg und der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.

8 Anhang: Temperaturfelder zum Ende der Kalendermonate

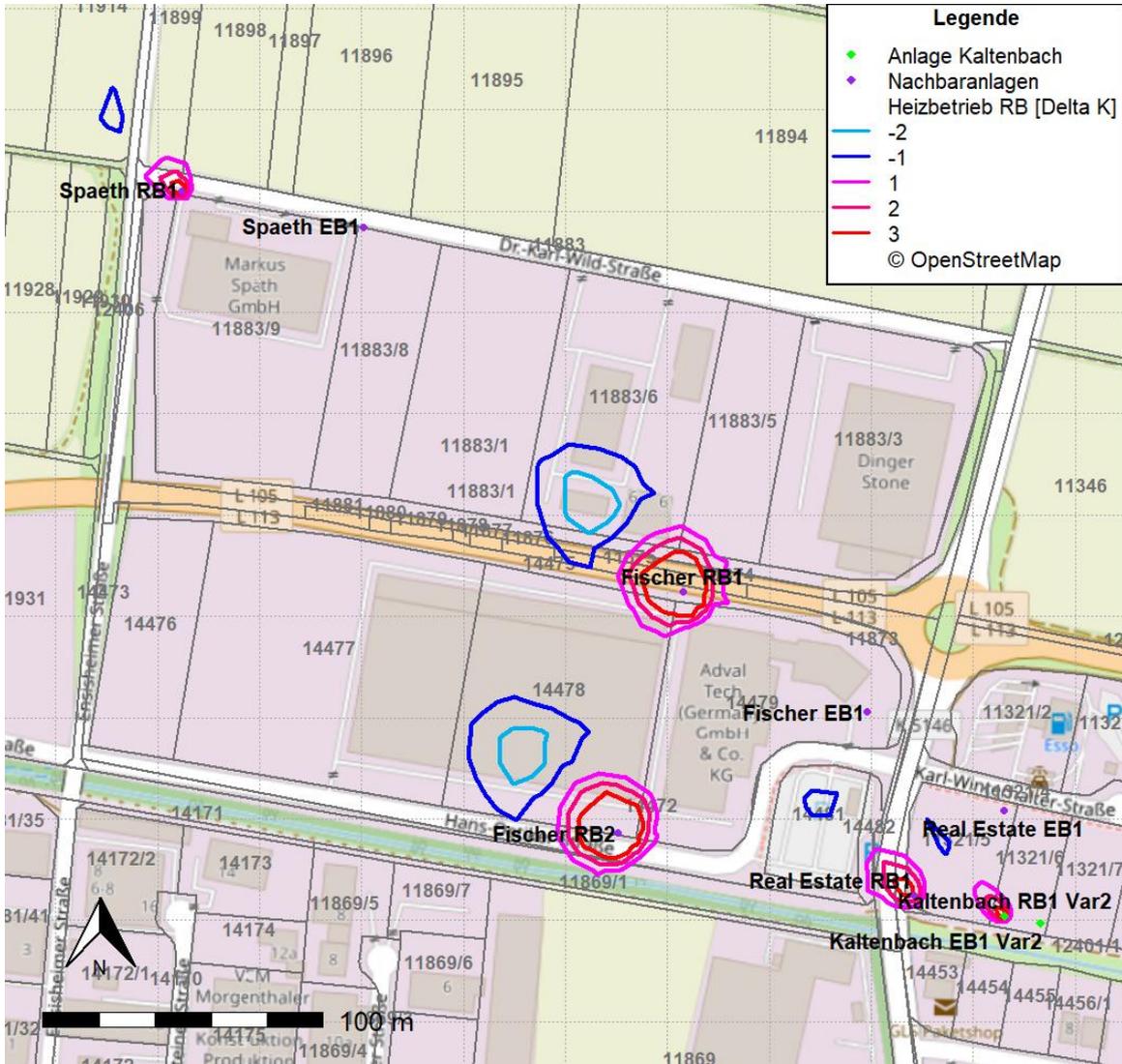
8.1 Temperaturfelder aller Anlagen der -1 K Variante 1



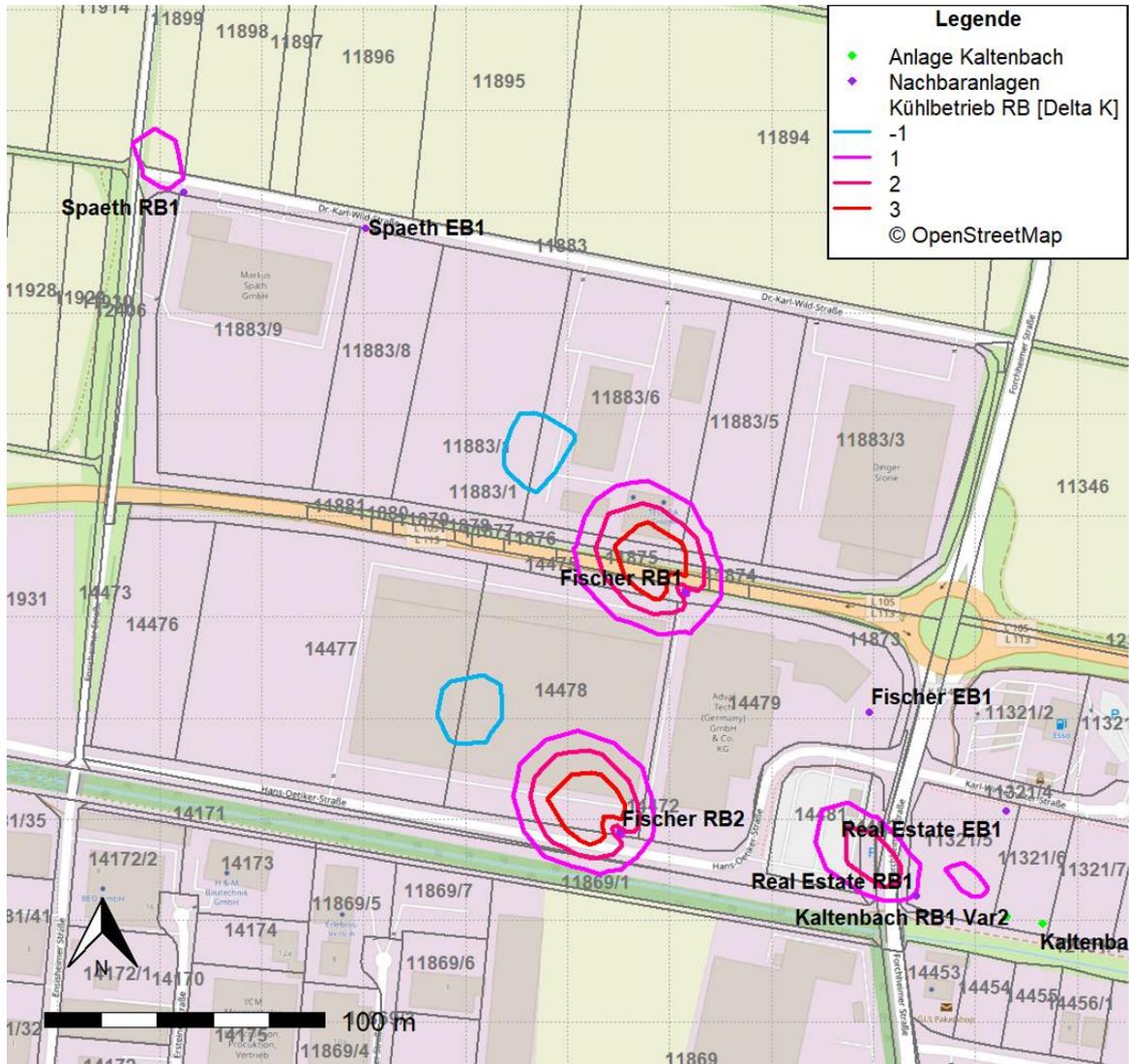
8.2 Temperaturfelder aller Anlagen der 1 K Variante 1



8.3 Temperaturfelder aller der -1 K Variante 2



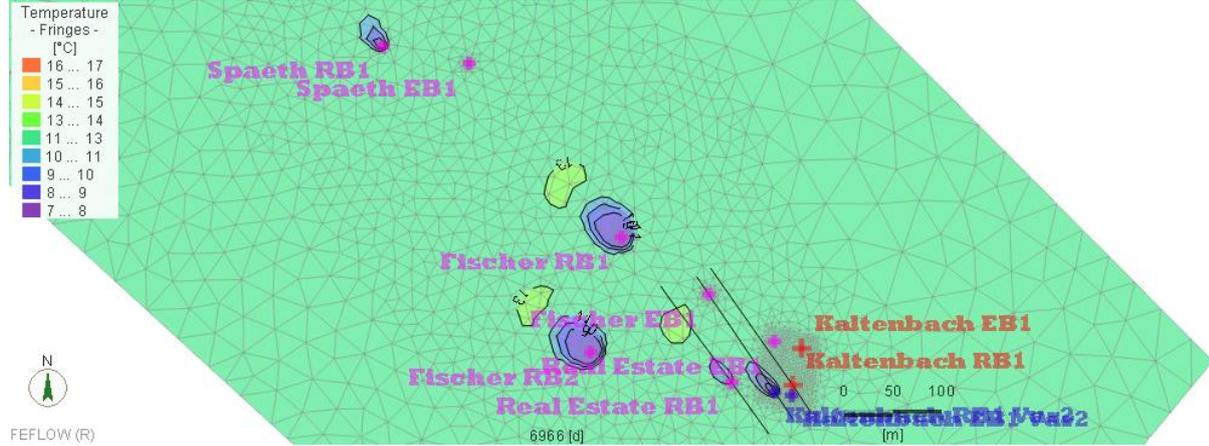
8.4 Temperaturfelder aller Anlagen der 1 K Variante 2



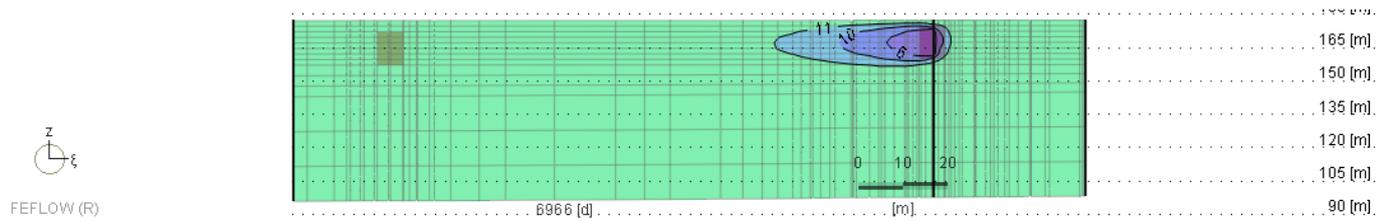
8.5 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Januar

a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)

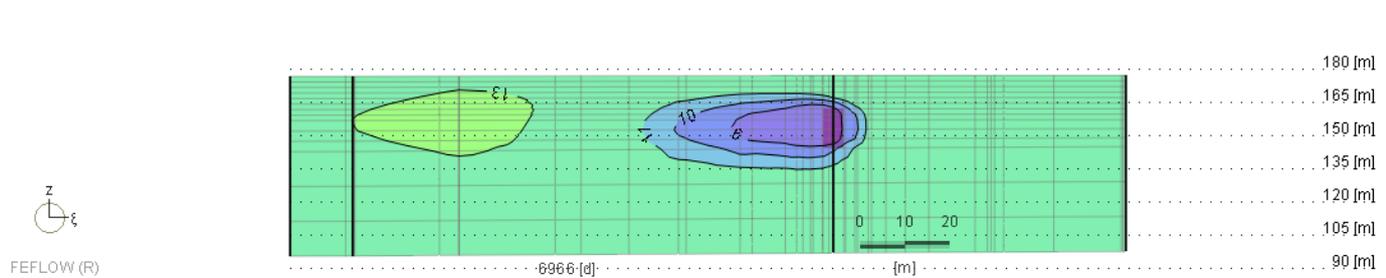
a)



b)



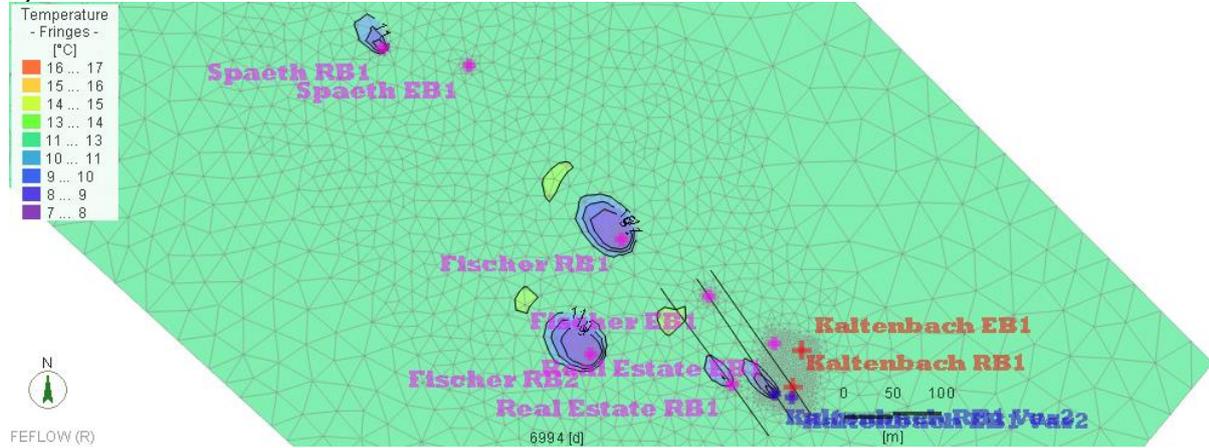
c)



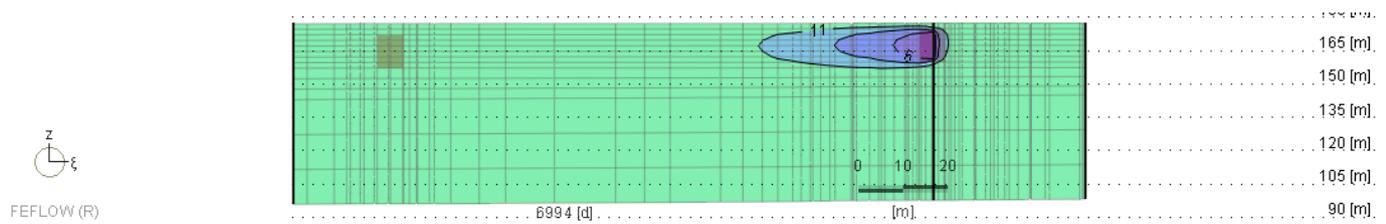
8.6 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Februar

a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)

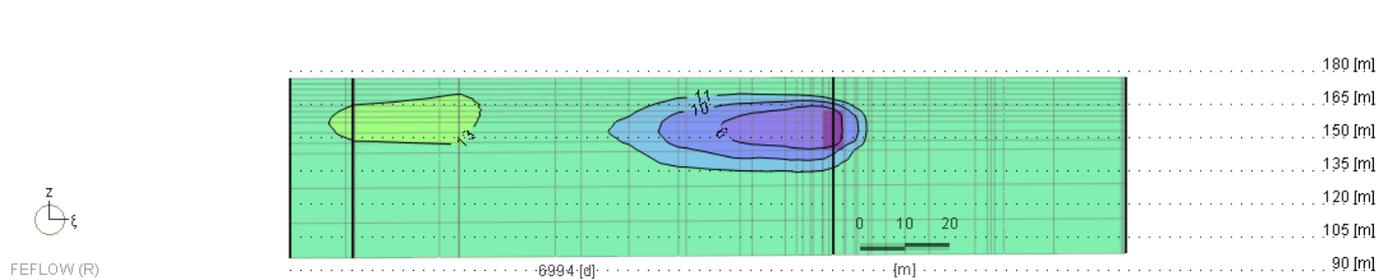
a)



b)



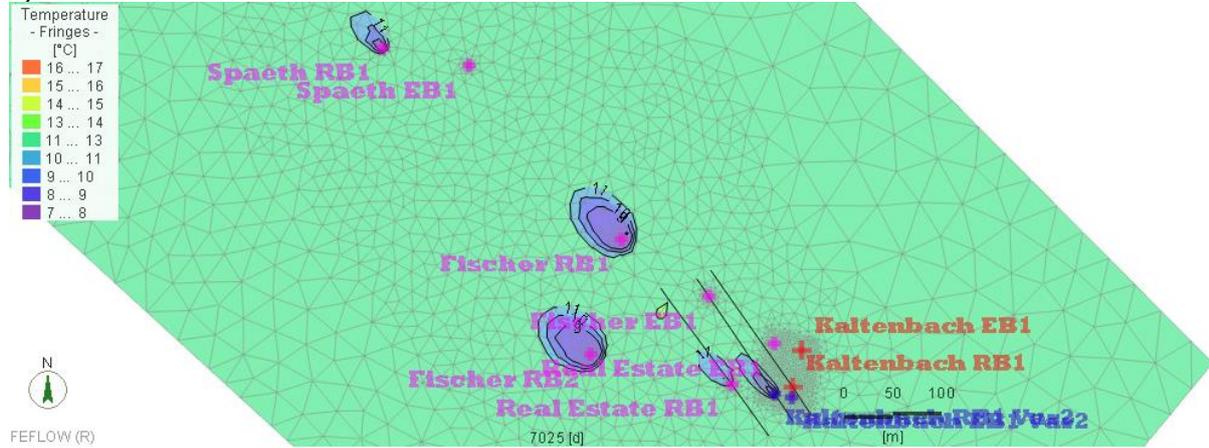
c)



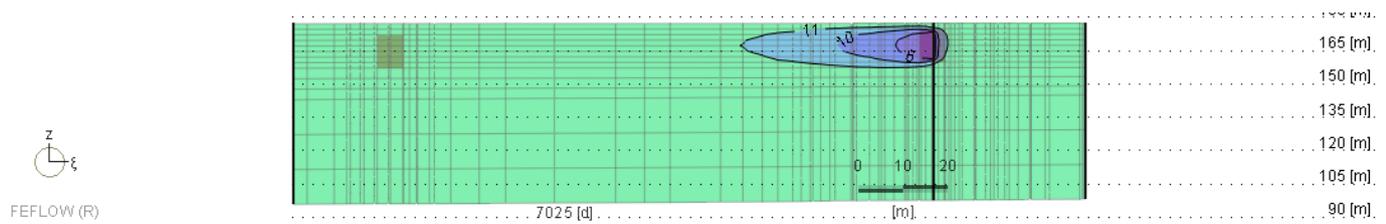
8.7 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende März

a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)

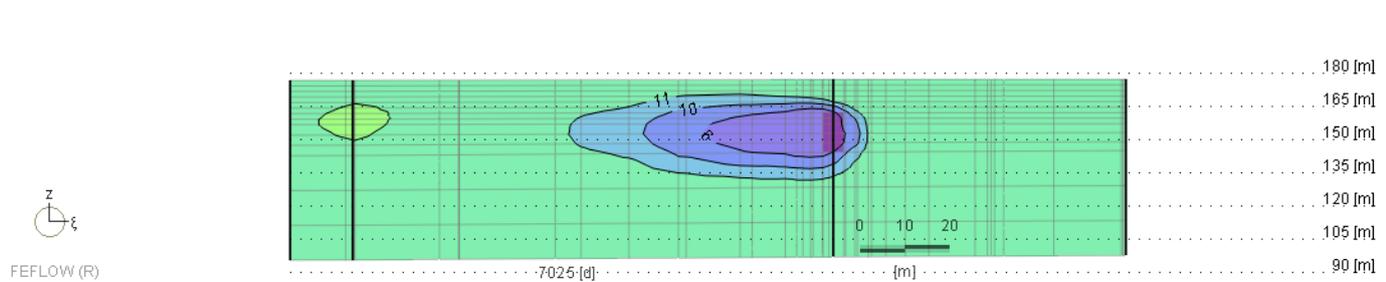
a)



b)

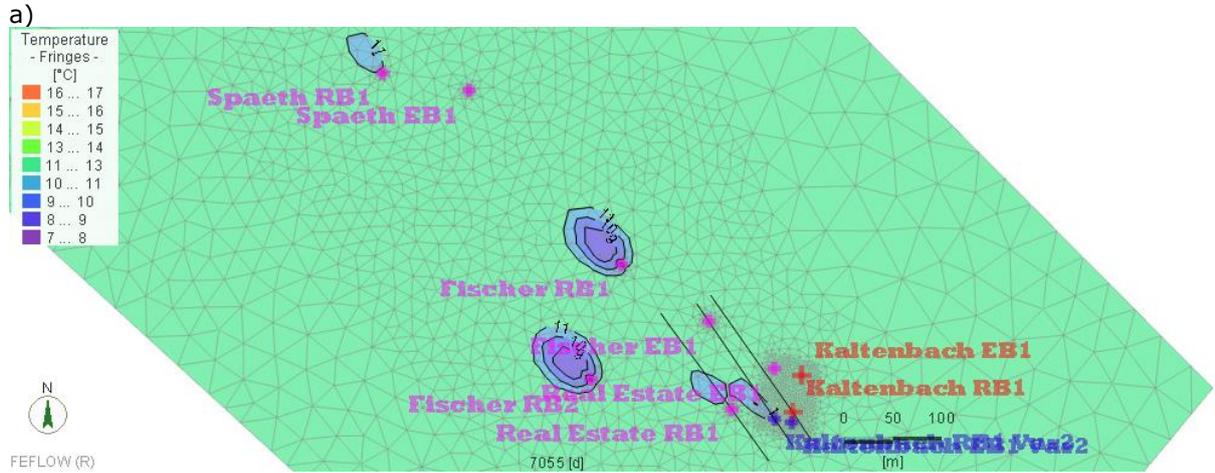


c)

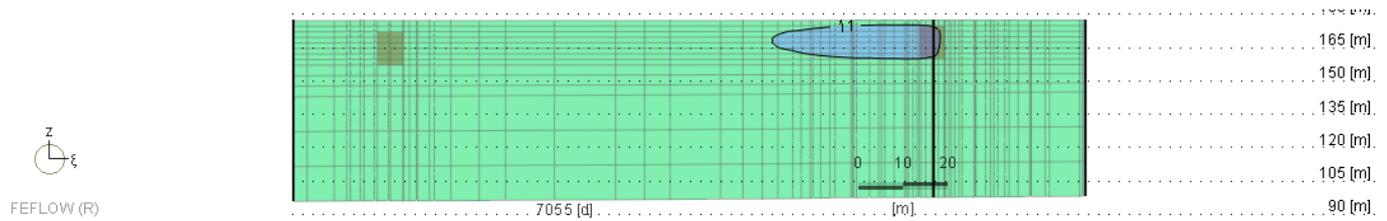


8.8 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende April

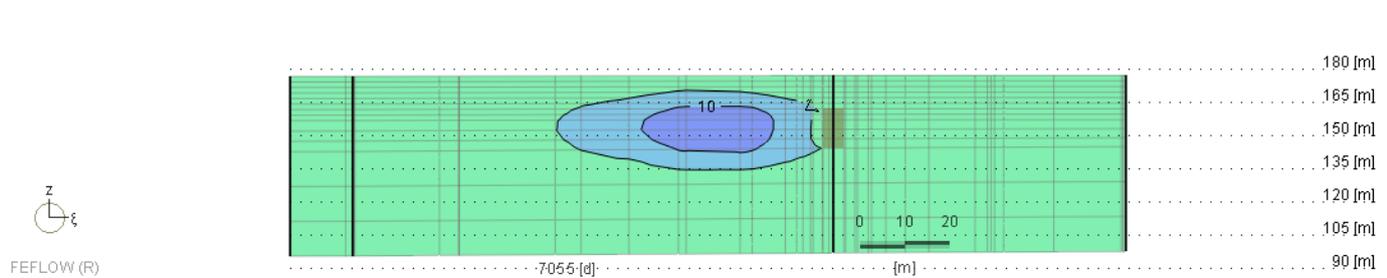
a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)



b)

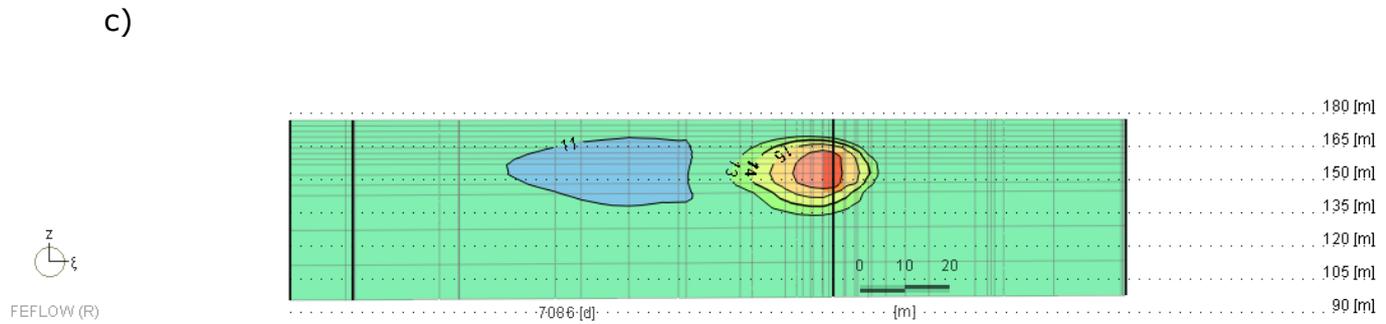
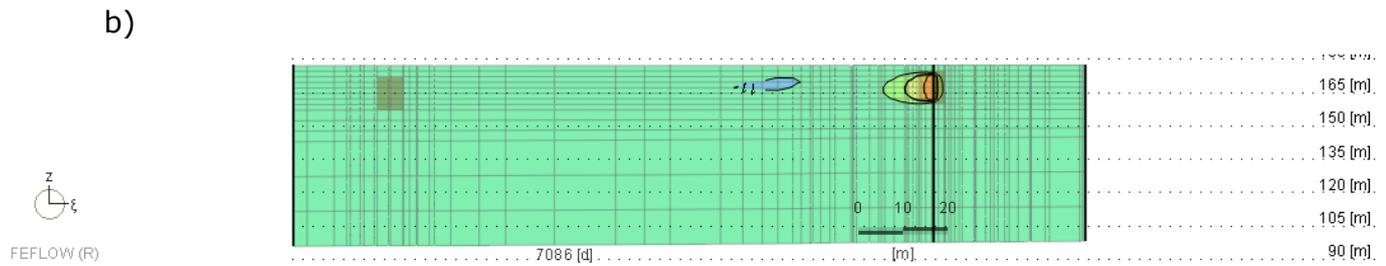
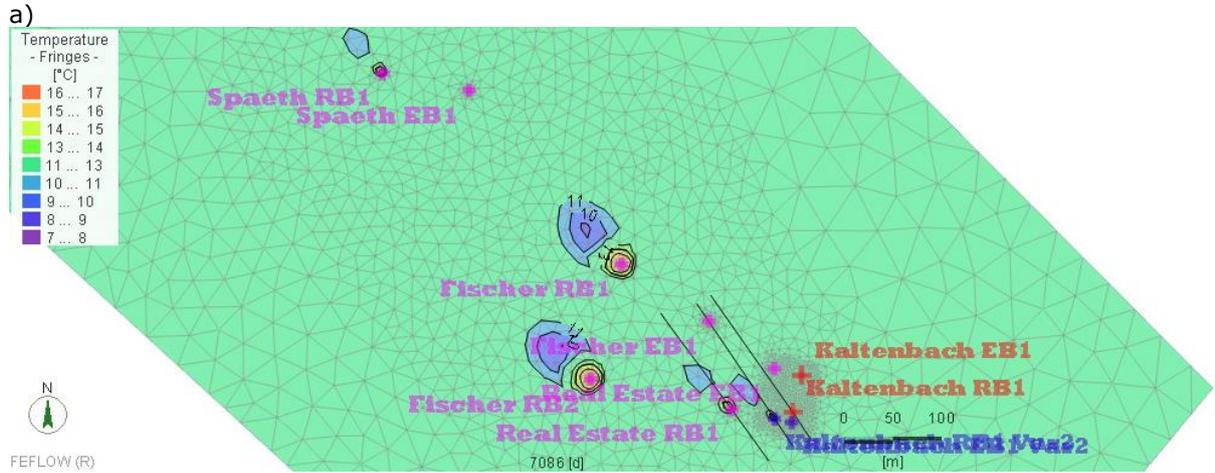


c)



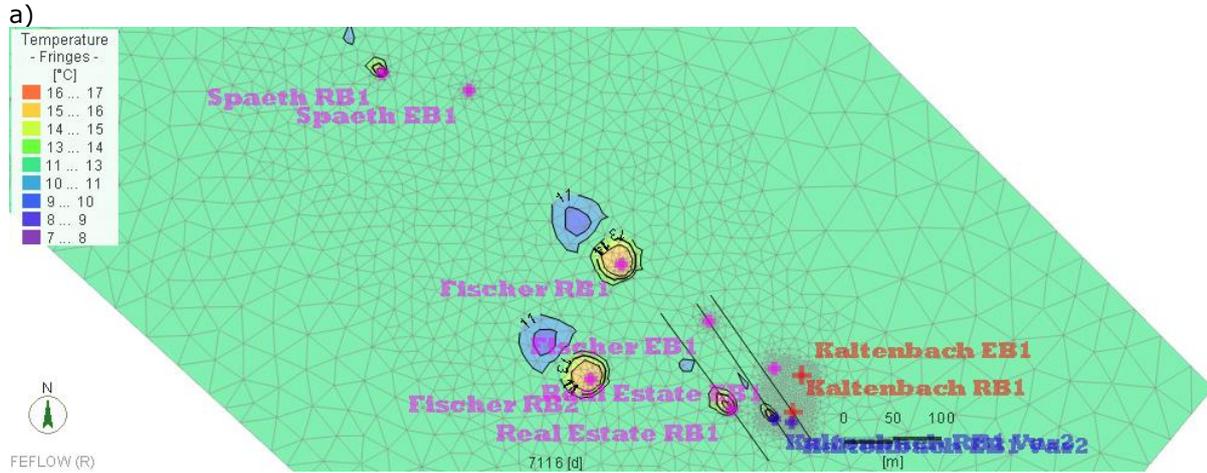
8.9 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Mai

a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)

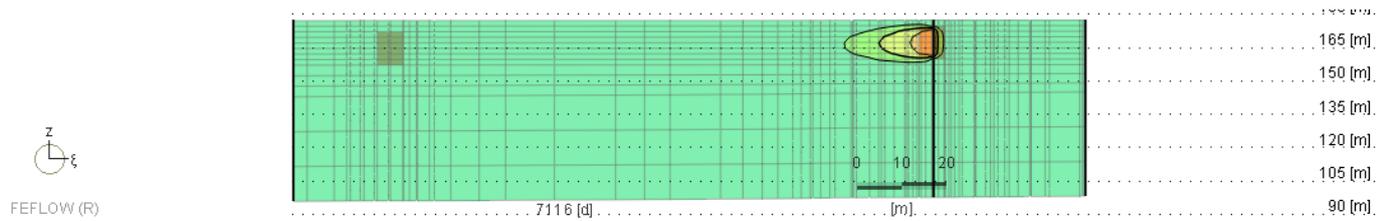


8.10 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Juni

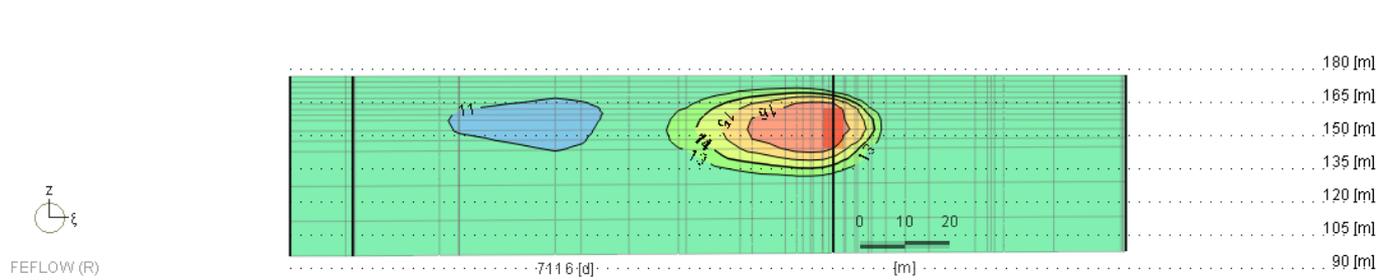
a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)



b)



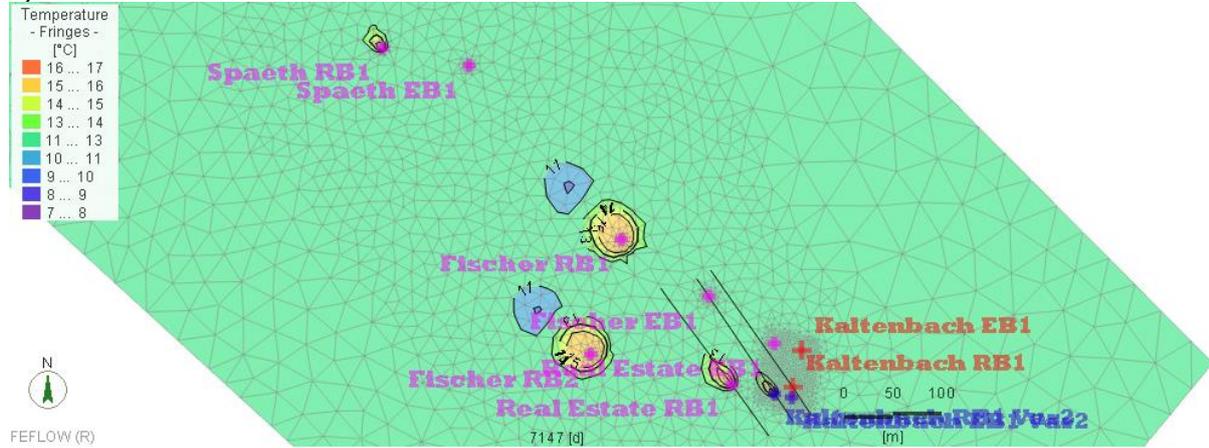
c)



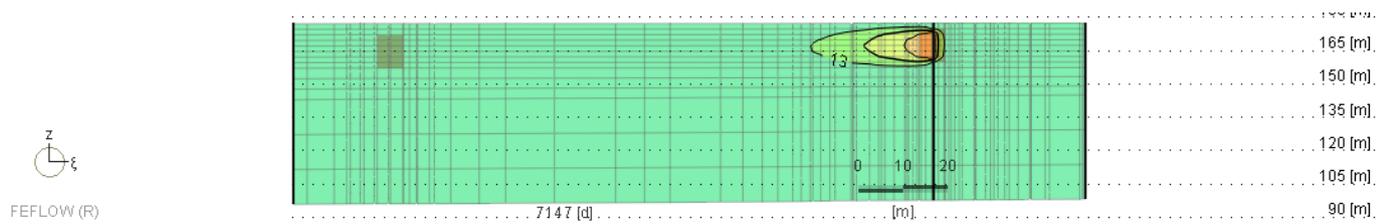
8.11 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Juli

a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)

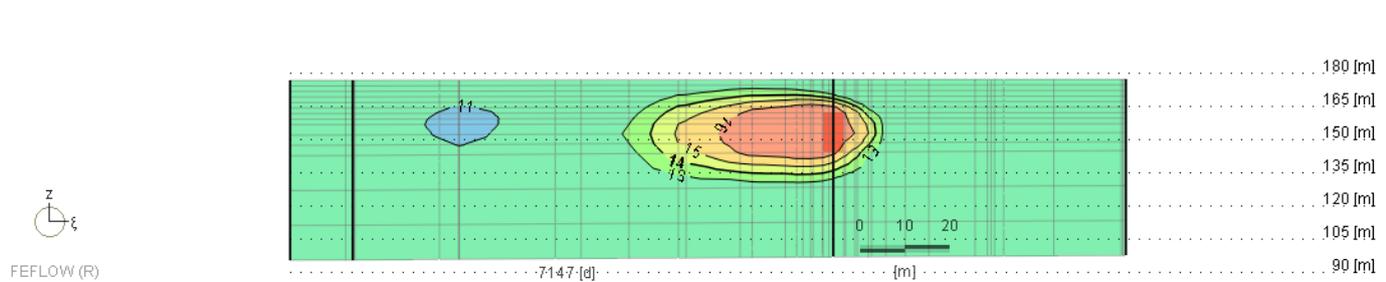
a)



b)

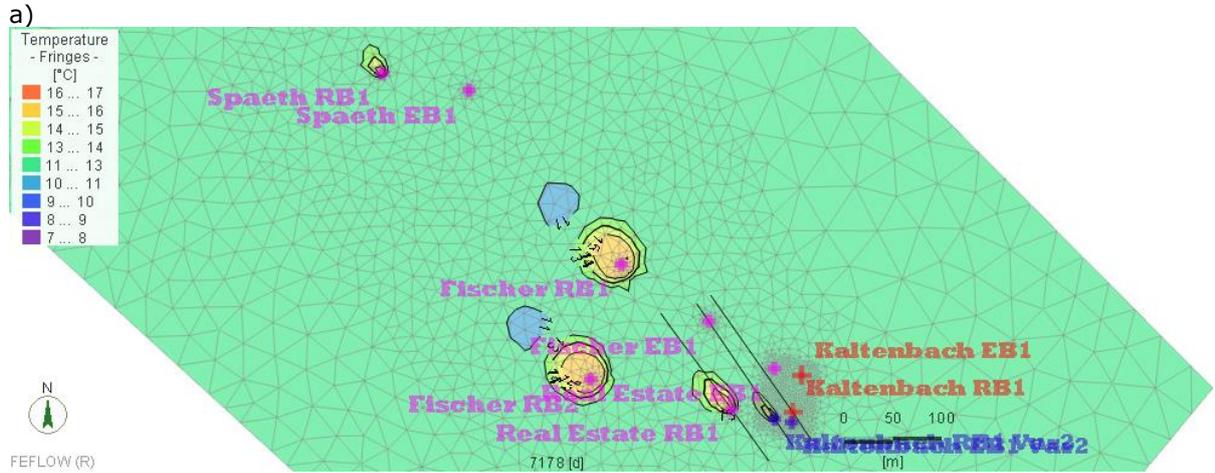


c)

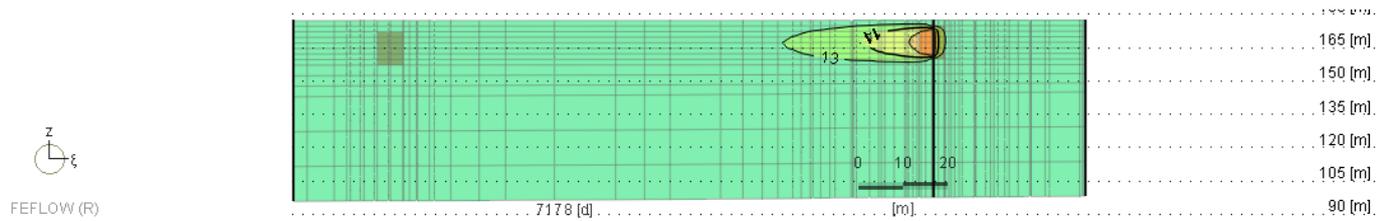


8.12 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende August

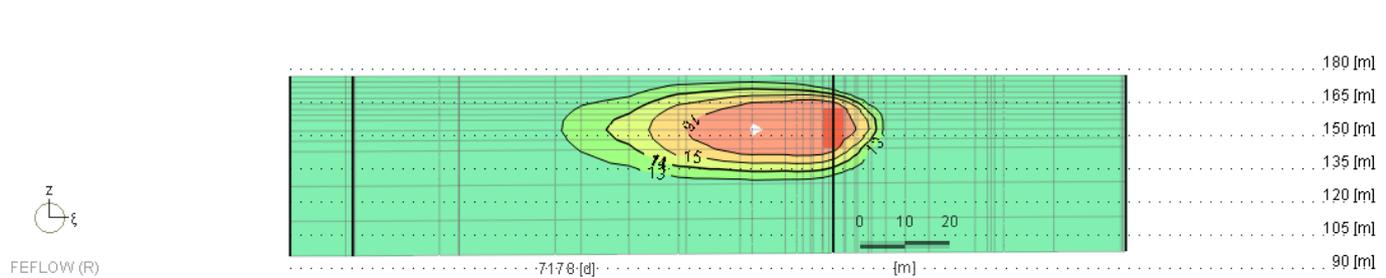
a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)



b)

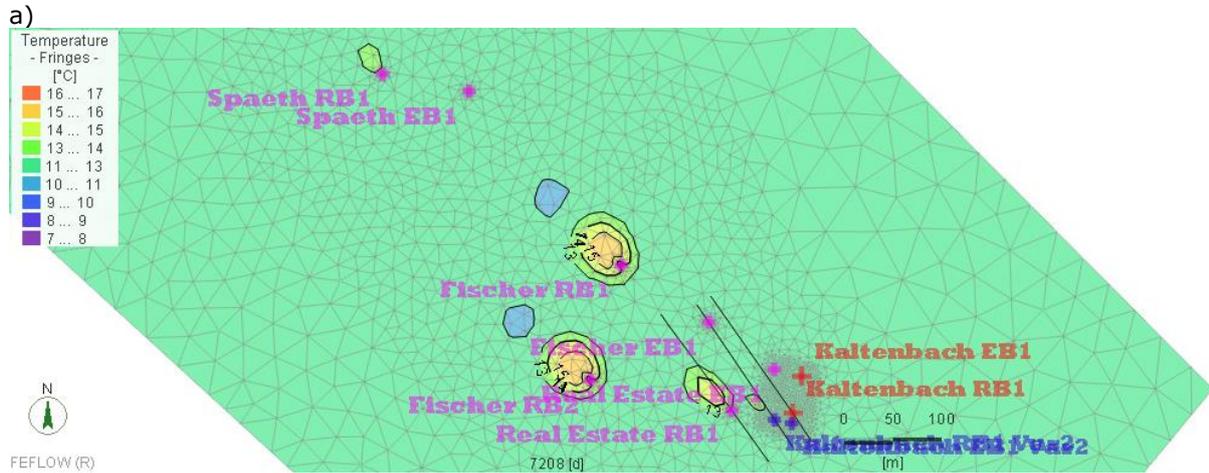


c)

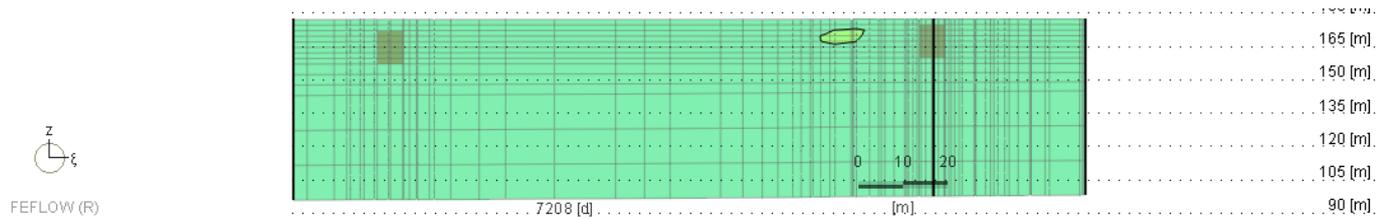


8.13 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende September

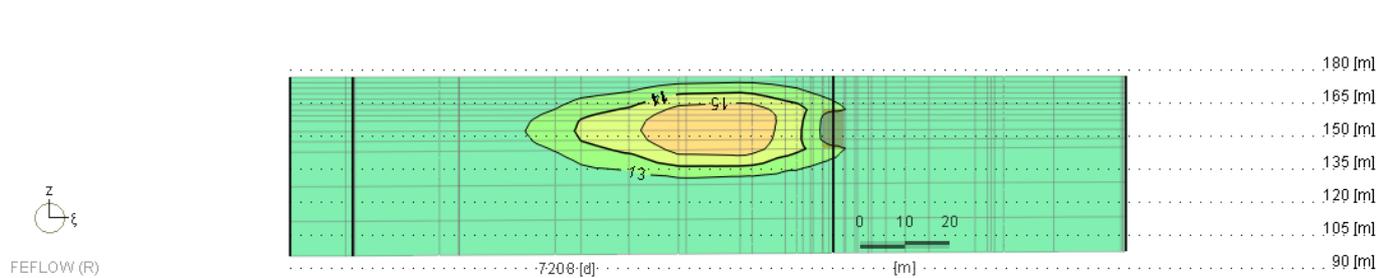
a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)



b)



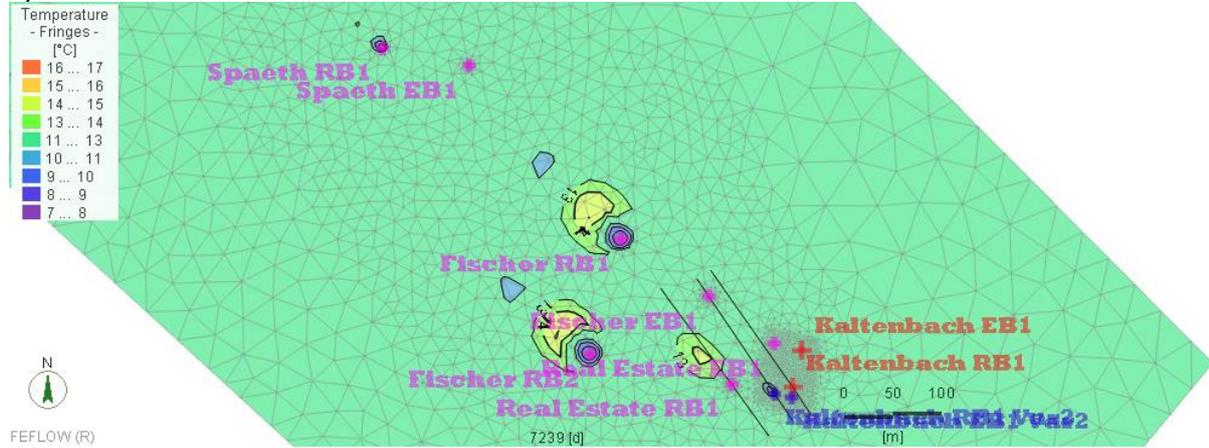
c)



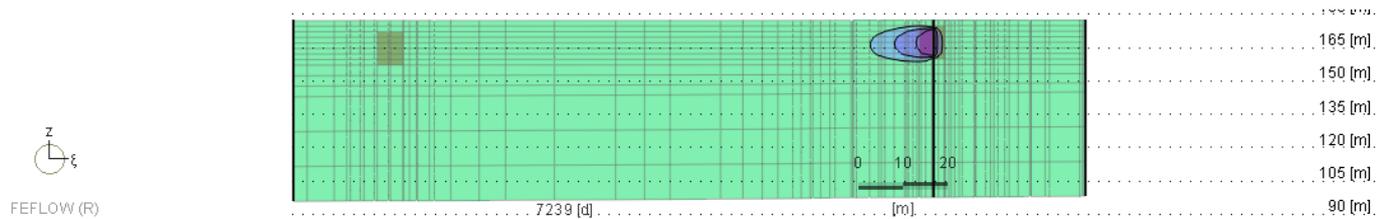
8.14 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Oktober

a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)

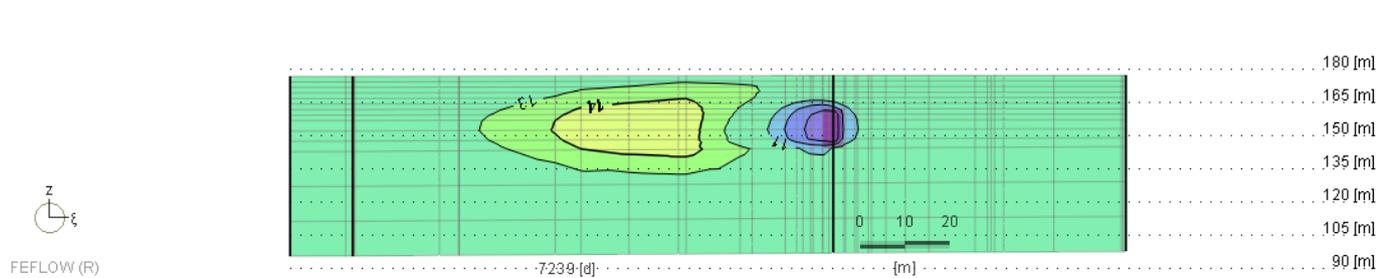
a)



b)



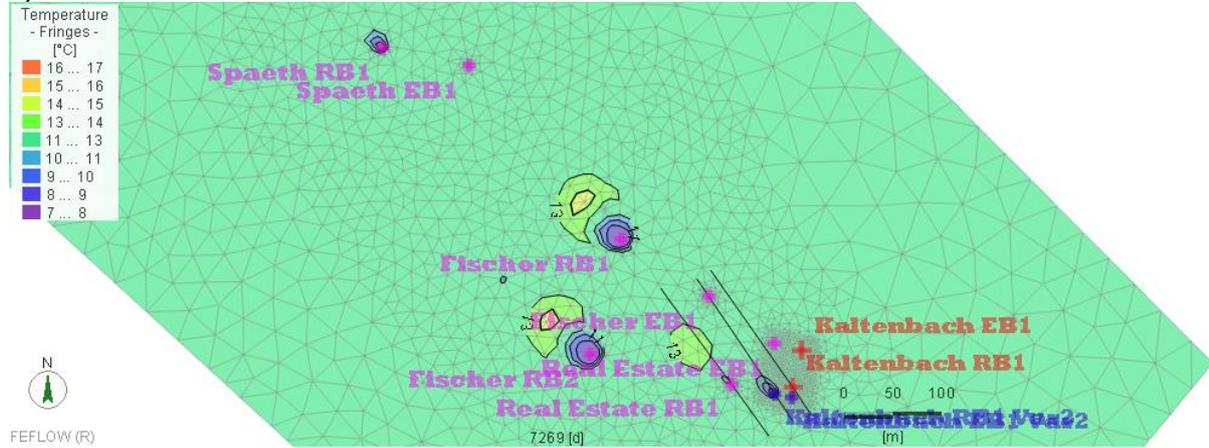
c)



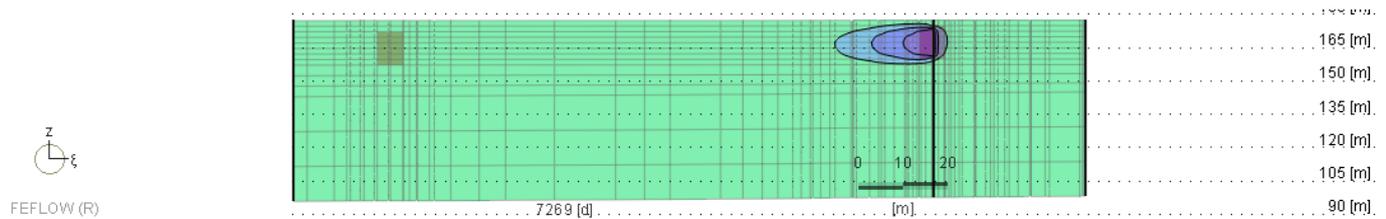
8.15 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende November

a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)

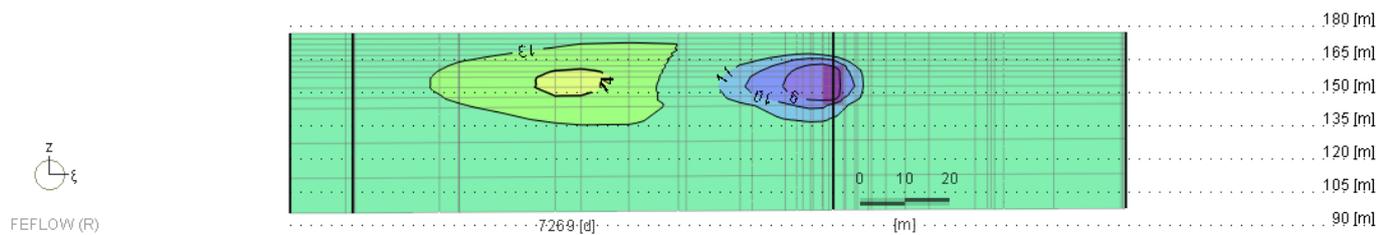
a)



b)



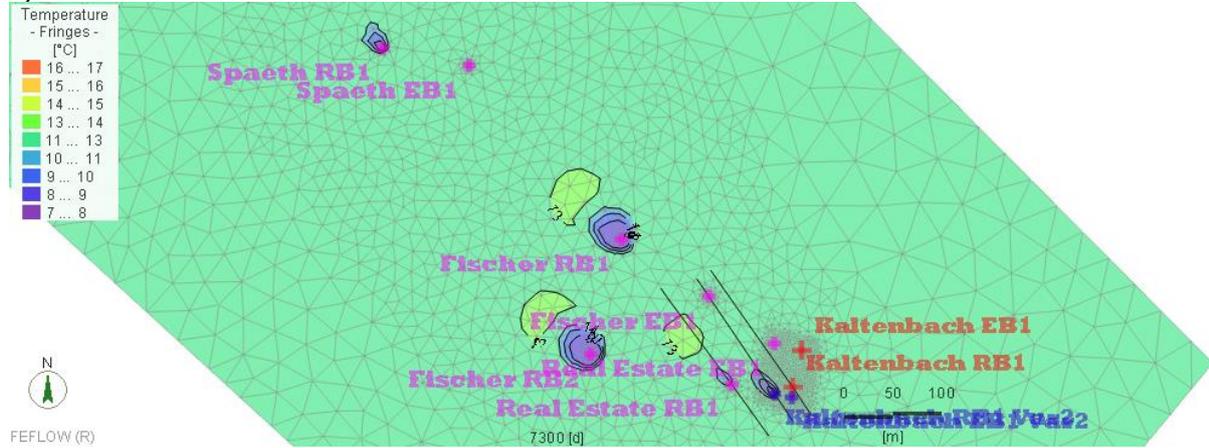
c)



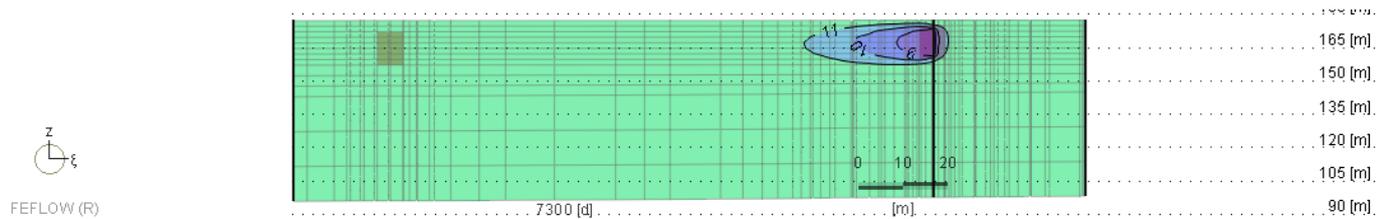
8.16 Temperaturfeld im Abstrom des Rückgabebrunnens Ende Dezember

a) Ansicht von oben (Tiefe 15 m), b. Querprofil durch Kaltenbach Rückgabebrunnen Variante 2 (Filterstrecke in rot), c) Querprofil durch Rückgabebrunnen Real Estate (Filterstrecke in rot)

a)



b)



c)

