

Schlussbericht, 26. April 2017

Qualitätssicherung Erdwärmesonden

Numerische Simulation eines
Erdwärmesondenfeldes mit
Berücksichtigung von Geocooling
und Grundwasserströmung



Autoren

Dr. Vincent Badoux, GEOTEST AG

Ursula Ritter, GEOTEST AG

Mark Gropius, GEOTEST AG

Dr. Michael Soom, GEOTEST AG

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	4
2.	Vorhandene Unterlagen	5
3.	Konzept	5
4.	Numerisches Wärmetransportmodell.....	7
4.1	Modellaufbau.....	7
4.2	Bodeneigenschaften	8
4.3	EWS Anlage.....	8
4.4	Grundwasser	8
4.5	Heizung und Warmwasserbedarf für Ladung Erdwärmesonden	9
4.6	Simulationen / Varianten	9
5.	Ergebnisse	11
5.1	Temperaturentwicklung.....	11
5.2	Variante Betrachtung	12
5.3	Einfluss des EWS-Feldes auf die Grundwassertemperaturen	21
5.4	Einfluss der Grundwasserströmung auf das EWS-Feld	21
5.5	Einfluss der Regeneration auf die Grundwassertemperaturen	23
5.6	Energiebilanzen im Grundwasser	23
5.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	29
6.	Schlussfolgerungen.....	32
	Anhänge	35

1. Einleitung

Eine stetige Zunahme und räumliche Verdichtung von Erdwärmesondenanlagen (EWS), insbesondere in Ballungsgebieten, sind verbunden mit einer zunehmenden thermischen Beeinflussung des Untergrundes. Dort wo EWS vornehmlich oder einseitig zum Heizen von Gebäuden genutzt werden, kann es zu einer zunehmenden Abkühlung des Untergrundes kommen. Die Regeneration des Untergrundes durch einen zusätzlichen Wärmeeintrag würde eine Verminderung oder möglicherweise sogar eine Kompensation dieses Effekts erlauben. Weiter kann der Wärmeeintrag zu einer Erwärmung des Untergrundes bzw. des evtl. vorhandenen Grundwassers führen. Aus Sicht des Grundwasserschutzes kann diese Erwärmung die Grundwasserqualität beeinträchtigen.

Ein zusätzlicher Wärmeeintrag lässt sich auf verschiedene Arten realisieren, wie z.B. durch Geocooling.

Geocooling bezeichnet den passiven Kühleffekt von Erdwärmesondenanlagen durch die Zirkulation von Wärmetragerflüssigkeit (z.B. Wasser) ohne den Einsatz von Wärmepumpen.

GEOTEST AG wurde beauftragt, das Regenerationspotenzial von Geocooling zu untersuchen.

Den Modellbetrachtungen wurde ein bezüglich des Platz- und Energiebedarfes idealisierter Fall eines Einfamilienhauses, sowie einer regelmässigen Anordnung mehrerer Einfamilienhäuser in einem massgebenden geologischen Umfeld für die Schweiz zu Grunde gelegt. Die Studie ist an ein Szenario angelehnt, bei dem ein Hausbesitzer eine Erdwärmesonde plant, dimensioniert und in Betrieb nimmt. Diese Sonde wird in diesem Bericht als Referenzsonde bezeichnet. Er rechnet dabei nicht damit, dass nach kurzer Zeit seine Nachbarn ebenfalls Erdwärmesonden in Betrieb nehmen und damit seine Erdwärmesonde beeinflussen. Nun stellt sich die Frage, ob mit Geocooling die Beeinflussung durch die Nachbarsonden so abgeschwächt werden kann, dass die Referenzsonde trotzdem über die geplante Betriebsdauer die gewünschte Leistung bringen kann.

Mit dem beschriebenen Szenario wird die Situation abgebildet, dass aktuell eine Verdichtung der Wärmenutzung des Untergrundes stattfindet.

Dieser Bericht dokumentiert die Ergebnisse der numerischen Modellbetrachtungen bezüglich des Einflusses von Geocooling auf die Temperaturentwicklung des Un-

tergrundes. Bereiche mit und ohne Grundwasser werden unterschiedlich betrachtet.

Alle Ergebnisse und Schlussfolgerungen beziehen sich hinsichtlich der berücksichtigten Energie- und Untergrundparameter ausschliesslich auf dieses konstruierte Beispiel und sind nicht allgemeingültig bzw. nicht ohne weiteres übertragbar.

2. Vorhandene Unterlagen

- [1] SIA Norm 384/6 Erdwärmesonden. 2010.
- [2] Potential_PV_Erdsonde_150629.xlsx, inkl. Kurzbeschreibung, FHS St.Gallen vom 29.06.2015
- [3] Wegleitung Grundwasserschutz, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL, Bern, 2004.

3. Konzept

Ein Einfamilienhaus (EFH) mit 2 Stockwerken und einer Grundfläche von 70 m² liegt auf einem Grundstück mit einer Fläche von 500 m². Der Haushalt besteht aus 4 Personen.

Es wurde ein Jahresenergiebedarf für Heizung und Warmwasseraufbereitung von 8'820 kWh bzw. 4'760 kWh berücksichtigt. Der gesamte Jahresenergiebedarf beträgt demnach 13'580 kWh, wobei der Energieentzug aus dem Untergrund aufgrund des Wärmepumpeneinsatzes (COP der Wärmepumpe 4.5 für Heizung und 2.8 für Warmwasseraufbereitung) lediglich 10'010 kWh beträgt.

Für die Heizung und Warmwasseraufbereitung des EFH wird eine typische Doppel-U Erdwärmesonde mit einer Tiefe von 122 m genutzt.

Für das Geocooling wurde eine Jahresenergiemenge von 3'030 kWh ermittelt. Diese basiert auf einer durchschnittlichen Leistung von 15 W/m². Das Geocooling ist dabei nur aktiv, wenn die Lufttemperatur grösser ist als 20 °C. Als Grundlage für die Berechnung dienen die Lufttemperaturdaten aus der Excel Tabelle der FHS St.Gallen [2]. Diese sind auf Stundenbasis vorgegeben. Das Verhältnis zwischen Heizungsbedarf und Warmwasseraufbereitung beträgt 0.22 [-], was einem normalen Wert entspricht.

Eine Übersicht der Jahresenergiebilanz eines Einfamilienhauses für Heizung, Warmwasseraufbereitung und Geocooling ist in Abbildung 1 dargestellt.

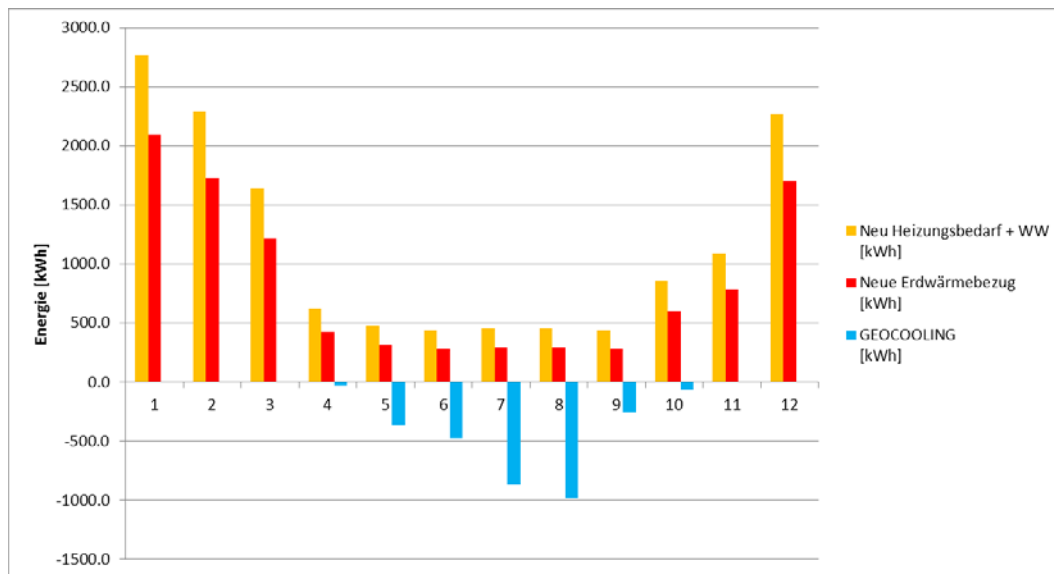


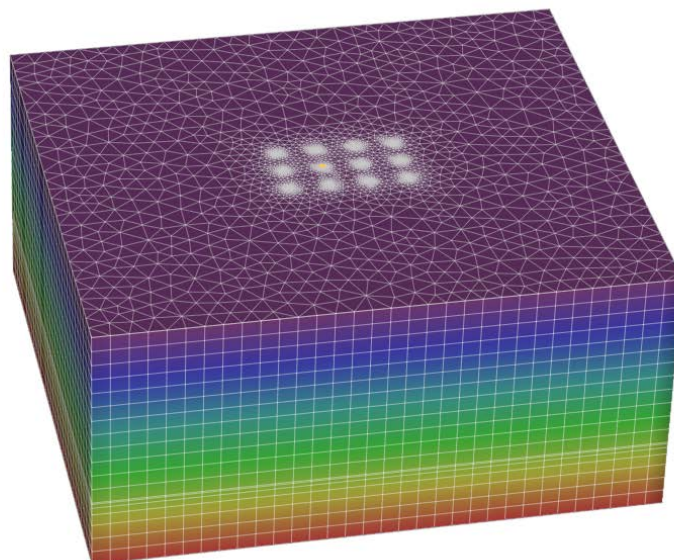
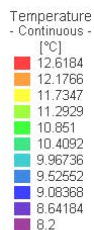
Abbildung 1: Jahresenergiebedarf eines Einfamilienhauses sowie Energiebereitstellung durch Geocooling

4. Numerisches Wärmetransportmodell

4.1 Modellaufbau

Für die Simulationen wurde ein numerisches 3D Wärmetransportmodell mit der Software FEFLOW 6.2 erstellt. Das Modell umfasst eine Fläche von 360 m x 320 m und ist 170 m tief. Ziel bei der Definition der Modellgröße ist es, den Einfluss der Modellränder auf die EWS auszuschliessen bzw. zu minimieren. Das zweidimensionale Modellnetz besteht aus finiten Dreieckselementen mit Kantenlängen zwischen 0.5 m und 20 m. Das Modell besteht insgesamt aus 147'725 Elementen und 79'000 Knoten, verteilt über 20 Schichten. Das 3D-Modell ist in Abbildung 2 dargestellt.

In den folgenden Abschnitten sind die Modelleigenschaften zusammengestellt.



13 nodes selected
Sep 1 2013 00:00:00

GEOTEST

Abbildung 2: 3D-Modell mit Finite Element Netz und ungestörte Temperaturverteilung im Untergrund

4.2 Bodeneigenschaften

- Uniformer Untergrund wie z.B. schweizerische Molasse
- Wärmeleitfähigkeit 2.7 W/m/K
- Wärmekapazität 2.1 MJ/m³/K
- Dichte 2.6·10³ kg/m³
- Mittlere Bodentemperatur 8.2 °C (Region Bern)
- Lokaler Wärmefluss 60 mW/m² (Region Bern)
- Porosität 0.25 [-]
- Wassergesättigt

4.3 EWS Anlage

- Anzahl Sonden 1
- Sondentyp Doppel U-Rohr (PE)
- Länge Sonde 122 m
- Durchmesser Rohr 32 mm
- Mächtigkeit Wand 3 mm
- Wärmeleitfähigkeit Rohr 0.42 W/m/K
- Abstand zwischen den Rohren 80 mm
- Durchmesser Bohrung 139.7 mm
- Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung 0.8 W/m/K
- Wärmekapazität Hinterfüllung 3.0 MJ/m³/K
- Dichte Hinterfüllung 1.2·10³ kg/m³
- Wärmeträgerflüssigkeit Ethylen-Glykol 25%
- Wärmeleitfähigkeit Wärmeträgerflüssigkeit 4.0·10⁶ J/m³/K
- Dichte Wärmeträgerflüssigkeit 1046.08 (à 0 °C)
- Viskosität Wärmeträgerflüssigkeit (4.05 mm²/s) 3·10⁻³ Kg/m/s
- Ausdehnungsfaktor Wärmeträgerflüssigkeit 0.00489
- Betriebsdauer 50 Jahre
- Minimale Temperatur (Mittelwert) -1.5 °C
- Maximale Temperatur 25 °C
- Fluidfliessrate 0.55 l/s

4.4 Grundwasser

- Hydraulischer Gradient 0.1 %
- Grundwassermächtigkeit 12 m
- Hydraulische Leitfähigkeit Aquifer 1.0·10⁻³ m/s

- Hydraulische Leitfähigkeit Aquitard $1.0 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Ungestörte Grundwassertemperatur ca. 8.5 °C (tiefenabhängig)

4.5 Heizung und Warmwasserbedarf für Ladung Erdwärmesonden

Die im Kapitel 3 definierten Energiewerte für Heizung, Warmwasserbedarf und Geocooling sind als transiente Randbedingungen im Modell definiert und in Abbildung 3 dargestellt. Die Simulationen wurden mit Tagesmittelwerten durchgeführt.

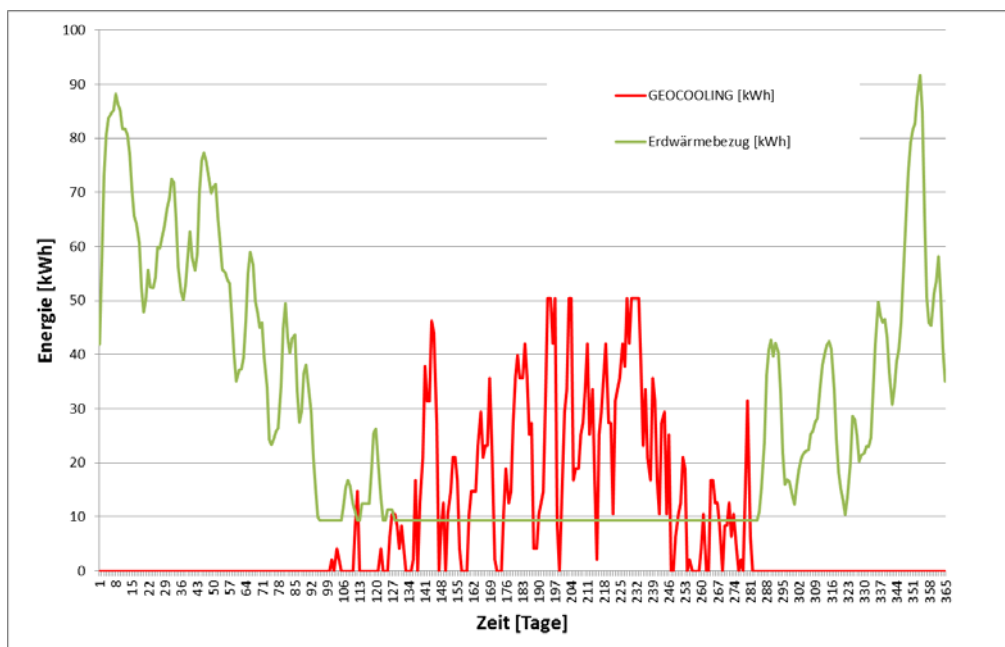


Abbildung 3: Jahresenergieprofil Erdwärmebezug und Geocooling (Tageswerte)

4.6 Simulationen / Varianten

Für die Untersuchungen wurden insgesamt 14 Varianten betrachtet, wo jeweils 1 oder 12 Sonden im Betrieb sind, 1 oder 12 Sonden mit Geocooling regeneriert werden sowie alle Varianten mit und ohne Grundwasserströmung. Die Simulationen sind für einen Zeitraum von jeweils 50 Jahren berechnet. Anfang der Simulation ist immer der 1. September.

Die Varianten sind in Tabelle 1 beschrieben.

Tabelle 1: Beschreibung der ausgeführten Varianten jeweils mit und ohne Berücksichtigung von Geocooling und Grundwasserströmung

Variante	Heizung- und Warmwasserbedarf			Geocooling		GW-Strömung
	1 EWS	12 EWS	12 EWS „schrittweise“	1EWS	12 EWS	
1a	X					
1b	X					X
2a	X			X		
2b	X			X		X
3a		X				
3b		X		X		
3c		X			X	
3d		X				X
3e		X			X	X
4a			X			
4b			X	X		
4c			X		X	
4d			X	X		X
4e			X		X	X

5. Ergebnisse

5.1 Temperaturentwicklung

Für jede Variante ist die Temperaturentwicklung für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren graphisch dargestellt. Abbildung 4 stellt den Schwankungsbereich der mittleren Sondentemperatur für die Referenzsonde dar. Bei Abbildung 5 bis Abbildung 12 sind nur die jährlichen Minima und Maxima dargestellt.

Bei einer knapp dimensionierten Anlage sollte die mittlere Sondentemperatur nach 50 Jahren gemäss [1] nicht weniger als -1.5 °C betragen. Unterhalb dieses Grenzwerts besteht Frostgefahr. Die Zone unterhalb dieses Grenzwerts ist in Abbildung 4 bis Abbildung 12 jeweils rot dargestellt.

Für die berücksichtigte Anlage (Referenzsonde) beträgt die minimale mittlere Sondentemperatur nach 50 Jahren $+1.1\text{ °C}$. Die Anlage ist daher mit einer Sondentiefe von 122 m jedoch mit Reserve dimensioniert.

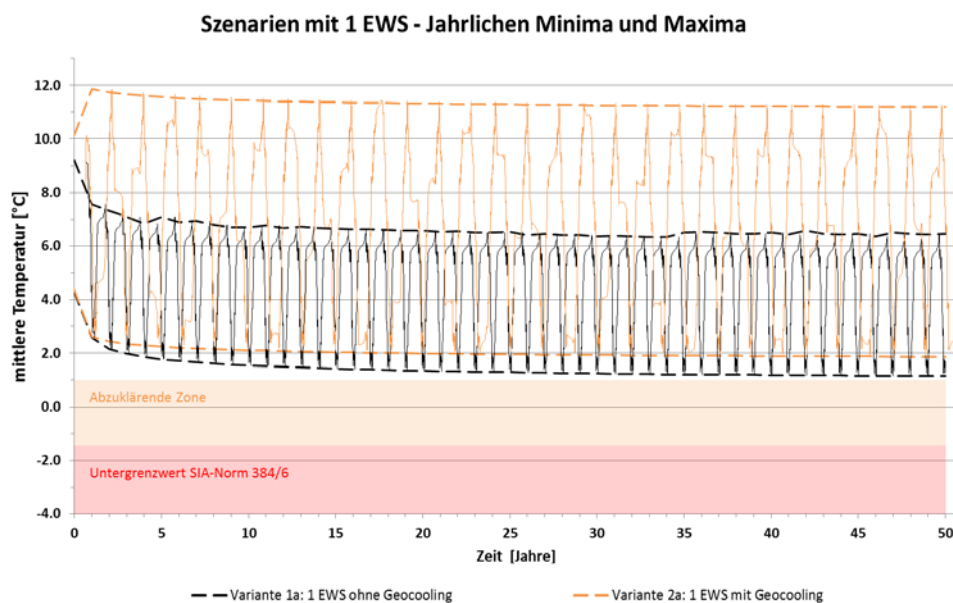


Abbildung 4: Verlauf der mittleren Sonden-Temperatur für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren.

5.2 Variante Betrachtung

Variante 1a - 1 EWS mit Heizungs- und Warmwasserbedarf ohne Geocooling (Referenzfall, siehe Anhang 2)

- Der Temperaturverlauf für eine einzelne Sonde zeigt eine Stabilisation der Temperatur nach 50 Jahren bei einem minimalen Wert von 1.1 °C.
- Während des Sommers steigt die Temperatur bis auf ca. 6.5 °C
- Die saisonale Temperaturschwankung beträgt 5.3 K (Abbildung 4).
- Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperatur im Untergrund einen quasi stationären Zustand erreicht hat.

Variante 2a - 1 EWS mit Heizungs- und Warmwasserbedarf mit Geocooling (Anhang 4)

- Mittels Regeneration einer EWS durch den Energieeintrag durch Geocooling beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren 1.9 °C (0.8 K höher im Vergleich zu Variante 1a, siehe Abbildung 5).
- Die saisonale Temperaturschwankung beträgt 9.3 K und ist grösser als in die Variante 1 (Abbildung 5). Dies wird durch den Netto-Wärmeeintrag während der Sommerzeit bewirkt.
- Wie bei Variante 1a erreichen der Temperatur des Untergrundes nach 50 Jahre einen stationären Zustand.

Variante 1b und 2b - 1 EWS mit Heizungs- und Warmwasserbedarf (mit und ohne Geocooling) und mit Grundwasserströmung (Anhänge 3 und 5)

- Durch die Grundwasserströmung beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde ohne Geocooling (Variante 1b) nach 50 Jahren 2.7 °C (1.6 K höher im Vergleich zu Variante 1a). Mit Geocooling (Variante 2b) beträgt die minimale Temperatur 3.1 °C (1.2 K höher im Vergleich zu Variante 2a).
- Durch Grundwasserströmung beträgt die maximale Temperatur in der Referenzsonde ohne Geocooling (Variante 1b) nach 50 Jahren 7.2 °C (0.7 K höher im Vergleich zu Variante 1a). Mit Geocooling (Variante 2b) beträgt die maximale Temperatur 10.9 °C (0.3 K niedriger im Vergleich zu Variante 2a).
- Die saisonale Temperaturschwankung ohne Geocooling beträgt 4.5 K und ist kleiner als in die Variante 1a. Mit Geocooling beträgt die saisonale Schwankung 7.8 K und ist auch kleiner im Vergleich zur Variante 2a.

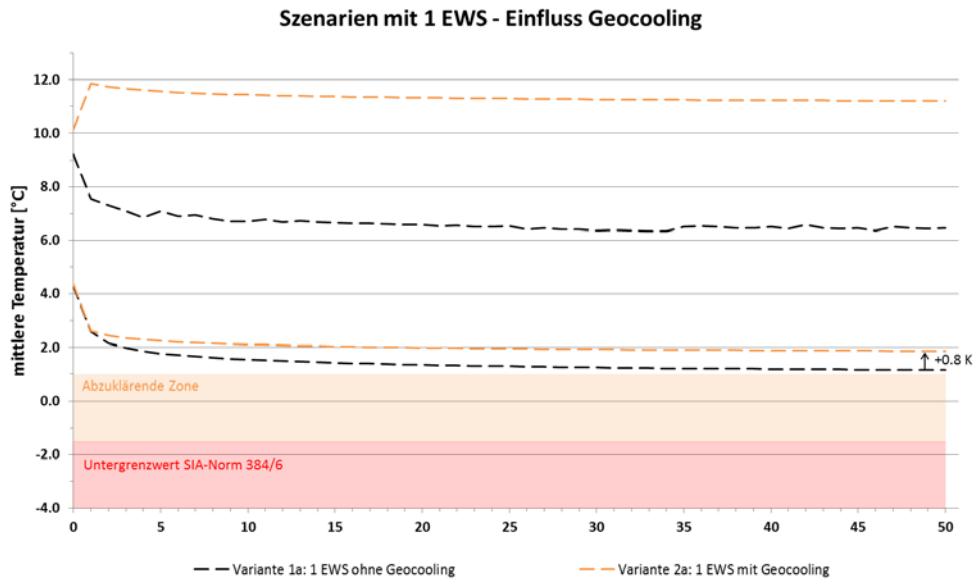


Abbildung 5: Schwankungsbereich der mittleren Sondentemperatur für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren: Szenarien mit 1 EWS mit und ohne Geocooling.

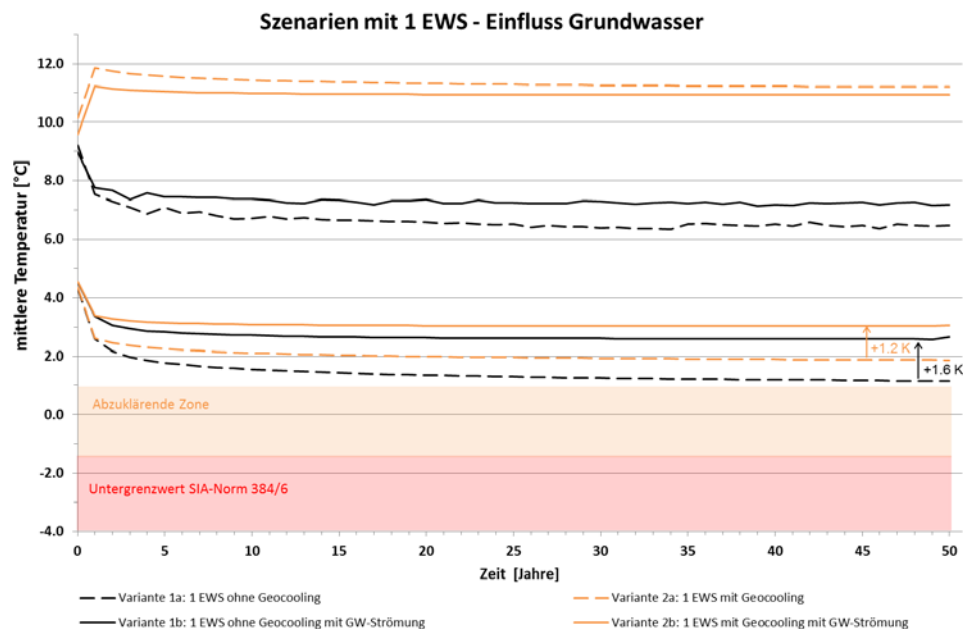


Abbildung 6: Schwankungsbereich der mittleren Sondentemperatur für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren: Szenarien mit 1 EWS mit und ohne Geocooling sowie mit und ohne Grundwasserströmung.

Variante 3a - 12 EWS mit Heizungs- und Warmwasserbedarf ohne Geocooling (Anhang 6)

- Durch den Betrieb der zusätzlichen 11 EWS sinkt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahre von 1.1 °C (Variante 1a) auf -2.1 °C (-3.2 K im Vergleich zu Variante 1a).
- Die Ergebnisse zeigen allerdings, dass nach 50 Jahren noch kein stationärer Zustand erreicht ist. Die jährliche Temperaturänderung beträgt noch ca. 0.033 K (Abbildung 7).
- Damit liegt die minimale Temperatur unter dem unteren Grenzwert der SIA-Norm 384/6 (-1.5 °C). Die Unterschreitung des Grenzwerts erfolgt in diesem Fall nach 35 Betriebsjahren.
- In der Variante 1a beträgt die minimale Temperatur nach 50 Jahren 1.1 °C. Durch den Betrieb der 11 zusätzlichen EWS ist diese Temperatur schon nach 8 Jahren erreicht.

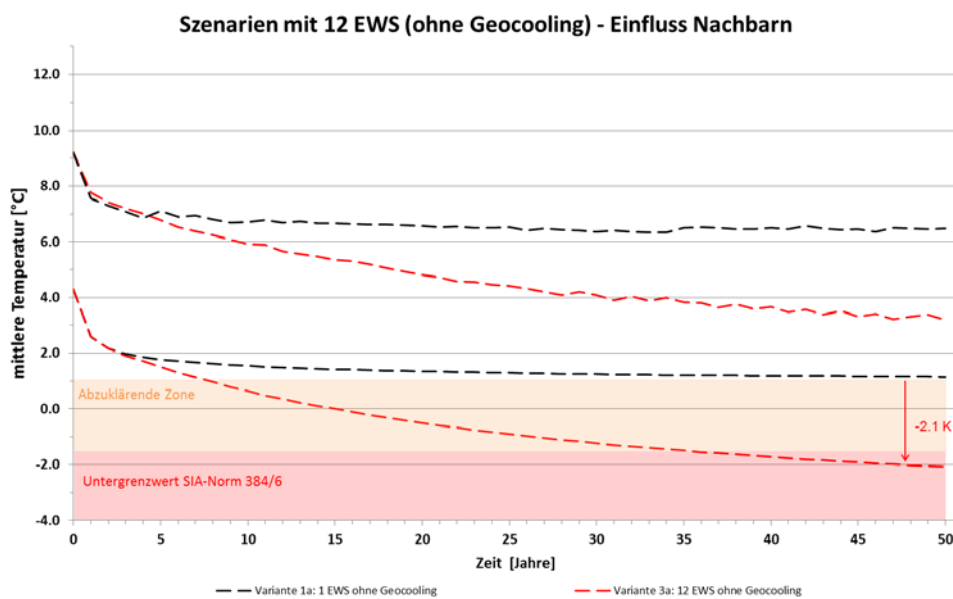


Abbildung 7: Schwankungsbereich der mittleren Sonden-Temperatur für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren: Szenarien mit 12 EWS (ohne Geocooling) und Beurteilung des Einflusses der benachbarten Anlagen.

Variante 3b, 3c - 12 EWS mit Heizungs- und Warmwasserbedarf mit Geocooling
(Anhänge 7 und 8)

- Im Variante 3a werden alle zusätzlichen 11 EWS zum gleichen Zeitpunkt in Betrieb genommen, was zu einer starken Abkühlung des Untergrundes führt. In Variante 3b wird in einer EWS Geocooling betrieben. In Variante 3c werden alle 12 EWS durch Geocooling regeneriert.
- Mittels Regeneration einer EWS (Variante 3b) durch den Energieeintrag durch Geocooling beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren -1.1 °C (1.0 K höher im Vergleich zu Variante 3a, siehe Abbildung 8).
- Mittels Regeneration 12 EWS (Variante 3c) durch den Energieeintrag durch Geocooling beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren -0.2 °C (1.9 K höher im Vergleich zu Variante 3a, siehe Abbildung 8). Allerdings bleibt die minimale Temperatur mit Geocooling immer noch 1.3 K tiefer als die Temperatur ohne die Beeinflussung der Nachbarn (Variante 1a). Daher reicht Geocooling für eine vollständige Regeneration für die hier betrachtete Situation nicht aus.
- Die Ergebnisse zeigen, dass nach 50 Jahren noch kein stationärer Zustand erreicht ist. In Variante 3b beträgt die jährliche Temperaturänderung ca. 0.028 K (Abbildung 8), was einem etwas kleineren Gradienten als in Variante 3a entspricht. Mit 12 regenerierten EWS reduziert sich die Temperaturänderung zu 0.020 K .
- Mit der Regeneration einer EWS oder von allen 12 EWS liegt die minimale Temperatur nach 50 Jahren nicht mehr unter dem unteren Grenzwert der SIA-Norm 384/6 (-1.5 °C).

Variante 3d, 3e - 12 EWS mit Heizungs- und Warmwasserbedarf mit Geocooling und mit Grundwasserströmung (Anhänge 9 und 10)

- Durch die Grundwasserströmung ist der Einfluss von benachbarten EWS weniger markant
- Mit 12 EWS ohne Geocooling und mit Grundwasserströmung (Variante 3d) beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren 0.9 °C (0.2 K weniger im Vergleich zu Variante 1a (ohne Nachbarn) und 3 K höher als Variante 3a (ohne Grundwasser)).
- Mit 12 EWS mit Geocooling und mit Grundwasserströmung (Variante 3e) beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren 1.4 °C (0.5 K höher im Vergleich zu Variante 3d (ohne Grundwasser)).

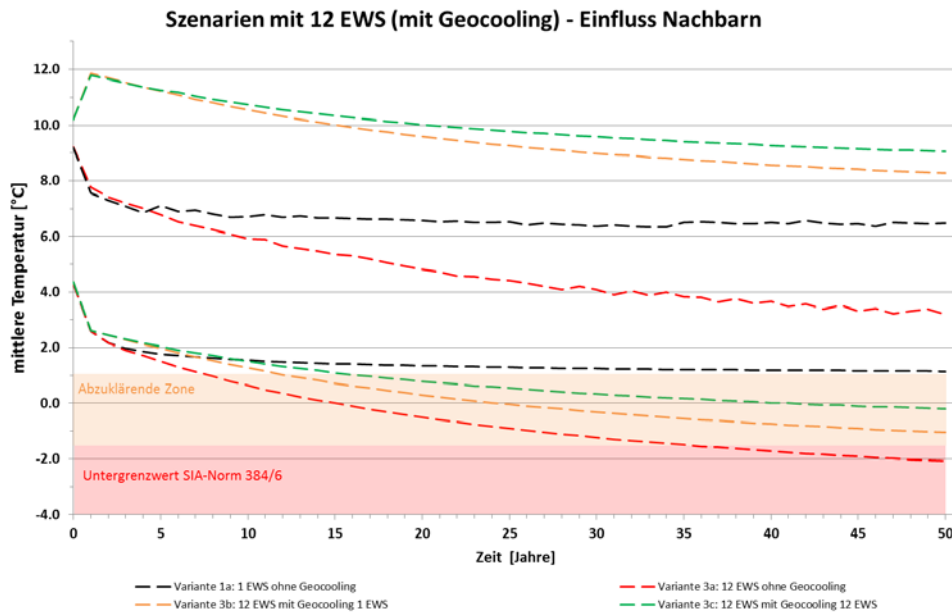


Abbildung 8: Schwankungsbereich der mittleren Sondentemperatur für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren mit und ohne Geocooling.

Variante 4a - 12 EWS bei schrittweisem Ausbau ohne Geocooling (Anhang 11)

- In Variante 3a werden alle zusätzlichen 11 EWS zum gleichen Zeitpunkt in Betrieb genommen, was einer sehr konservativen und ungünstigen Situation entspricht. In der neuen Variante 4a werden die 11 EWS schrittweise ausgebaut. Alle 5 Jahre werden 2 neue EWS in Betrieb genommen. Die Auskühlung wirkt daher langsamer.
- Durch den Betrieb der zusätzlichen 11 EWS sinkt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren von 1.1 °C (Variante 1a) auf -1.4 °C (-2.5 K im Vergleich zu Variante 1a).
- Die Ergebnisse zeigen allerdings, dass nach 50 Jahren noch kein stationärer Zustand erreicht ist. Die jährliche Temperaturänderung beträgt ca. 0.04 K (Abbildung 9).
- Damit liegt die minimale Temperatur nah am unteren Grenzwert der SIA-Norm 384/6 (-1.5 °C).
- In Variante 1a beträgt die minimale Temperatur nach 50 Jahren 1.1 °C. Durch die schrittweise Inbetriebnahme der zusätzlichen 11 EWS ist diese Temperatur nach ca. 15 Jahren erreicht (statt 8 Jahre in Variante 3a).

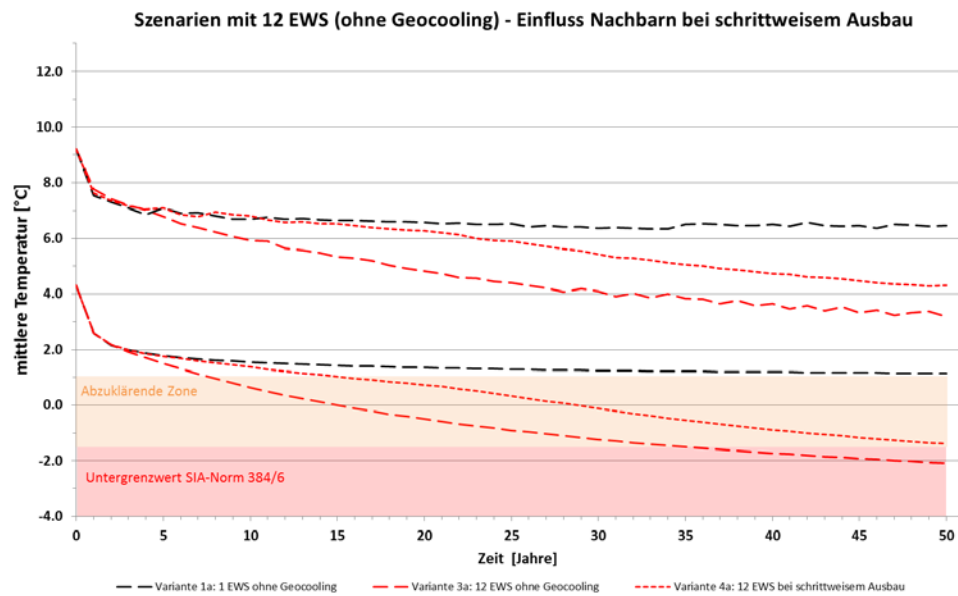


Abbildung 9: Schwankungsbereich der mittleren Sondentemperatur für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren.

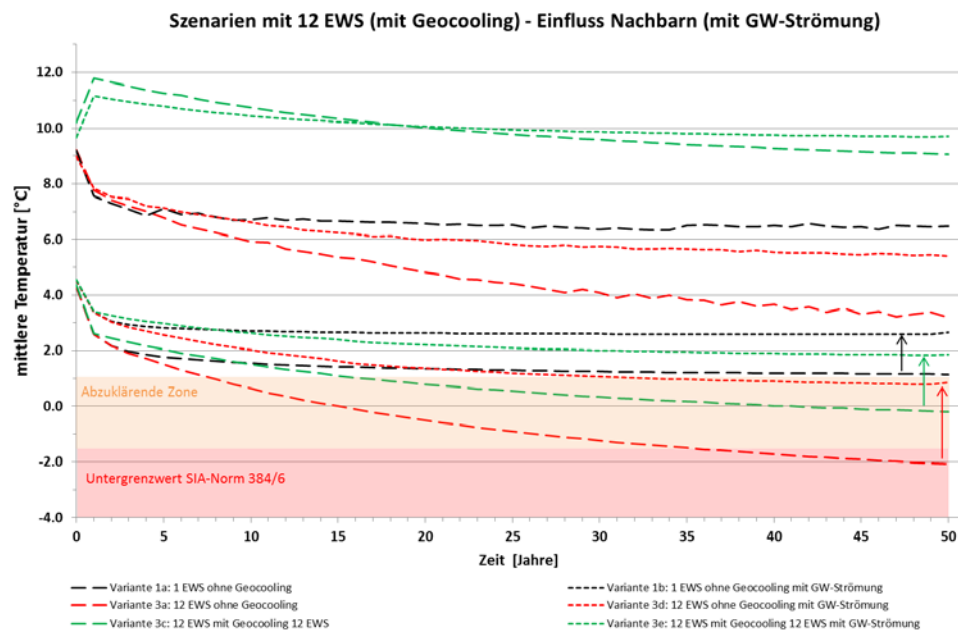


Abbildung 10: Schwankungsbereich der mittleren Sondentemperatur für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren mit und ohne Geocooling sowie mit und ohne Grundwasserströmung.

Variante 4b, 4c - 12 EWS bei schrittweisem Ausbau mit Geocooling (Anhänge 12 und 13)

- In Variante 4b ist der Energieeintrag durch Geocooling in zwei EWS berücksichtigt. In Variante 4c werden alle 12 EWS durch Geocooling regeneriert.
- Mittels Regeneration von zwei EWS (Variante 4b) durch den Energieeintrag durch Geocooling beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren -0.5 °C (0.9 K höher im Vergleich zu Variante 4a, siehe Abbildung 11).
- Durch die Regeneration von allen 12 EWS (Variante 4c) durch den Energieeintrag durch Geocooling beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren 0.1 °C (0.6 K höher im Vergleich zu Variante 4a, siehe Abbildung 11). Jedoch bleibt die minimale Temperatur mit Geocooling 1.0 K tiefer als die Temperatur ohne die Beeinflussung der Nachbarn. Daher reicht bei diesem Szenario Geocooling für eine vollständige Regeneration nicht aus.
- Die Ergebnisse zeigen, dass nach 50 Jahren noch kein stationärer Zustand erreicht ist. Die jährliche Temperaturänderung beträgt ca. 0.04 K (Abbildung 11), damit ist diese etwas höher als bei Variante 3a. Mit 12 regenerierten EWS reduziert sich die Temperaturänderung zu 0.03 K .
- Mit der Regeneration einer 1 EWS oder aller 12 EWS liegt die minimale Temperatur allerdings nicht mehr unter dem unteren Grenzwert der SIA-Norm 384/6 (-1.5 °C).

Variante 4d, 4e - 12 EWS mit Heizungs- und Warmwasserbedarf mit Geocooling und mit Grundwasserströmung bei schrittweisem Ausbau (Anhänge 14 und 15)

- Durch die Grundwasserströmung ist der Einfluss von benachbarten EWS weniger markant.
- Bei der Regeneration von lediglich 2 EWS, schrittweisem Ausbau und mit Grundwasserströmung (Variante 4d) beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren 0.0 °C und ist damit 0.5 K höher als in Variante 4b ohne Grundwasserströmung.
- Durch Geocooling in allen 12 EWS bei ebenfalls schrittweisem Ausbau und mit Grundwasserströmung beträgt die minimale Temperatur in der Referenzsonde nach 50 Jahren 0.6 °C . Damit ist sie wie bei Variante 4d um 0.5 K höher als in Variante 4c ohne Grundwasserströmung und um 0.6 K höher als bei der Regeneration von lediglich 2 EWS in Variante 4d.

- Mit einer jährlichen Temperaturänderung von 0.03 K/Jahr ist die Temperatur in der Referenzsonde bei beiden Varianten 4d und 4e nach 50 Jahren nicht stationär aber über dem SIA-Grenzwert von -1.5 °C.

Tabelle 2: Temperatur Entwicklung in der EWS nach 50 Jahren Betriebszeit. T_{min} und T_{max} [K] beziehen sich auf die jährliche minimale und maximale mittlere Fluid-Temperatur in der EWS. DT [K/Jahr] bezieht sich auf die jährliche Änderung der mittleren Fluid-Temperatur in der EWS.

Variante	Beschreibung	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tmax-Tmin [K]	DT [K/Jahr]
1a	1 EWS ohne Geocooling	6.5	1.1	5.3	0.004
2a	1 EWS mit Geocooling	11.2	1.9	9.3	0.002
1b	1 EWS ohne Geocooling mit GW-Strömung	7.2	2.7	4.5	< 0.001
2b	1 EWS mit Geocooling mit GW-Strömung	10.9	3.1	7.8	< 0.001
3a	12 EWS ohne Geocooling	3.2	-2.1	5.3	0.033
3b	12 EWS mit Geocooling 1 EWS	8.3	-1.1	9.4	0.028
3c	12 EWS mit Geocooling 12 EWS	9.1	-0.2	9.3	0.020
3d	12 EWS ohne Geocooling mit GW-Strömung	5.4	0.9	4.5	0.01
3e	12 EWS mit Geocooling 12 EWS mit GW-Strömung	8.5	1.4	7.1	0.02
4a	12 EWS bei schrittweisem Ausbau	4.3	-1.4	5.7	0.04
4b	12 EWS mit Geocooling 2 EWS bei schrittweisem Ausbau	8.7	-0.5	9.2	0.04
4c	12 EWS mit Geocooling 12 EWS bei schrittweisem Ausbau	9.3	0.1	9.2	0.03
4d	12 EWS mit Geocooling 2 EWS bei schrittweisem Ausbau mit GW-Strömung	8.9	0.0	8.9	0.03
4e	12 EWS mit Geocooling 12 EWS bei schrittweisem Ausbau mit GW-Strömung	9.5	0.6	8.9	0.03

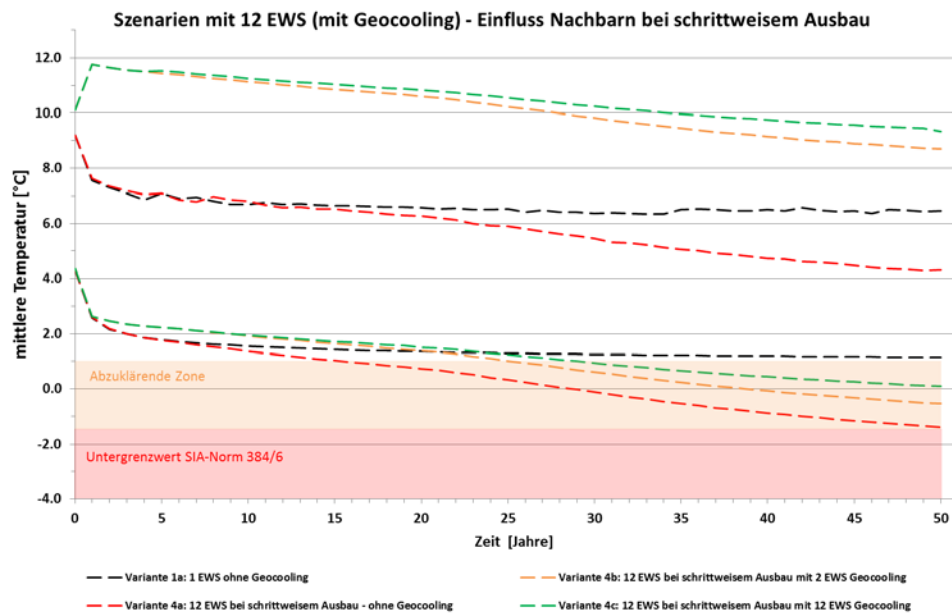


Abbildung 11: Schwankungsbereich der mittleren Sonden-Temperatur für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren mit und ohne Geocooling bei schrittweisem Ausbau.

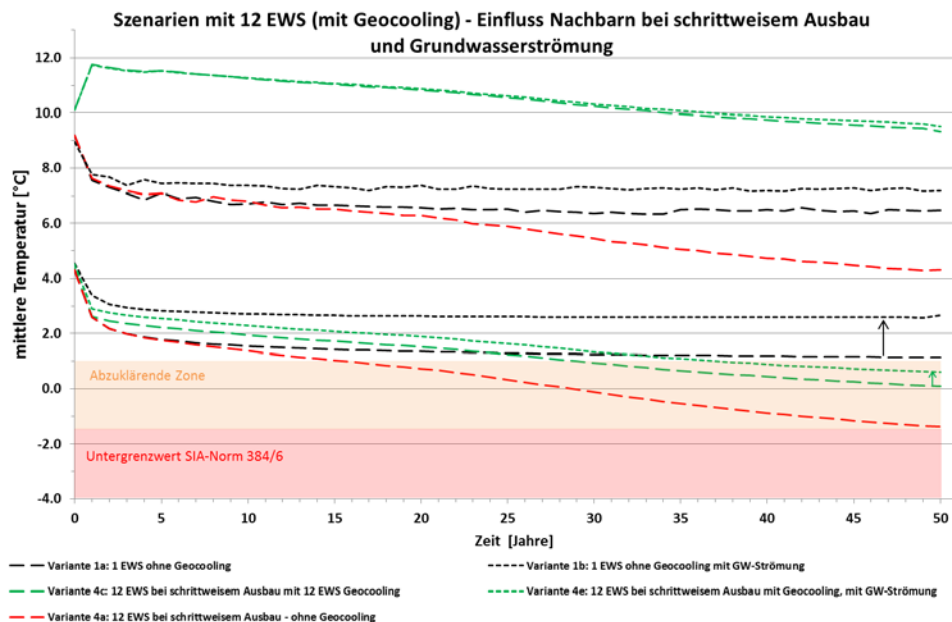


Abbildung 12: Schwankungsbereich der mittleren Sonden-Temperatur für die Referenzsonde während einer Betriebsdauer von 50 Jahren mit und ohne Geocooling sowie mit und ohne Grundwasserströmung bei schrittweisem Ausbau.

5.3 Einfluss des EWS-Feldes auf die Grundwassertemperaturen

Durch das EWS-Feld wird die Temperatur von Untergrund und Grundwasser verändert. Durch Wärmeentzug (Heizen) und Wärmeeintrag (Kühlen) werden diese abgekühlt bzw. erwärmt.

Ohne Grundwasserströmung beträgt die Temperaturänderung in einem Abstand von ca. 25 m vom Feldrand noch 1 K. Die 3 K Isolinie befindet sich innerhalb des EWS-Feldes (Variante 3a, Anhang 6).

Mit Grundwasserströmung befindet sich die Isolinie der 1 K Temperaturdifferenz ca. 25 – 30 m im Abstrom des Feldes und ist damit geringfügig weiter vom Feldrand entfernt als ohne Grundwasserströmung. Temperaturänderungen von 3 K und grösser treten nicht flächig sondern nur sehr lokal in unmittelbarer Nähe der Sonden auf (Variante 3d, Anhang 9).

Eine Überschreitung des in der Grundwasserschutzregelung [3] definierten Grenzwertes von maximal 3 K Temperaturänderung in 100 m Entfernung erfolgt daher in beiden Fällen nicht.

5.4 Einfluss der Grundwasserströmung auf das EWS-Feld

Im Bereich des Grundwasserleiters wird durch die Grundwasserströmung die thermische Beeinflussung des Untergrundes durch das EWS-Feld deutlich abgemildert (vgl. Varianten 3a und 3d, Anhänge 6 und 9). Die flächenhafte Ausdehnung der grösseren Temperaturdifferenzen (>3 K innerhalb des EWS-Feldes) ist ohne Grundwasserströmung bedeutend grösser. Es zeigt sich hier, dass die Grundwasserströmung den Einfluss des EWS-Felds abdämpft, indem relativ zu den Feldtemperaturen warmes oder kaltes Wasser nachströmt und damit dem EWS-Feld Energie zugetragen bzw. entzogen wird.

Die Grundwasserströmung bewirkt auch unterhalb des Grundwasserleiters im Bereich des EWS-Feldes eine höhere Temperatur im Vergleich zum Fall ohne Grundwasserströmung. Abbildung 13 zeigt die Untergrundtemperaturen ohne Grundwasserströmung (a), mit Grundwasserströmung (b) sowie die Differenz aus beiden (c) (mit Grundwasser – ohne Grundwasser), jeweils am Ende der Kühlphase nach 50 Betriebsjahren. Aus Abbildung 13c wird ersichtlich, dass die Temperatur unterhalb des Grundwasserleiters durch die Grundwasserströmung insofern beeinflusst wird, dass die Erdwärmesonden dem Untergrund darunter weniger Energie entziehen bzw. eintragen müssen. Da der Betrieb durch den Heizbetrieb dominiert ist, sind die Temperaturen innerhalb des EWS-Feldes also höher, wenn

eine Grundwasserströmung vorhanden ist. Im Abstrom des EWS-Feldes kühlt sich der Untergrund durch die durch das EWS-Feld abgekühlte Grundwasserströmung etwas ab.

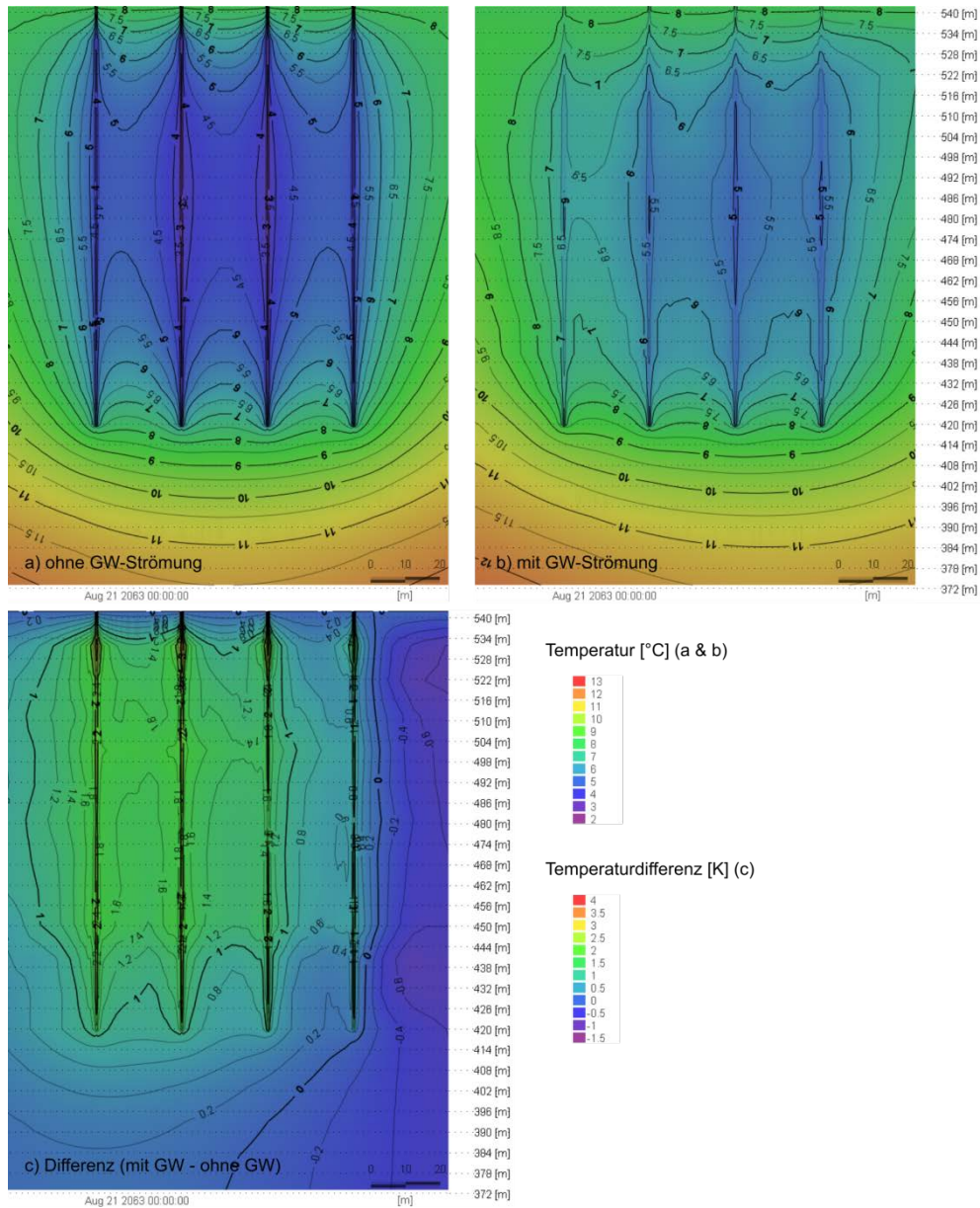


Abbildung 13: Einfluss der Grundwasserströmung auf die Temperaturen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes nach 50 Jahre Betriebszeit am Ende der Kühlphase:

- a) Untergrundtemperaturen ohne Grundwasserströmung.
- b) Untergrundtemperaturen mit Grundwasserströmung.
- c) Differenz aus b) und a) (mit Grundwasserströmung minus ohne Grundwasserströmung).

5.5 Einfluss der Regeneration auf die Grundwassertemperaturen

Ohne Grundwasserströmung wird durch die Regeneration mittels Geocooling ein flächenhafter Anstieg der Temperaturen im Bereich des EWS-Feldes um 1-2 K erzielt (vgl. Variante 3a und 3c, Anhänge 6 und 8). Die Regeneration bei vorhandener Grundwasserströmung bewirkt einen flächenhaften Temperaturanstieg von bis zu ca. 1 K (vgl. Varianten 3d und 3e, Anhänge 9 und 10).

Der Einfluss der Regeneration bei vorhandener Grundwasserströmung ist somit geringer als ohne Grundwasserströmung. Dies ist der Fall, da der Wärmeeintrag durch Geocooling durch den Zustrom von relativ zu den Sondentemperaturen (während des Geocoolings) kühlerem Grundwasser ebenfalls abgedämpft wird.

5.6 Energiebilanzen im Grundwasser

Der Wärmebetrag, der durch den Betrieb einer Erdwärmesondenanlage dem Grundwasserleiter entzogen bzw. eingetragen und abtransportiert wird, wird in den folgenden Abschnitten analysiert und diskutiert.

Dafür wurden für die Szenarien 3d (12 EWS mit Grundwasser, ohne Geocooling) und 3e (12 EWS mit Grundwasser und mit Geocooling) Energiebilanzen erstellt. Für diese Betrachtung wurde die Energiebilanz über alle EWS und die gesamte Sondenlänge summiert. Weiter wurden die Abschnitte der Erdwärmesonden die in der Grundwasserströmung liegen und die Abschnitte unterhalb differenziert betrachtet.

Abbildung 14 bis Abbildung 16 zeigen den Energieentzug der Variante 3d (kein Geocooling) über 50 Jahre bzw. über 15 Jahre sowie über 3 Jahre. Dabei sind der gesamte Wärmeentzug über das ganze Erdwärmesondenfeld summiert (grüne Kurve), der Wärmeentzug im Grundwasserleiter (blaue Kurve) sowie der Wärmeentzug unterhalb des Grundwasserleiters (violette Kurve) dargestellt. Der Anteil der Energie aus dem Grundwasserleiter (in %), in Bezug auf den gesamten Energieentzug, wird mit einer schwarzen gestrichelten Kurve gezeigt.

Für die folgenden Betrachtungen wird von einem konservativen System ausgegangen. Die durch die Erdwärmesonde entzogene Energiemenge (Wärme) entspricht dabei der Energiemenge (Kälte) die durch das Grundwasser abtransportiert wird und umgekehrt.

In Variante 3d ohne Geocooling wird dem Untergrund über das ganze Jahr Wärme entzogen, wobei im Sommer der Wärmeentzug am geringsten ist (nur Warmwasserbereitung).

Aus Abbildung 14 wird ersichtlich, dass der Energieentzug unterhalb des Grundwasserleiters und aus dem Grundwasser mit den Betriebsjahren im Durchschnitt ab- bzw. zunimmt. Aus Folge daraus nimmt der Anteil der Wärme aus dem Grundwasser über die 50 Betriebsjahre zu (von ca. 5-20% auf ca. 30-45%). Der Grund für diese Entwicklung ist, dass der Untergrund unterhalb des Grundwasserleiters sich zunehmend auskühlt und die verfügbare Energiemenge aus dem Grundwasserleiter im Vergleich dazu jedoch durch die natürliche Regeneration weniger schnell abnimmt.

Aus Abbildung 14 und Abbildung 15 wird ersichtlich, dass der Jahresgang des Energieanteils aus dem Bereich des Grundwasserleiters sich mit der Zeit verändert. In den ersten Betriebsjahren ist der Anteil maximal während der Heizphase. In den späteren Betriebsjahren ist der Anteil maximal während des Sommers.

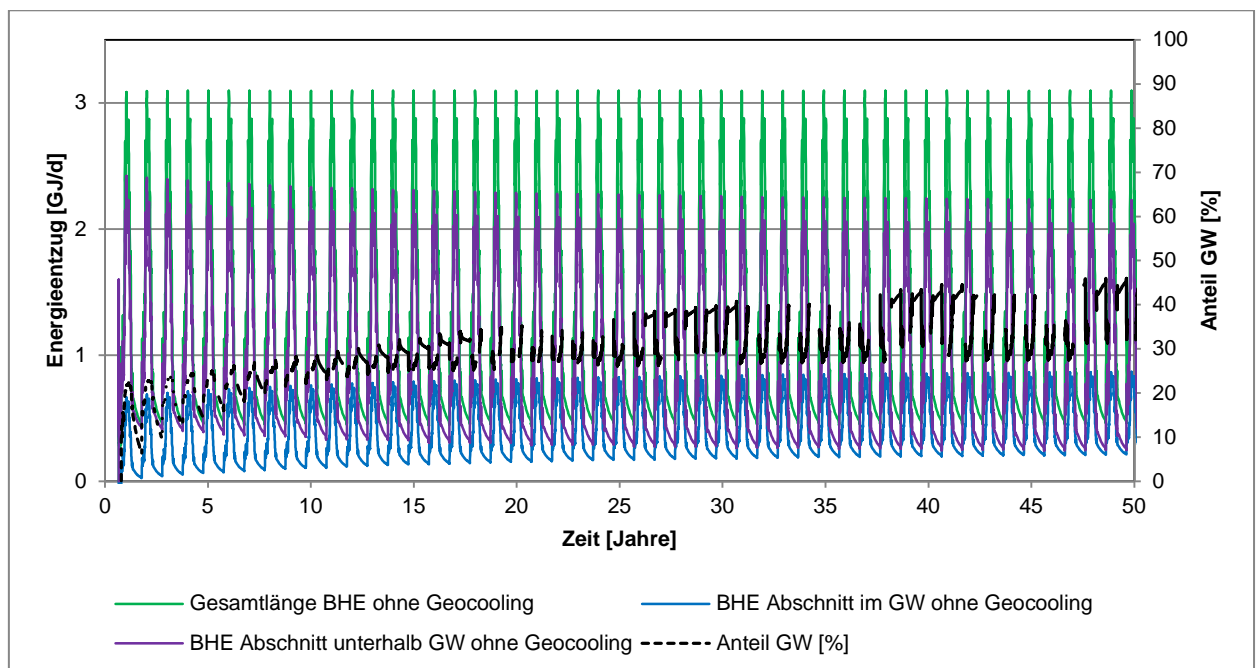


Abbildung 14: Variante 3c (12 EWS mit Grundwasser ohne Geocooling): Energieentzug während 50 Jahren für das gesamte Erdwärmesondenfeld, sowie für aufgeschlüsselt in die Bereiche im und unterhalb des Grundwasserleiters. Weiter ist der prozentuale Anteil des Grundwasserleiters am Gesamtenergieentzug dargestellt.

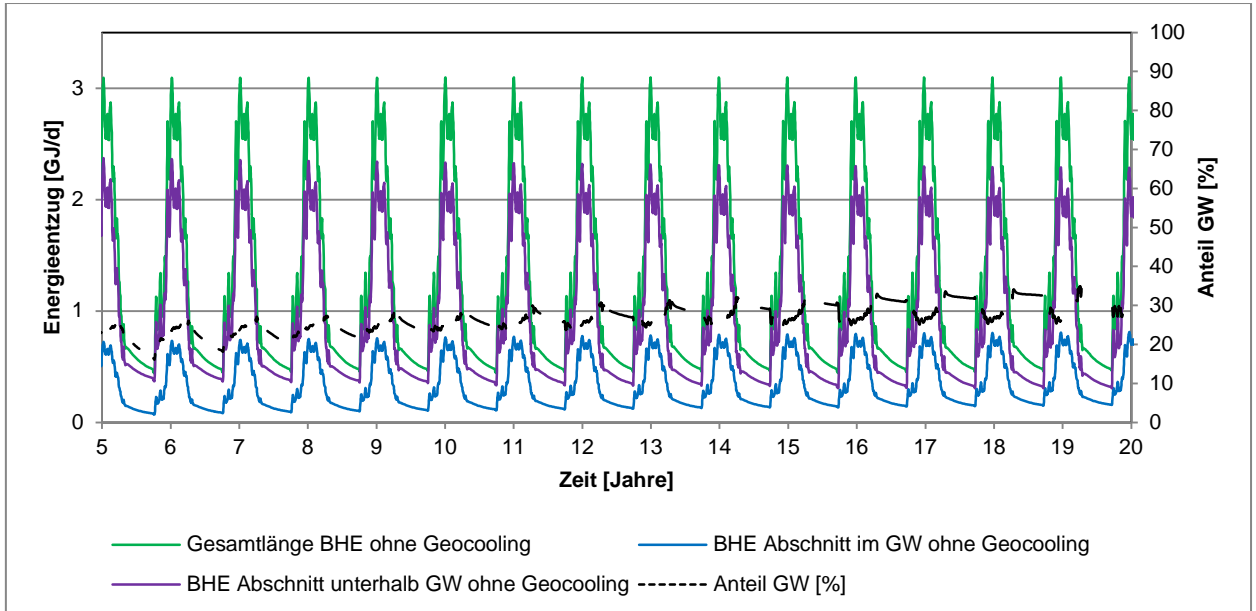


Abbildung 15: Ausschnitt aus Abbildung 14 über 15 Jahre.

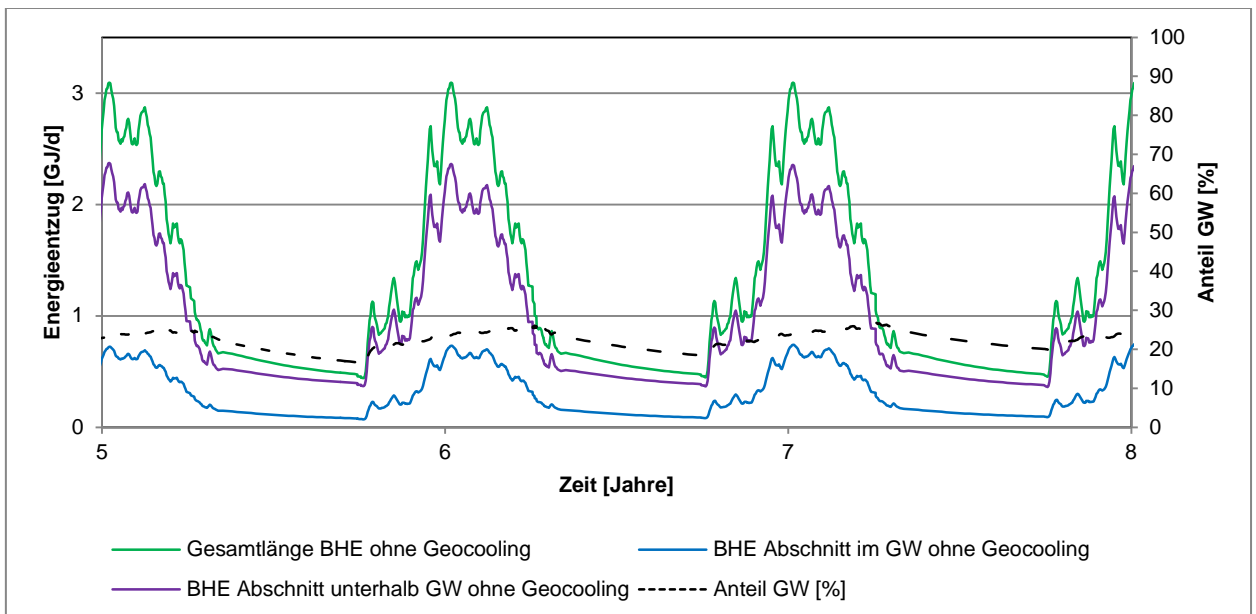


Abbildung 16: Ausschnitt aus Abbildung 14 über 3 Jahre.

Energieentzug sowie -Eintrag für 12 EWS mit Grundwasser und mit Geocooling (Variante 3e) sind in Abbildung 17 bis Abbildung 20 dargestellt.

Im Sommer wird hier dem Untergrund durch Geocooling Wärme zugeführt, wodurch der Wärmeentzug ein negatives Vorzeichen erhält. Der prozentuale Anteil des Wärmeentzugs bzw. Wärmeeintrag aus und im Grundwasserleiter variiert hier im Bereich des Übergangs von Heizen zu Kühlen und von Kühlen zu Heizen sehr stark aufgrund der Vorzeichenwechsel und der sehr kleinen Zahlen um den Nullpunkt herum.

Aus Abbildung 17 bis Abbildung 20 ist ersichtlich, dass die Entwicklung der einzelnen Kurvenverläufe über die Betriebszeit der Anlage tendenziell ähnlich ist wie in Variante 3d. D.h. der Anteil der Wärme aus dem Grundwasserleiter nimmt mit den Jahren zu, der Anteil von Unterhalb nimmt mit den Jahren ab. Allerdings fällt die Änderung des Verhältnisses vergleichsweise geringer aus als bei Variante 3d.

In den ersten Betriebsjahren beträgt der Anteil aus dem Bereich des Grundwasserleiters während der Heizphase (Winter) und der Kühlphase (Sommer) ca. 25% bzw. 35%. In den späteren Betriebsjahren beträgt der Anteil aus dem Bereich des Grundwasserleiters während der Heizphase und der Kühlphase ca. 30% bzw. 20%.

In Abbildung 20 ist bemerkenswert, dass während des Frühjahrs (zwischen Heiz- und Kühlbetrieb) es eine kurze Zeit gibt, während der ein Energieentzug unterhalb des Grundwasserleiters und gleichzeitig ein Energieeintrag ins Grundwasser stattfindet. Durch die Sonde entsteht dadurch ein Energieaustausch zwischen dem Grundwasser und den darunter liegenden Schichten.

Die durchschnittliche Verteilung des Energieentzugs auf Grundwasserleiter und unterliegende Schichten über 50 Betriebsjahre sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3 : Anteile [%] des Energieentzugs aus dem Bereich des Grundwasserleiters (3d: ohne Geocooling, 3e: mit Geocooling).

Bereich	Heizen (3d)	Heizen (3e)	Kühlen (3e)
	Wärmeentzug	Wärmeentzug	Wärmeeintrag
Anteil GW-Leiter [%]	29.2	25.5	25.4
Anteil unterhalb GW-Leiter [%]	70.8	74.5	74.6

Beim betrachteten Fall befindet sich 10% der Sonde im Bereich des Grundwasserleiters, was einem eher hohen Anteil entspricht. In den bestehenden Rechnungen ist die effektive Leistung pro Meter im Bereich des Grundwasserleiters ca. 2-3-mal höher als unterhalb (10% der Strecke entzieht oder einträgt 25-29% der Energie).

Wir schätzen daher, dass in einem allgemeinen Fall mit einem geringmächtigen Grundwasserleiter und Sonden von 100 m bis 300 m Länge, 5-30 % der durch Erdwärmesonden entzogenen Wärme bzw. eingetragene Wärme im Grundwasser abtransportiert wird. Der genaue Anteil muss jedoch von Fall zu Fall ermittelt werden.

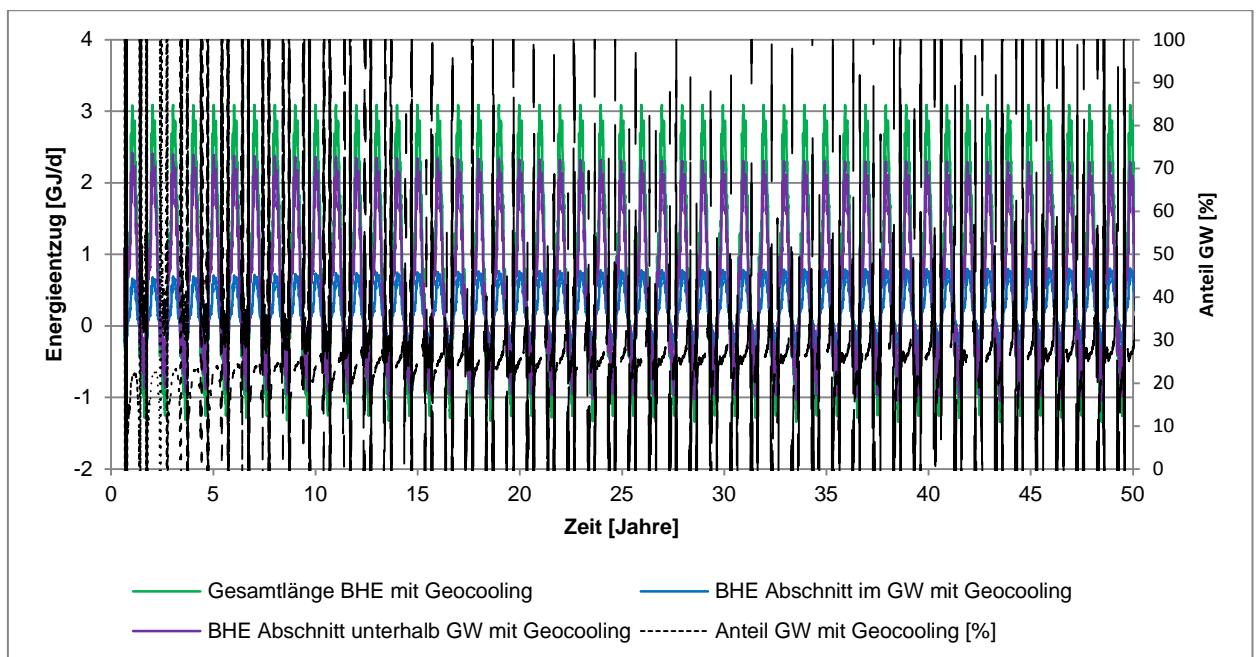


Abbildung 17: Variante 3e (12 EWS mit Grundwasser und Geocooling): Energieentzug während 50 Jahren für das gesamte Erdwärmesondenfeld, sowie für aufgeschlüsselt in die Bereiche im und unterhalb des Grundwasserleiters. Weiter ist der prozentuale Anteil des Grundwasserleiters am Gesamtenergieentzug dargestellt.

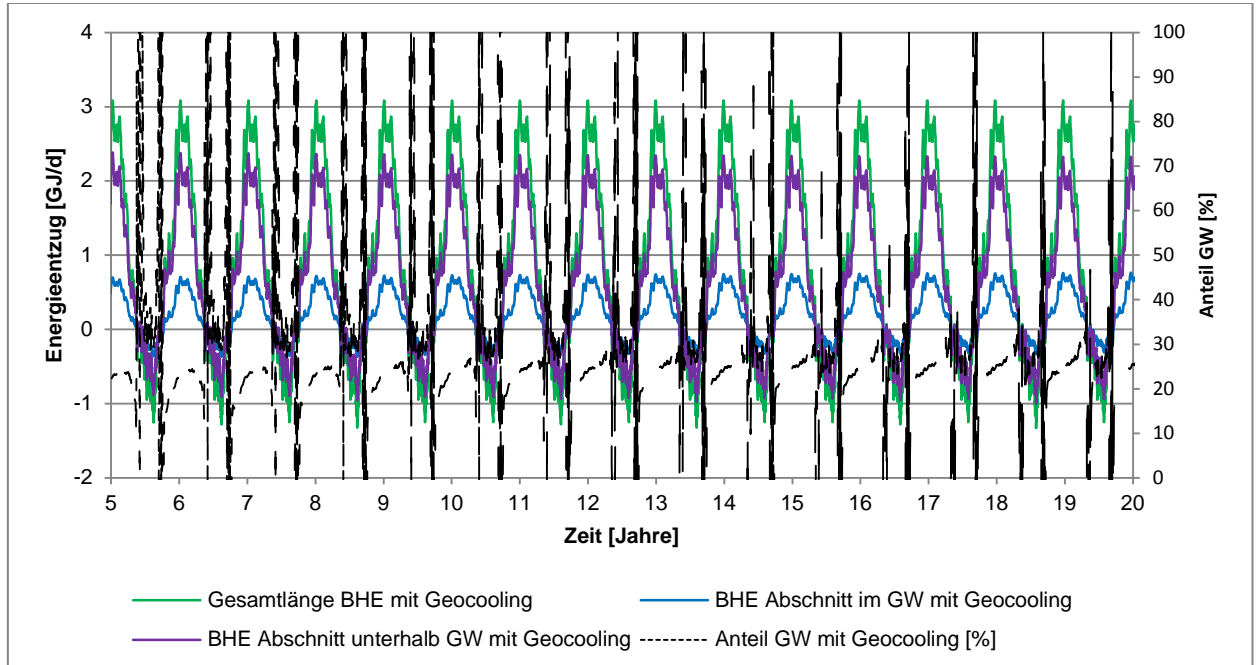


Abbildung 18: Ausschnitt aus Abbildung 17 über 15 Jahre. Beim Übergang von Heizen zu Kühlen ist der Anteil des Energieentzugs aus dem Bereich des Grundwassers aufgrund der Zahlen um den Nullpunkt herum sehr hoch oder sehr niedrig.

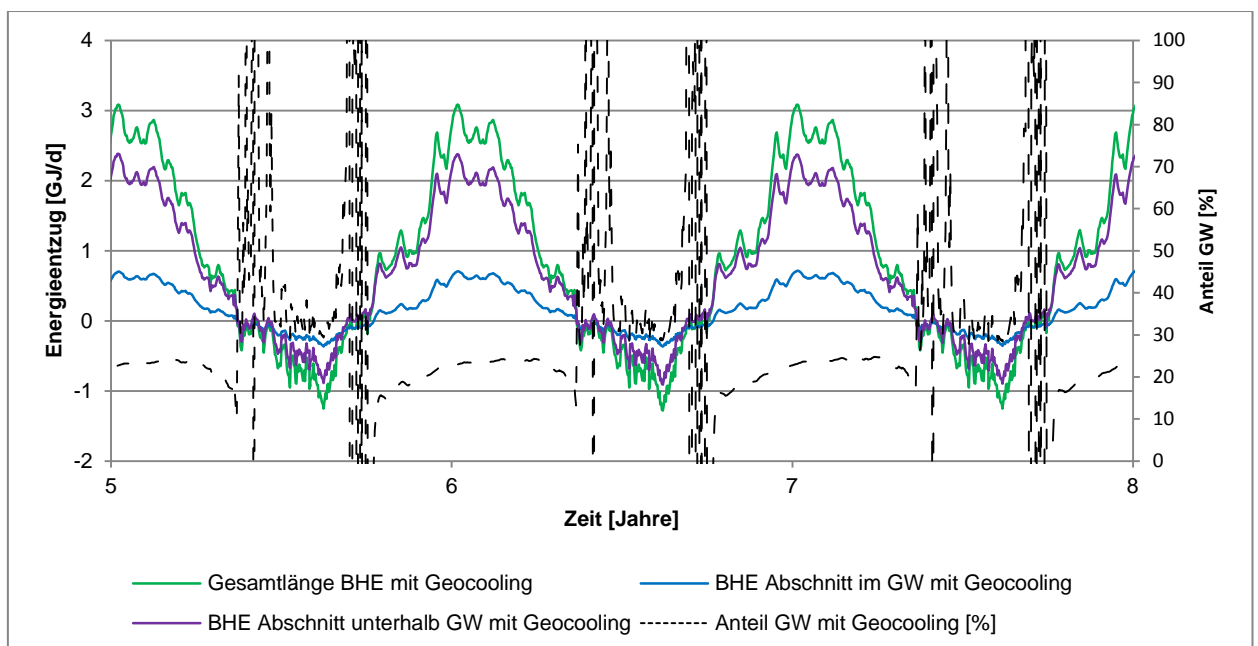


Abbildung 19: Ausschnitt aus Abbildung 17 über 3 Jahre.

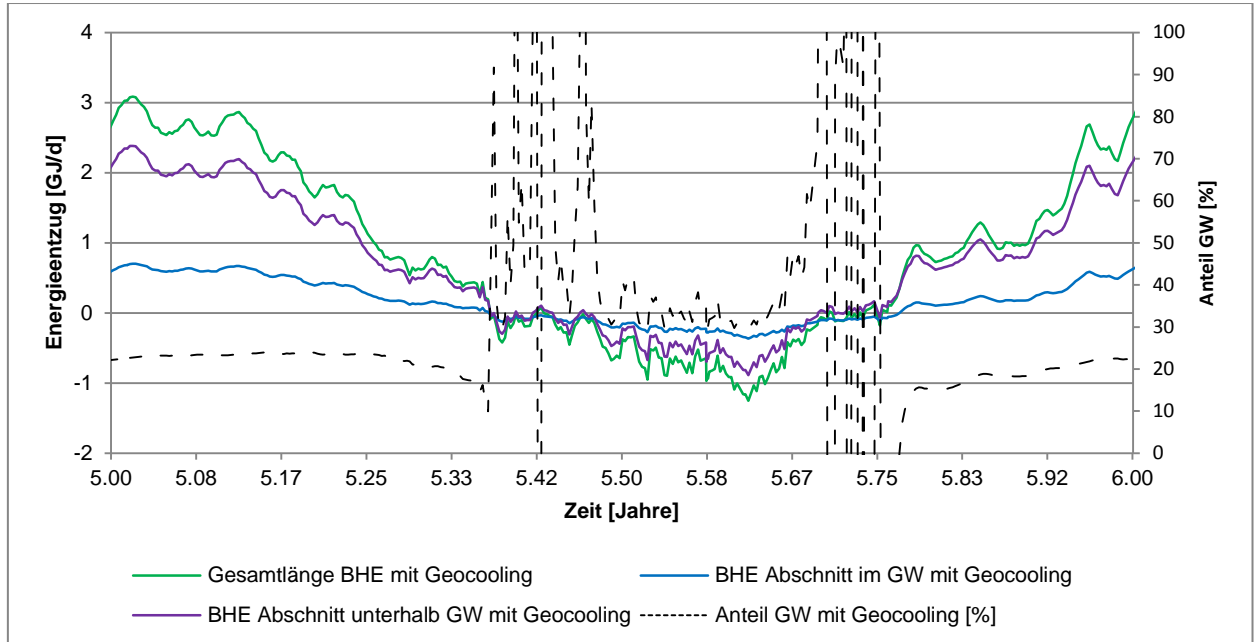


Abbildung 20: Ausschnitt aus Abbildung 17 über 1 Jahr.

5.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Erdwärmesondenbetrieb führt im reinen Heizbetrieb zu einem Wärmeentzug aus dem Untergrund und bewirkt eine Abkühlung des Untergrundgesteins sowie der Grundwassertemperatur.

Der Betrieb einer Einzelsonde bewirkt beim berücksichtigten Nutzungsprofil und Sondereigenschaften eine Abkühlung des Sondenfluids nach 50 Jahren auf eine minimale mittlere Temperatur von 1.1 °C (Abkühlung um 3.2 K).

Durch den parallelen Betrieb von 12 EWS erfolgt eine Abkühlung des Sondenfluids der Referenz-EWS auf eine minimale mittlere Temperatur von -2.1 °C (Abkühlung um 6.4 K). Der parallele Betrieb aller 12 EWS führt daher zu einer zusätzlichen Abkühlung um 3 K im Vergleich zum Einzelbetrieb.

Bei einem schrittweisen Ausbau des EWS-Feldes beträgt die minimale mittlere Sondentemperatur nach 50 Jahren -1.4 °C (Abkühlung um 5.7 K), allerdings befindet sich die Temperatur nach 50 Jahren nicht in einem stationären Zustand (Abkühlung um 0.04 K/Jahr). Der schrittweise Ausbau führt zu einer zusätzlichen Abkühlung um 2.5 K im Vergleich zum Einzelbetrieb. Dieser entspricht einem realistischeren Szenario als der Ausbau in einem Schritt.

Die Reichweite der thermischen Beeinflussung ($\Delta T > 1$ K) des Untergrundes beträgt je nach Betrachtungstiefe rund 10 m bis 20 m für den Betrieb einer Einzelsonde und rund 30 m bis 40 m für den Betrieb aller 12 EWS.

Der Bereich mit $\Delta T > 3$ K hat bei einem Heizbetrieb der 12 EWS eine Reichweite von rund 5 m bis 15 m je nach Betrachtungstiefe und bleibt somit auf den Nahbereich der EWS bzw. des EWS-Feldes beschränkt (Variante 3a, Anhang 6).

Eine Überschreitung des in der Grundwasserschutzregelung [3] definierten Grenzwertes von maximal 3 K Temperaturerhöhung in 100 m Entfernung erfolgt daher in beiden Fällen nicht.

Einfluss der Grundwasserströmung

Beim Betrieb einer Einzelsonde erhöht sich durch Grundwasserströmung die minimale berechnete Temperatur von 1.1 °C auf 2.7 °C (Abkühlung verringert sich von 3.2 K auf 1.6 K). Bei einem Betrieb des EWS-Feldes mit parallelem Betrieb aller 12 EWS erhöht sich die minimale berechnete Temperatur von -2.1 °C auf 0.9 °C, d. h. die Abkühlung verringert sich von 6.4 K auf 3.4 K. Eine Grundwasserströmung hat daher einen positiven Einfluss auf den Betrieb der EWS.

Die Reichweite der thermischen Beeinflussung ($\Delta T > 1$ K) beim Betrieb der Einzelsonde beträgt bei vorhandener Grundwasserströmung rund 10 m – 15 m und ist damit nur leicht erhöht gegenüber dem Fall ohne Grundwasserströmung. Der Bereich mit $\Delta T > 3$ K ist auf das direkte Nahfeld der EWS beschränkt (vgl. Variante 1b, Anhang 6).

Beim Betrieb des EWS-Feldes mit 12 EWS beträgt die Reichweite der thermischen Beeinflussung ($\Delta T > 1$ K) bis zu 60 m und diejenige der Bereich mit $\Delta T > 3$ K rund 15 m (vgl. Variante 3c, Anhang 6).

Durch die Grundwasserströmung wird die thermische Beeinflussung des Untergrundes durch das Erdwärmesondenfeld deutlich abgemildert (vgl. Varianten 3a und 3d, Anhänge 6 und 9). Der Bereich mit höheren Temperaturdifferenzen ($\Delta T > 1$ K) ist ohne Grundwasserströmung bedeutend grösser, allerdings bleibt dieser Bereich in beiden Fällen im Nahfeld der EWS. Es zeigt sich hier, dass die Grundwasserströmung den Einfluss des Erdwärmesondenfeldes abdämpft, indem relativ zu den Feldtemperaturen warmes Wasser nachströmt.

Einfluss der Regeneration (Geocooling)

Eine Regeneration durch Geocooling hat einen positiven Einfluss auf den Betrieb der EWS. Beim Betrieb einer Einzelsonde erhöht sich die minimale berechnete Temperatur von 1.1 °C auf 1.9 °C (die Abkühlung reduziert sich von 3.2 K auf 2.4 K).

Die Reichweite der thermischen Beeinflussung ($\Delta T > 1$ K) bei dem Betrieb der Einzelsonde mit Geocooling beträgt rund 5 m – 10 m. Ein Bereich mit $\Delta T > 3$ K ist nur im direkten Nahfeld der EWS vorhanden.

Bei einem Betrieb des EWS-Feldes mit parallelem Betrieb aller 12 EWS erhöht sich durch Geocooling in allen 12 Sonden die minimale berechnete Temperatur von -2.1 °C auf 0.2 °C, d. h. die Abkühlung verringert sich von 6.4 K auf 4.1 K.

Beim Betrieb des EWS-Feldes mit 12 EWS und Geocooling in allen EWS beträgt die Reichweite der thermischen Beeinflussung ($\Delta T > 1$ K) bis zu 40 m. Der Bereich mit $\Delta T > 3$ K hat einen Radius von weniger als 5 m und befindet sich damit im direkten Nahfeld der EWS.

Bei einem schrittweisen Ausbau des EWS-Feldes und Geocooling in allen 12 EWS beträgt die minimale mittlere Temperatur in der Referenzsonde 0.1 °C (Abkühlung um 4.2 K). Mit einer Abkühlung von 0.03 K/Jahr befindet sich das System noch nicht in einem stationären Zustand. Die Regeneration bei schrittweisem Ausbau ist daher geringer als beim Ausbau in einem Schritt. Der schrittweise Ausbau ist realistischer als ein Ausbau in einem Schritt, daher zeichnet diese Annahme ein realistischeres Bild des Regenerationspotenzials durch Geocooling.

Ohne Grundwasserströmung wird durch die Regeneration mittels Geocooling ein flächenhafter Anstieg der Temperaturen im Bereich des EWS-Feldes um 1-2 K erzielt (vgl. Variante 3a und 3c, Anhänge 6 und 8). Die Regeneration bei vorhandener Grundwasserströmung bewirkt einen flächenhaften Temperaturanstieg von bis zu ca. 1 K im Bereich des Grundwasserleiters (vgl. Varianten 3d und 3e, Anhänge 9 und 10). Der Einfluss der Regeneration auf die Temperaturen des Untergrunds ist bei vorhandener Grundwasserströmung somit geringer als ohne Grundwasserströmung. Dies ist der Fall, weil der Wärmeeintrag durch Geocooling durch den Zustrom von relativ zu den Sondentemperaturen kühlerem Grundwasser ebenfalls abgedämpft wird.

Die durchschnittliche Verteilung des Energieentzugs auf Grundwasserleiter und unterliegende Schichten über 50 Betriebsjahre beträgt im vorliegenden Fall zwischen 25% (Heizbetrieb) und 29% (Kühlbetrieb) der gesamten Energiemenge.

Durch Geocooling wird Energie ins Grundwasser eingetragen und dadurch die Grundwassertemperatur erhöht. Mit Grundwasserströmung befindet sich die Isolierung der 1 K Temperaturdifferenz ca. 25 – 30 m im Abstrom des Feldes. Temperaturänderungen von 3 K und grösser treten nicht flächig, sondern nur sehr lokal in unmittelbarer Nähe der Sonden auf.

Eine Überschreitung des in der Grundwasserschutzregelung [3] definierten Grenzwertes von maximal 3 K Temperaturänderung in 100 m Entfernung erfolgt in keinem der betrachteten Fälle.

6. Schlussfolgerungen

Die GEOTEST AG wurde beauftragt, anhand numerischer Simulationen das Regenerationspotenzial von einem gezielten Wärmeeintrag durch Geocooling in den Untergrund zu untersuchen und dessen Einfluss auf die Grundwassertemperatur zu beurteilen.

Den Modellbetrachtungen wurden ein bezüglich Platz- und Energiebedarf idealisierter Fall eines Einfamilienhauses sowie einer regelmässigen Anordnung mehrerer Einfamilienhäuser in einem geologischen Umfeld mit Sedimentgesteinen zu Grunde gelegt (repräsentativ für eine typisch schweizerische Lage).

Der Bericht dokumentiert die Ergebnisse der numerischen Modellbetrachtungen hinsichtlich:

- der Beeinflussung des Untergrundes durch eine bzw. mehrere Erdwärmesonden
- der gegenseitigen Beeinflussung der EWS von benachbarten EWS-Anlagen
- der gegenseitigen Beeinflussung der EWS von benachbarten EWS-Anlagen bei schrittweisem Ausbau
- des Einflusses einer Grundwasserströmung auf die Temperatur des Untergrundes und des Sondenfluids
- des Regenerationspotentials durch Geocooling
- der Temperaturänderung im Grundwasser
- Anteile des Energieentzugs bzw. -Eintrags [%] aus dem Bereich des Grundwasserleiters

Die Simulationen zeigen, dass die Erstellung der zusätzlichen EWS in der Nachbarschaft einen Einfluss auf die mittlere Temperatur der bestehenden Referenz-EWS hat. In diesen Zusammenhang sinkt die minimale mittlere Sondentemperatur in der Referenz-EWS um ca. 3.0 K nach 50 Jahren Betriebszeit. Damit liegt die minimale Temperatur unter dem unteren Grenzwert der SIA-Norm 384/6 (-1.5 °C), selbst wenn die Erdwärmesonde ursprünglich mit Reserve dimensioniert war. Die Unterschreitung des Grenzwerts erfolgt nach mehreren Jahrzehnten (z.B. 35 Betriebsjahren wie in Variante 3a, 12 EWS ohne Geocooling).

Beim schrittweisen Ausbau ändert sich der Betrag dieser Abkühlung nicht, aber verzögert die Beeinträchtigung in der Zeit. Die Unterschreitung des Grenzwerts erfolgt im berücksichtigten Fall erst nach mehr als 50 Betriebsjahren.

Bei einer knapp dimensionierten Anlage würde der SIA-Norm-Grenzwert mit Beeinträchtigung durch Nachbarsonden bereits nach einigen Betriebsjahren unterschritten (z.B. 8 bis 15 Jahren wie in Varianten 3a und 4a), wobei ohne Nachbarsonden dieser Grenzwert erst nach 50 Jahren erreicht würde.

Durch die Regeneration mittels Geocooling wird die **maximale** mittlere Temperatur der Referenz-EWS deutlich erhöht und erreicht für das EWS-Feld mit 12 EWS Temperaturen, die denen der EWS im Einzelbetrieb entsprechen. Die **minimalen** mittleren Temperaturen der EWS steigen hingegen nur geringfügig. Die Regeneration mittels Geocooling reicht nicht aus, um den Abkühlungseffekt durch die Nachbarn zu kompensieren. Allerdings kann durch Geocooling der Zeitpunkt, zu dem der SIA-Grenzwert von -1.5 °C unterschritten wird, herausgezögert werden.

Bei einer knapp dimensionierten Anlage (z.B. bei einer Dimensionierung gemäss SIA-Norm mit einer mittleren minimalen Wärmeträgertemperatur von -1.5 °C nach 50 Jahren) mit Hinweisen auf einen niedrigeren Temperaturverlauf als angenommen (z.B. durch den Bau von zusätzlichen EWS in der Nachbarschaft), wäre eine Regeneration mittels Geocooling allerdings eine mögliche Lösung, um die durch die Nachbarn reduzierte Lebensdauer der Anlage wieder zu verlängern. Diese Studie zeigt allerdings, dass eine Verlängerung bis zur ursprünglich geplanten Lebensdauer von 50 Jahren durch Geocooling im vorliegenden Fall nicht möglich ist.

Der Einfluss der Grundwasserströmung wurde untersucht. Alleine die Grundwasserströmung ohne Geocooling bewirkt im vorliegenden Fall einen Anstieg der minimalen Sondentemperatur um 3 K im Vergleich zu einem Fall ohne Grundwasserströmung. Ist eine Grundwasserströmung vorhanden und wird zusätzlich Geocooling betrieben, so fallen die minimalen Sondentemperaturen sogar um 0.3 K höher aus als in der Dimensionierung geplant. Da die Grundwasserströmung für

die Dimensionierung eines Erdwärmesondenfeldes in der Regel nicht vollständig berücksichtigt wird, bringt eine Grundwasserströmung eine zusätzliche Reserve, die eine längere Betriebsdauer der Anlage unterstützt.

Die Grundwasserströmung dämpft den Einfluss des Erdwärmesondenfeldes auf die Untergrundtemperatur ab und verlagert den Einfluss in Strömungsrichtung. Eine Überschreitung des in der Grundwasserschutzregelung [3] definierten Grenzwertes von maximal 3 K Temperaturerhöhung in 100 m Entfernung erfolgt bei den gegebenen Bedingungen nicht.

Beim betrachteten Fall befindet sich 10% der Sonde im Bereich des Grundwasserleiters, was einem eher hohen Anteil entspricht. In den bestehenden Rechnungen ist die effektive Leistung pro Meter im Bereich des Grundwasserleiters ca. 2-3-mal höher als unterhalb (10% der Strecke tauscht 25-29% der Energie aus).

In einem allgemeinen Fall mit einem geringmächtigen Grundwasserleiter und Sonden von 100 m bis 300 m Länge, werden 5-30 % der durch Erdwärmesonden entzogenen bzw. eingetragenen Wärme im Grundwasser abtransportiert. Der genaue Anteil muss von Fall zu Fall ermittelt werden.

Stellt sich nach Fertigstellung einer Anlage heraus, dass eine Unterdimensionierung der EWS bzw. des EWS-Feldes vorliegt, könnte Geocooling eine Möglichkeit darstellen, um den Betrieb der Anlage zu verlängern. Um wieviel die Lebensdauer einer Anlage verlängert werden kann, ist von den jeweiligen Gegebenheiten abhängig und kann einige Jahrzehnte betragen.

Die Modellergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Geocooling einen grundsätzlich positiven Einfluss auf den EWS-Betrieb sowie auf die thermischen Auswirkungen auf Untergrund- und Grundwasser hat und daher empfehlenswert ist.

Da Geocooling einen zusätzlichen Wohnkomfort durch Kühlung im Sommer bietet, ist nicht zu empfehlen, auf diese Möglichkeit grundsätzlich zu verzichten. Wird Geocooling bereits von Anfang an eingeplant, besteht keine Möglichkeit, die Anlage ggf. durch Geocooling zu sanieren. Wir empfehlen daher, die Anlage mit einer zusätzlichen Reserve zu dimensionieren. Damit werden allfällige Beeinträchtigungen durch künftige Anlagen bereits in der Planungsphase berücksichtigt.

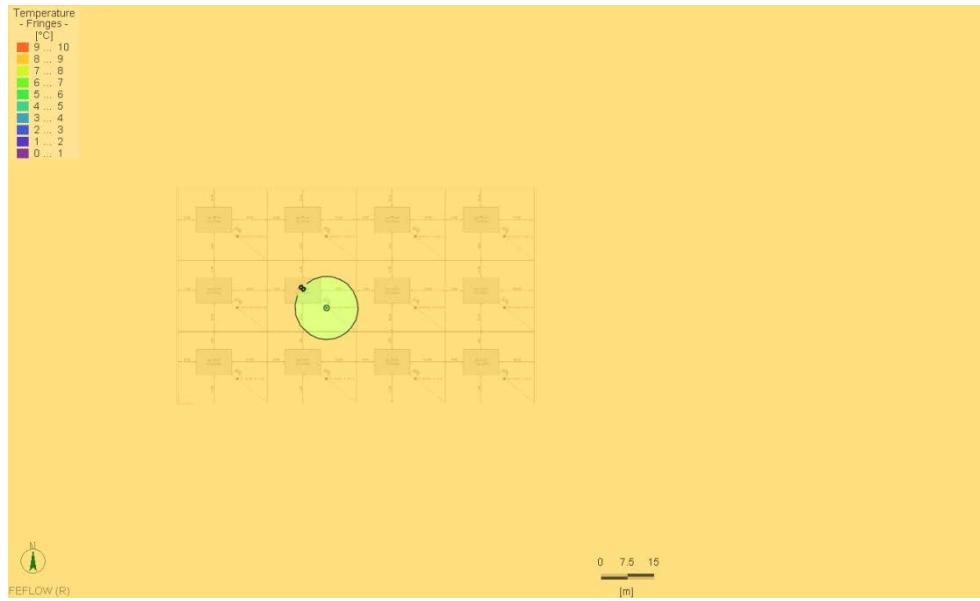
Alle Ergebnisse und Schlussfolgerungen beziehen sich hinsichtlich der berücksichtigten Energie- und Untergrundparameter ausschliesslich auf dieses konstruierte Beispiel und sind nicht allgemeingültig bzw. nicht ohne weiteres übertragbar.

Anhänge

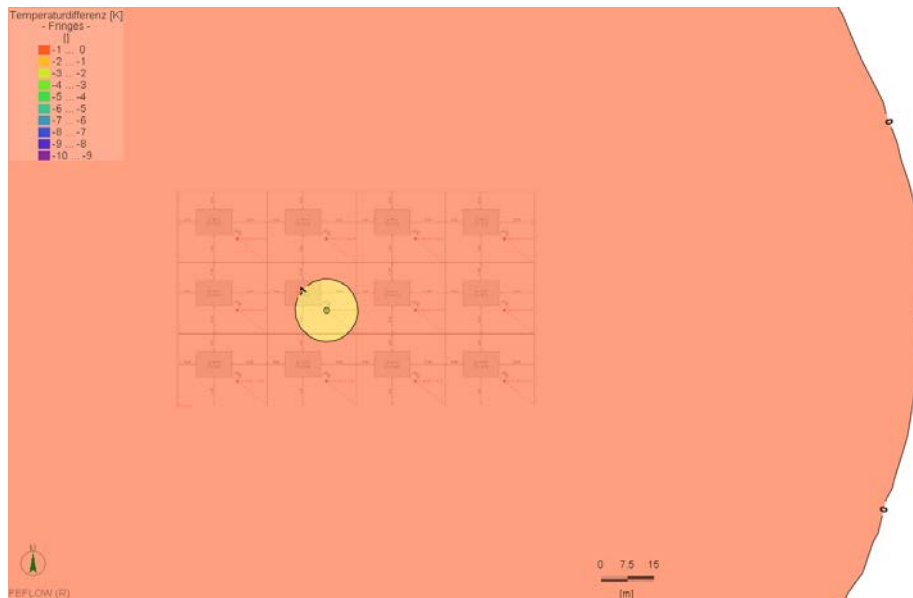
Anhang 1: Situationsplan	36
Anhang 2: Variante 1a – 1 EWS mit Heizungsbedarf	37
Anhang 3: Variante 1b – 1 EWS mit Heizungsbedarf mit Grundwasserströmung..	39
Anhang 4: Variante 2a – 1 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 1 EWS.....	41
Anhang 5: Variante 2b – 1 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 1 EWS mit Grundwasserströmung	43
Anhang 6: Variante 3a – 12 EWS mit Heizungsbedarf	45
Anhang 7: Variante 3b – 12 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 1 EWS.....	47
Anhang 8: Variante 3c – 12 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 12 EWS.....	49
Anhang 9: Variante 3d – 12 EWS mit Heizungsbedarf mit Grundwasserströmung	51
Anhang 10: Variante 3e – 12 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 12 EWS mit Grundwasserströmung	53
Anhang 11: Variante 4a – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau	55
Anhang 12: Variante 4b – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau, Geocooling in 1 EWS	57
Anhang 13: Variante 4c – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau, Geocooling in 12 EWS	59
Anhang 14: Variante 4d – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau, Geocooling in 1 EWS mit Grundwasserströmung.....	61
Anhang 15: Variante 4e – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau, Geocooling in 1 EWS mit Grundwasserströmung.....	63
Anhang 16: Diagramme alle Varianten	65

Anhang 2: Variante 1a – 1 EWS mit Heizungsbedarf

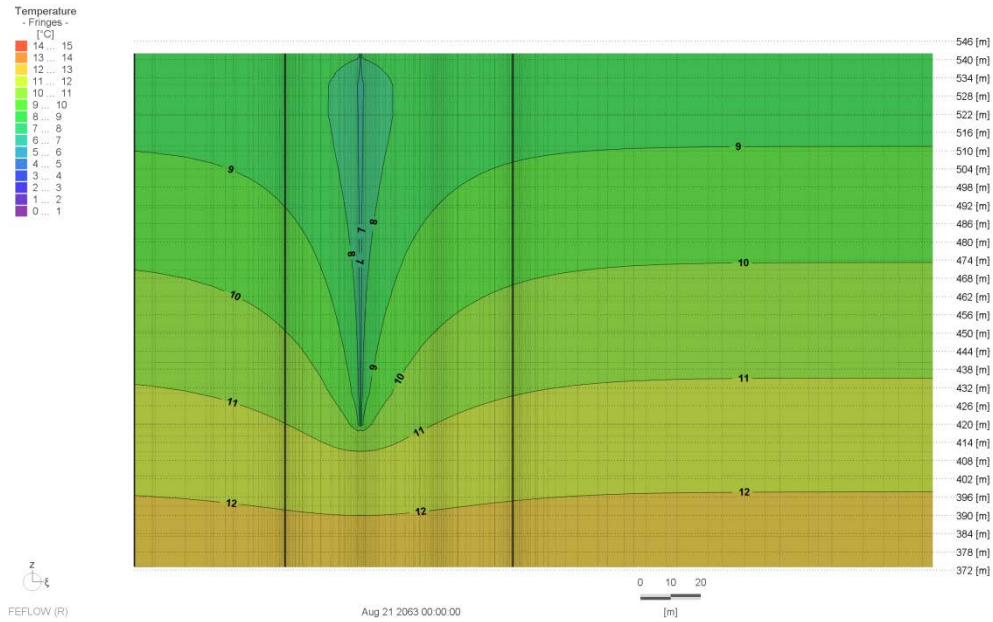
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 1a)



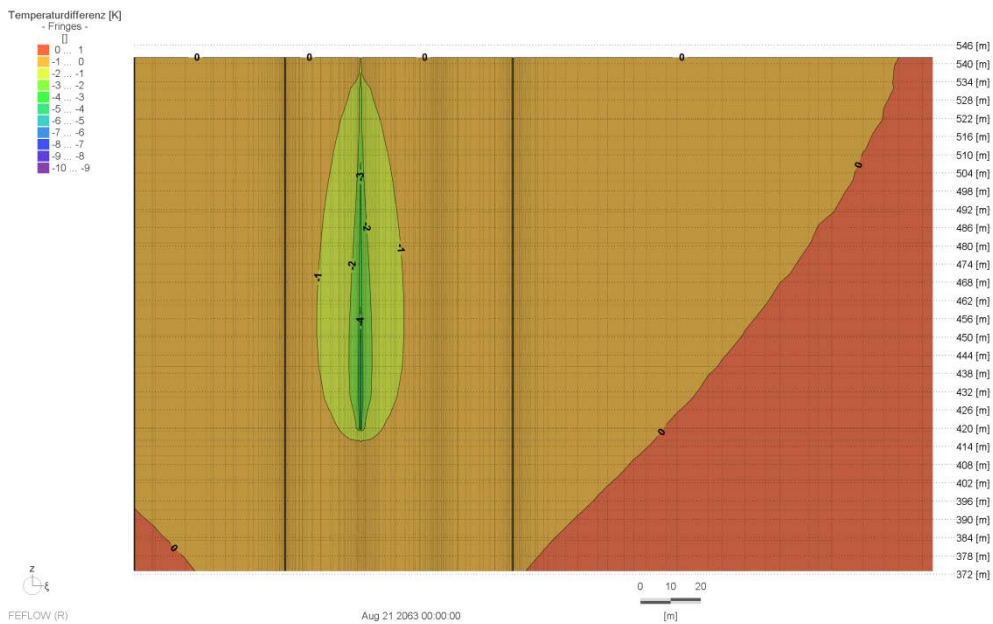
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 1a)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 1a)

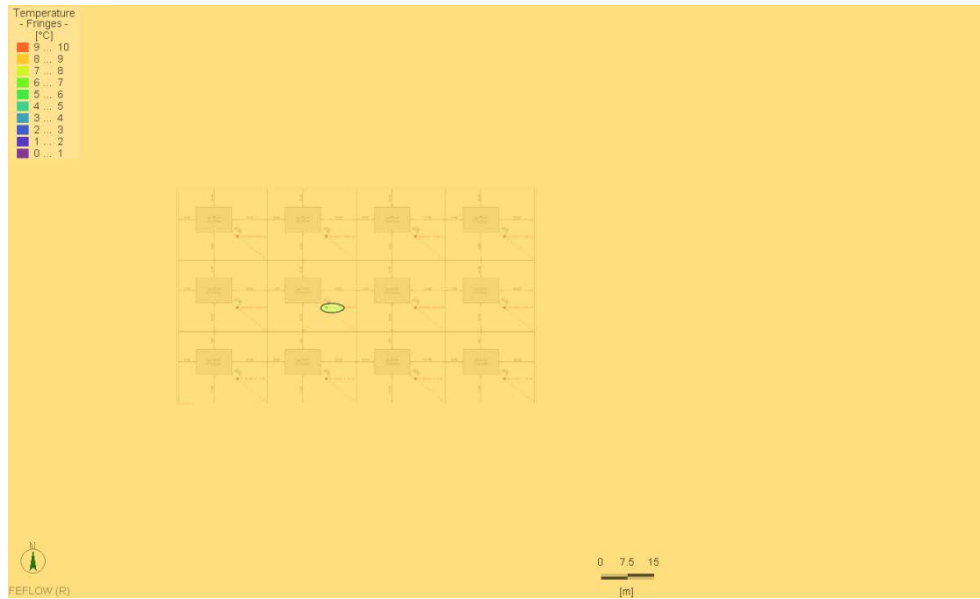


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 1a)

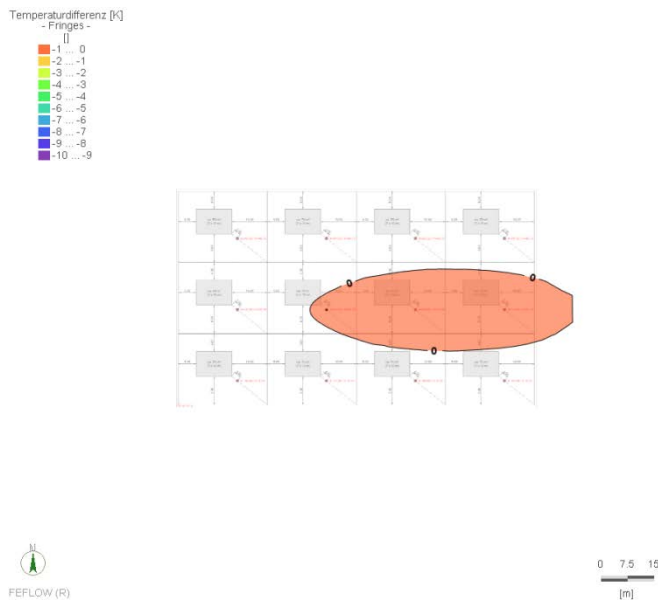


Anhang 3: Variante 1b – 1 EWS mit Heizungsbedarf mit Grundwasserströmung

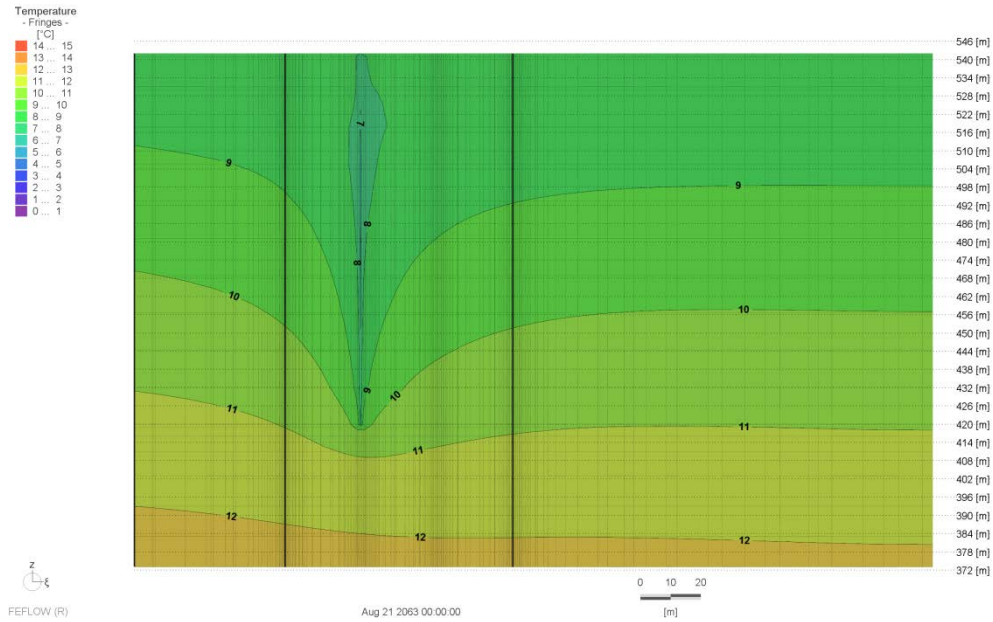
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 1b)



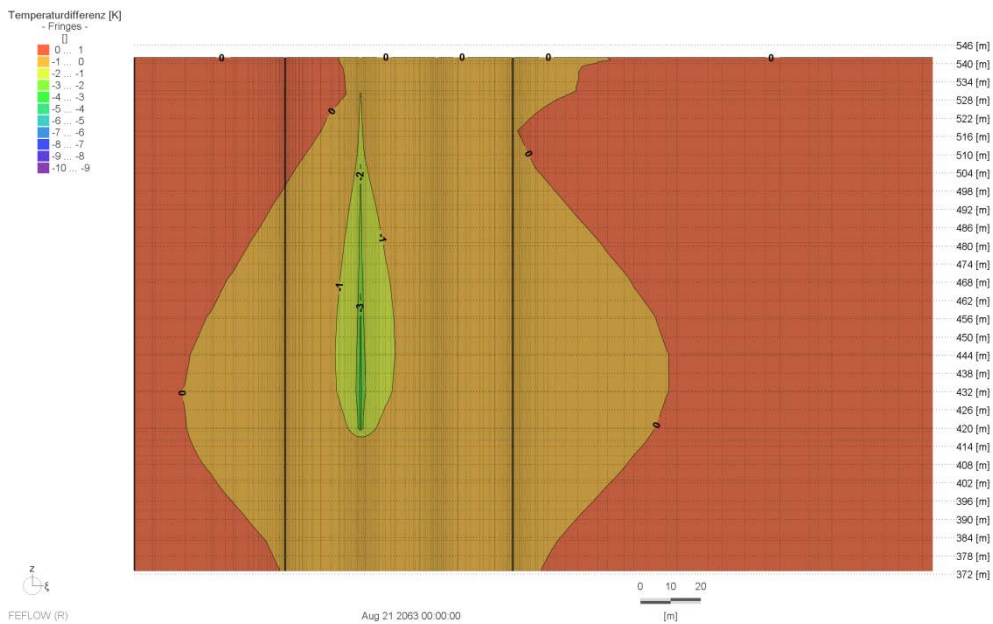
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 1b)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 1b)

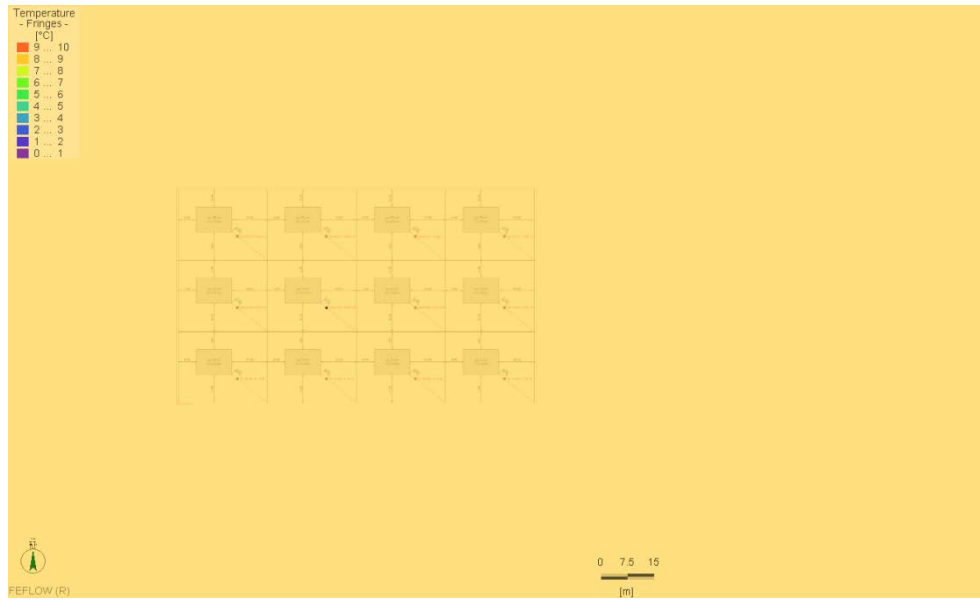


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 1b)

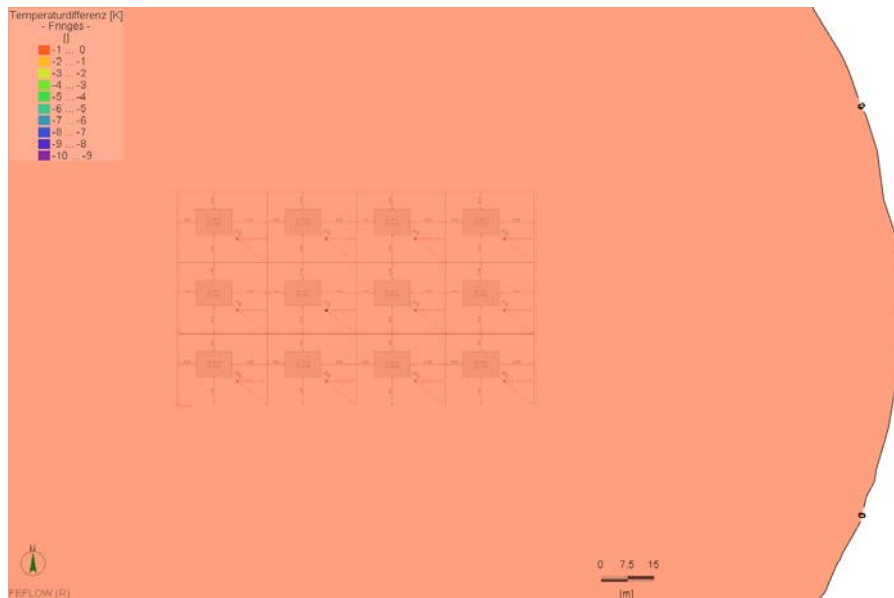


Anhang 4: Variante 2a – 1 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 1 EWS

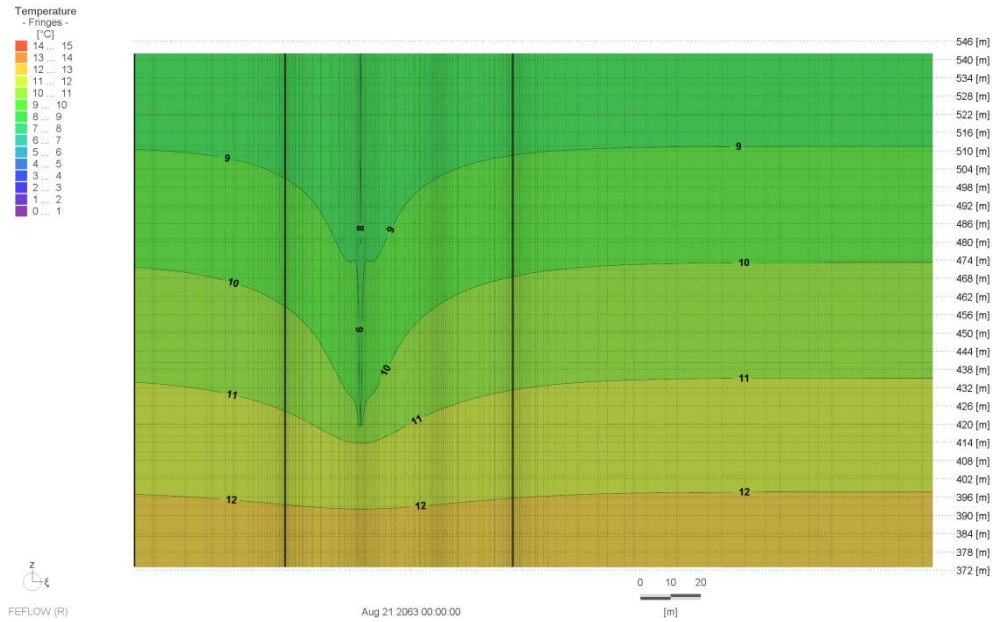
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 2a)



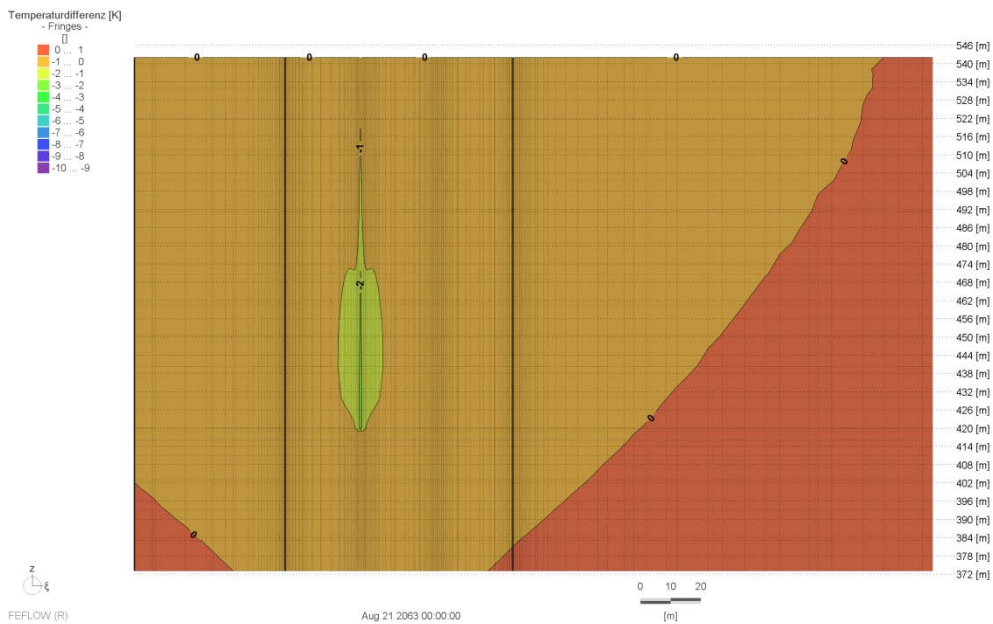
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 2a)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 2a)

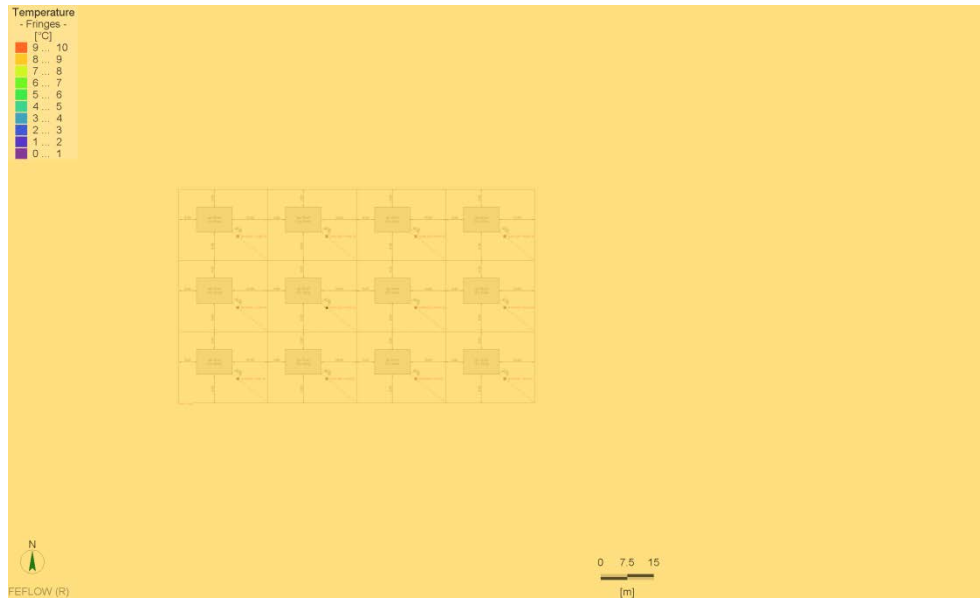


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 2a)

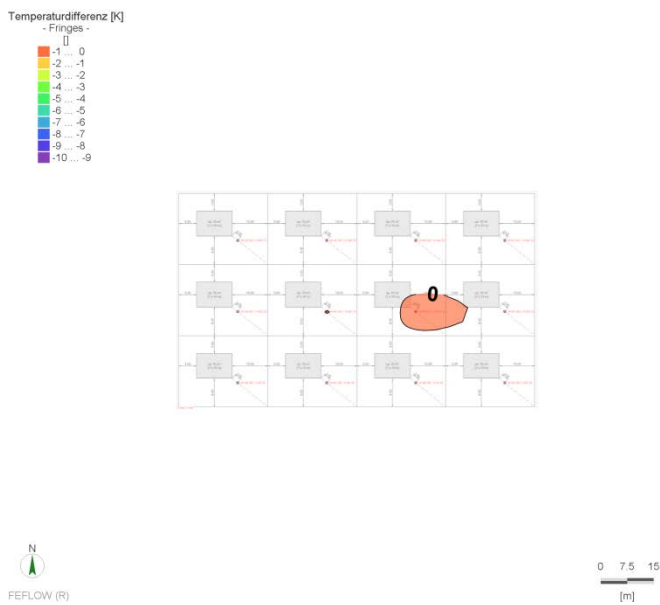


Anhang 5: Variante 2b – 1 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 1 EWS mit Grundwasserströmung

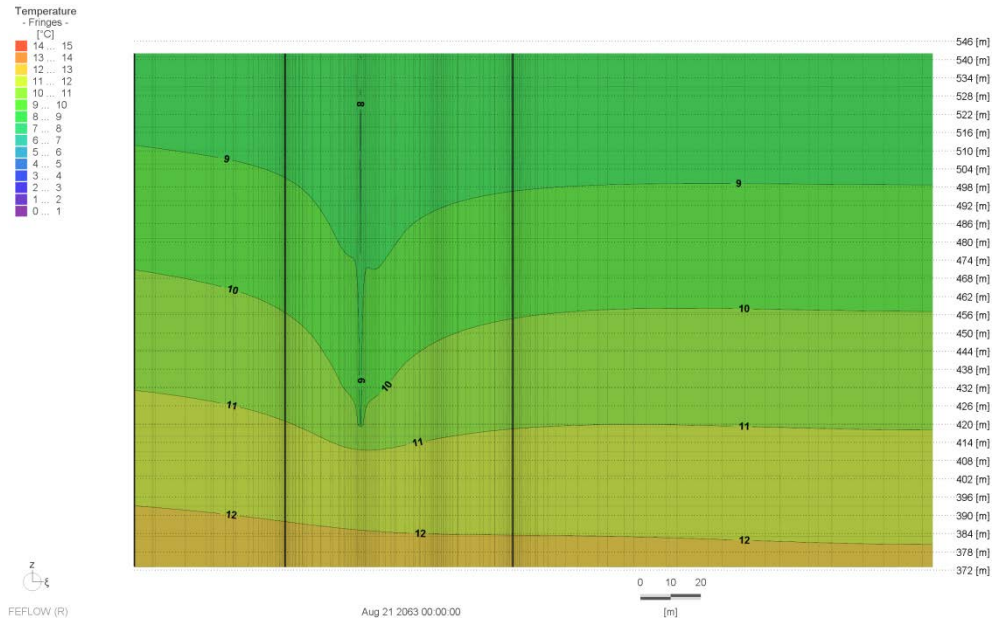
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 2b)



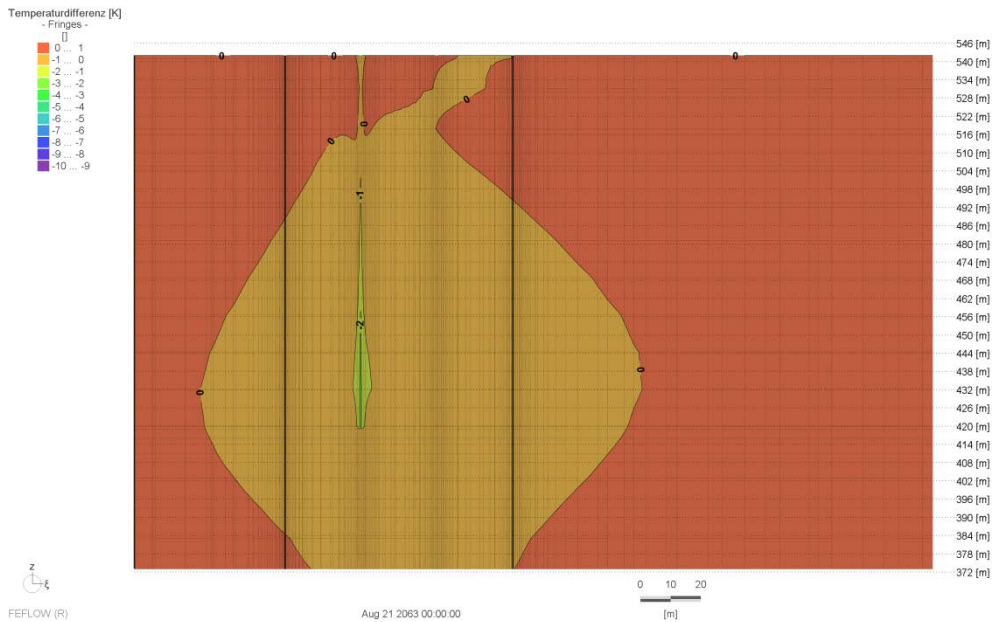
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 2b)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 2b)

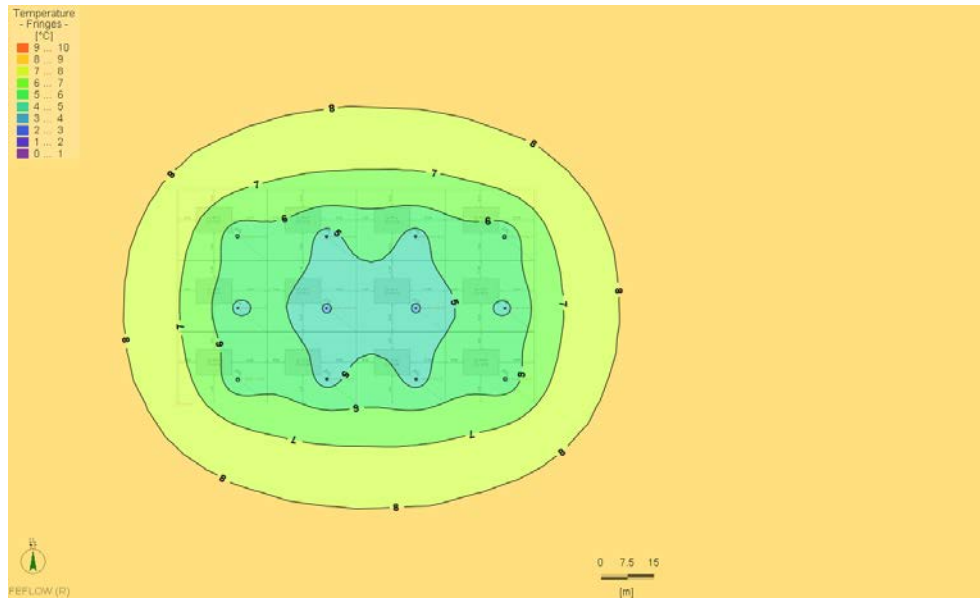


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 2b)

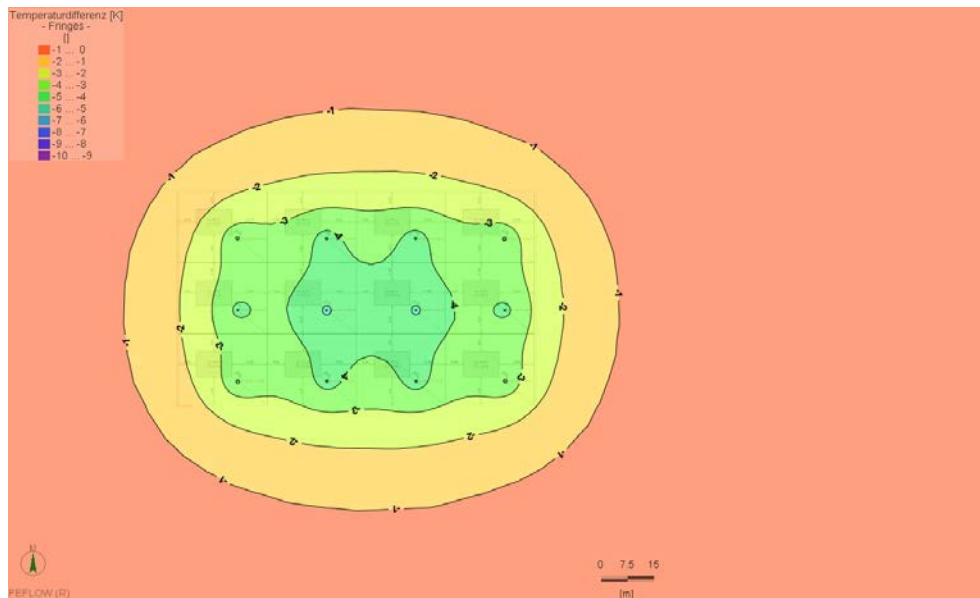


Anhang 6: Variante 3a – 12 EWS mit Heizungsbedarf

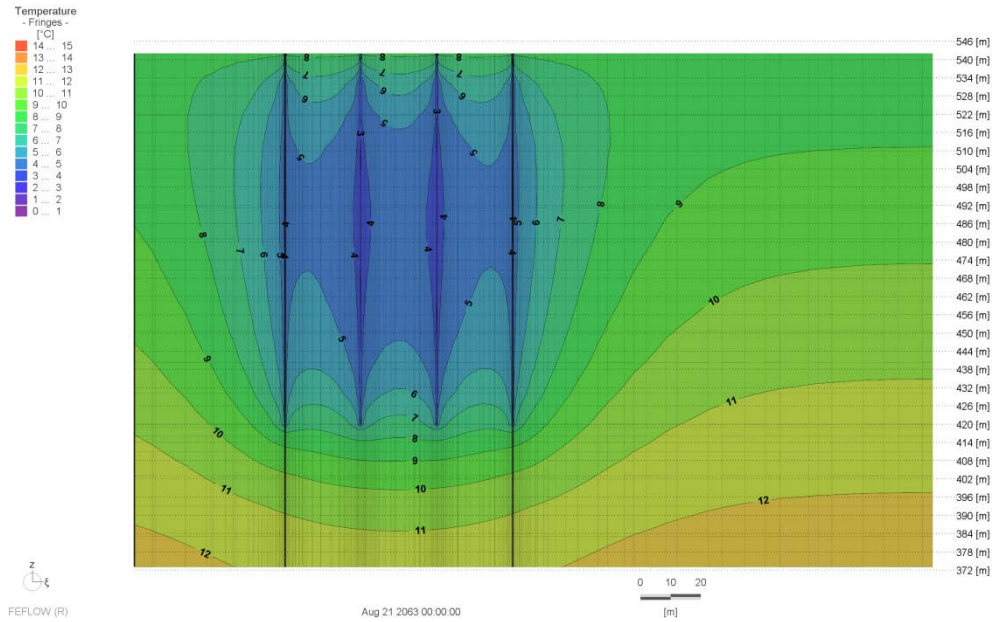
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 3a)



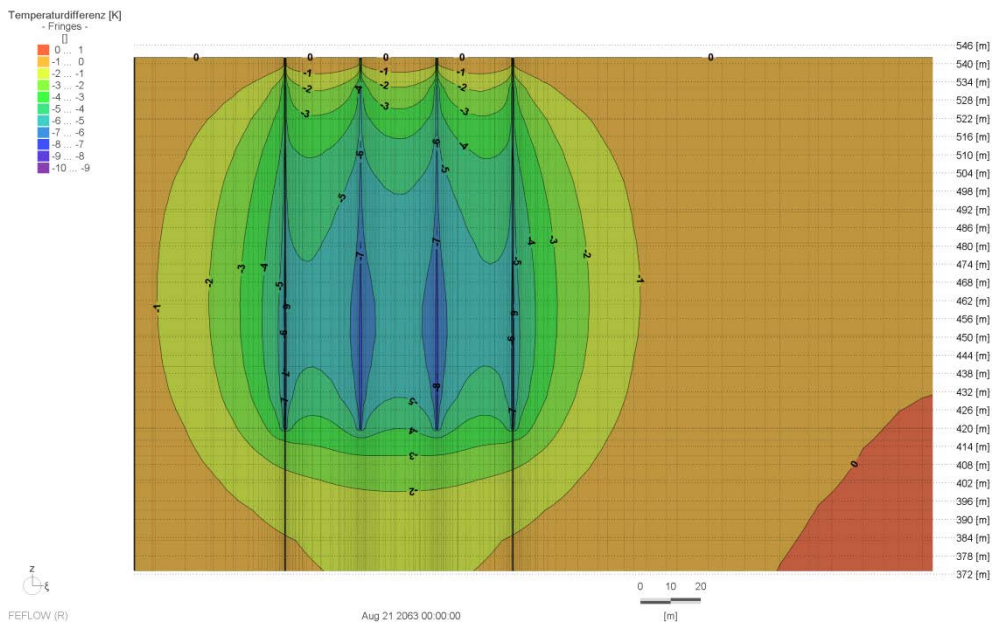
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 3a)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 3a)

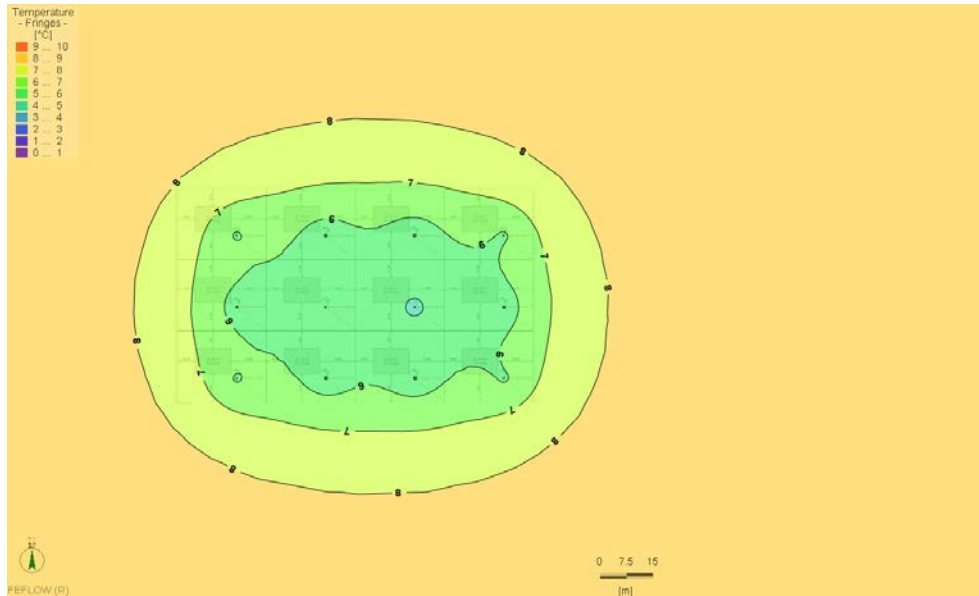


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 3a)



Anhang 7: Variante 3b – 12 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 1 EWS

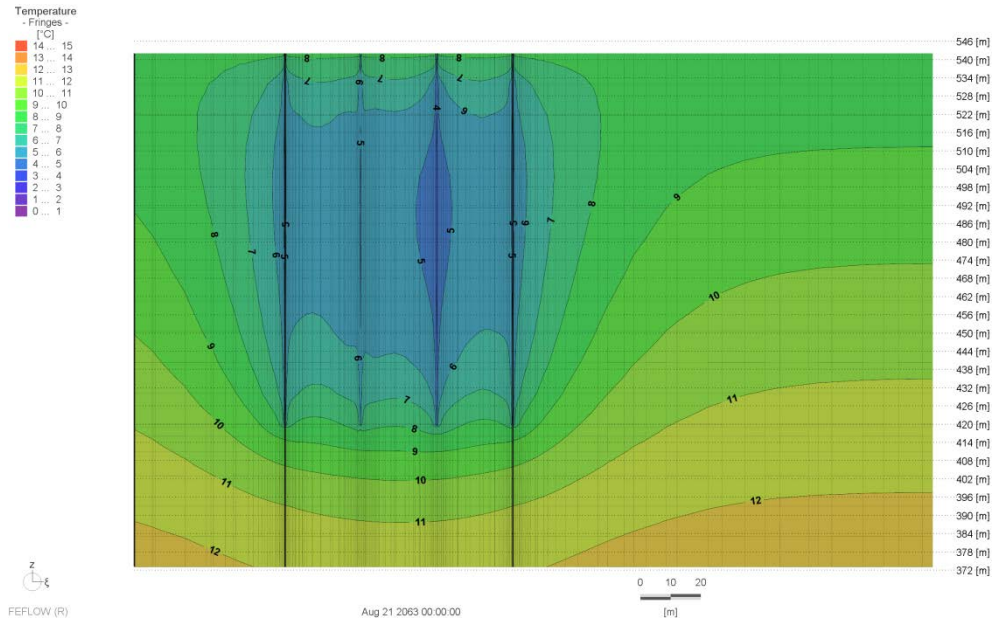
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 3b)



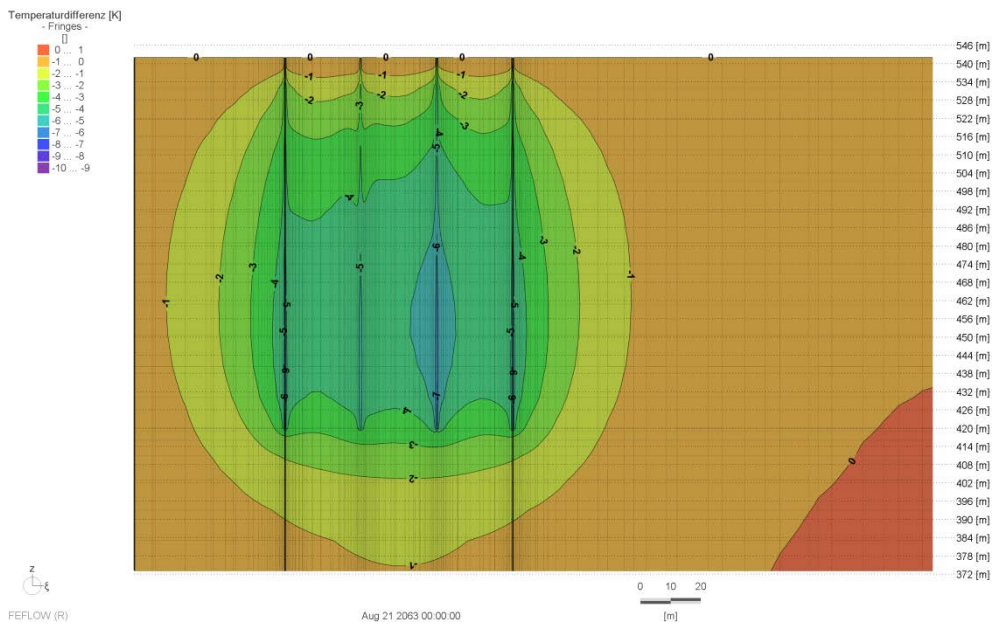
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 3b)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 3b)

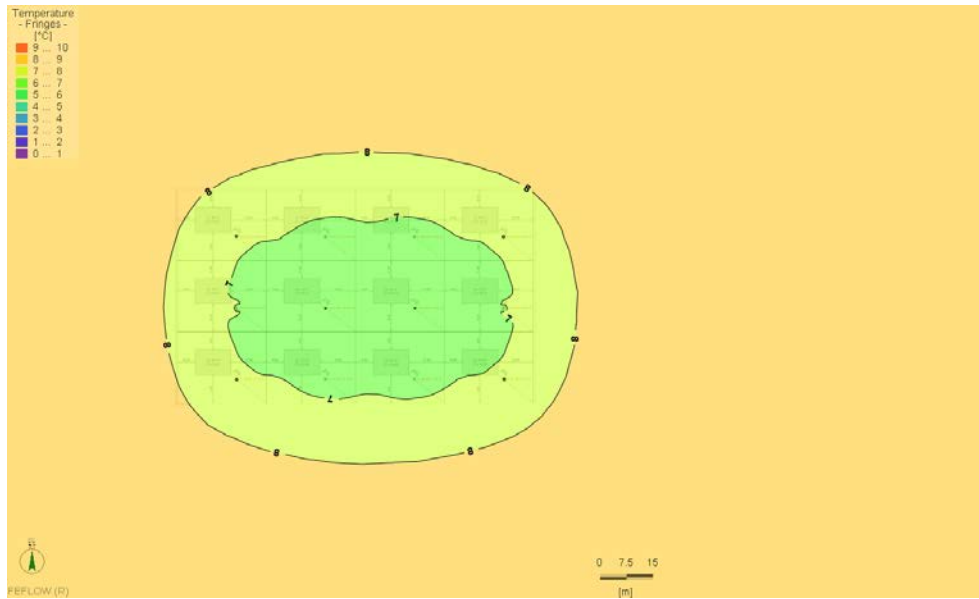


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 3b)

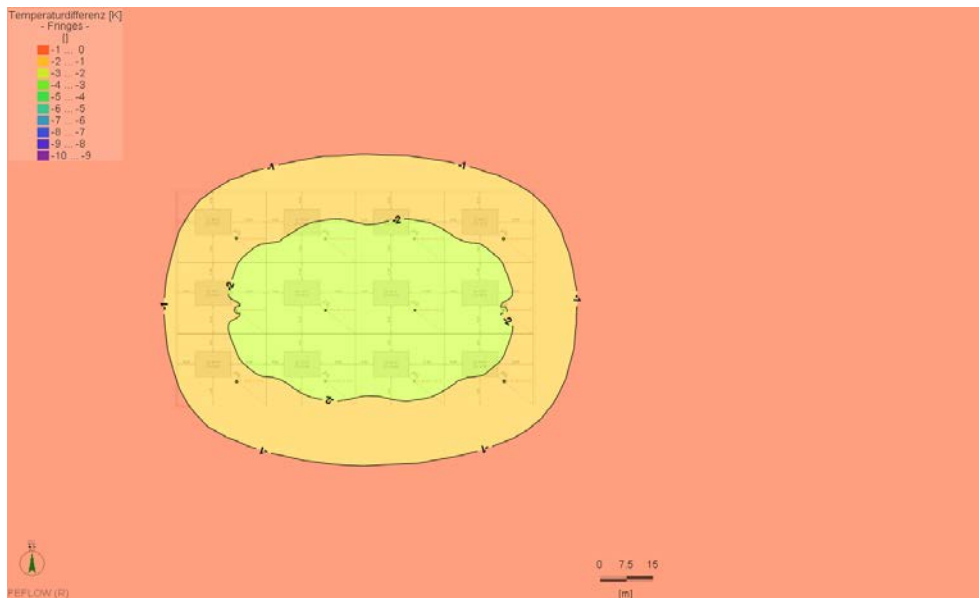


Anhang 8: Variante 3c – 12 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 12 EWS

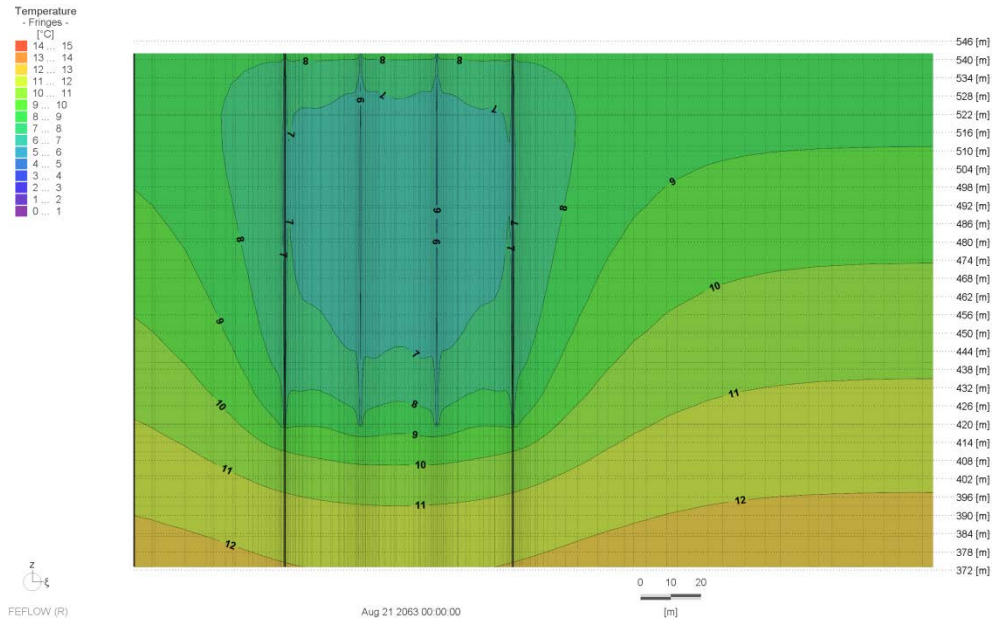
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 3c)



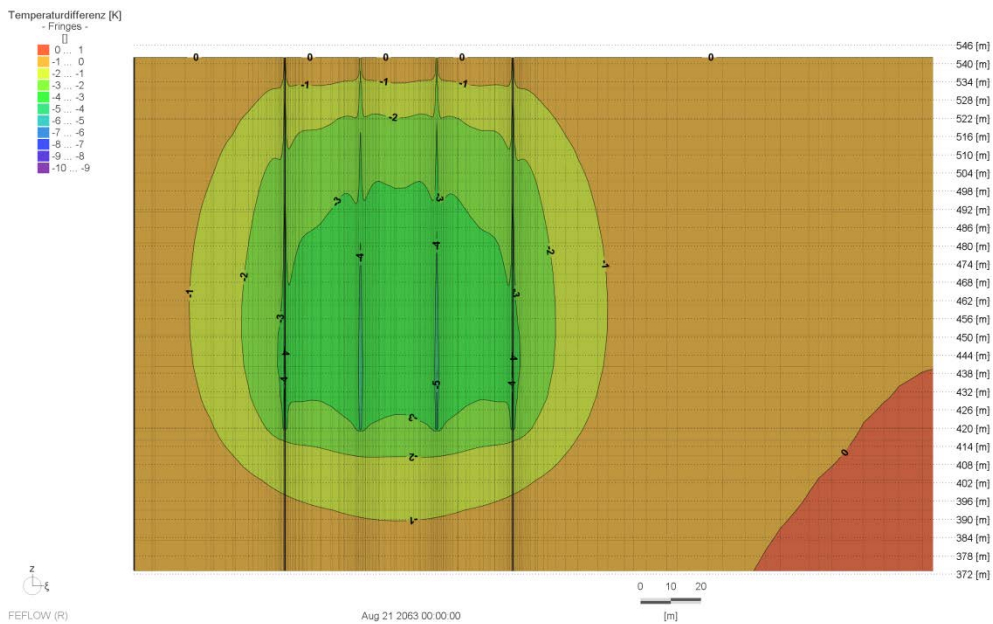
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 3c)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 3c)

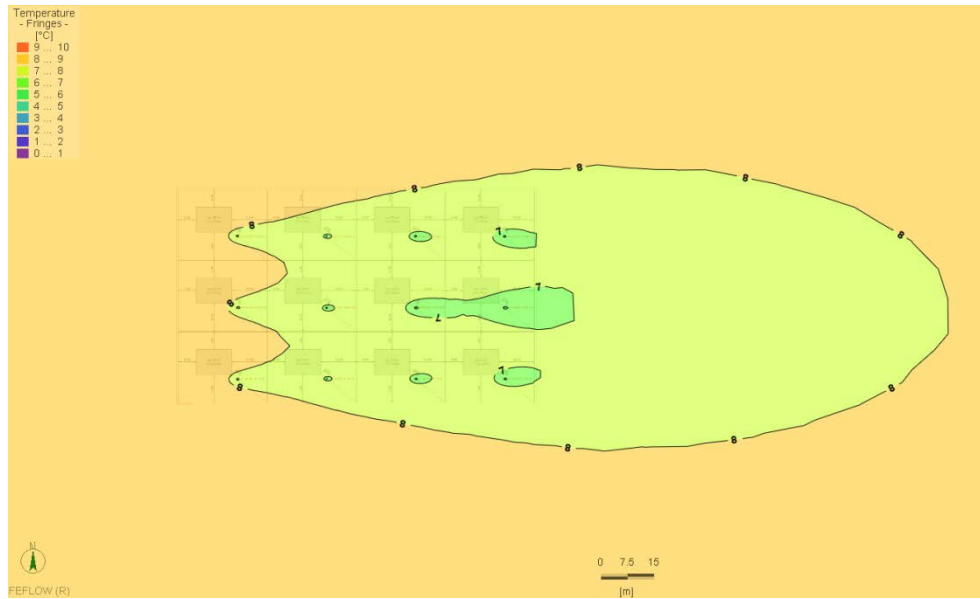


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 3c)

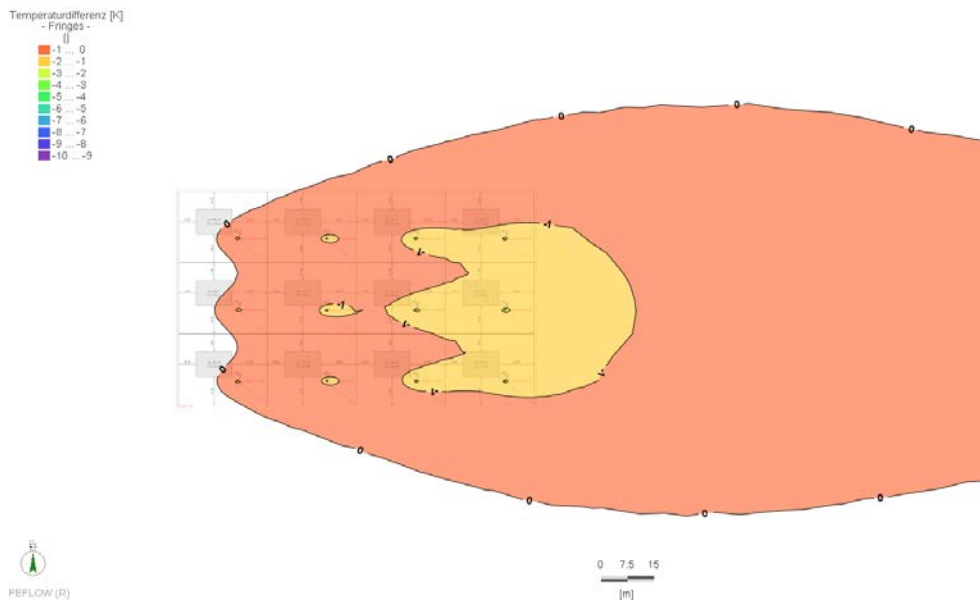


Anhang 9: Variante 3d – 12 EWS mit Heizungsbedarf mit Grundwasserströmung

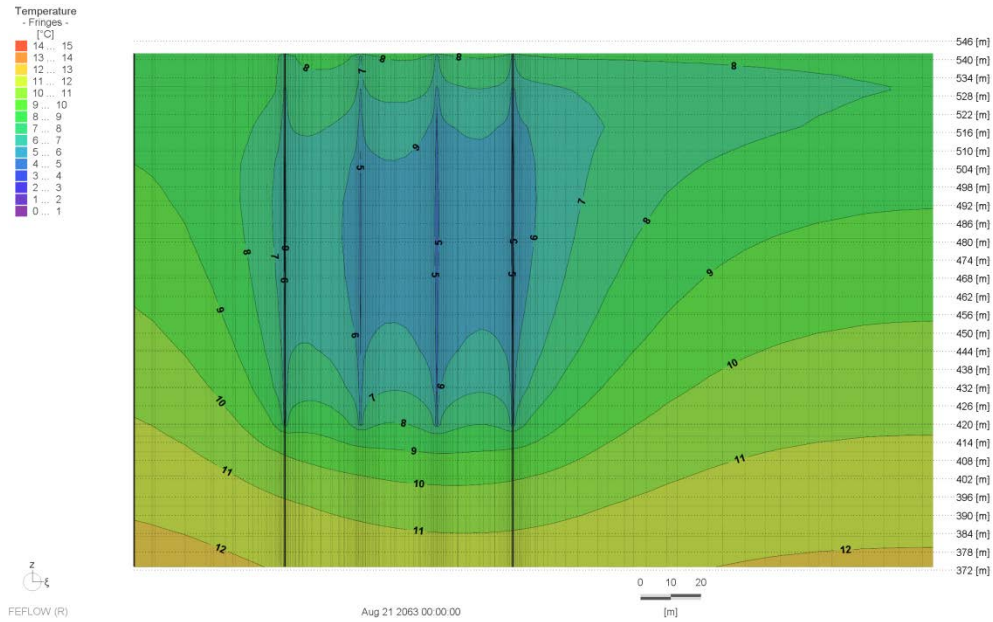
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 3d)



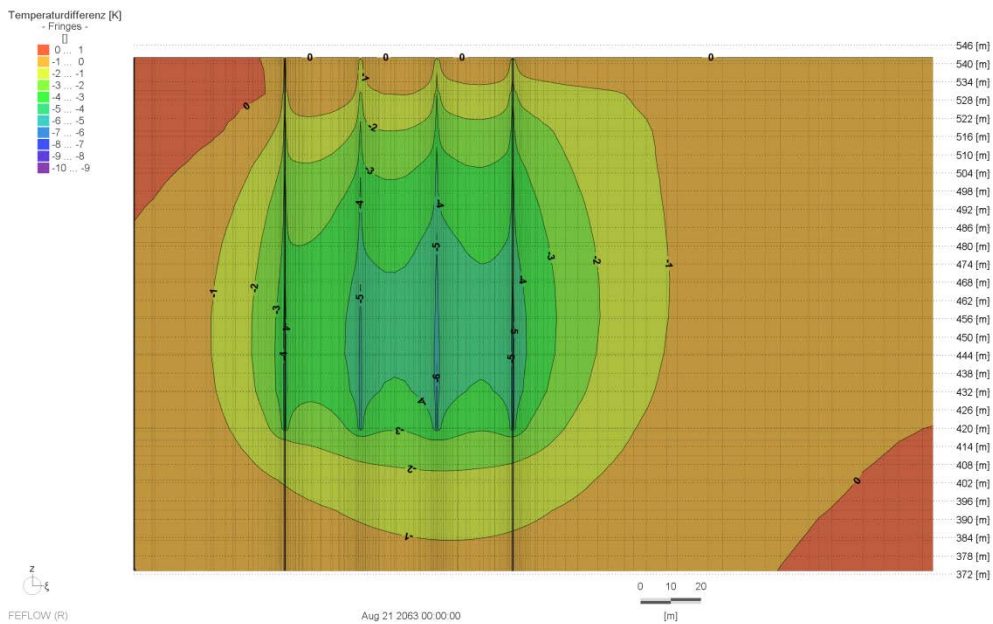
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 3d)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 3d)

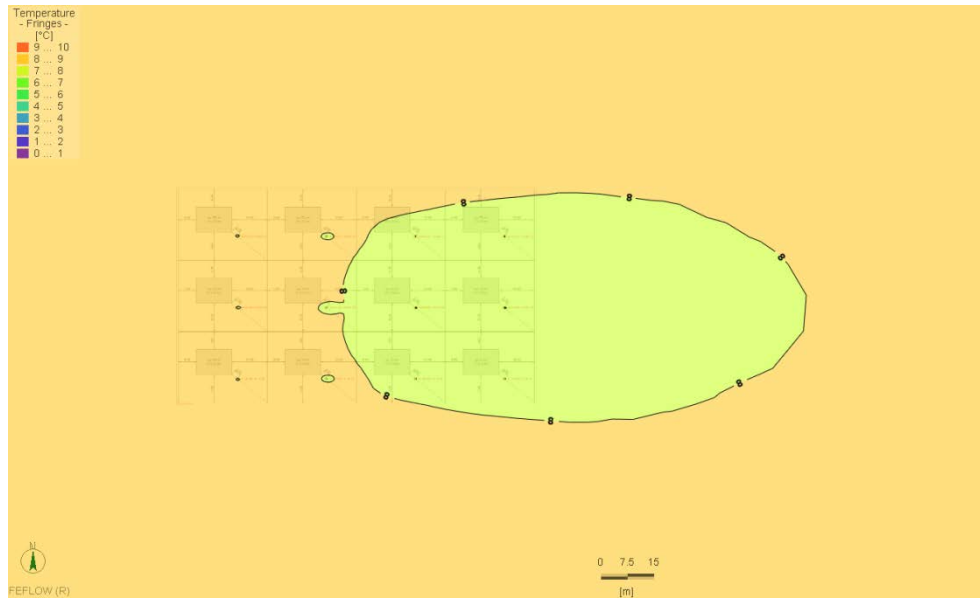


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 3d)

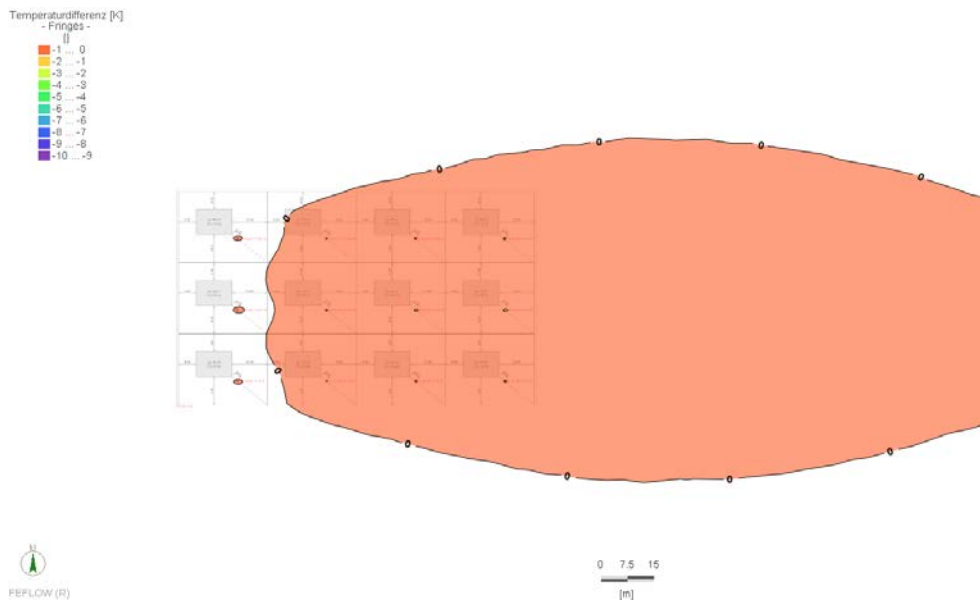


Anhang 10: Variante 3e – 12 EWS mit Heizungsbedarf, Geocooling in 12 EWS mit Grundwasserströmung

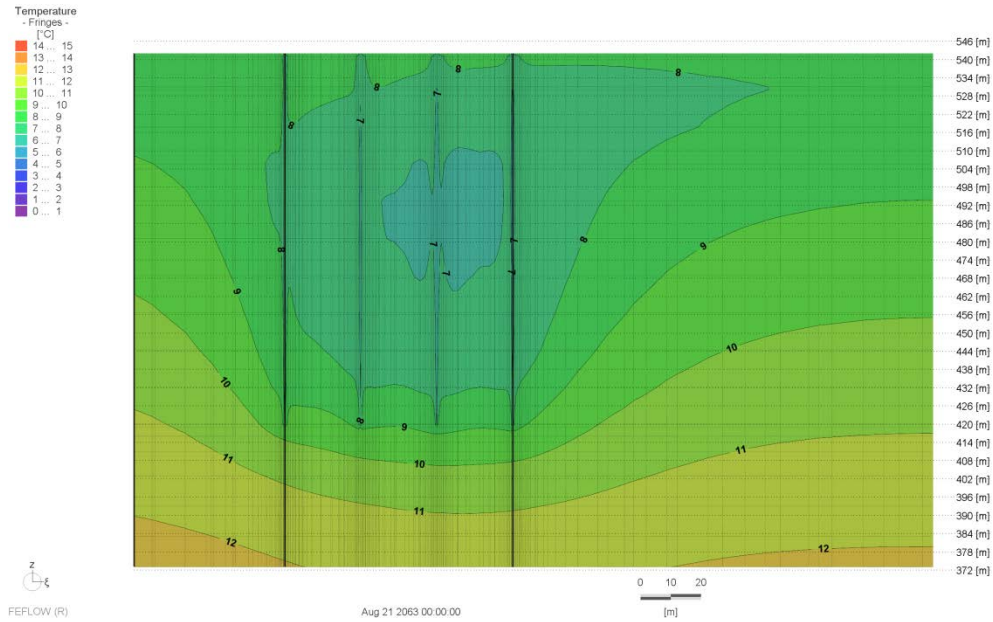
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 3e)



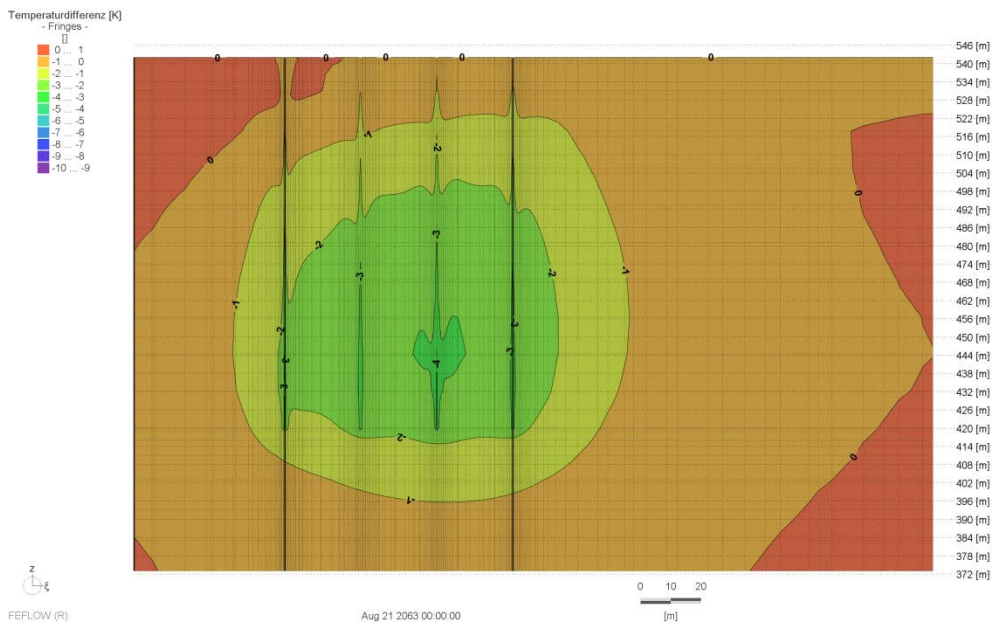
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 3e)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 3e)

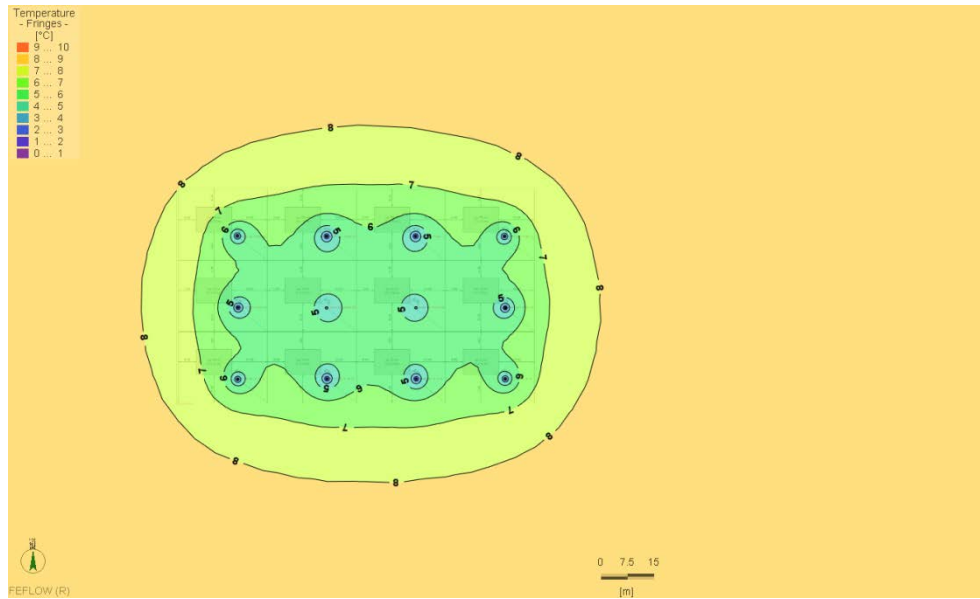


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 3e)

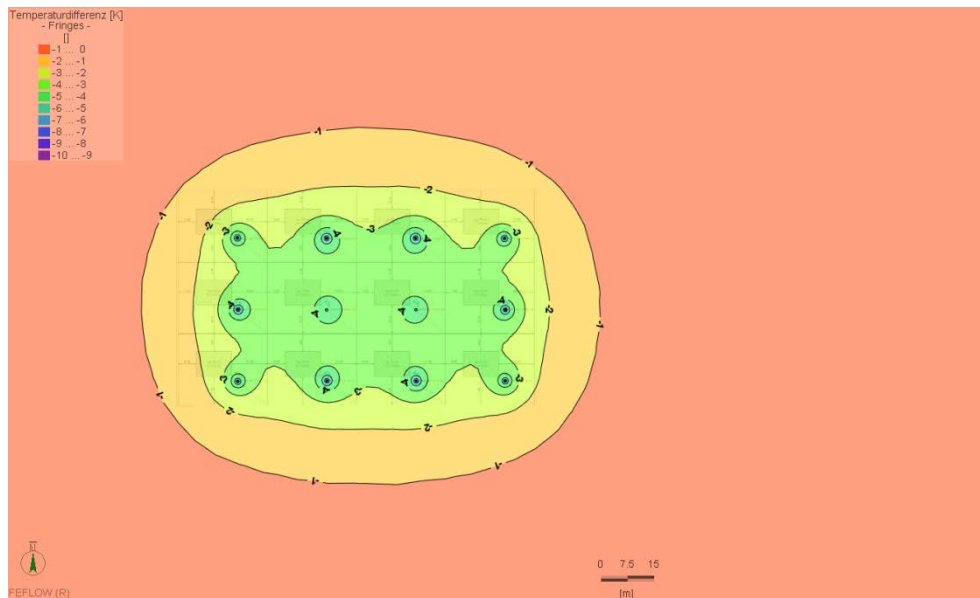


Anhang 11: Variante 4a – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau

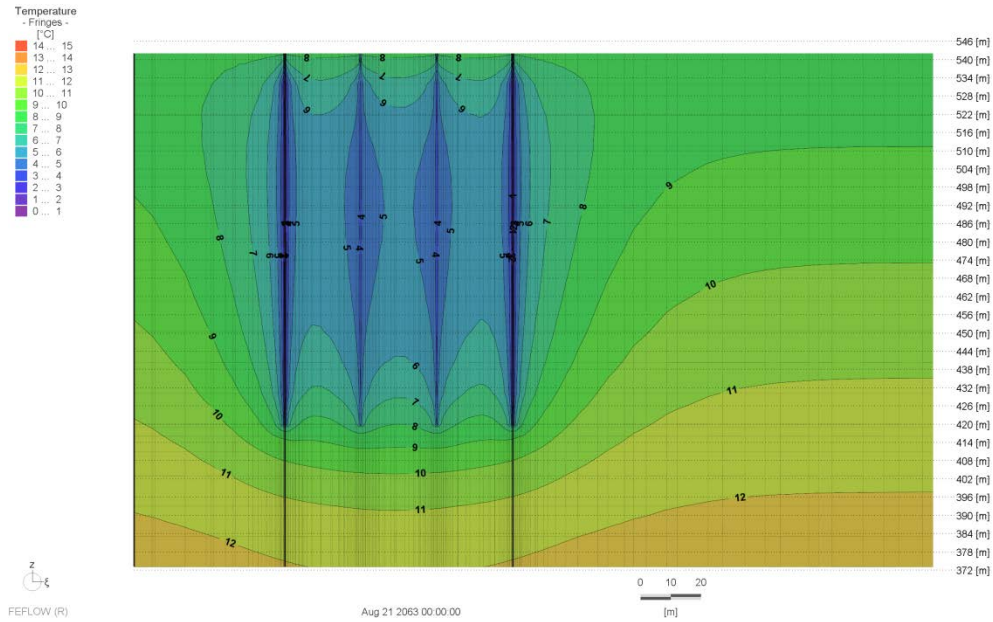
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 4a)



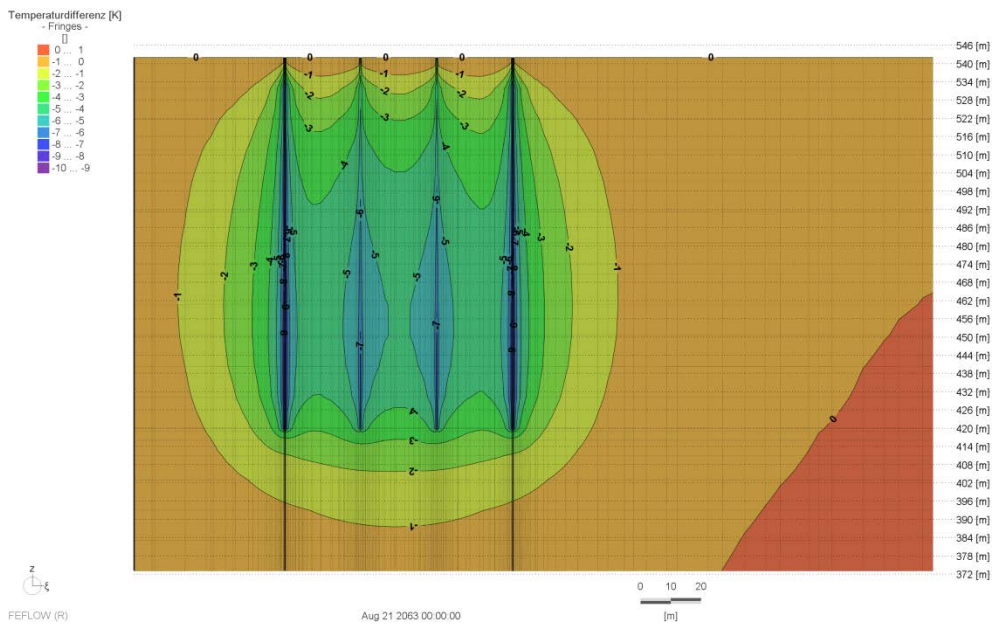
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 4a)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 4a)

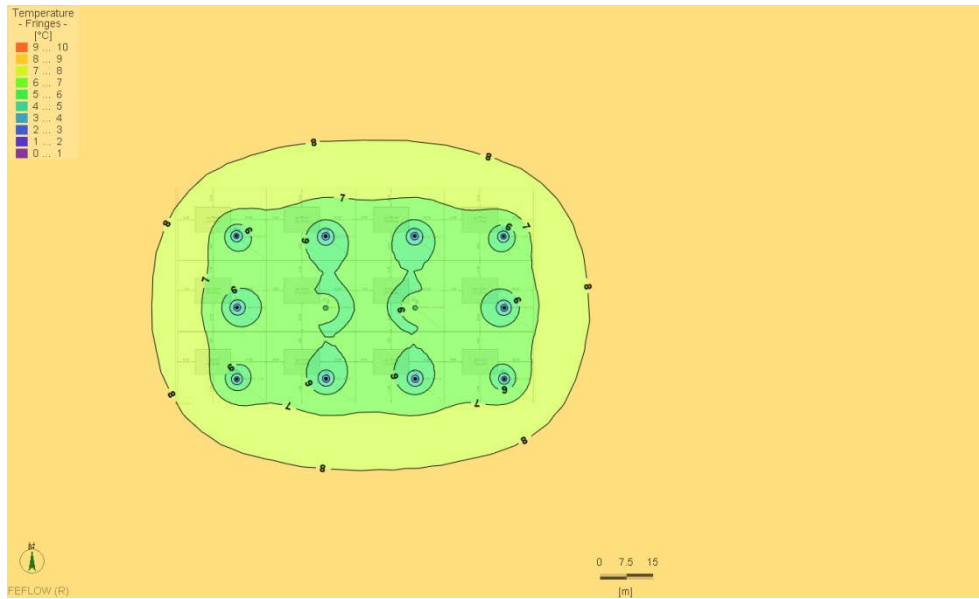


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 4a)

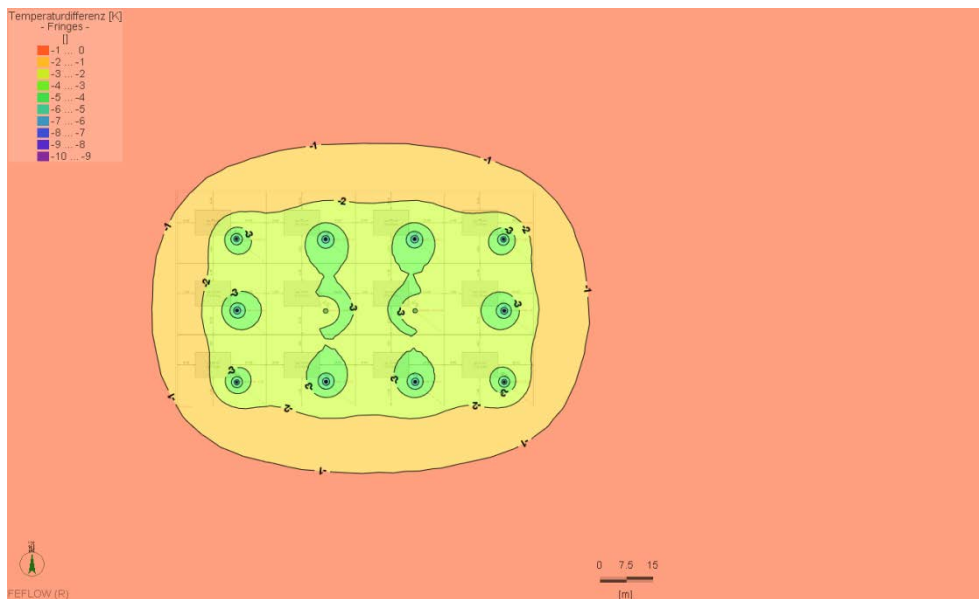


Anhang 12: Variante 4b – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau, Geocooling in 1 EWS

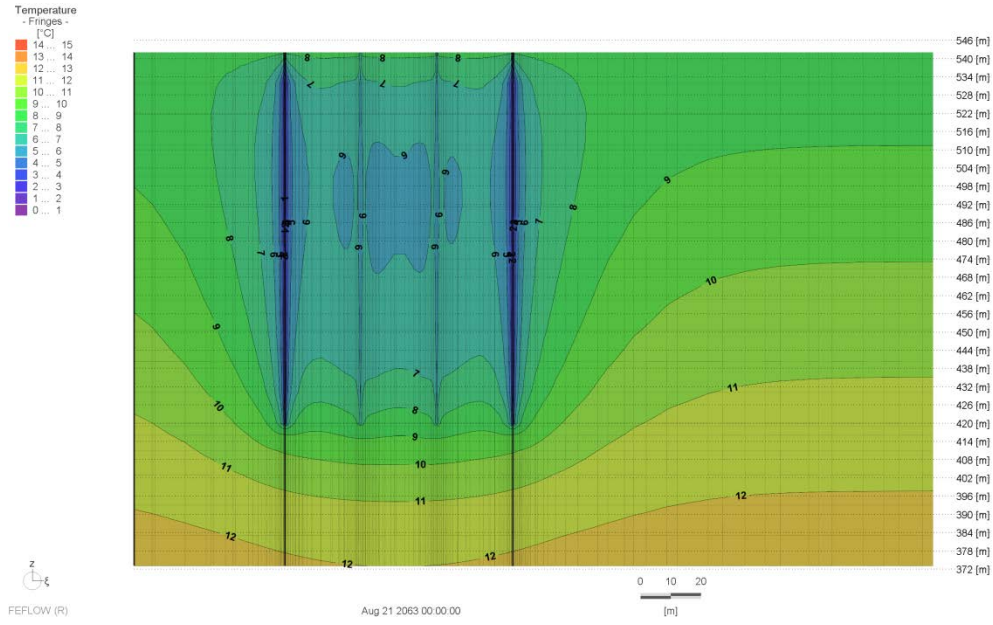
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 4b)



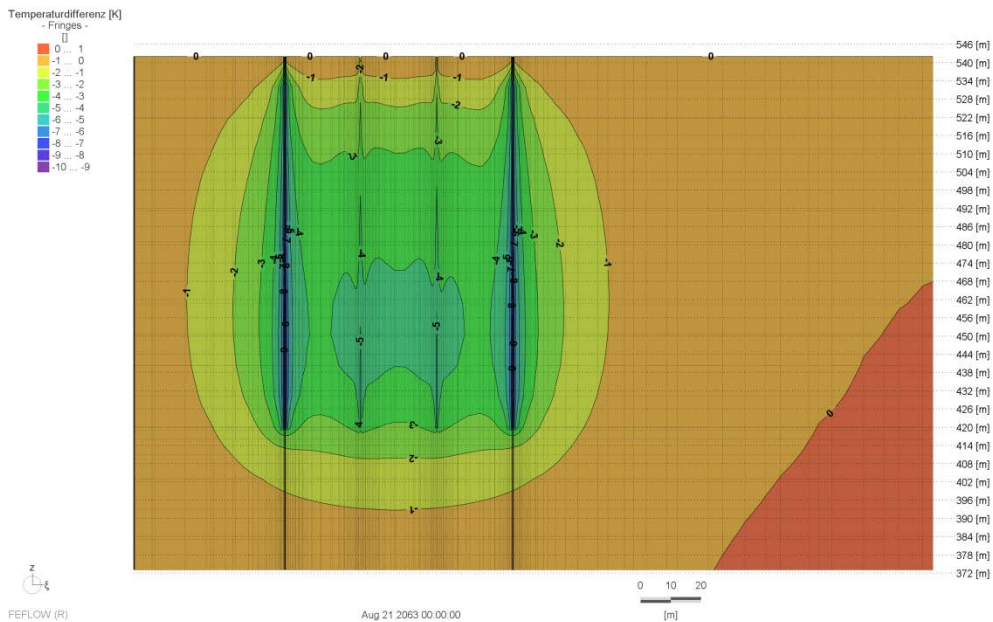
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 4b)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 4b)

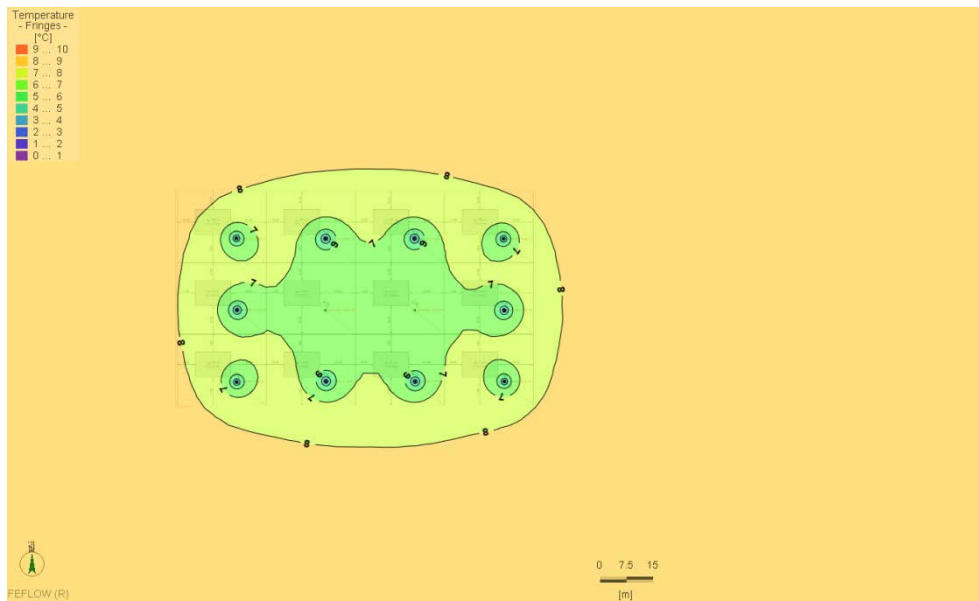


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 4b)

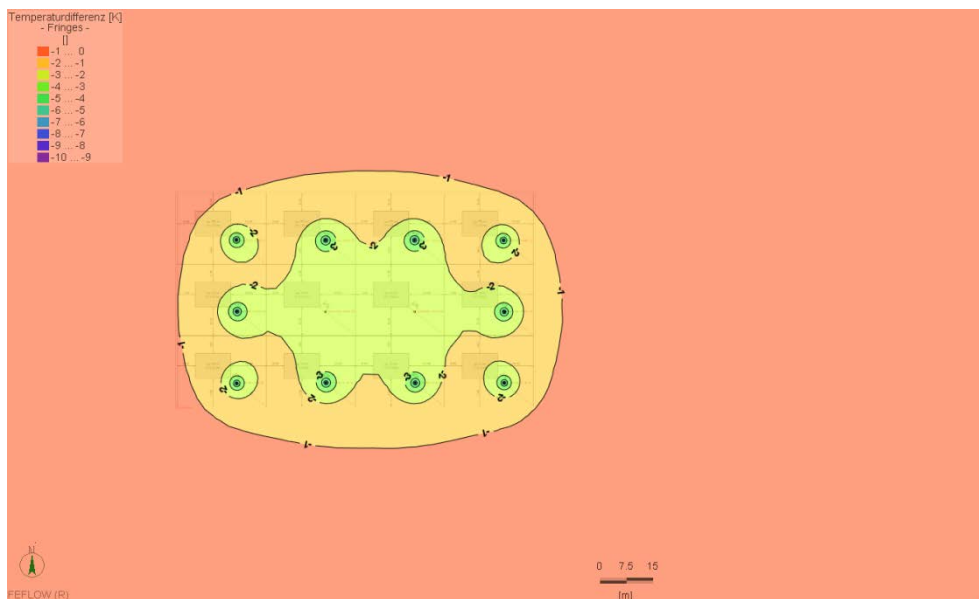


Anhang 13: Variante 4c – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau, Geocooling in 12 EWS

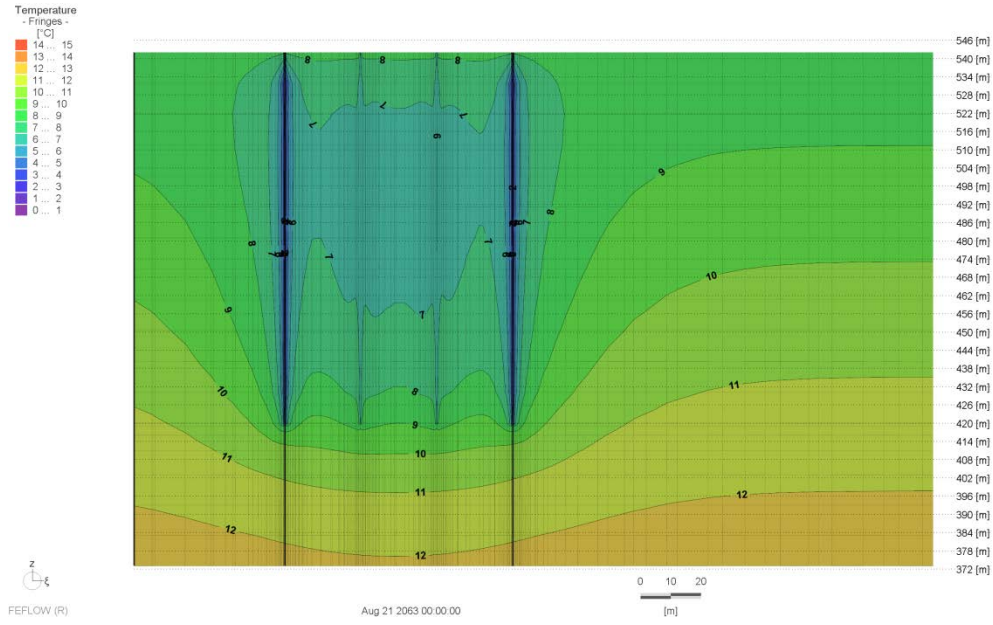
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 4c)



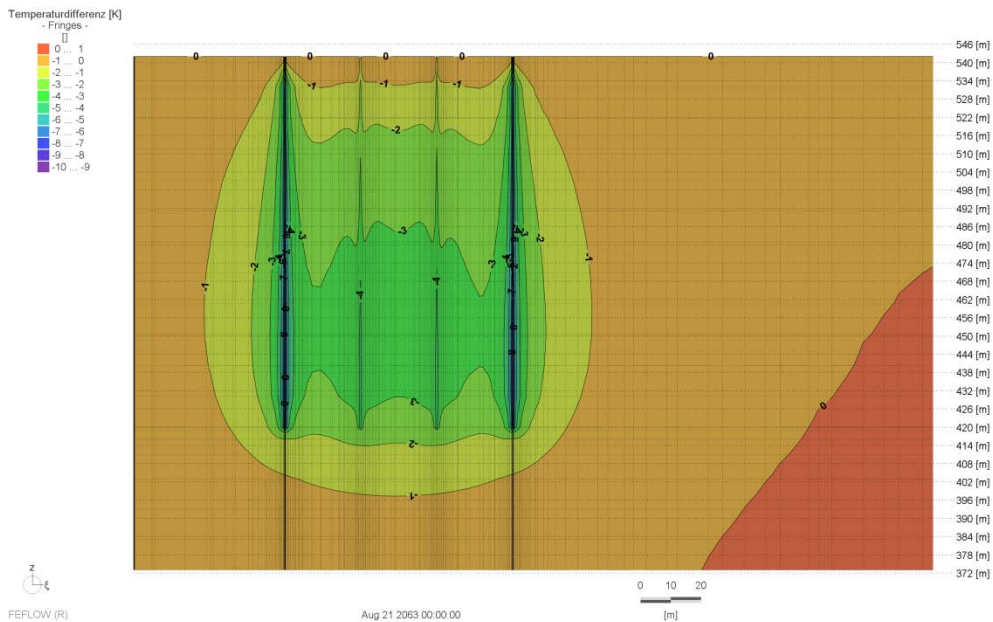
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 4c)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 4c)

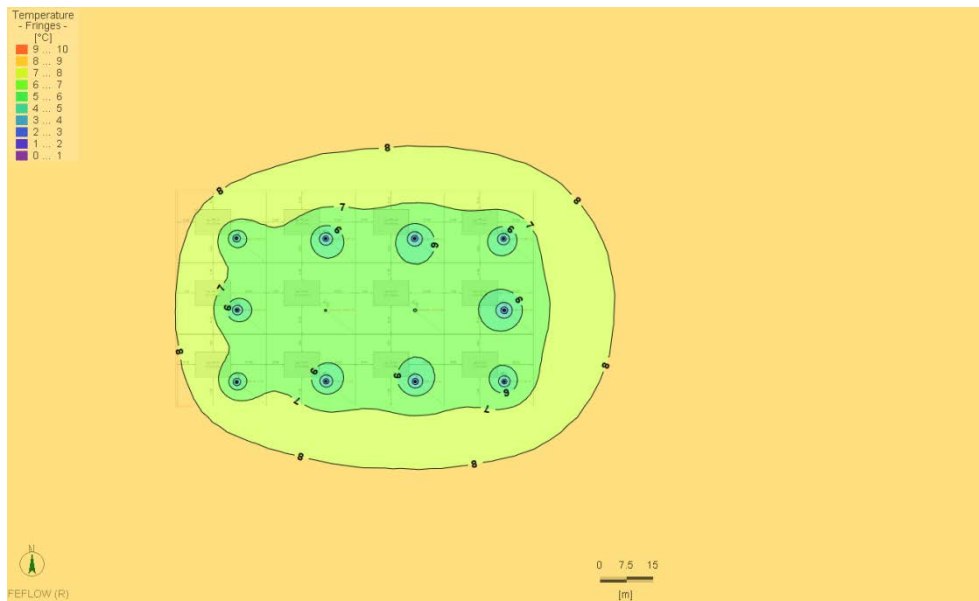


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 4c)

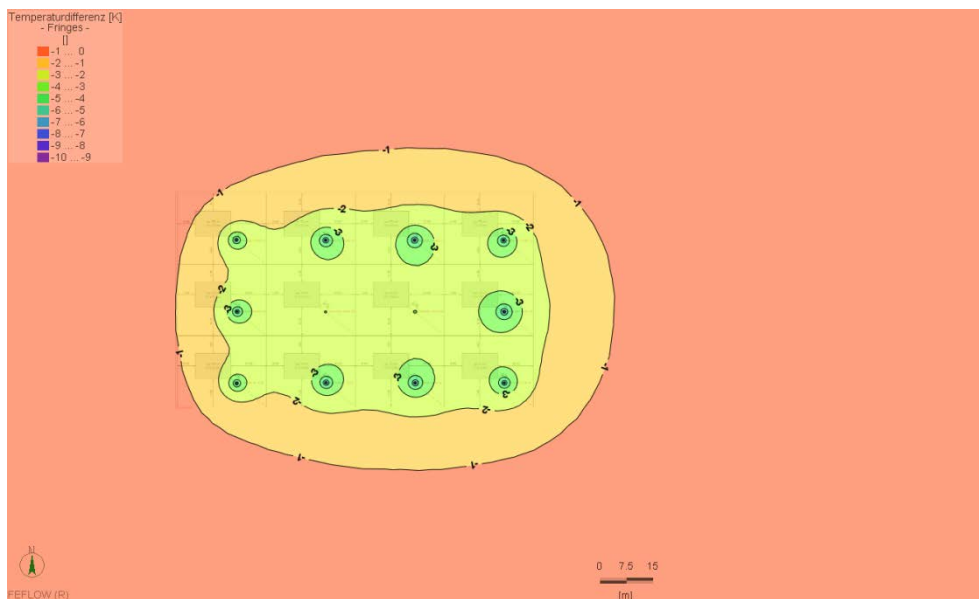


Anhang 14: Variante 4d – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau, Geocooling in 1 EWS mit Grundwasserströmung

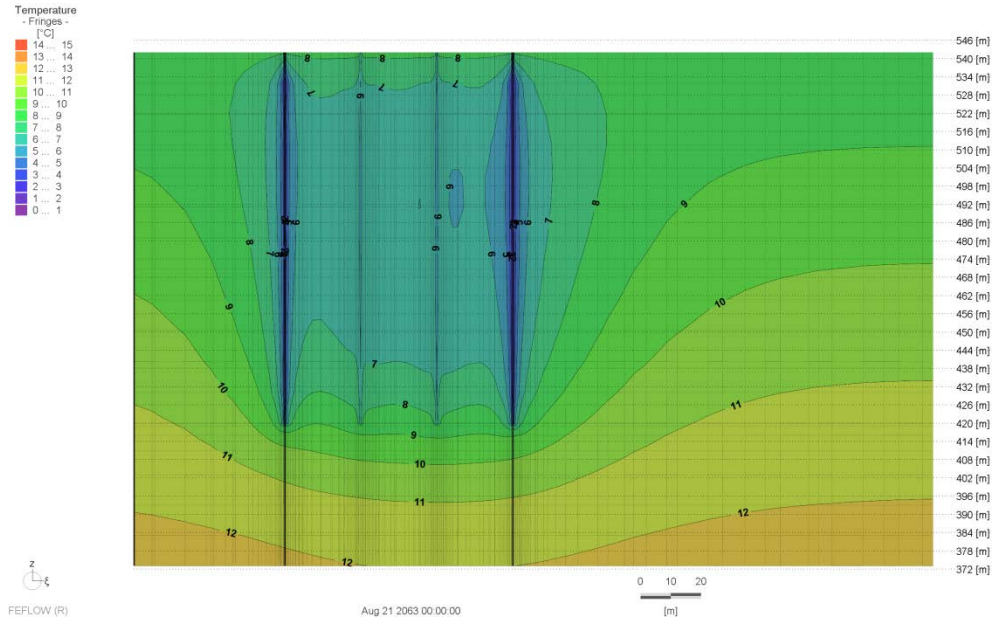
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 4d)



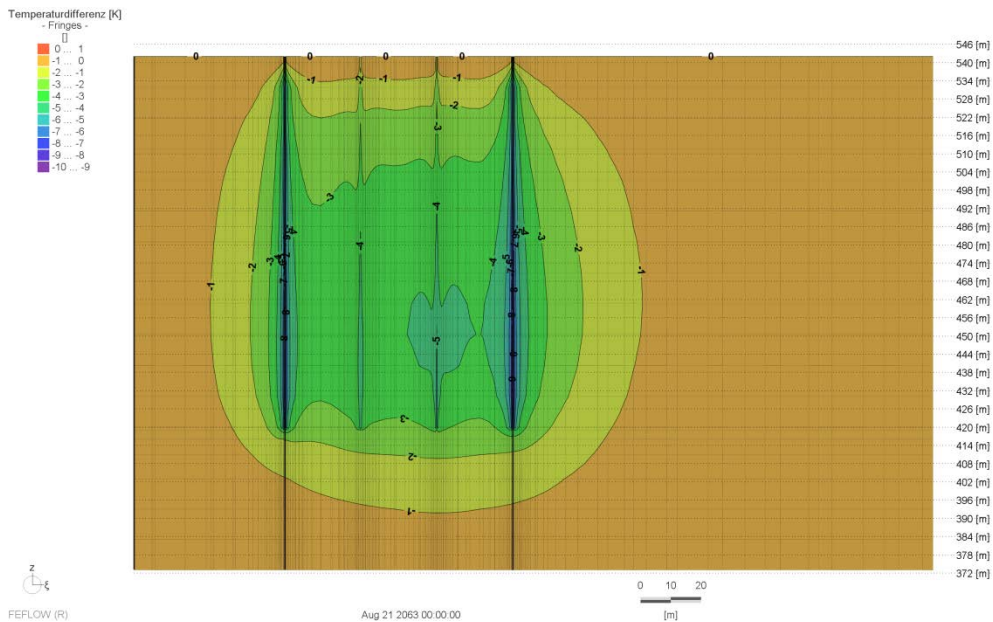
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 4d)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 4d)

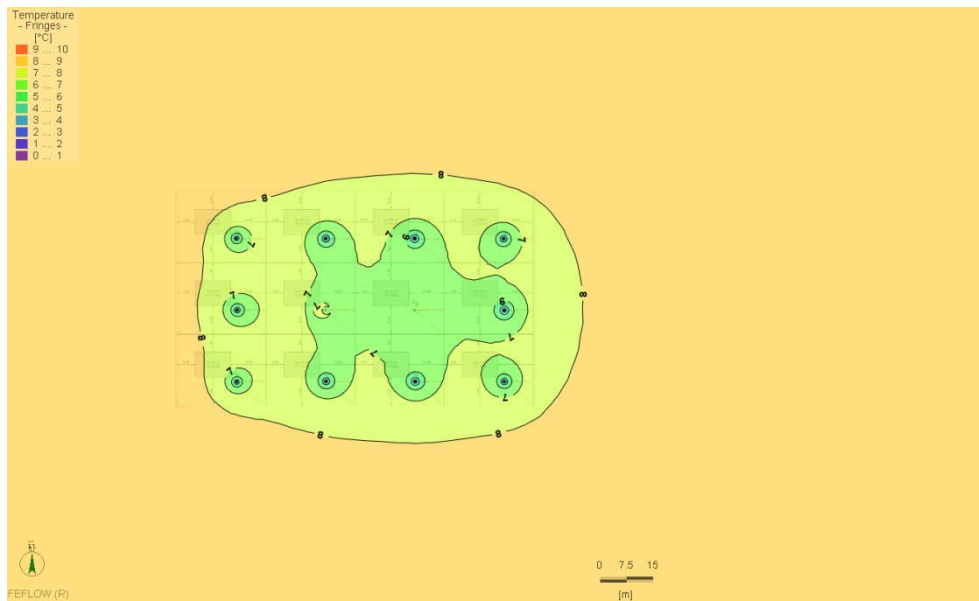


Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 4d)

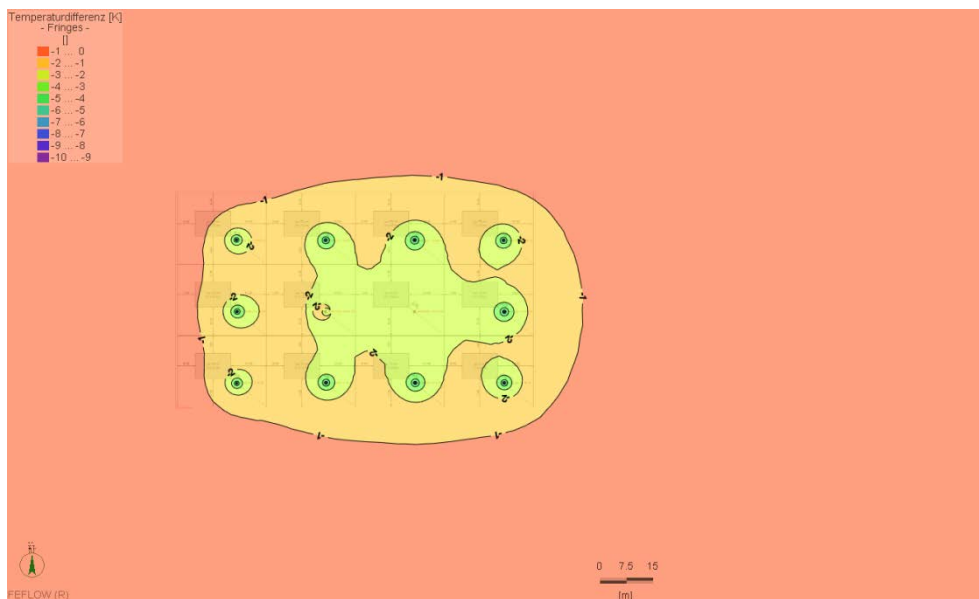


Anhang 15: Variante 4e – 12 EWS mit Heizungsbedarf bei schrittweisem Ausbau, Geocooling in 1 EWS mit Grundwasserströmung

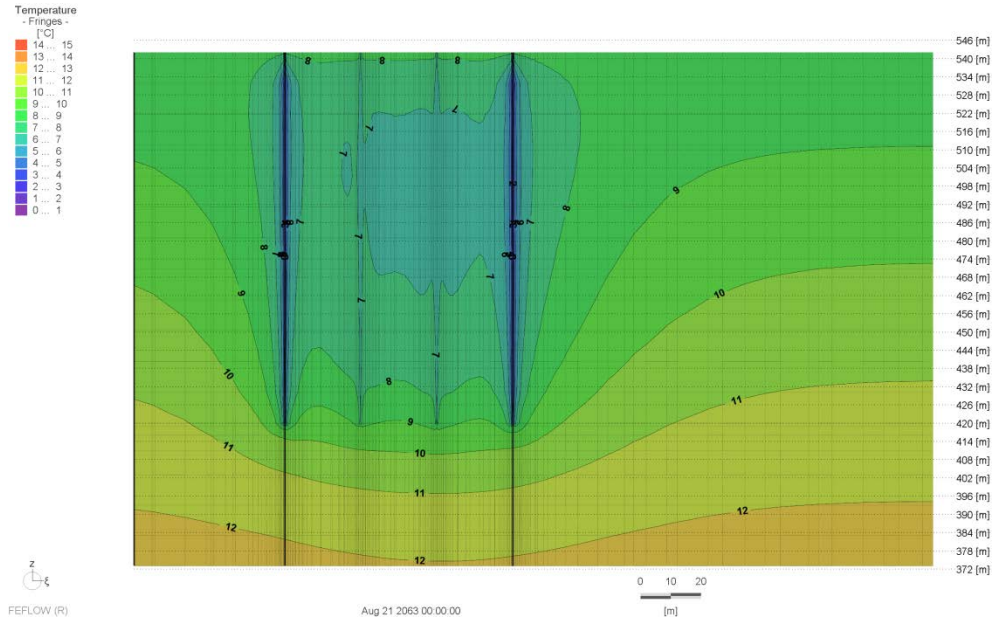
Temperaturverteilung in 12 m Tiefe (Variante 4e)



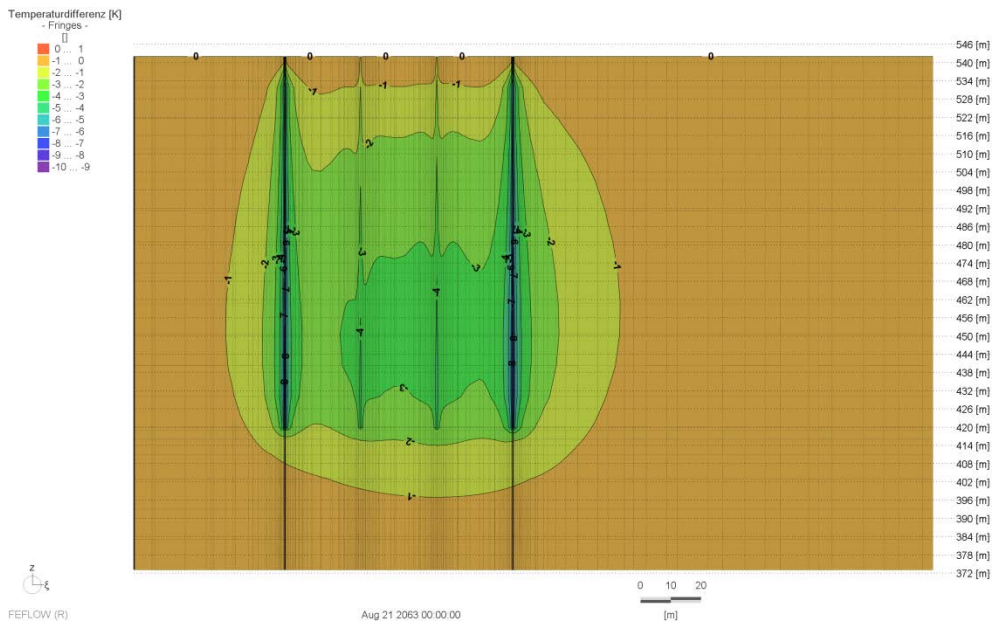
Temperaturdifferenzen in 12 m Tiefe (Variante 4e)



Temperaturverteilung Schnitt (Variante 4e)



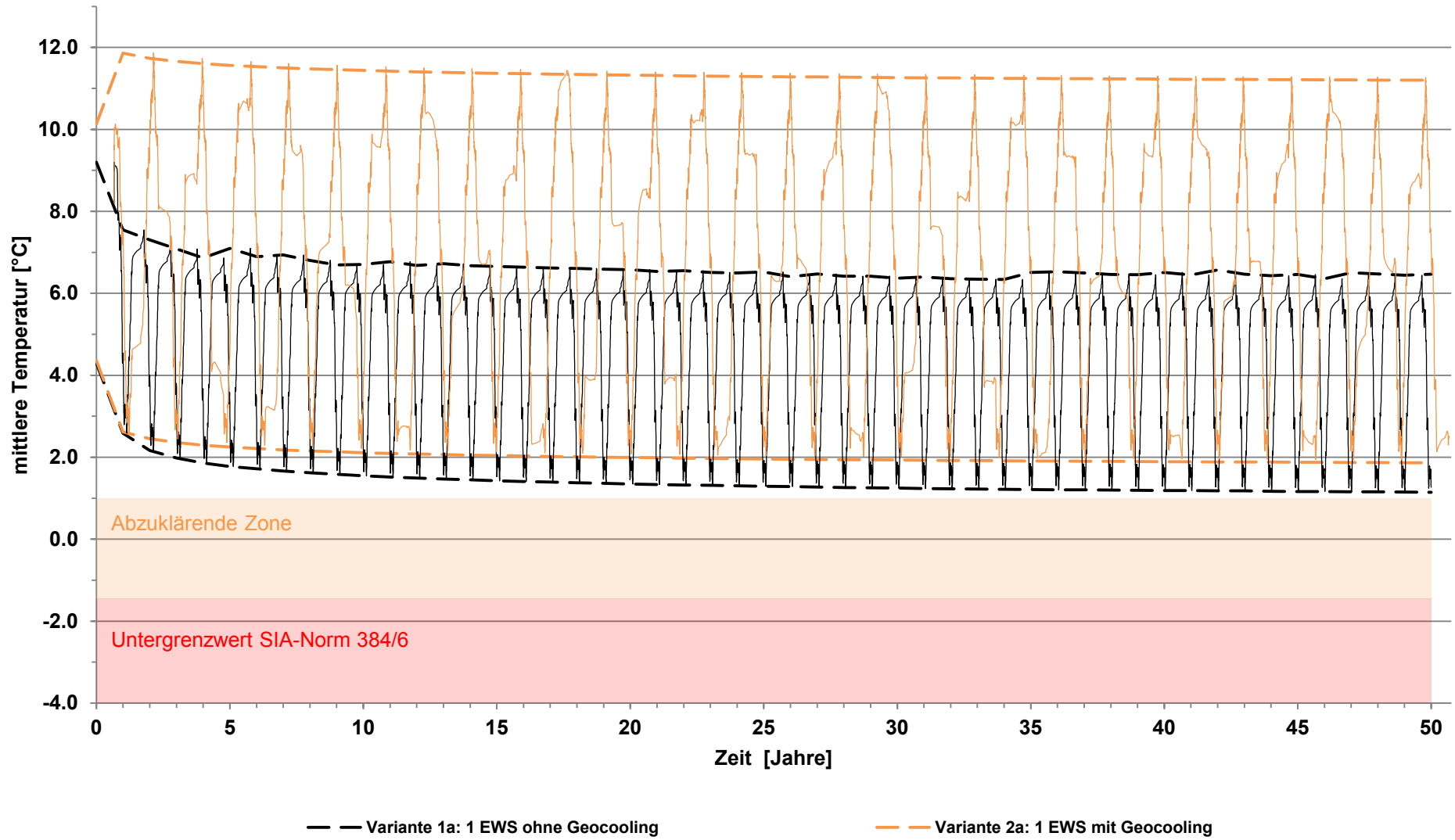
Temperaturdifferenzen Schnitt (Variante 4e)



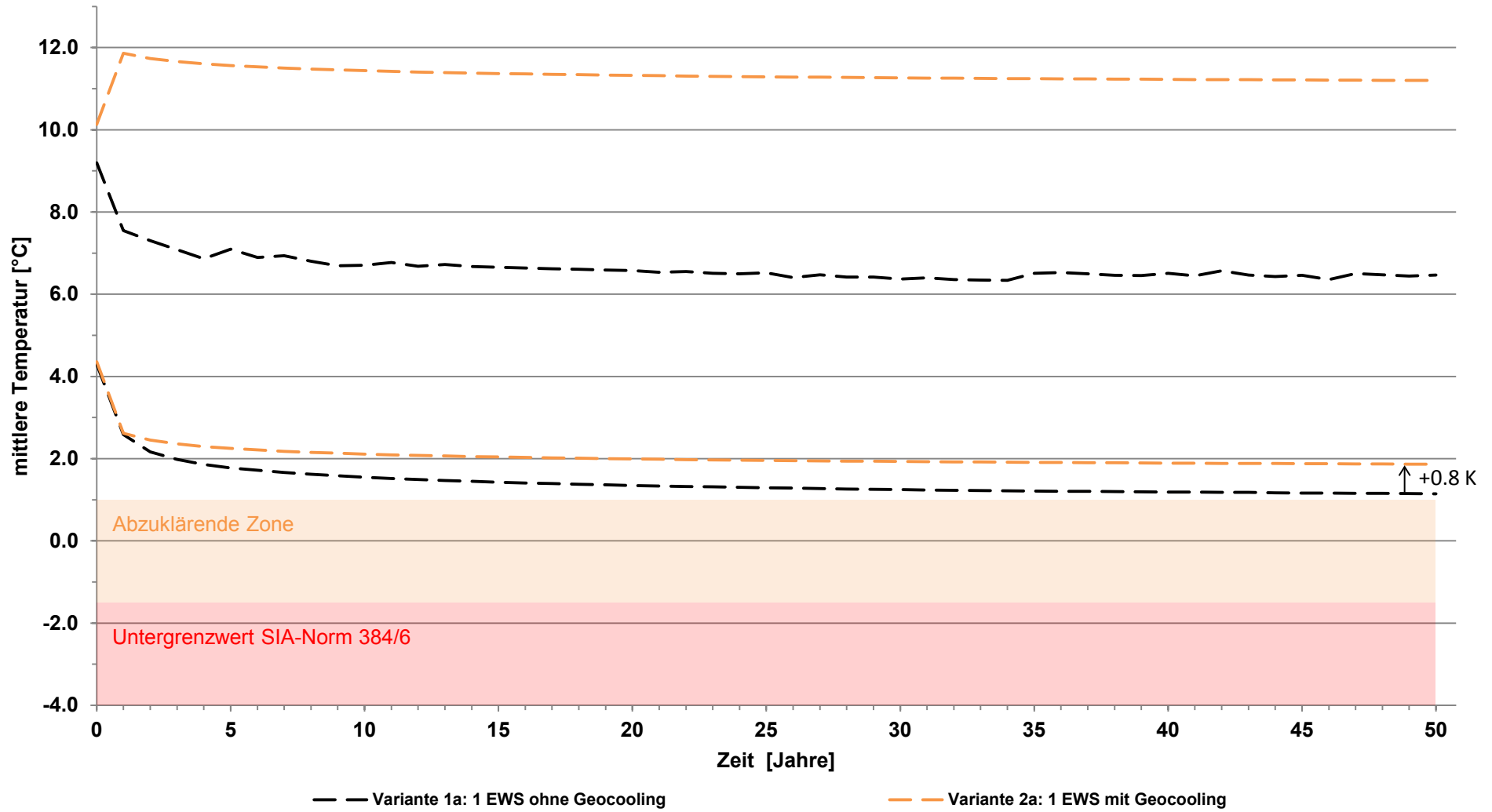
1316084.3a
Qualitätssicherung Erdwärmesonden

Anhang 16: Diagramme aller Varianten

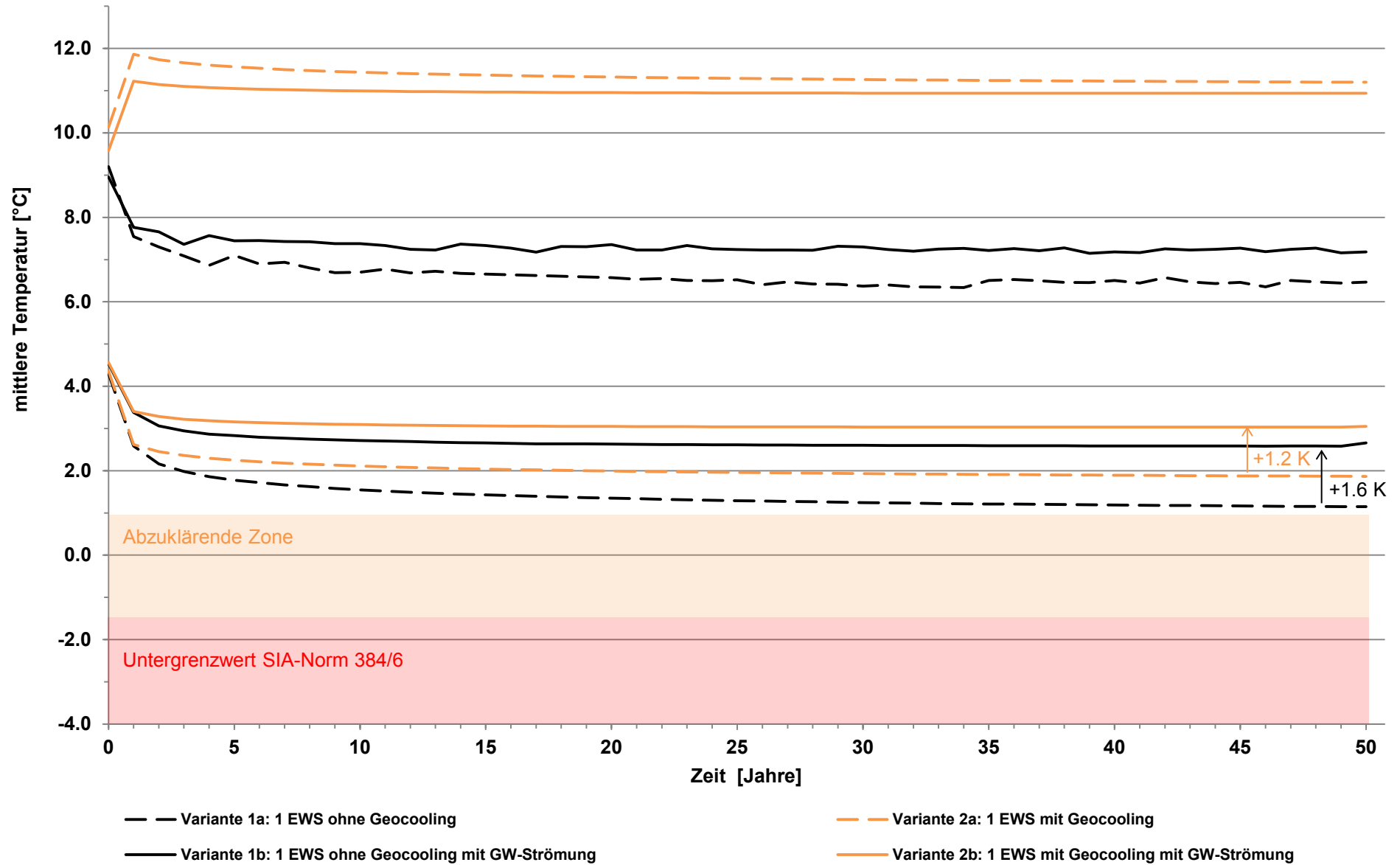
Szenarien mit 1 EWS - Jährlichen Minima und Maxima



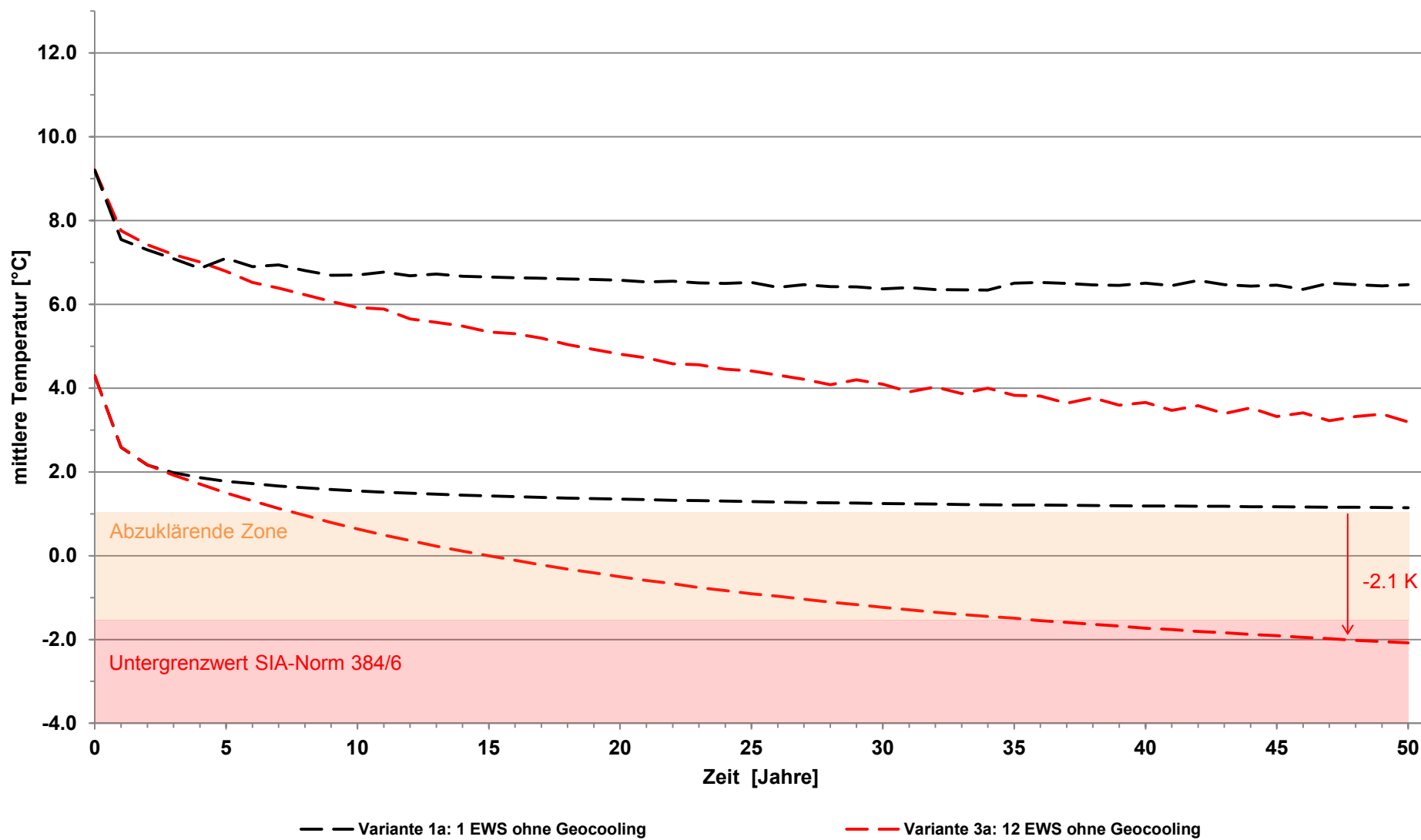
Szenarien mit 1 EWS - Einfluss Geocooling



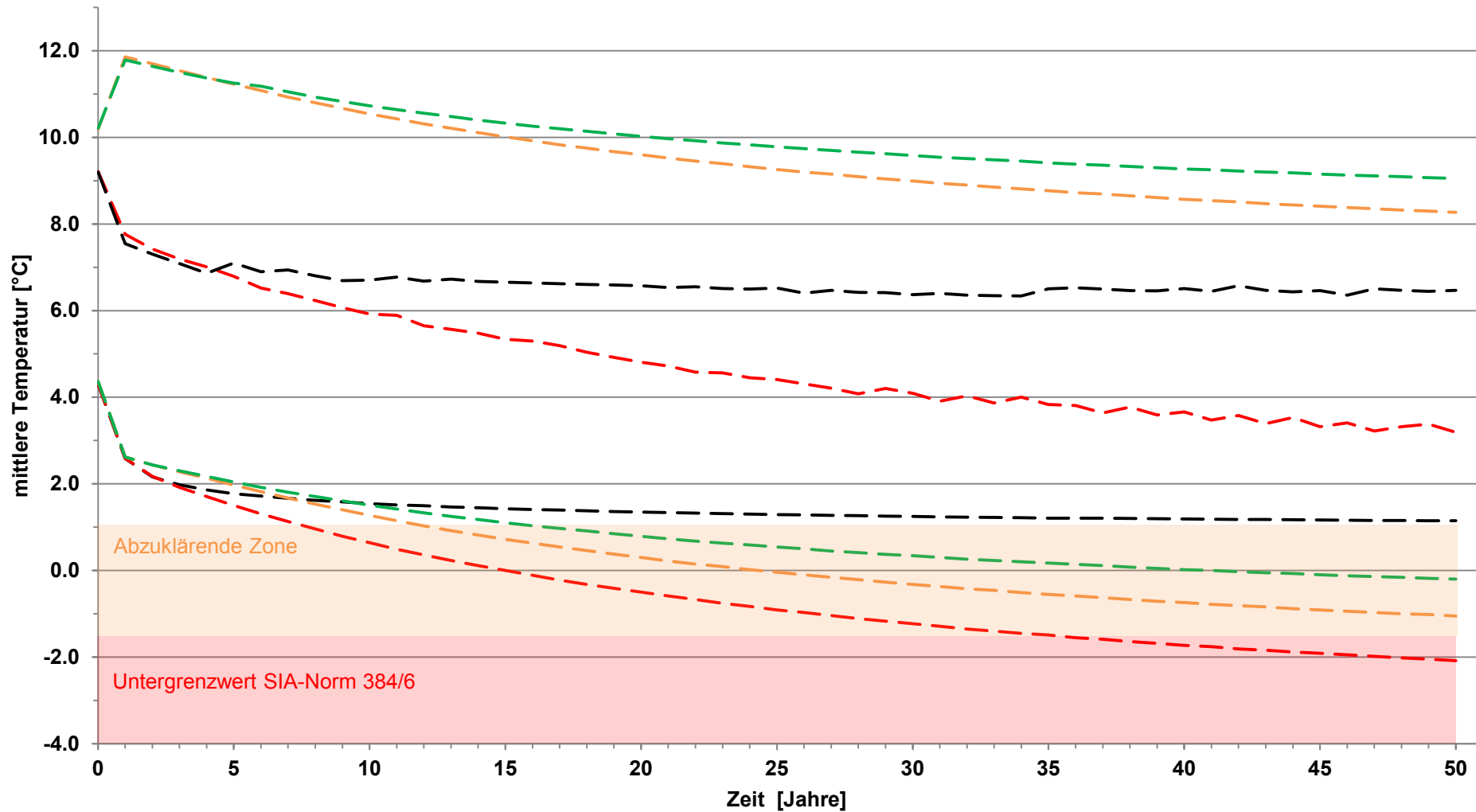
Szenarien mit 1 EWS - Einfluss Grundwasser



Szenarien mit 12 EWS (ohne Geocooling) - Einfluss Nachbarn



Szenarien mit 12 EWS (mit Geocooling) - Einfluss Nachbarn



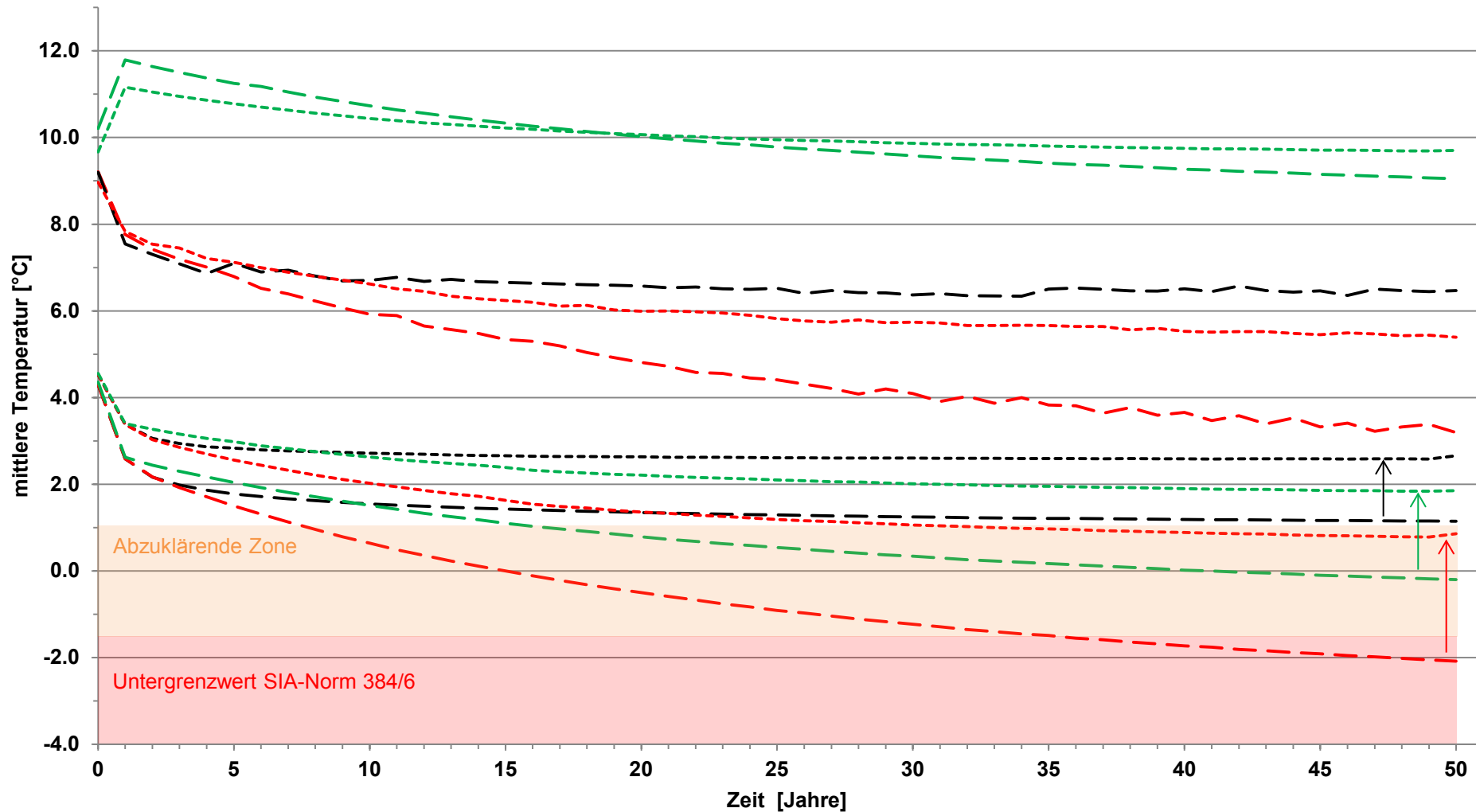
— Variante 1a: 1 EWS ohne Geocooling

— Variante 3b: 12 EWS mit Geocooling 1 EWS

— Variante 3a: 12 EWS ohne Geocooling

— Variante 3c: 12 EWS mit Geocooling 12 EWS

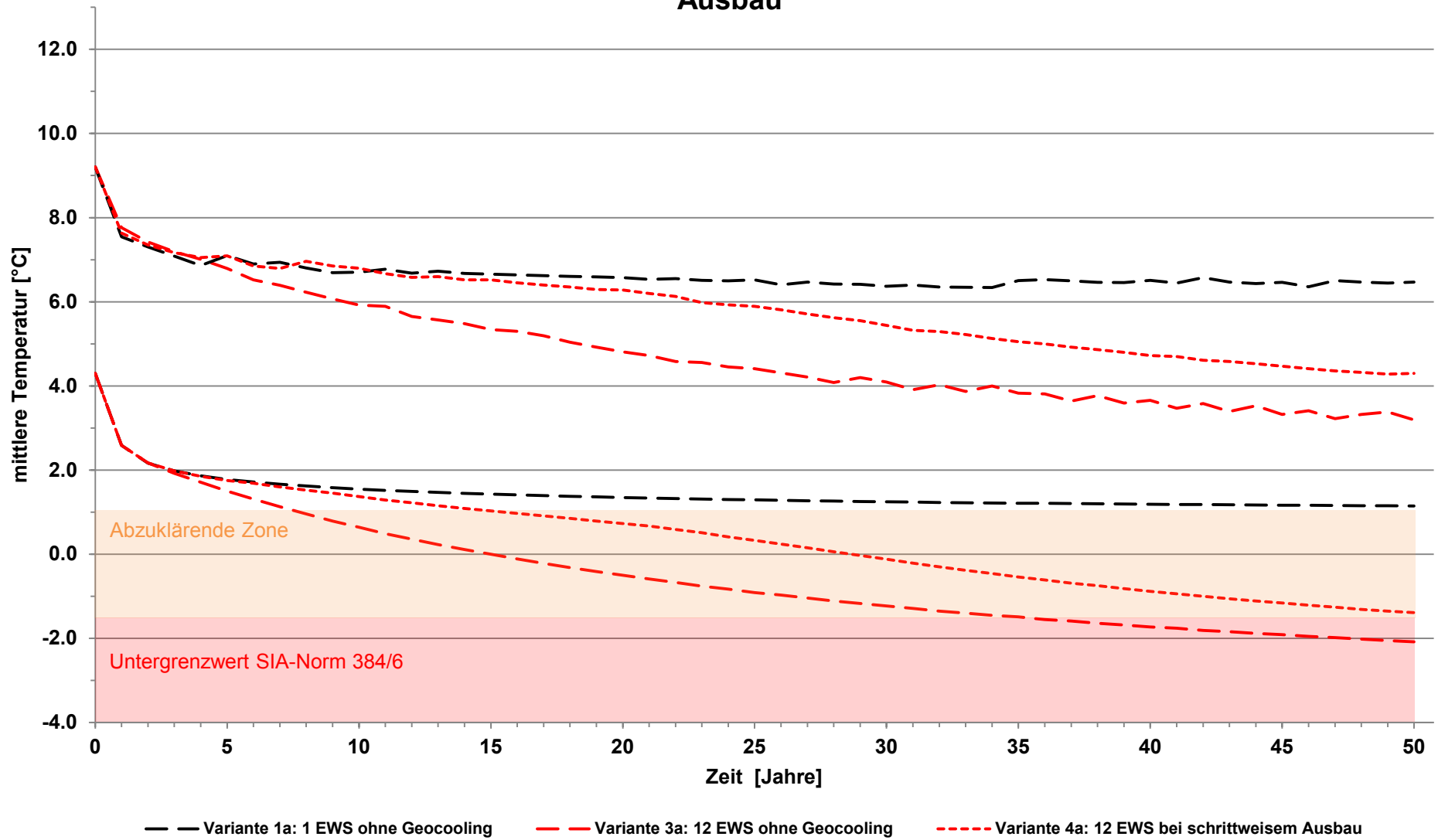
Szenarien mit 12 EWS (mit Geocooling) - Einfluss Nachbarn (mit GW-Strömung)



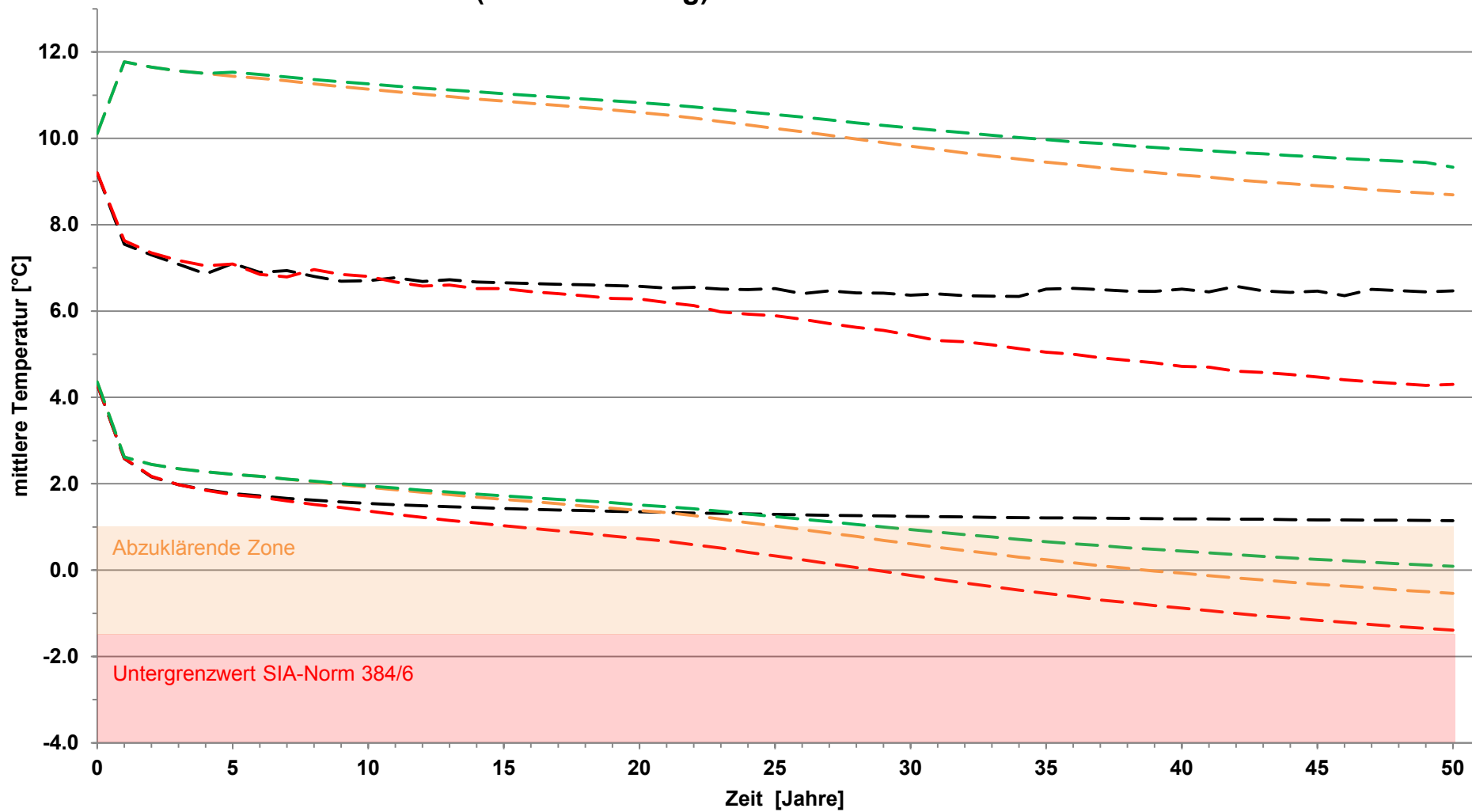
— Variante 1a: 1 EWS ohne Geocooling
 — Variante 3a: 12 EWS ohne Geocooling
 — Variante 3c: 12 EWS mit Geocooling 12 EWS

- - - Variante 1b: 1 EWS ohne Geocooling mit GW-Strömung
 - - - Variante 3b: 12 EWS ohne Geocooling mit GW-Strömung
 - - - Variante 3d: 12 EWS mit Geocooling 12 EWS mit GW-Strömung

Szenarien mit 12 EWS (ohne Geocooling) - Einfluss Nachbarn bei schrittweisem Ausbau



Szenarien mit 12 EWS (mit Geocooling) - Einfluss Nachbarn bei schrittweisem Ausbau



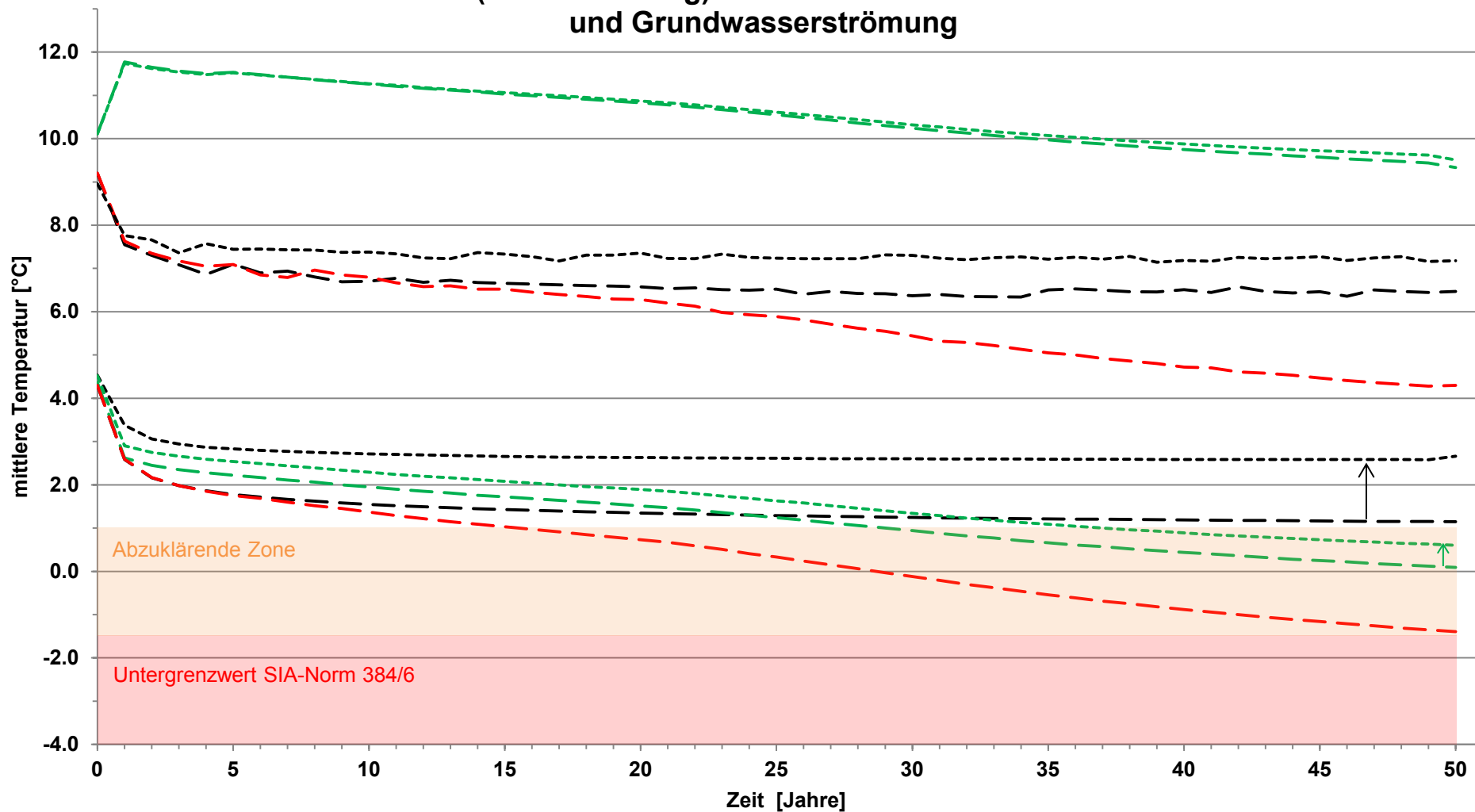
— Variante 1a: 1 EWS ohne Geocooling

— Variante 4b: 12 EWS bei schrittweisem Ausbau mit 2 EWS Geocooling

— Variante 4a: 12 EWS bei schrittweisem Ausbau - ohne Geocooling

— Variante 4c: 12 EWS bei schrittweisem Ausbau mit 12 EWS Geocooling

Szenarien mit 12 EWS (mit Geocooling) - Einfluss Nachbarn bei schrittweisem Ausbau und Grundwasserströmung



- Variante 1a: 1 EWS ohne Geocooling
- Variante 1b: 1 EWS ohne Geocooling mit GW-Strömung
- Variante 4c: 12 EWS bei schrittweisem Ausbau mit 12 EWS Geocooling
- Variante 4e: 12 EWS bei schrittweisem Ausbau mit Geocooling, mit GW-Strömung
- Variante 4a: 12 EWS bei schrittweisem Ausbau - ohne Geocooling