



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 31. Januar 2011

Betriebsverhalten des Geothermiespeichers "The Dolder Grand"

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Geothermie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Geowatt AG
Dohlenweg 28, 8050 Zürich
www.geowatt.ch

Autor(en):

Sarah Signorelli, signorelli@geowatt.ch
Ernst Rohner, rohner@geowatt.ch

BFE-Bereichsleiter: Gunter Siddiqi

BFE-Programmleiter: Rudolf Minder

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154'411 / 103'345

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist/sind ausschliesslich der/die Autor/en dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Der Um- und Erweiterungsbau des Hotels "The Dolder Grand" wurde mit einer komplett neuen Haustechnik versehen (Hotelbetrieb, Wellnessbereich), wobei der Heiz- und Kühlbedarf hauptsächlich durch einen geothermischen Energiespeicher gedeckt wird.

In einem ersten Projekt (BFE-Projekt Nr. 100'878) wurden Optimierungssimulationen der geothermischen Anlage durchgeführt, mit dem Ziel, eine energetisch effiziente und kostenoptimale Dimensionierung zu erreichen. Aufgrund dieser Ausführungsplanung wurde ein Geothermiespeicher mit 70 Sonden à 152 m gebaut. Eine Kurzfassung der Planung ist in diesem Bericht enthalten.

Ziel des vorliegenden Projekts war es, den Betrieb des Geothermiespeichers des Hotels "The Dolder Grand" in Zürich für das volle zweite Betriebsjahr zu analysieren. Eine direkte Gegenüberstellung der Grundlagen der Ausführungsplanung mit Messdaten des nun zweijährigen Betriebs erweist sich aus verschiedenen Gründen als schwierig. Zum einen wurden signifikant grössere Kältebezüge an das EWS-Feld angeschlossen als geplant, die zudem ein tieferes Temperaturniveau benötigen als für die Auslegung angenommen. Zum anderen kam es zu Messdatenverlusten, resp. -ausfällen, so dass der Betrieb der Anlage nur ungenügend abgebildet wurde.

Im Fokus standen daher die nachstehenden Fragestellungen:

- Entspricht das thermische Verhalten der Erdwärmesonden wie in der Planungsphase angegeben?
- Kann die Anlage auch unter dem geänderten Bewirtschaftungsregime (wesentlich höherer Kältebezug) nachhaltig betrieben werden?

Die Messdaten aus den Erdwärmesonden haben gezeigt, dass das thermische Verhalten bei Wärmeentzug als auch bei Wärmeeintrag (Kühlung) den berechneten Werten entspricht. Insbesondere der Vorerwärmungseffekt im Winterbetrieb, resp. der Vorkühlungseffekt im Sommerbetrieb wurde messtechnisch nachgewiesen. Die nun sehr kälte dominierte Nutzung bildet sich auch in relativ hohen EWS-Temperaturen während des gesamten Jahres ab.

Grundsätzlich hat sich das Betriebsschema der ausgeführten Anlage gegenüber der geplanten Anlage nicht geändert. Der nun erhöhte Kältebedarf und das teilweise notwendige tiefere Temperaturniveau der Kühlung bewirken eine grundsätzlich erhöhte Laufzeit der Kältemaschine. Es besteht jedoch noch Optimierungspotenzial. So liegt der Wärmeentzug im Winterbetrieb unterhalb des maximal möglichen Wertes. Kann der Wärmeentzug optimiert werden, könnte die Temperatur im Geothermiespeicher während der Heizperiode tiefer gesenkt werden, was die Laufzeit der Kältemaschine für den Kühlbetrieb verringern würde.

Grundsätzlich zeigt dieser Bericht, dass trotz der Änderungen in der Kälteabnehmerstruktur, der Geothermiespeicher nachhaltig bewirtschaftet werden kann.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Dimensionierung (Zusammenfassung BFE Projekt Nr. 100'878).....	6
2.1	Anlagekonzept	6
2.2	Eingabeparameter	10
2.2.1	Energiebilanz	10
2.2.2	Aufbau des Geothermiespeichers	11
2.2.3	Thermische Untergrundparameter.....	12
2.3	Optimierung	13
2.3.1	Standardauslegung	13
2.3.2	Optimierung des Erdwärmesondenabstandes	15
2.3.3	Isolation der horizontalen Leitungen.....	17
2.3.4	Oberflächennahe Isolation der Erdwärmesondenrohre.....	18
2.3.5	Serieschaltung und Optimierung der Sondenanzahl	20
2.4	Schlussfolgerung	24
3.	Betrieb	27
3.1	Änderungen im Gebäudekonzept – Erweiterung des Hotelkomplexes	27
3.2	Betriebsverhalten der Geothermiespeicheranlage.....	27
3.2.1	Messkonzept	27
3.2.2	Messwerte	31
3.3	Temperaturverhalten im Geothermiespeicher	36
3.3.1	Messkonzept	36
3.3.2	Initiale Messungen.....	38
3.3.3	Messungen während des Betriebes.....	41
3.4	Betriebserfahrung.....	44
4.	Schlussfolgerungen	45
5.	Berichte	47

1. Einleitung

Über mehrere Jahre wurde das alte Dolder Grand Hotel zum City Resort Hotel "The Dolder Grand" umgebaut. Das Ziel war dabei, höchsten Komfort und Luxus mit dem Einsatz neuester Technologien und minimiertem Energieverbrauch zu kombinieren. Das "The Dolder Grand" ist eines der grössten privaten Hotelprojekte der Schweiz.

Das "The Dolder Grand" wurde vom Londoner Architekturbüro Forster & Partners grundlegend neu konzipiert. Vom alten Dolder blieb lediglich der Originalbau von 1896 erhalten. Alle später zugefügten Bauten wurden abgerissen und durch moderne Neubauten ergänzt.

Der Um- und Erweiterungsbau des "The Dolder Grand" wurde mit einer komplett neuen Haustechnik versehen (Hotelbetrieb, Wellnessbereich), wobei der Heiz- und Kühlbedarf hauptsächlich durch einen geothermischen Energiespeicher gedeckt wird. Im Winter wird der Energiespeicher entladen und dient dabei als Energiequelle für die Wärmepumpe. Diese erzeugt die notwendigen Betriebstemperaturen für die Warmwasserbereitung und die Heizung. Von Frühling bis Herbst wird das Hotel teilweise über den geothermischen Energiespeicher gekühlt.

Das Hotel "The Dolder Grand" wurde im Frühling 2008 wieder eröffnet. Es verfügt über 173 luxuriöse Zimmer und Suiten, erlesene Gastronomie, ein Spa-Bereich auf 4'000 m² sowie grosszügige Bankett- und Seminarräumlichkeiten mit einem Festsaal.



Figur 1: Das neue "The Dolder Grand".

Im Rahmen des BFE-Projekts Nr. 100'878 wurde der Geothermiespeicher dimensioniert. Im Zwischenbericht von 2004 wurden die Resultate dieser ersten Projektphase vorgestellt. Es wurden verschiedene Szenarien berechnet und das Erdwärmesondefeld bezüglich Nachhaltigkeit und Kosten optimiert. Eine Zusammenfassung ist in Kapitel 2 zu finden. Basierend auf den Resultaten aus dieser ersten Projektphase wurden insgesamt 70 Erdwärmesonden à 152 m gebohrt.

Während des Baus wurde entschieden, das Hotel um verschiedene Räumlichkeiten zu erweitern. Dadurch ergaben sich grosse Leistungs- und Energieänderungen gegenüber der Planungsphase. Im vorliegenden Nachfolgeprojekt wird das Betriebsverhalten des realisierten Geothermiespeichers, vor allem auch unter den geänderten Rahmenbedingungen, untersucht. Zum einen wird dabei auf Messdaten des Betriebes und aus dem Geothermiespeicher und zum anderen auf die Betriebserfahrung des Energieplaners und des Technischen Personals des Hotels zurückgegriffen.

Es war geplant, dass ab Inbetriebnahme des Hotels die Vor- und Rücklauftemperaturen des gesamten Erdwärmesondefeldes sowie die Temperaturen von 2 in Serie geschalteten Erdwärmesonden beim Ein- und Austritt in den Verteiler sowie in verschiedenen Tiefen aufgezeichnet werden. Weiter sollte der Durchfluss, die Durchflussmenge und die Energiemenge registriert werden. Die Messfühler wurden ins Haustechnik-Leitsystem integriert. Die Daten des zweiten vollen Betriebsjahres von Frühling 2009 bis Frühling 2010 sollte analysiert und so die Funktionsweise der Anlage dokumentiert werden. Leider traten Pannen beim Leitsystem auf, so dass die Daten des ersten Halbjahres fehlerhaft waren. Im Verlaufe der Arbeiten am Leitsystem gingen leider die Daten betreffend des Erdwärmesondefeldes verloren und die Messwerte konnten nicht mehr abgerufen werden.

Neben den Messungen der Betriebsparameter wurden zusätzlich in zwei noch zugänglichen Bohrungen Temperaturprofilmessungen sowie in zwei Bohrungen, welche mit faseroptischen Kabel ausgerüstet sind, je ein Temperaturprofil während des Sommers- und des Winterbetriebes durchgeführt. Diese Messungen wurden mit den Profilen der ungestörten Temperaturverteilung im Untergrund vor Inbetriebnahme verglichen. Damit sind trotz dem Verlust der Betriebsdaten, Rückschlüsse auf das Temperaturverhalten des Geothermiespeichers möglich.

2. Dimensionierung (Zusammenfassung BFE Projekt Nr. 100'878)

Im Rahmen des BFE-Projekts Nr. 100'878 wurde die Dimensionierung des Geothermiespeichers durchgeführt, ausgehend vom damals bekannten Energiebedarf und vom geplanten Anlagekonzept. Es wurden verschiedene Optimierungsberechnungen bezüglich Effizienz und Kosten durchgeführt. Die wichtigsten Resultate sind in diesem Kapitel zusammengestellt.

2.1 Anlagekonzept

Für die Dimensionierung des Geothermiespeichers wurde von folgender Anlage ausgegangen: Der Kern besteht aus einer gasbetriebenen Absorptionswärmepumpe, die sowohl für Heiz- wie Kühlaufgaben eingesetzt wird, und Energie aus einem Erdwärmesondenfeld bezieht, beziehungsweise abgibt. Zur Spitzendeckung sind ein fossil beheizter Kessel und eine Kältemaschine nachgeschaltet. In Figur 1 und Figur 2 ist das Anlagekonzept dargestellt, wie es in der Planungsphase vorgesehen war.

Die Planung sah vor, dass die Wärmepumpe wärmegeführt betrieben wird. Dadurch wird das Sondenfeld über den Winter abgekühlt und ein grosser Teil der Kühlung kann so im Sommer praktisch zum Nulltarif direkt über das Sondenfeld erfolgen (Geocooling). Durch die Kühlung wird das Sondenfeld seinerseits über den Sommer wieder aufgewärmt. Die Kühlenergie ist ein Abfallprodukt der Wärmeproduktion und Kühlen regeneriert den Geothermiespeicher. Die Effizienz der Wärmepumpe wird nahezu verdoppelt, da die Kühlenergie ebenfalls genutzt wird. Bei gleichem elektrischem Aufwand wird also gekühlt und geheizt.

Die Erdwärmesonden werden mit Wasser betrieben. Es wird direkt auf den Verdampfer der Wärmepumpe gefahren. Die Kälteverbraucher (wie Klimageräte in den Hotelzimmern) sind ebenfalls direkt, ohne hydraulische Entkoppelung, angeschlossen. Die direkte Anbindung erlaubt eine Kühlung der Klimageräte direkt ab Erdwärmesondenfeld und sichert eine effiziente Nutzung der Temperaturniveaus.

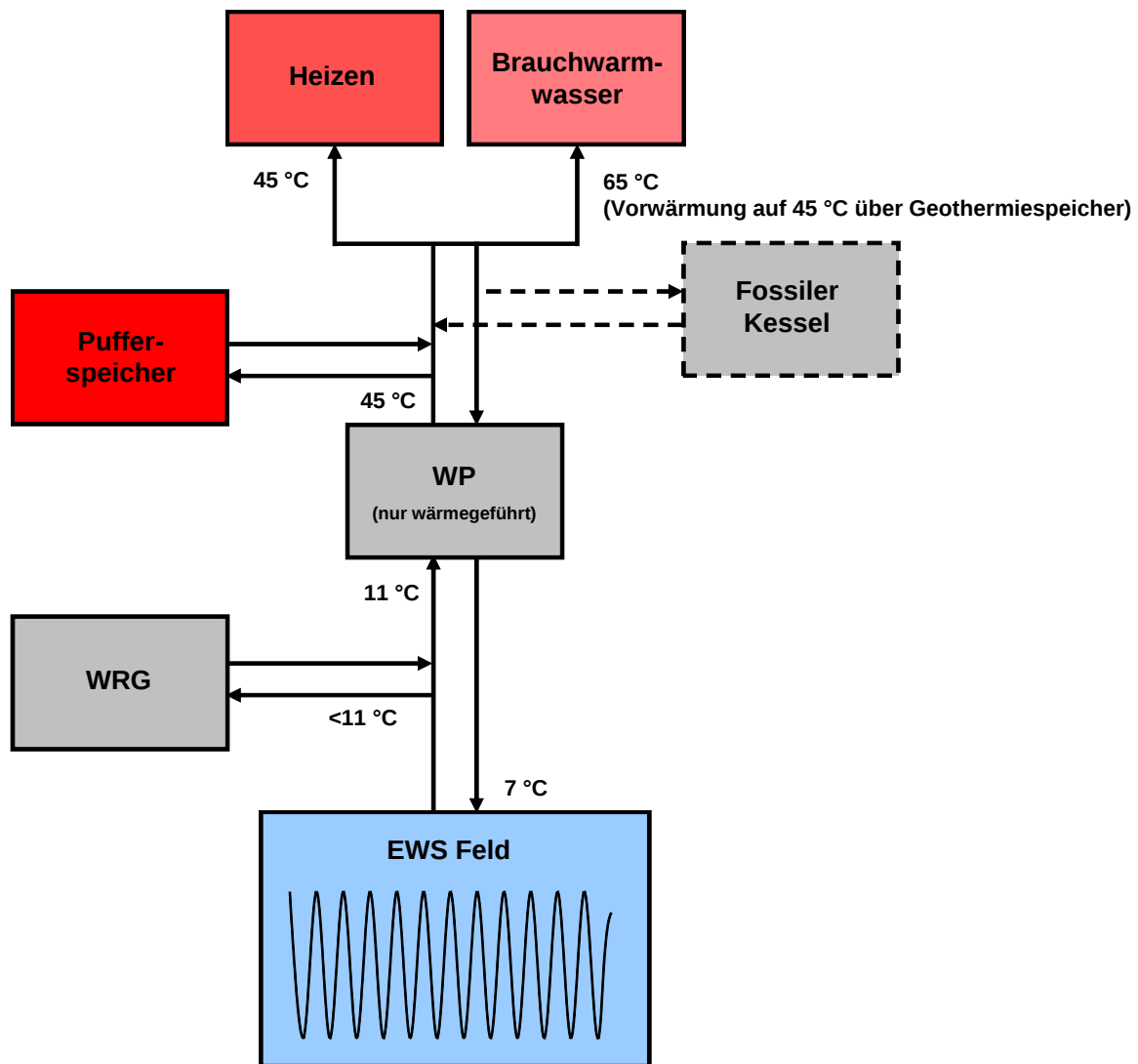
Bei gleichzeitigem Kälte- und Wärmebedarf findet die Energieverschiebung direkt zwischen den Verbrauchern statt. Kann die anfallende Kühl- oder Wärmeenergie nicht gleichzeitig von einem Verbraucher verwendet werden, erlaubt der Geothermiespeicher die saisonale Zwischenspeicherung.

Im Winter (Monate mit negativer Energiebilanz in Tabelle 1) wird der Energiespeicher entladen und der Heizkreis über die Absorptionswärmepumpe auf Betriebstemperatur für die Warmwasservorwärmung und Heizung gebracht. Die Absorptionswärmepumpe arbeitet im Heizfall mit einer fixen Vorlauftemperatur (Austrittstemperatur aus dem Geothermiespeicher)

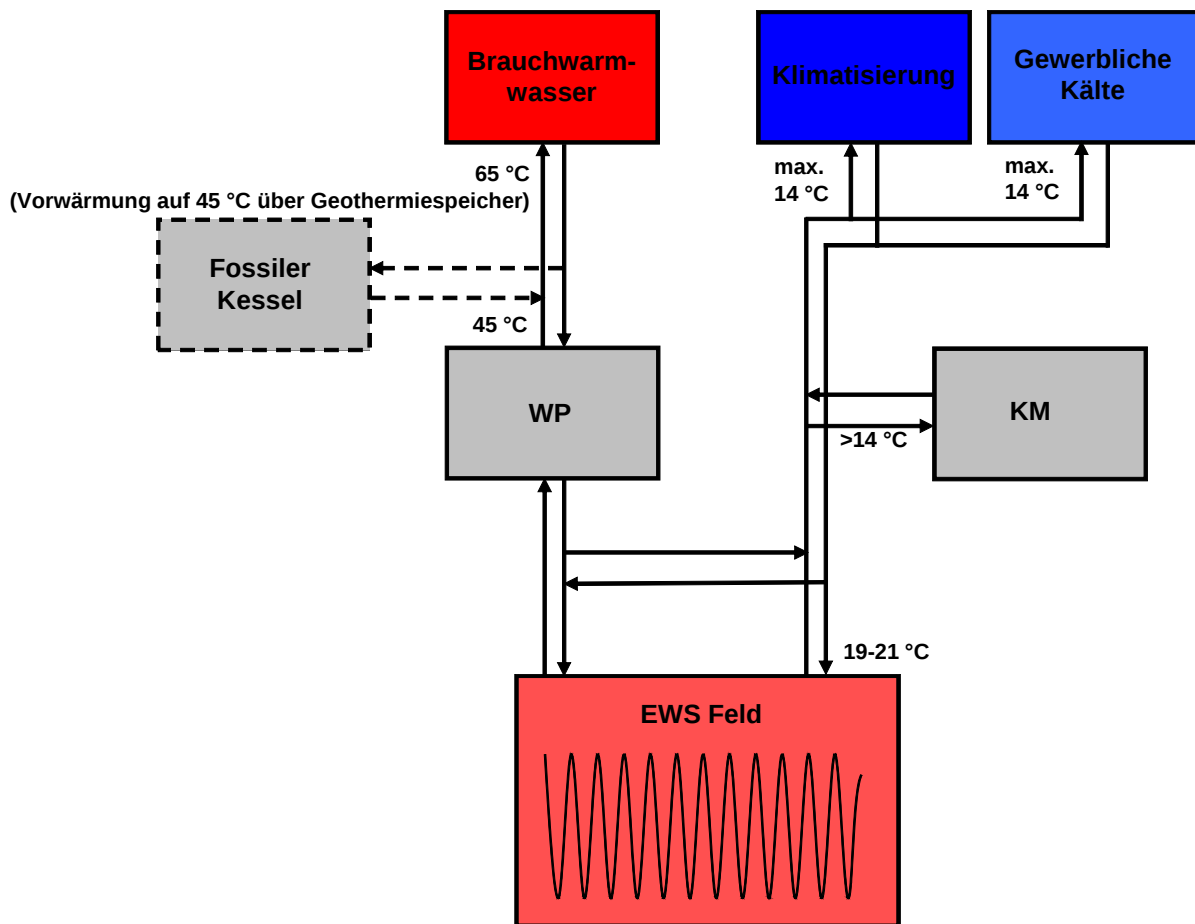
von 11 °C. Um diese Temperatur sicherzustellen, wird das Sondenfluid aus dem Geothermiespeicher bei Bedarf über eine Abwasser-Wärmerückgewinnung (WRG) nachgewärmt, wobei ein spezieller Plattentaucher verwendet wird. Die Wärmepumpe arbeitet mit einer Temperaturdifferenz ΔT von 4 K. Daraus ergibt sich eine fixe Rücklauftemperatur von 7 °C.

Ab Frühling bis Herbst wird das Hotel über den geothermischen Energiespeicher gekühlt. Im Kühlfall (Monate mit positiver Energiebilanz in Tabelle 1) benötigen die gewerbliche Kühlung, die Umluft- und die Luftkühlung eine maximale Vorlauftemperatur von 14 °C. Daraus ergeben sich Eintrittstemperaturen in den Geothermiespeicher von 19 bis 21 °C. Wenn immer möglich wird direkt über den Geothermiespeicher gekühlt. Wenn die 14°C am Austritt des Geothermiespeichers überschritten werden, stehen Kältemaschinen zur Nachkühlung (speziell für die Luftentfeuchtung) zur Verfügung. Die Vorwärmung des Trinkwassers erfolgt ebenfalls über die Absorptionswärmepumpe; das heisst, über das Erdwärmesondenfeld. Die dabei entstehende Kälteleistung unterstützt die Gebäudekühlung.

Im Vergleich mit einer üblichen Erdwärmesondenanlage für reine Heizzwecke (ΔT ca. 3 K) arbeitet die Anlage des "The Dolder Grand" vor allem im Sommer mit grösseren Unterschieden zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur. Dies kann eine stärkere Beeinflussung zwischen Erdwärmesondenvorlauf und -rücklauf zur Folge haben, was im Kapitel 2.3.4 untersucht wird.



Figur 2: Betriebsschema für den Heizfall, wie es in der Planungsphase angenommen wurde. In der Ausführungsphase erfolgten verschiedene Anpassungen (vergleiche Kapitel 3.1).



Figur 3: Betriebsschema für den Kühlfall, wie es in der Planungsphase angenommen wurde. In der Ausführungsphase erfolgten verschiedene Anpassungen (vergleiche Kapitel 3.1).

2.2 Eingabeparameter

2.2.1 Energiebilanz

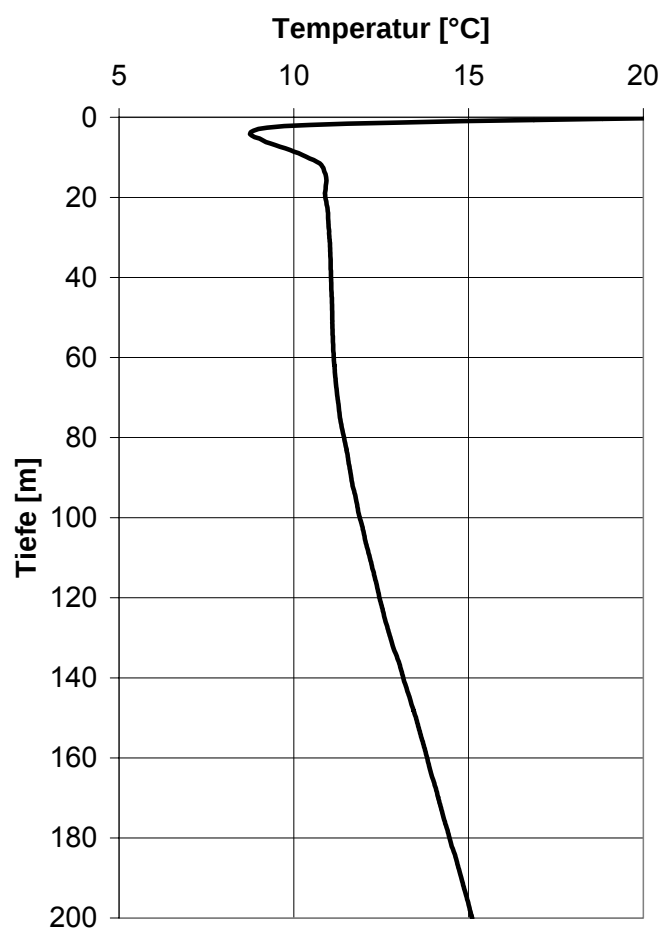
Tabelle 1 fasst die energetischen Randbedingungen zusammen, die von der Firma Ernst Basler + Partner AG erarbeitet wurden, sowie die Temperaturrandbedingungen für diesen speziellen Anlageaufbau (siehe auch Kapitel 2.1). Das Ausgangskonzept geht von einer sehr ausgeglichenen Energiebilanz zwischen Wärme- und Kältebedarf aus. Es wird etwas mehr Wärme als Kälte benötigt. Im Endausbau benötigt der Hotelkomplex jedoch deutlich mehr Kälteenergie als Heizenergie, da während der Bauphase das Hotel um zusätzliche Gebäude erweitert wurde (vergl. Kapitel 3.1).

Tabelle 1: Energiebilanz des Geothermiespeichers, Vorlauf- und Rücklauftemperatur. Die Vorlauftemperatur entspricht der Austrittstemperatur aus dem Geothermiespeicher, die gebraucht wird, um die Energiebilanz zu decken. Die Rücklauftemperatur entspricht der Eintrittstemperatur in den Geothermiespeicher. Wenn die Vorlauftemperatur durch das Erdwärmesondenfeld nicht erreicht wird, kommen WRG bzw. Kältemaschinen zum Einsatz.

	Wärmeentzug [MWh]	Kälteentzug [MWh]	Bilanz [MWh]	Vorlauf [°C]	Rücklauf [°C]	ΔT [K]
Januar	187	38	-149	11	7	-4
Februar	161	41	-120	11	7	-4
März	120	58	-62	11	7	-4
April	89	109	20	14	19	5
Mai	67	129	62	14	19	5
Juni	49	155	106	14	20	6
Juli	49	192	143	14	21	7
August	53	175	122	14	21	7
September	80	109	29	14	20	6
Oktober	107	67	-40	11	7	-4
November	137	41	-96	11	7	-4
Dezember	151	38	-113	11	7	-4
Total	1250	1152				

2.2.3 Thermische Untergrundparameter

In einer 200 m tiefen Testerdwärmesonde wurde die ungestörte Untergrundtemperatur gemessen und mittels eines Thermischen Response Tests die mittlere Wärmeleitfähigkeit im Boden bestimmt. Beide Messwerte sind Schlüsselparameter für die Dimensionierung von Geothermiespeichern. Das Temperaturprofil ist in Figur 5 dargestellt. Am Sondenfuss auf 200 m beträgt die Temperatur 15.2 °C. Die Testbohrung befindet sich in einem Wald ca. 20 m höher als der gebaute Geothermiespeicher, weshalb die Temperaturen ca. 0.5 K tiefer liegen als im Geothermiespeicher (siehe Figur 25). Die Wärmeleitfähigkeit ist zusammen mit den restlichen thermischen Parametern in Tabelle 2 zusammengestellt.



Figur 5: Ungestörtes Temperaturprofil entlang der 200 m tiefen Testbohrung Dolder.

Tabelle 2: Materialparameter.

Untergrund

Wärmeleitfähigkeit	$2.3 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmekapazität	$2.40 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}\text{K}^{-1}$

Fluid (Wasser)

Wärmeleitfähigkeit	$0.6 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmekapazität	$4.18 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}\text{K}^{-1}$

Rohre

Wärmeleitfähigkeit	$0.42 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmekapazität	$1.62 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}\text{K}^{-1}$

Hinterfüllung

Wärmeleitfähigkeit	$0.8 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmekapazität	$2.00 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}\text{K}^{-1}$

Bodenplatte

Wärmeleitfähigkeit	$1.8 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmekapazität	$2.64 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}\text{K}^{-1}$

Kiesbeton

Wärmeleitfähigkeit	$1.28 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmekapazität	$1.98 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}\text{K}^{-1}$

Isolationen

Wärmeleitfähigkeit	$0.04 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmekapazität	$0.05 \times 10^6 \text{ J m}^{-3}\text{K}^{-1}$

2.3 Optimierung

Dieses Kapitel fasst die verschiedenen Optimierungsberechnungen für die Dimensionierung des Geothermiespeichers zusammen. Gesucht ist die Sondenkonfiguration, deren Erdwärmesondenaustrittstemperaturen möglichst geringe Unterschiede zu den benötigten Betriebstemperaturen aufweisen (11 °C im Winter, 14 °C im Sommer). Wenn das Erdwärmesondenfeld diese Temperaturen nicht erbringen kann, müssen die WRG bzw. die Kältemaschinen das Manko decken. Ziel dieser Optimierungssimulationen ist, deren Einsatz zu minimieren.

2.3.1 Standardauslegung

Für die Festlegung des Sondenlayouts wurde zum einen die Energiebilanz, aber auch das mögliche Platzangebot berücksichtigt. Werden die EWS tiefer gebohrt, kann mehr Energie

auf einem höheren Temperaturniveau entzogen werden, dies verringert jedoch die Kühlleistung. Um eine möglichst hohe Kühlleistung auf tiefem Temperaturniveau zu erhalten, wären kurze Erdwärmesonden von Vorteil. Dies bedeutet aber einen grösseren Platzbedarf und höhere Verrohrungskosten. Als Optimum haben sich 81 Erdwärmesonden (9 x 9 Raster) à 127 m ergeben (vergleiche Figur 4). Dieses Sondenlayout wird als Standardlayout für die nachfolgenden Optimierungen verwendet.

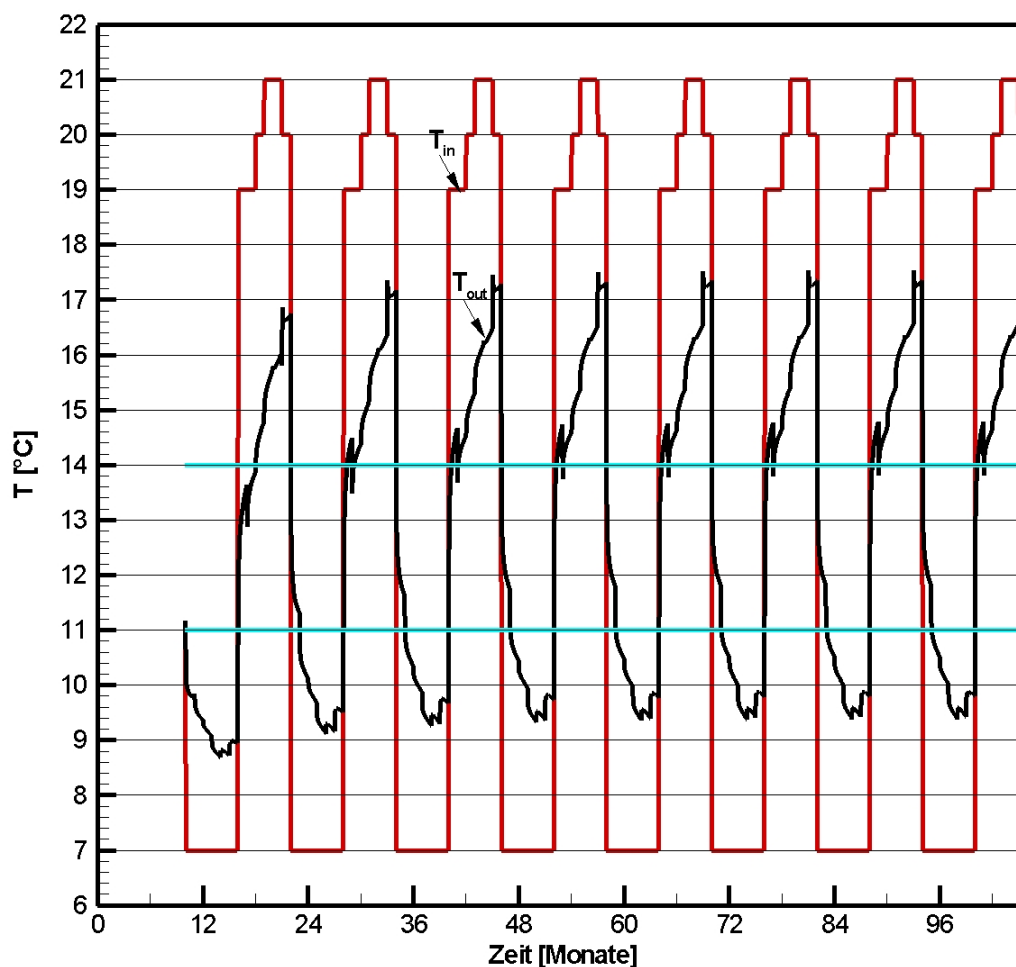
Figur 6 stellt den Verlauf der Eintrittstemperatur in den Geothermiespeicher (T_{in}) bzw. der Austritt (T_{out}) aus dem Speicher über 8 Betriebsjahre dar. Die Eintrittstemperatur ist eine fixe Randbedingung, die durch die Arbeitstemperaturen der Absorptionswärmepumpe, respektive durch die Rücklauftemperaturen der Klimaanlage im Sommer, bestimmt ist (siehe Tabelle 1). Das eigentliche Resultat der Simulation ist die Austrittstemperatur, die im Winter bzw. Sommer möglichst nahe an 11 bzw. 14 °C kommen sollte.

Figur 6 zeigt, dass die Austrittstemperatur T_{out} anfänglich leicht zunimmt, nach ca. 3 Betriebsjahren aber ein konstantes Verhalten erreicht. Die Peaks im Temperaturverlauf, die vor allem im April und September sichtbar sind, sind auf den kleineren Energiebedarf in diesen Monaten zurückzuführen (siehe Tabelle 1).

Mit dem hier simulierten Sondenlayout (81 Erdwärmesonden à 127 m) werden folgende Ergebnisse erreicht:

- Im Winter deckt der Geothermiespeicher im Durchschnitt ca. 70 % des Leistungsbedarfs. Der übrige Bedarf soll durch die WRG geleistet werden.
- Im Sommer kann der Energiebedarf nur im April und Mai des ersten Betriebsjahres ausschliesslich durch Geocooling gedeckt werden. Im Durchschnitt wird jedoch mehr als 70 % durch das Erdwärmesondenfeld gedeckt. Wie erwartet, wird bei sehr heisser Witterung der Einsatz einer Kältemaschine notwendig sein. Das Erdwärmesondenfeld wird dabei als Vorkühlung benutzt.

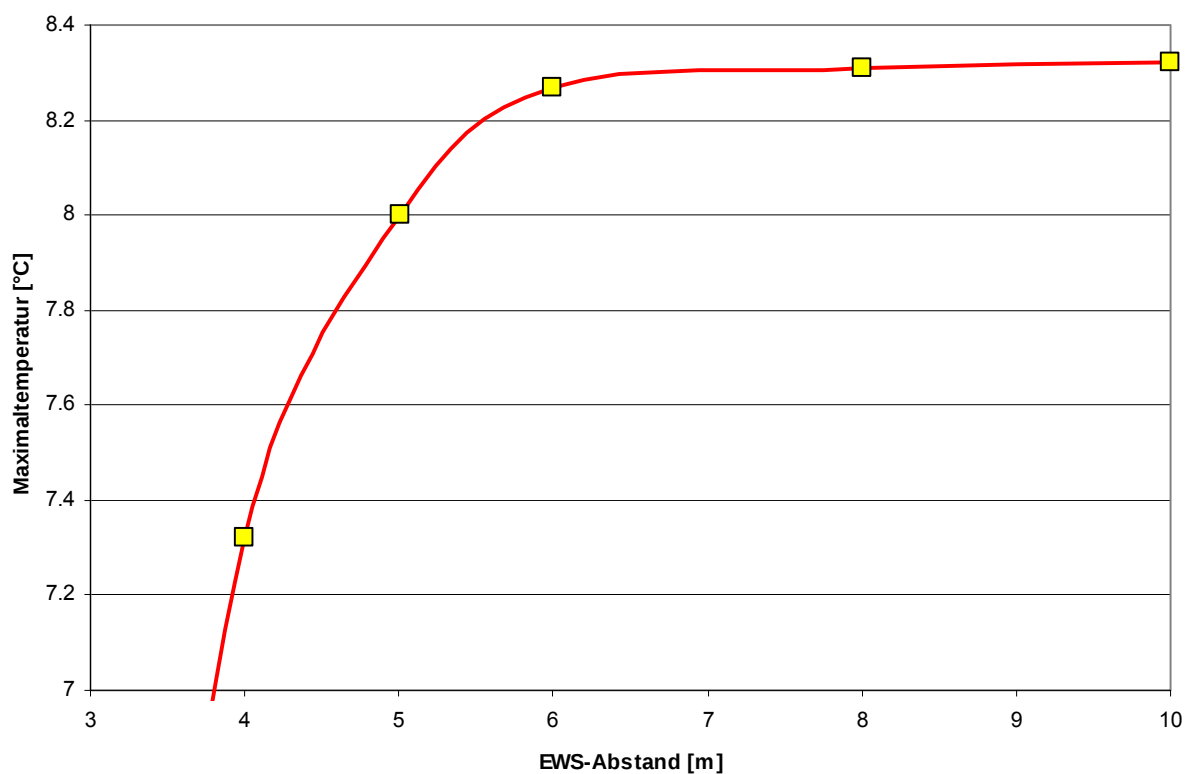
In den nachfolgenden Untersuchungen wird versucht, diese Ergebnisse zu verbessern und der Einsatz von WRG und Kältemaschine zu verkleinern.



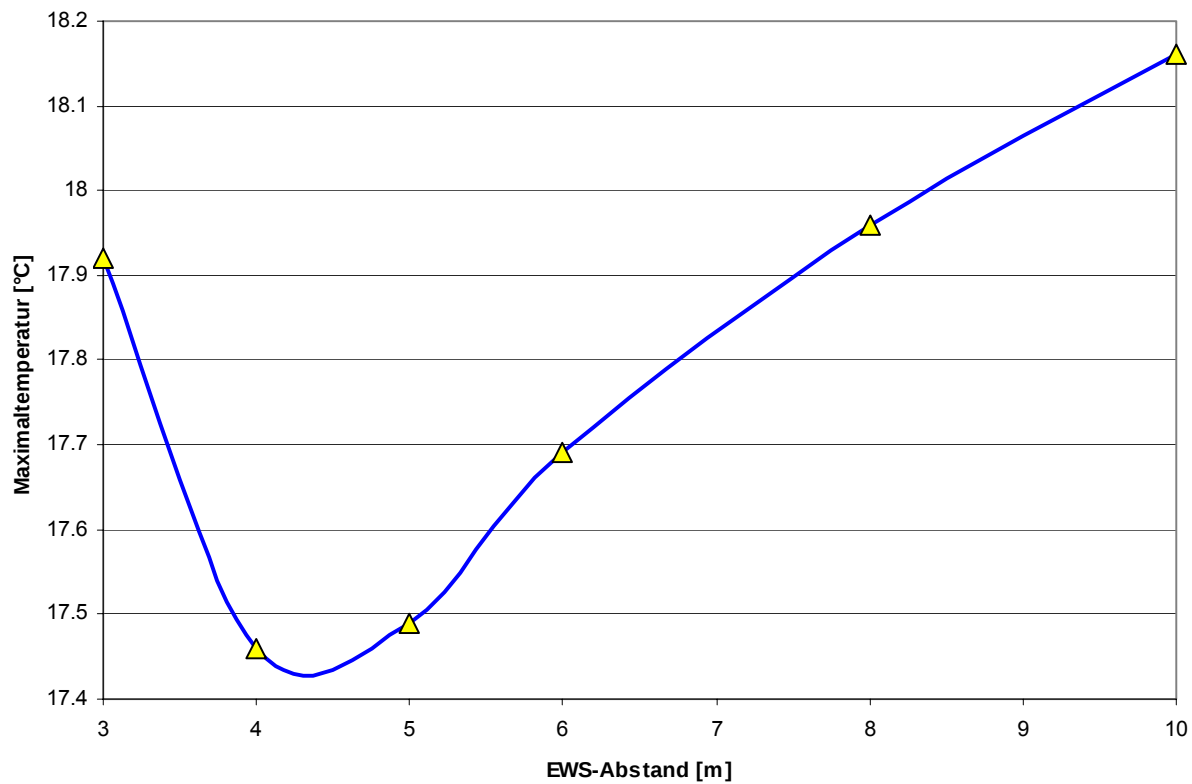
Figur 6: Verlauf der berechneten Eintrittstemperatur in den Geothermiespeicher (T_{in}) bzw. der Austritt (T_{out}) aus dem Speicher über 8 Betriebsjahre für die Standardauslegung mit 81 Sonden à 127 m. Die Eintrittstemperatur ist eine fixe Randbedingung, die durch die Arbeitstemperaturen der Absorptionswärmepumpe, respektive durch die Rücklauftemperaturen der Klimaanlage im Sommer bestimmt, ist (siehe Tabelle 1). Die Simulation startet im Oktober des ersten Jahres.

2.3.2 Optimierung des Erdwärmesondenabstandes

Beim Heizen ist ein möglichst grosser Abstand der Erdwärmesonden von Vorteil. Wie Figur 7 zeigt, sind aber bei der vorliegenden Anlage im Heizfall ab 6 m Abstand nur noch geringe Verbesserungen sichtbar. Dies ergibt sich durch den kombinierten Kühl- Heizbetrieb. Für den Kühlbetrieb liegt der optimale Abstand zwischen 4 bis 5 m Abstand (siehe Figur 8). Gemäss kantonaler Bewilligung für das Projekt sollten 5 m nicht unterschritten werden. Bohrtechnisch kann ein sehr enger Abstand ebenfalls zu Schwierigkeiten führen. Da für die Anlage das Kühlen eine höhere Priorität hat als das Heizen und aus bohrtechnischen Gründen, wurde ein Sondenabstand von 5 m festgelegt.



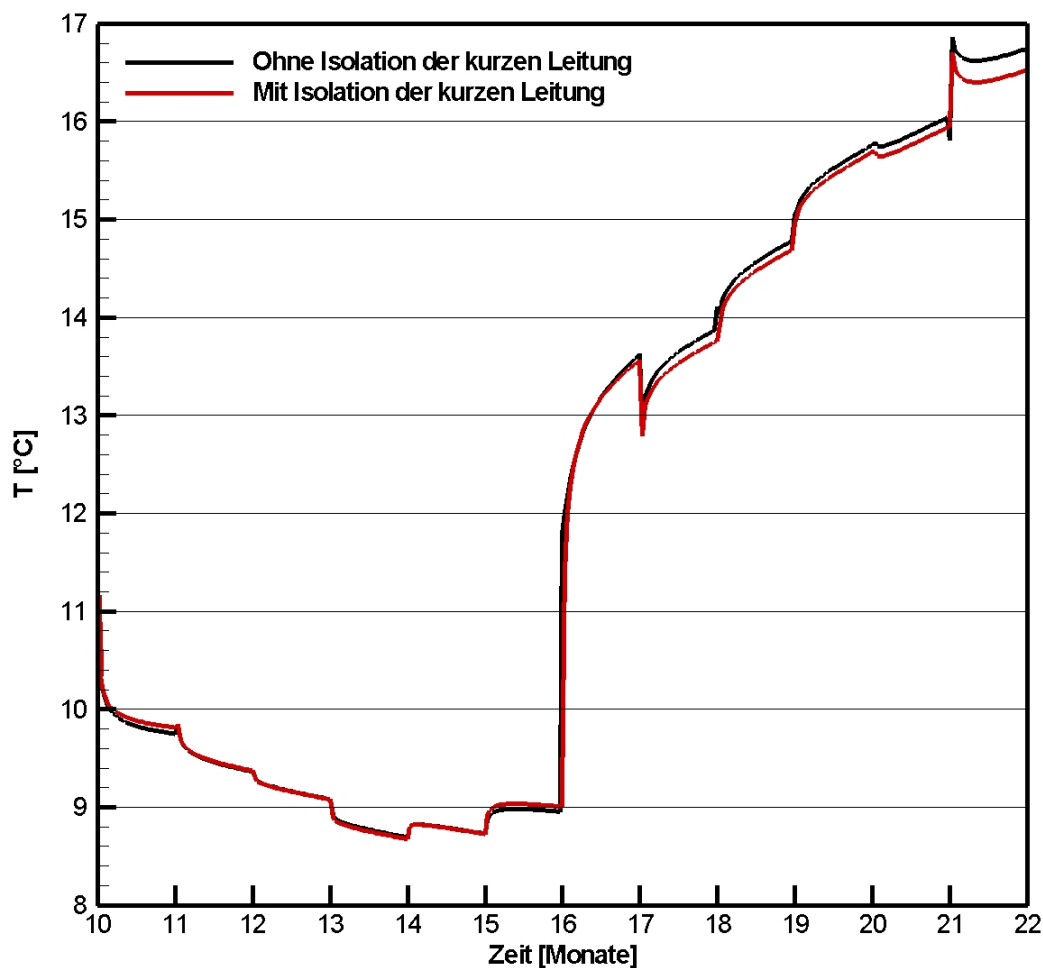
Figur 7: Erdwärmesondenabstand für Maximaltemperatur im Heizfall.



Figur 8: Erdwärmesondenabstand für Minimaltemperatur im Kühlfall.

2.3.3 Isolation der horizontalen Leitungen

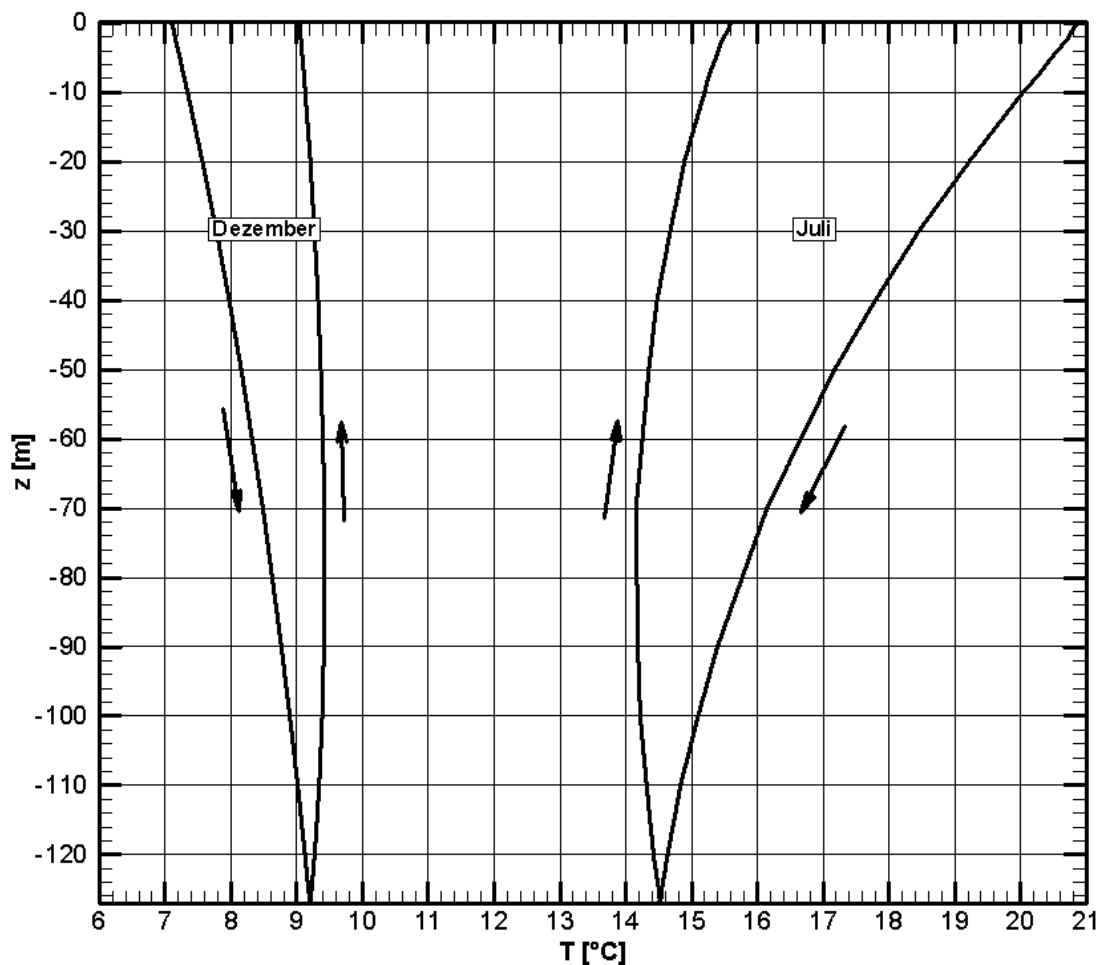
In diesem Optimierungsschritt wurde der Effekt von isolierten Zuleitungen aus dem Geothermiespeicher untersucht. Figur 9 vergleicht den Temperaturverlauf im ersten Betriebsjahr für den Fall mit isolierten Zuleitungen und für den Standardfall aus Kapitel 2.3.2. Im Winter ergibt sich durch die Isolation praktisch keine Verbesserung. Im Sommer sind die Temperaturen geringfügig tiefer. Nur im September (ganz rechts) ergibt die Isolation der Zuleitung eine erkennbare Verbesserung. Die Kosten für die Isolation sind im Verhältnis zur Wirkung zu hoch.



Figur 9: Vergleich der Austrittstemperatur aus dem Geothermiespeicher im ersten Betriebsjahr mit und ohne Isolation der Zuleitungen (Standard-Sondenlayout von 81 Erdwärmesonden à 127 m). Die Simulation startet im Oktober.

2.3.4 Oberflächennahe Isolation der Erdwärmesondenrohre

Wegen des grossen Unterschiedes zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur in den Erdwärmesonden (siehe Tabelle 1), entsteht eine relativ grosse thermische Beeinflussung zwischen Vorlauf- und Rücklaufrohren. Figur 10 stellt den Temperaturverlauf entlang der Erdwärmesonde im Dezember und Juli dar. Im Sommer erwärmen die wärmeren Vorlaufrohre die Rücklaufrohre aus dem Geothermiespeicher um fast 1.5 K. Im Winterbetrieb ist die gegenseitige Beeinflussung deutlich geringer.

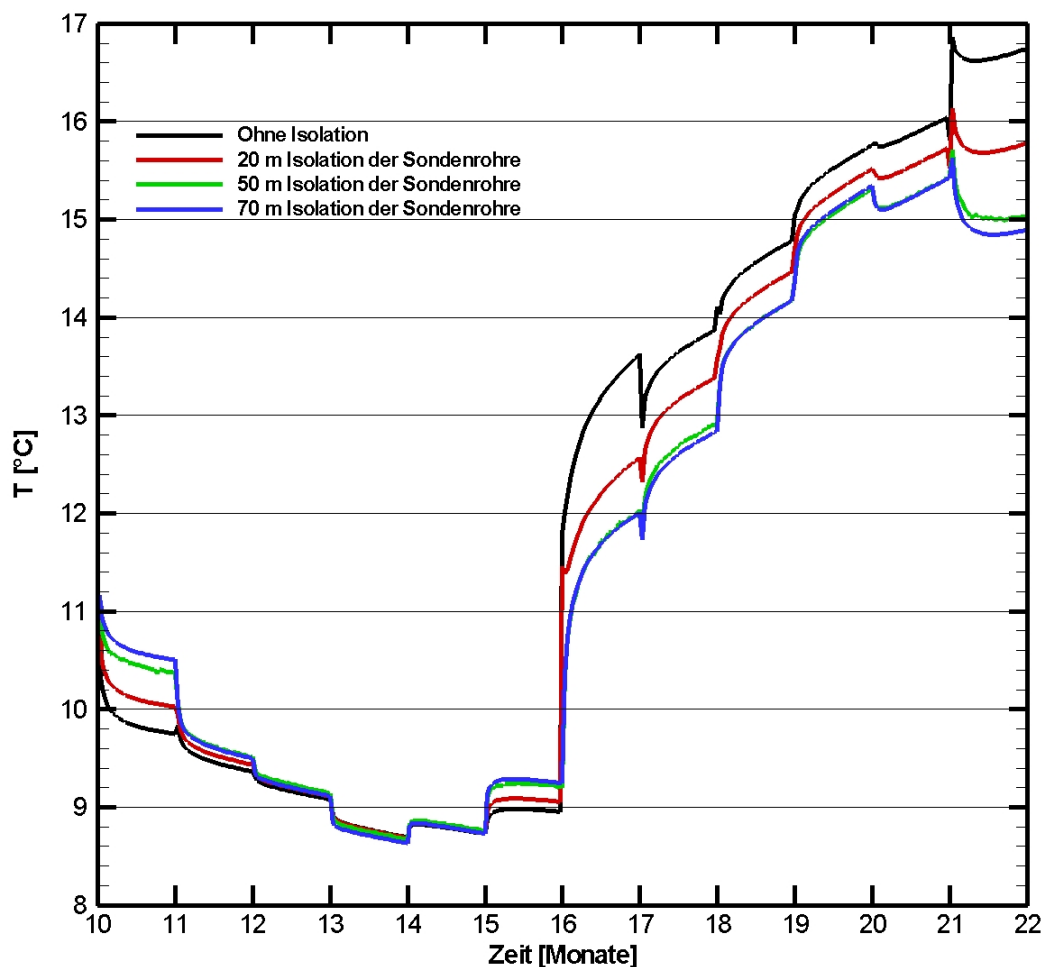


Figur 10: Vertikales Temperaturprofil entlang der Erdwärmesonde im Dezember und im Juli des ersten Betriebsjahres bei nicht isolierten Erdwärmesondenrohren. Die Pfeile zeigen die Durchflussrichtung.

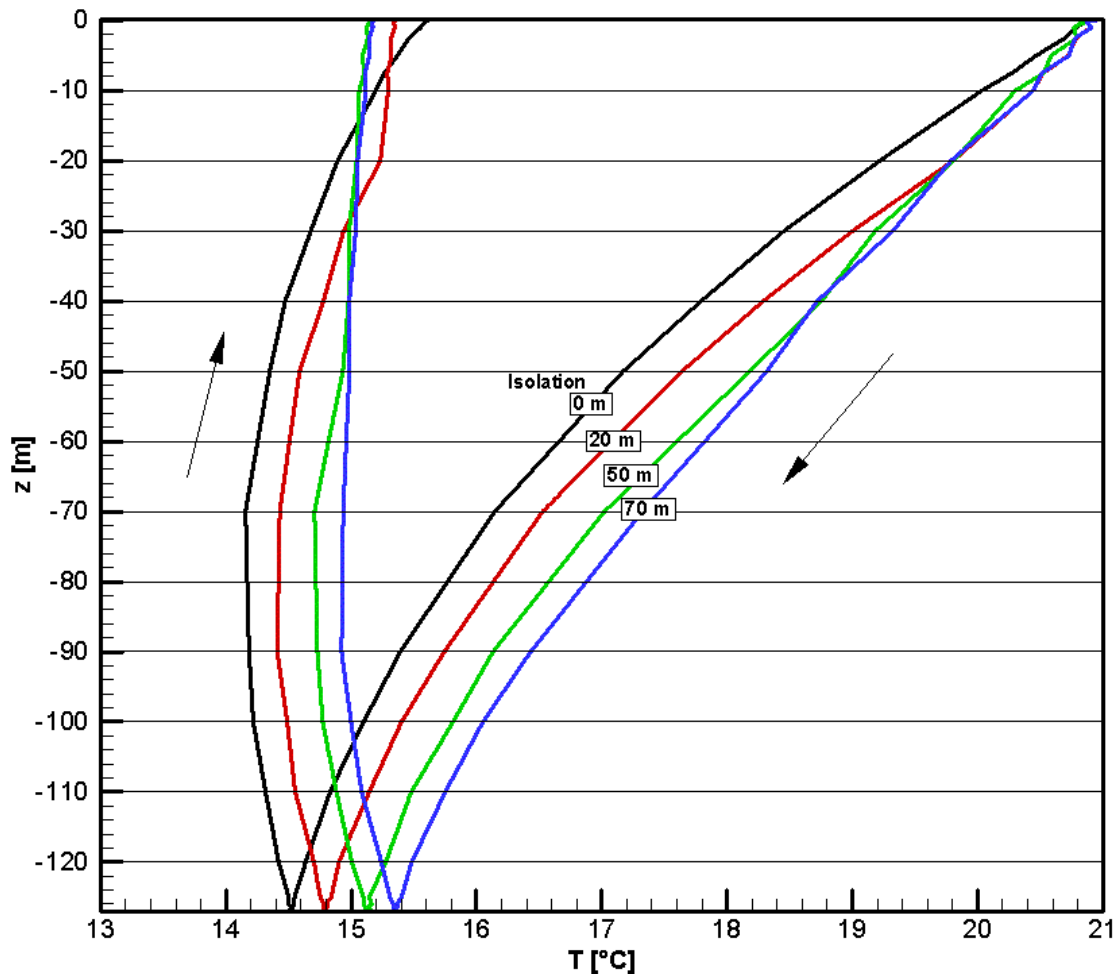
Es wurden deshalb Optimierungsrechnungen mit teilweise isolierten Erdwärmesonden-Rücklaufrohren durchgeführt. In der Praxis kann eine Isolation relativ kostengünstig bis 20 m eingebracht werden. Als Vergleich wurden auch Isolationen bis 50 und 70 m Tiefe untersucht.

Figur 11 stellt die Ergebnisse dar. Die teilweise Isolation der Erdwärmesonden-Rücklaufrohre zeigt vor allem im Sommer eine Verbesserung. Bei einer 20 m tiefen Isolation entstehen im Sommer durchschnittlich bis 0.5 K tiefere Austrittstemperaturen, mit 70 m Isolation sogar bis 1 K. Tiefer reichende Isolationen haben praktisch keine weitere Verbesserung zur Folge.

Figur 12 stellt das vertikale Temperaturprofil entlang der Erdwärmesonde im Juli dar. Es zeigt sich, dass die Isolation auch einen gewissen Nachteil mit sich bringt. Die Wärme, die vom aufsteigenden Sondenrohr dank der Isolation nicht vom absteigenden Sondenrohr aufgenommen werden kann, führt zu einer höheren Temperatur im absteigenden Sondenrohr und Sondenfuss. Trotzdem haben diese Simulationen gezeigt, dass durch Isolation der Erdwärmesondenrohre ein Optimierungspotential besteht.



Figur 11: Vergleich der Austrittstemperatur aus dem Geothermiespeicher im ersten Betriebsjahr bei einer Isolation der Erdwärmesonde-Rücklaufrohre in den ersten 20, 50 bzw. 70 m.



Figur 12: Vertikales Temperaturprofil entlang der Erdwärmesonde im Juli des ersten Betriebsjahres, ohne und mit Isolation der obersten 20, 50 bzw. 70 m. Die Pfeile zeigen die Durchflussrichtung.

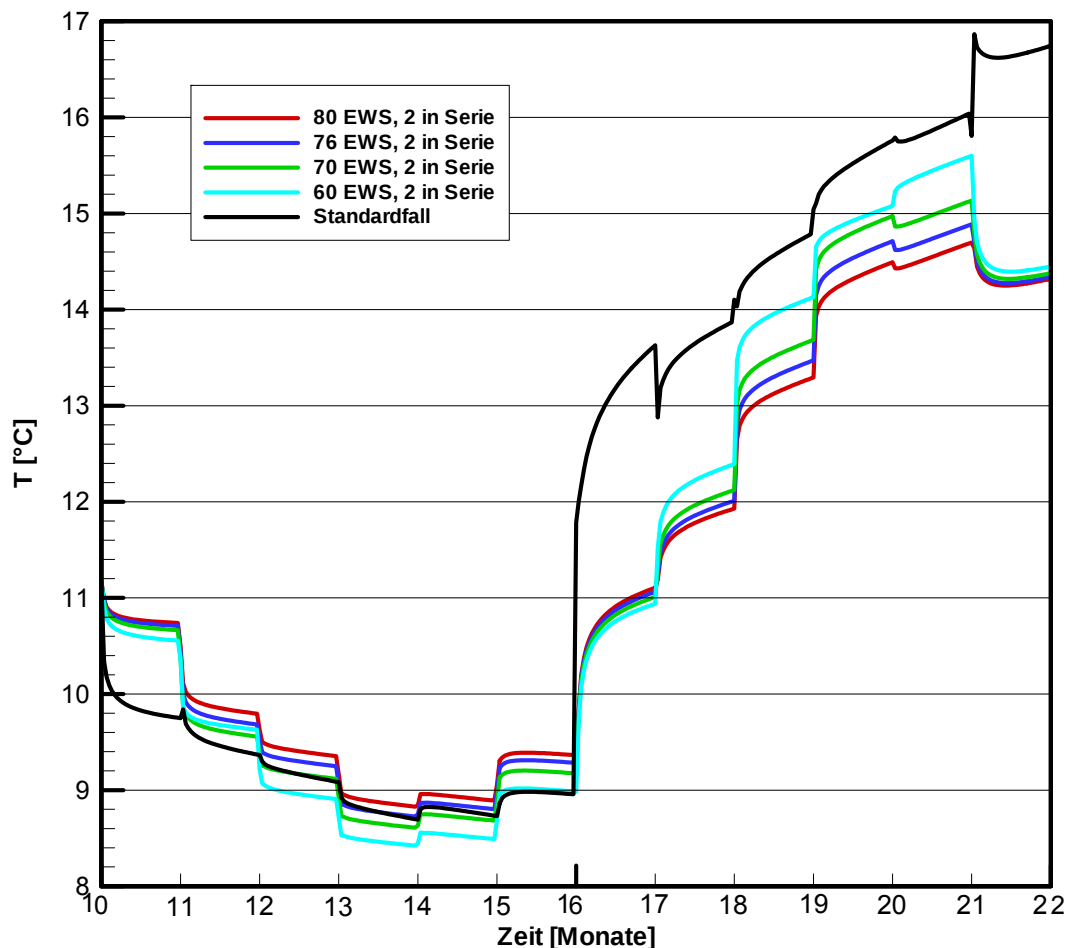
2.3.5 Serieschaltung und Optimierung der Sondenanzahl

Als weitere Variante werden zwei Erdwärmesonden in Serie geschaltet. In diesem Fall zirkuliert das aus der ersten Erdwärmesonde kommende Fluid durch eine zweite Erdwärmesonde bevor es zum Verteiler zurückkommt. Dadurch ergibt sich eine Art Vorerwärmung bzw. -kühlung durch die erste Erdwärmesonde.

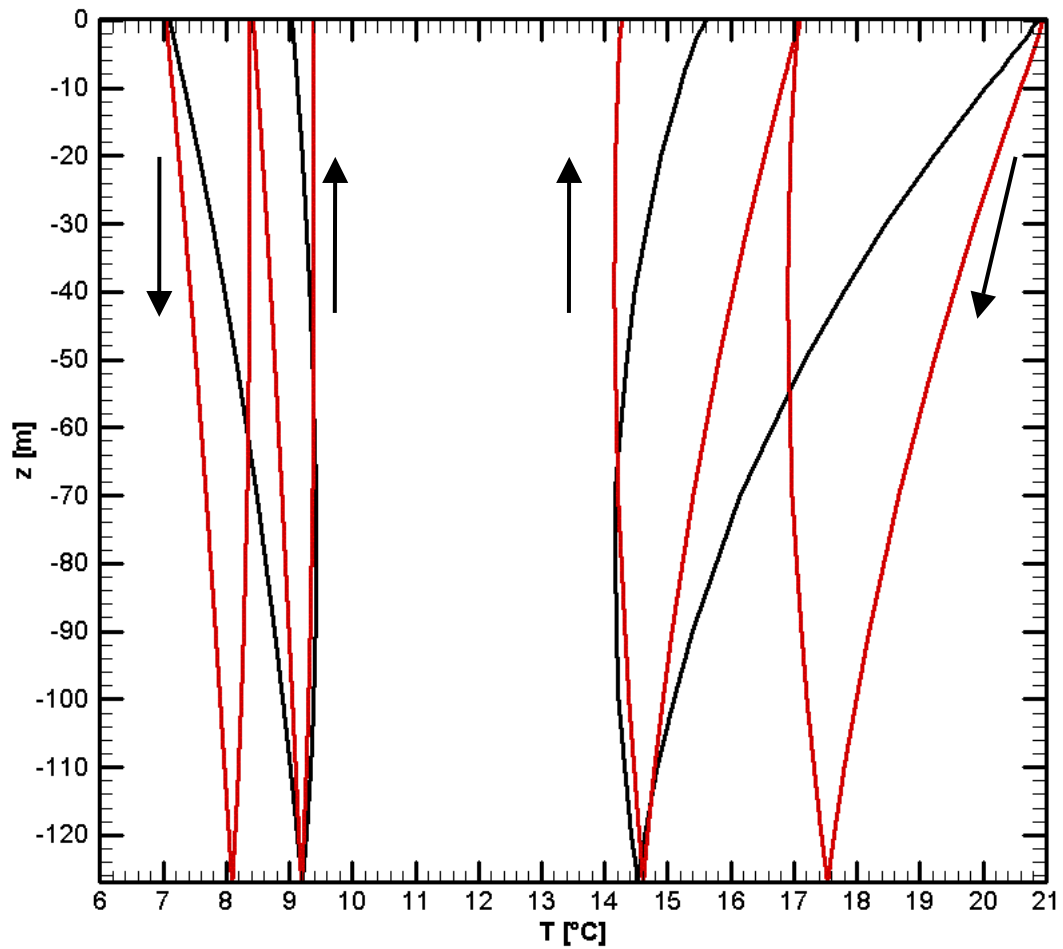
Figur 13 stellt den Temperaturverlauf am Austritt der zweiten Erdwärmesonde in Abhängigkeit der Erdwärmesondenanzahl dar. Es zeigt sich, dass eine solche Variante wesentlich tiefere Fluidtemperaturen im Sommer ergibt. Bei einem Erdwärmesondenfeld mit 80 Erdwärmesonden à 127 m mit jeweils 2 in Serie geschalteten Sonden ergeben sich zwischen 1 K und 2 K tiefere Austrittstemperaturen als beim Standardfall. Zusätzlich lassen sich bei einer Serieschaltung die Kosten für horizontale Leitungen reduzieren.

Figur 14 vergleicht den Temperaturverlauf entlang der Erdwärmesonde im Dezember und Juli bei 80 Erdwärmesonden mit je 2 in Serie geschalteten Erdwärmesonden mit dem Standardfall aus Figur 10. Im Kühlbetrieb können durch die Serieschaltung deutlich tiefere Fördertemperaturen erreicht werden. Im Heizbetrieb sind die Auswirkungen geringer. Es können nur leicht höhere Temperaturen erreicht werden.

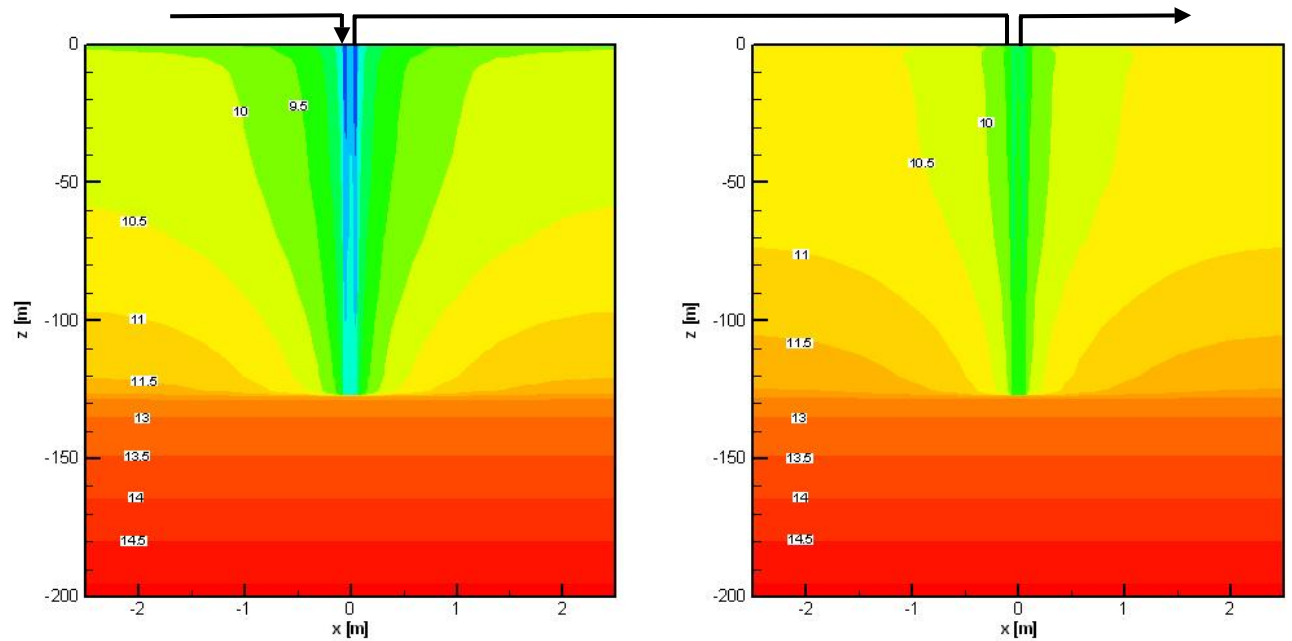
In einem zweiten Schritt wurde die Anzahl Sonden reduziert. Figur 13 zeigt, dass durch die Serieschaltung auch mit weniger Erdwärmesonden eine optimalere Fördertemperatur über das ganze Jahr erreicht wird als bei der Standardauslegung. Zur Illustration ist in Figur 15 und Figur 16 das Temperaturfeld im Winter und im Sommer um zwei in Serie geschaltete Erdwärmesonden dargestellt.



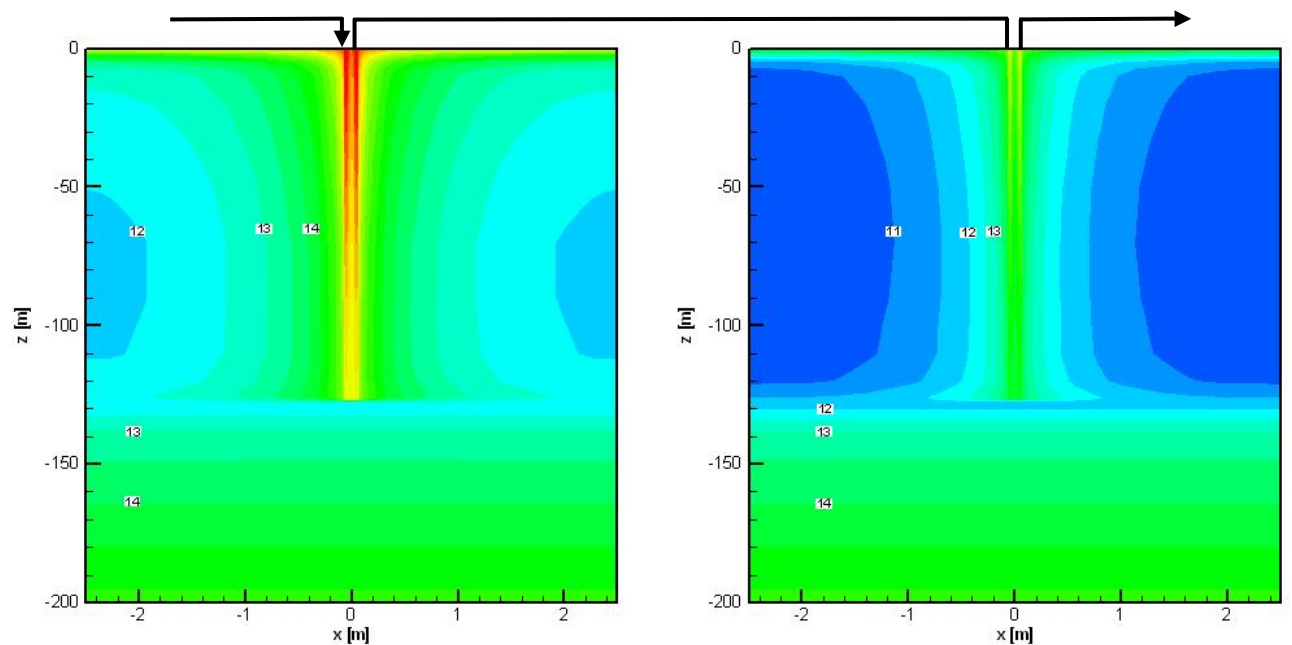
Figur 13: Vergleich der Austrittstemperatur aus dem Geothermiespeicher im ersten Betriebsjahr für Sondenlayouts mit 80, 76, 70 bzw. 60 Erdwärmesonden à 127 m, wobei jeweils 2 Erdwärmesonden in Serie geschaltet sind, und für den Standardfall (81 Erdwärmesonden à 127 m). Die Simulation startet im Oktober.



Figur 14: Vertikales Temperaturprofil entlang der Erdwärmesonde im Dezember und im Juli des ersten Betriebsjahres für den Standardfall (schwarze Kurven, 81 Erdwärmesonden à 127 m) und bei 80 Erdwärmesonden, wobei jeweils 2 Erdwärmesonden in Serie geschaltet sind (rote Kurven).



Figur 15: Temperaturfeld im Heizfall um zwei in Serie geschaltete Erdwärmesonden (80 Erdwärmesonden à 127m insgesamt) links erste Erdwärmesonde ab Verteiler, rechts nachgeschaltete Erdwärmesonde.



Figur 16: Temperaturfeld im Kühlfall um zwei in Serie geschaltete Erdwärmesonden (80 Erdwärmesonden à 127m insgesamt) links erste Erdwärmesonde ab Verteiler, rechts nachgeschaltete Erdwärmesonde.

2.4 Schlussfolgerung

Aus den Optimierungsberechnungen können für den Geothermiespeicher des Hotels "The Dolder Grand" folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

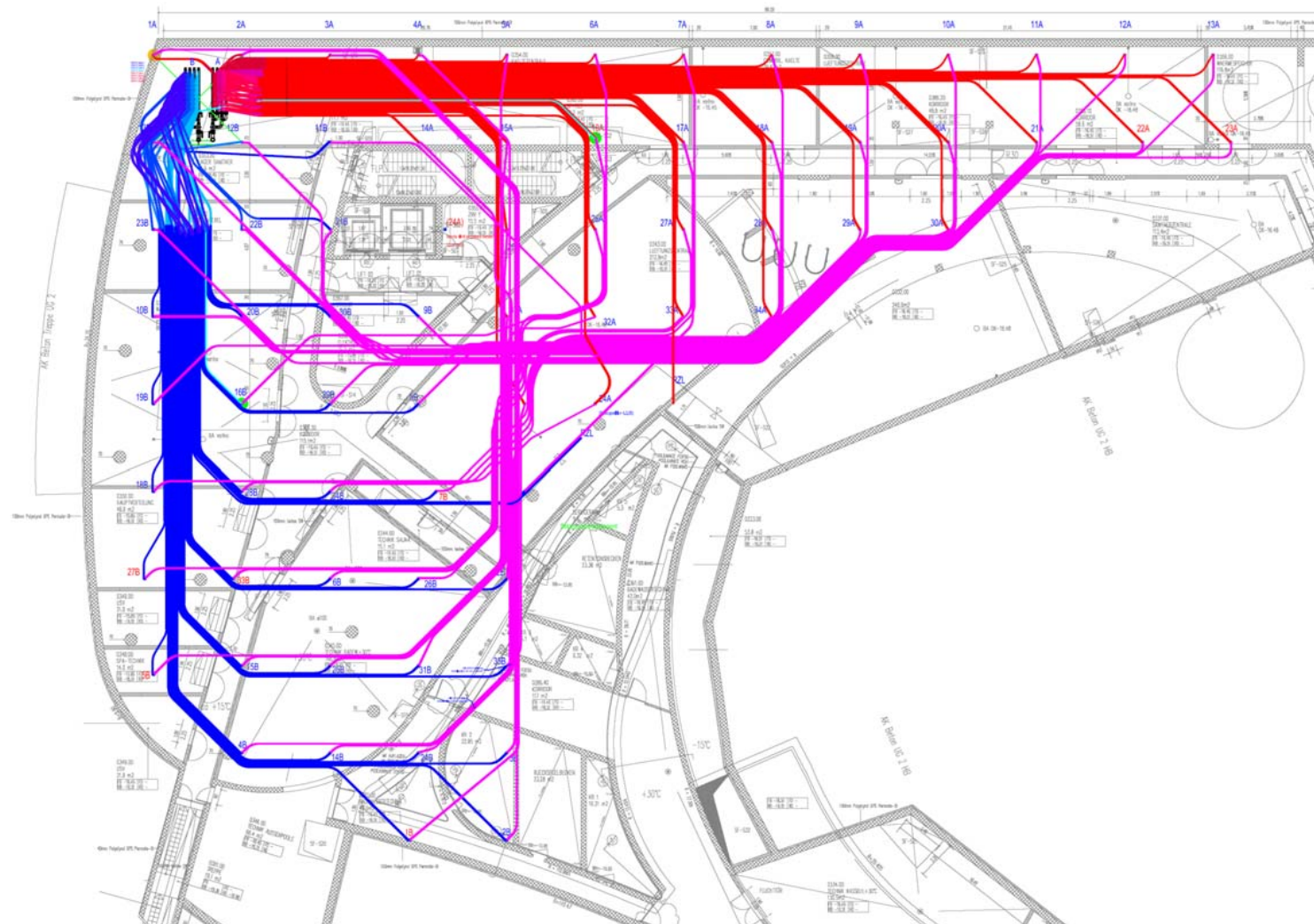
- Der ideale Abstand der Erdwärmesonden für das vorgegebene Heiz- und Kühlkonzept liegt bei 5 m.
- Eine Isolation der horizontalen Leitungen hat praktisch keinen Einfluss auf die Austrittstemperatur aus dem Geothermiespeicher. Darauf kann verzichtet werden.
- Bei Einzelanbindung der Erdwärmesonden ergibt sich eine grosse Temperaturspreizung zwischen Erdwärmesonden-Eintritts- und Austrittstemperaturen. Durch eine vertikale Isolation der ersten 20 m der Erdwärmesonden-Rücklaufrohre kann eine tiefere Fördertemperatur in den Sommermonaten erreicht werden, was für den Kühlbetrieb anzustreben ist. Die benötigte Vorlauftemperatur von maximal 14 °C kann länger geliefert werden. Auf den Winterbetrieb hat die Isolation einen geringen Einfluss; die Temperaturen sind nur leicht höher.
- Mit einer Serieschaltung von je zwei Erdwärmesonden kann von allen untersuchten Varianten die beste Optimierung der Fördertemperaturen hinsichtlich der Vorgaben für Heizen und Kühlen erreicht werden. Zudem ergeben sich dadurch Einsparungen bei den Anschlusskosten. Durch die Serieschaltung steigt zwar die benötigte Leistung der Umwälzpumpe, es kann dadurch aber verhindert, dass die Anlage bei Teillast im laminaren Bereich läuft. Der Nutzen der Serieschaltung übersteigt bei weitem den Mehraufwand an Pumpenergie.
- Die Optimierung, die sich durch die Serieschaltung ergibt, erlaubt es, die Erdwärmesondenanzahl bei gleich bleibender Erdwärmesondentiefe (Verringerung der gesamten Sondenmeter) zu reduzieren und so Kosten einzusparen.
- Die Modellierungen zeigten zudem, dass der Geothermiespeicher mit Vorteil im Herbst in Betrieb genommen werden sollte, damit der Speicher bereits während einer Heizperiode abgekühlt wird, bevor der Kühlbetrieb im darauf folgenden Sommer zum ersten Mal aufgenommen wird. Bei der Inbetriebnahme konnte diese Vorgabe jedoch nicht berücksichtigt werden

Gemäss Berechnung ist ein Geothermiespeicher mit 70 Erdwärmesonden à 127 m Tiefe für die Deckung des vorgegebenen Energiebedarfs ausreichend. Da aber beim Bedarf relativ grosse Unsicherheiten bestehen, wurde aus Sicherheitsüberlegungen die Tiefe auf 152 m vergrössert.

Es wurden je 2 Sonden in Serie geschaltet. Das heisst, dass das aus der ersten Erdwärmesonde kommende Fluid nochmals durch eine zweite Erdwärmesonde zirkuliert, bevor es wieder beim Verteiler ankommt. Dadurch ergibt sich eine Vorerwärmung bzw. -kühlung in der ersten Erdwärmesonde. Es zeigt sich, dass eine solche Variante wesentlich tiefere Fluidtemperaturen im Sommer ergibt. Erst so können die für die Kühlung benötigten Temperaturen erreicht werden. Dazu wurde das Erdwärmesondenfeld in 2 Teile (rot und blau) aufgeteilt, die in Serie zusammengeschlossen wurden. Das Layout des gebauten Geothermiespeichers ist in Figur 18 dargestellt. Figur 17 zeigt den Verteiler im Keller des Hotels.



Figur 17: Verteiler des Geothermiespeichers im Keller des Hotels "The Dolder Grand" mit insgesamt 70 Erdwärmesonden.



Figur 18: Sondenlayout mit der Position der 70 x 152 m tiefen Sonden und den Zuleitungen. Der Geothermiespeicher ist in zwei Bereiche (rot und blau) aufgeteilt, die in Serie geschaltet sind.

3. Betrieb

3.1 Änderungen im Gebäudekonzept – Erweiterung des Hotelkomplexes

Der Geothermiespeicher wurde mit 70 Erdwärmesonden à 152 so gebaut, wie er in Kapitel 2.4 beschrieben wurde. Die Anlage wird aber anders bewirtschaftet als ursprünglich vorgesehen, da sich im Verlaufe der Bauphase die Energieabnehmerstruktur änderte. So wurde der Hotelkomplex um zusätzliche Gebäude erweitert. Dadurch wurden vor allem mehr Kältebezüge angeschlossen, die zum Teil tiefere Vorlauftemperaturen von 10 °C gegenüber den geplanten 14 °C benötigen. Es fallen auch im Winter relativ grosse Kühllasten an. Dadurch ergibt sich eine unausgeglichene Energiebilanz zwischen Wärme- und Kältebezug. Es wird deutlich mehr Kälteenergie und eine viel höhere Spitzenlast benötigt als geplant (vergl. Kapitel 2.1). Um den effektiven Bedarf zu decken, wurden zwei weitere Kältemaschinen und zur Unterstützung der Absorptionswärmepumpe eine zusätzliche Wärmepumpe, die auch als Kältemaschine betrieben werden kann, installiert. Das Grundkonzept und die hydraulische Schaltung konnten aber beibehalten werden.

3.2 Betriebsverhalten der Geothermiespeicheranlage

3.2.1 Messkonzept

Figur 19 zeigt das Messkonzept des Geothermiespeichers, wie es konzipiert war. Es wurde ein kompletter Sondenkreislauf mit den beiden in Serie geschalteten Erdwärmesonden 16A und 16B ausgemessen (Position siehe Figur 24). Die Lage der Sonden ist in Figur 24 dargestellt. Gemessen wurden die Temperatur beim Ein- und Austritt in den Verteiler und in verschiedenen Tiefen in den Sonden, sowie der Durchfluss. Weiter wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen, der Durchfluss, die Durchflussmenge und die Energiemenge des Gesamtfeldes erfasst. Das Messintervall betrug 10 Minuten. Tabelle 3 fasst die verschiedenen Messparameter zusammen. Für die Temperaturmessungen wurden Ni-100-Messfühler (Siemens-Spezifikation) eingesetzt. Nach Anschluss wurden sie über einen Referenzfühler kalibriert.

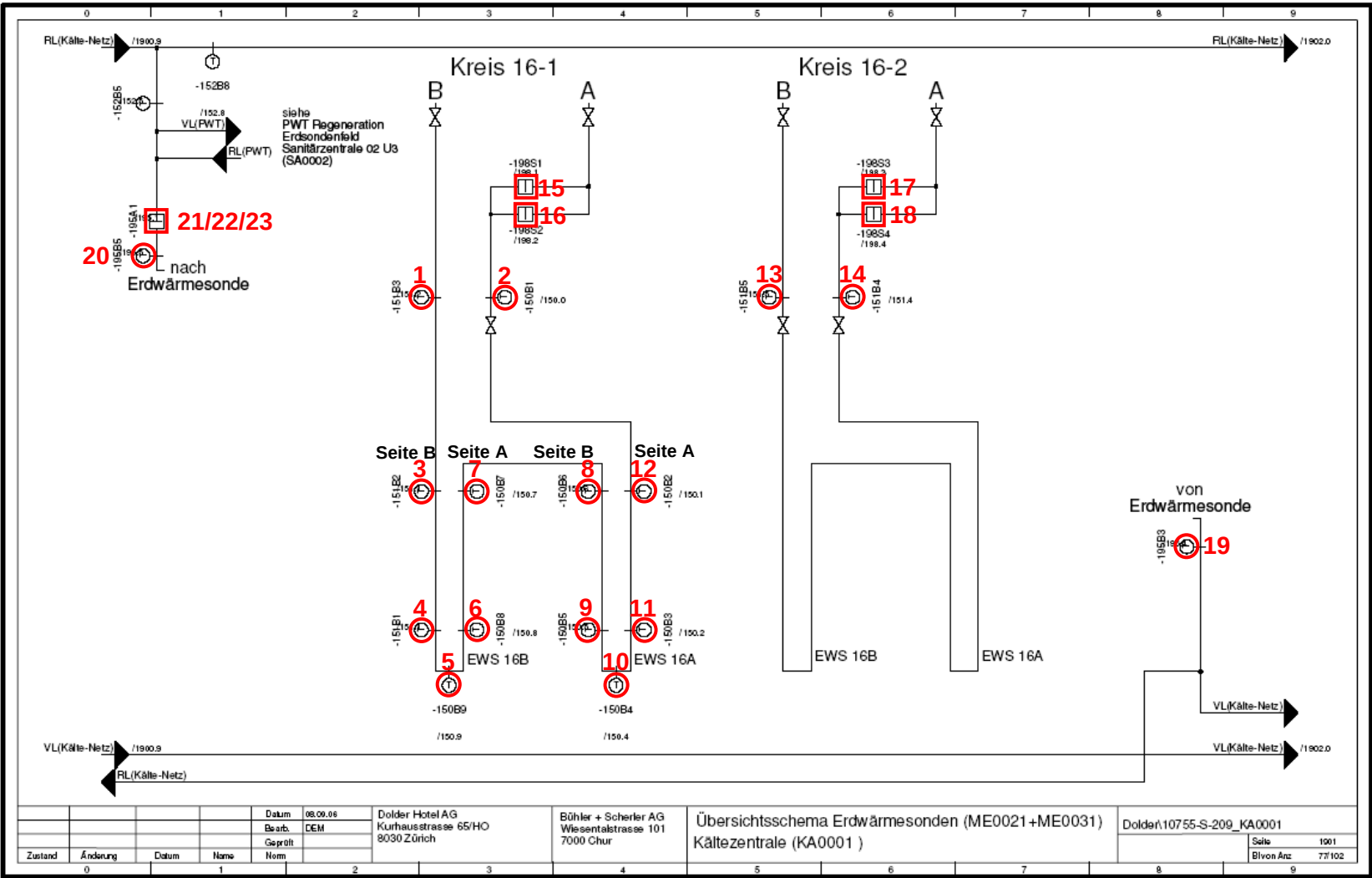
Ab Eröffnung im Frühling 2008 wurden die Betriebsdaten über das Leitsystem des Hotels aufgezeichnet. Es war geplant, die Daten des zweiten Betriebsjahres von Frühling 2009 bis Frühling 2010 zu analysieren. Leider hat sich bei der Analyse des ersten Halbjahres im Herbst 2009 gezeigt, dass die Registrierung der Messdaten fehlerhaft war. Zum Beispiel hat der Messfühler der Hauptleitung ab Verteiler nicht korrekt funktioniert. Weiter waren die Durchfluss- und die Energiezähler sowie die Temperaturfühler nicht funktionstüchtig (vergl.

Kapitel 3.2.2). Von den 12 Temperaturmessfühlern in den beiden in Serie geschalteten Erdwärmesonden 16A und 16B waren zwei (Messfühler 3 und 6) defekt, ansonsten funktionierte aber die restliche Temperaturerfassung in den Sonden. Allgemein sind aber Temperaturdaten nur dann repräsentativ, wenn im System auch Durchfluss vorhanden ist (Anlage läuft). Da jedoch die Impulse der Durchflusszähler nicht registriert wurden, sind keine aussagekräftigen Schlussfolgerungen möglich. Die Daten können nur qualitativ betrachtet werden.

Im Herbst 2009 wurde das Messleitsystem des Hotels wegen verschiedener Probleme überarbeitet. Dabei ging die Information über das Messkonzept betreffend des Geothermiespeichers verloren. Die Daten können nicht mehr abgerufen werden.

Tabelle 3: Liste der gemessenen Anlageparameter. Die Nummerierung bezieht sich auf Figur 19.

Nr.	ID	Beschreibung	Einheit
1	151B3	Temperatur im Erdwärmesondenkreislauf 16, beim Verteilbalken B im Rohrkreis 1	[°C]
2	150B1	Temperatur im Erdwärmesondenkreislauf 16, beim Verteilbalken A im Rohrkreis 1	[°C]
3	151B2	Temperatur beim Sondenkopf der Erdwärmesonde 16B, Seite B des Rohrkreises 1	[°C]
4	151B1	Temperatur in 75 m Tiefe in der Erdwärmesonde 16B, Seite B des Rohrkreises 1	[°C]
5	150B9	Temperatur am Sondenfuss in der Erdwärmesonde 16B, im Rohrkreis 1	[°C]
6	150B8	Temperatur in 75 m Tiefe in der Erdwärmesonde 16B, Seite A des Rohrkreises 1	[°C]
7	150B7	Temperatur beim Sondenkopf aus der Erdwärmesonde 16B, Seite A des Rohrkreises 1	[°C]
8	150B6	Temperatur beim Sondenkopf in die Erdwärmesonde 16A, Seite B des Rohrkreises 1	[°C]
9	150B5	Temperatur in 75 m Tiefe in der Erdwärmesonde 16A, Seite B des Rohrkreises 1	[°C]
10	150B4	Temperatur am Sondenfuss in der Erdwärmesonde 16A, im Rohrkreis 1	[°C]
11	150B3	Temperatur in 75 m Tiefe in der Erdwärmesonde 16A, Seite A des Rohrkreises 1	[°C]
12	150B2	Temperatur beim Sondenkopf aus der Erdwärmesonde 16A, Seite A des Rohrkreises 1	[°C]
13	151B4	Temperatur im Erdwärmesondenkreislauf 16 beim Verteilbalken B Rohrkreises 2	[°C]
14	151B5	Temperatur im Erdwärmesondenkreislauf 16 beim Verteilbalken A Rohrkreises 2	[°C]
15	198S1	Durchflussrate Richtung A-B des Erdwärmesondenkreislaufes 16 im Rohrkreis 1	[m ³ /h]
16	198S2	Durchflussrate Richtung B-A des Erdwärmesondenkreislaufes 16 im Rohrkreis 1	[m ³ /h]
17	198S3	Durchflussrate Richtung A-B des Erdwärmesondenkreislaufes 16 im Rohrkreis 2	[m ³ /h]
18	198S4	Durchflussrate Richtung B-A des Erdwärmesondenkreislaufes 16 im Rohrkreis 2	[m ³ /h]
19	195B3	Temperatur im gesamten Solekreislauf gemäss Figur 19	[°C]
20	195B6	Temperatur im gesamten Solekreislauf gemäss Figur 19	[°C]
21	195A1	Kumulative Durchflussmenge des Gesamtfeldes	[m ³]
22	195A1	Durchflussrate des Gesamtfeldes	[m ³ /h]
23	195A1	Energiezähler des Gesamtfeldes	[MWh]



Figur 19: Messkonzept des Geothermiespeichers "The Dolder Grand". Die Temperaturfühler sind mit roten Kreisen und die Durchfluss- und Energiezähler mit roten Rechtecken markiert. Die Messparameter sind in Tabelle 3 beschrieben.

3.2.2 Messwerte

Von Frühling bis Herbst 2009 wurden die Betriebsdaten des Geothermiespeichers wie geplant aufgezeichnet. Figur 20 zeigt die Messwerte für die Temperaturfühler beim Ein- und Austritt in die Wärmepumpen bzw. Kältemaschine (Mischtemperatur des gesamten Geothermiespeichers) und der Fühler für die Registrierung des Durchflusses der Wärmepumpen bzw. Kältemaschine. Es hat sich gezeigt, dass die Messeinrichtung im Sommerhalbjahr 2009 mehrheitlich nicht funktioniert hat.

Die Messfühler in den beiden in Serie geschalteten Erdwärmesonden 16A und 16B funktioniert mehrheitlich. Figur 21 zeigt die Ein- und Austrittstemperaturen des Kreislafs 16A und 16B beim Verteiler. Die Austrittstemperatur aus den Sonden (im Heizfall Fühler 2; im Kühlfall Fühler 1) zeigt die Verhältnisse im Sondenkreislauf 16A und 16B. Die Eintrittstemperatur in die Sonden (im Heizfall Fühler 1; im Kühlfall Fühler 2) entspricht der Mischtemperatur nach der Wärmepumpe bzw. Kältemaschine und ist für das gesamte Sondenfeld repräsentativ.

Grundsätzlich sind die Temperaturwerte nur aussagekräftig, wenn auf der Anlage Durchfluss vorhanden ist. Wie aber Figur 20 zeigt, wurden die Impulse der Durchflusszähler nicht registriert. Es können aber trotzdem qualitative Aussagen gemacht werden. So zeigt Figur 21, dass bis Ende Mai (ca. bis Tage 50) mehrheitlich geheizt und danach mehrheitlich gekühlt wird.

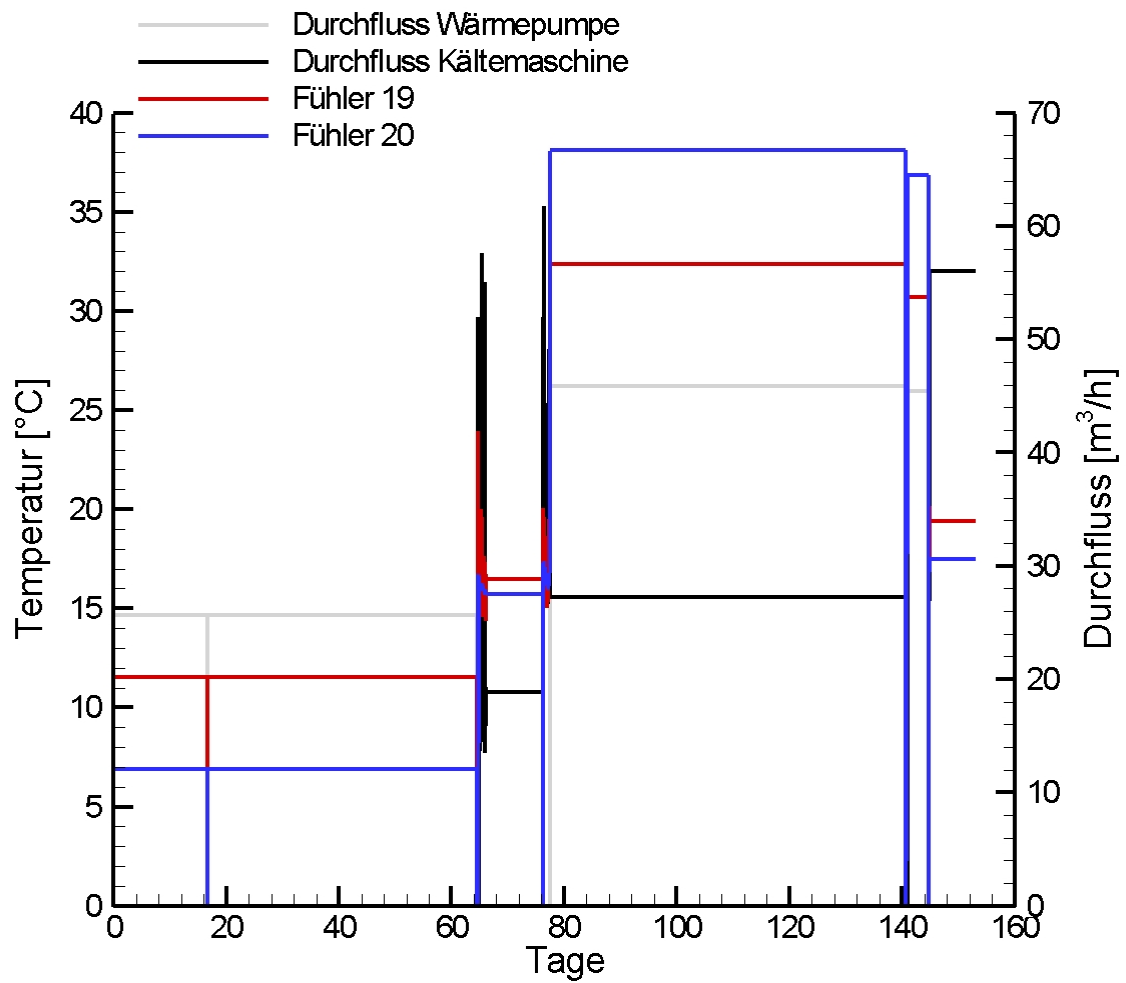
Der Zoom in die Datenreihe zeigt in Figur 22 den Temperaturverlauf während des Heizens am 1. April 2009 für zwei Betriebszyklen. Fühler 2 ist die Austrittstemperatur aus der Sonde 16A und Fühler 1 zeigt die Rücklauftemperatur in die Sonde 16B, als Mischtemperatur aller Sonden nach der Wärmepumpe. Die minimale Fördertemperatur liegt im April 2009 am Ende der Heizsaison bei etwa 10 °C. Die minimale Rücklauftemperatur in den Geothermiespeicher beträgt ca. 5 °C. Bei dem wasserbetriebenen Geothermiespeicher wären Rücklauftemperaturen von minimal 3 °C zulässig. Sicherlich haben sich die Temperaturen gegenüber den Minimaltemperaturen während der Spitzenbelastung Mitte des Winters (ca. Februar) bereits etwas erholt. Trotzdem scheint die Anlage hinsichtlich des Heizbetriebes möglicherweise noch ein gewisses Optimierungspotential zu haben. Dazu wären aber Messungen über die Minimaltemperatur im Winter nötig.

Bei der Planung wurde von einer Vorlauftemperatur für die Direktkühlung von 14 °C (Hochtemperaturkälte) ausgegangen. Bereits bei der Planung (siehe Kapitel 2.3.1) war klar, dass die Kältelast nicht komplett über den Geothermiespeicher gedeckt werden kann. Reicht die Speichertemperatur für die Kühlung nicht mehr, wird der Geothermiespeicher zur Vorkühlung der Kältemaschine benutzt. Beim Bau wurden zusätzliche Kältebezüge angeschlossen, welche Vorlauftemperaturen von 10 °C (Niedertemperaturkälte) benötigen. Der Geothermiespeicher ist für solche tiefen Temperaturen nicht konzipiert und kann sie nicht liefern. Diese Käl-

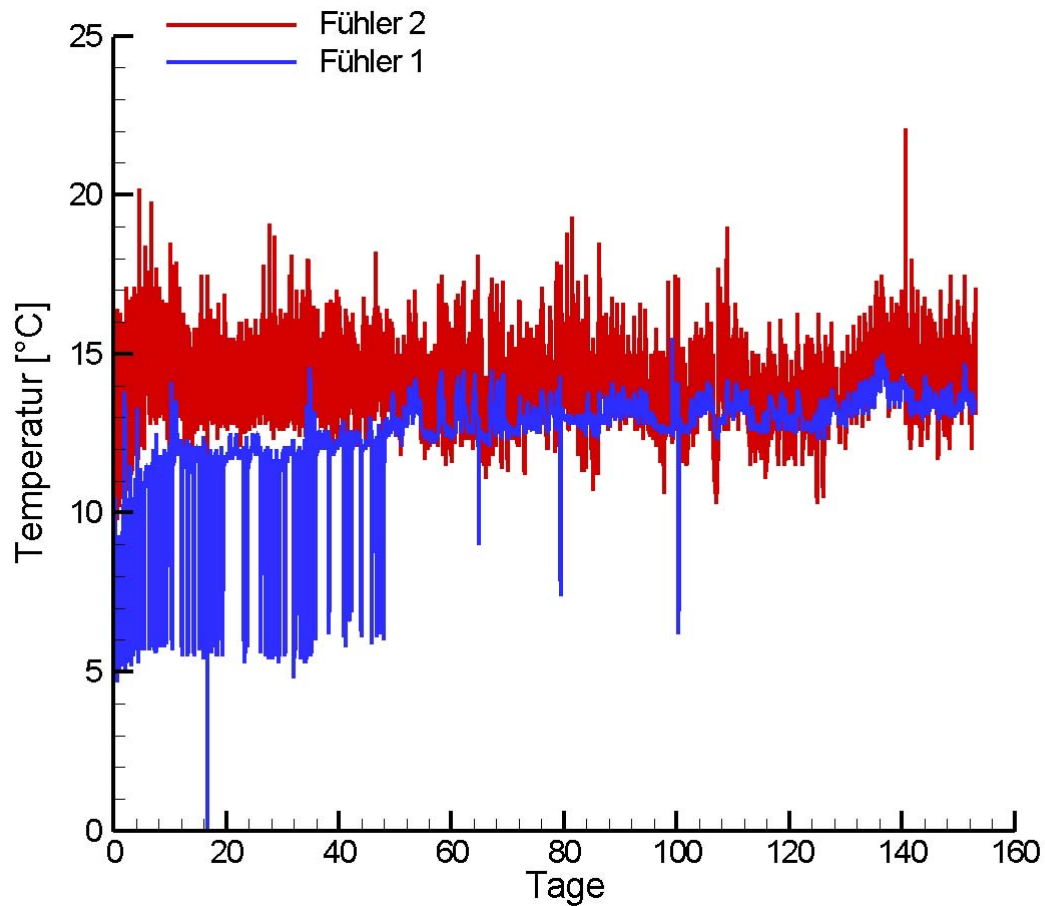
tebezüger werden prinzipiell über Kältemaschinen, mit Vorkühlung über den Geothermiespeicher, bedient.

Figur 23 zeigt zwei Betriebszyklen für den Kühlbetrieb am 29. August 2009. Die Austrittstemperatur (Fühler 2) liegt Ende Sommer bei ca. 13 °C und steigt während der Kühlung bis ca. 16 °C. Im Mai zu Beginn der Hauptkühlsaison liegen die Austrittstemperaturen ca. 1 K tiefer. Die Austrittstemperaturen zeigen lediglich den Wert für die Sonde 16A und B und nicht den Wert für den gesamten Geothermiespeicher. Aufgrund der Lage der Sonde im Sondenfeld (Position siehe Figur 24), kann angenommen werden, dass die Mischtemperatur aller Sonden nur unwesentlich anders sein wird. Die Rücklauftemperatur (Mischtemperatur) ins Sondenfeld (Fühler 1) liegt Ende August bei 14 bis 17 °C. Während der Stillstandsphase gleichen sich die Temperaturen im Vor- und Rücklauf der Umgebungstemperatur an.

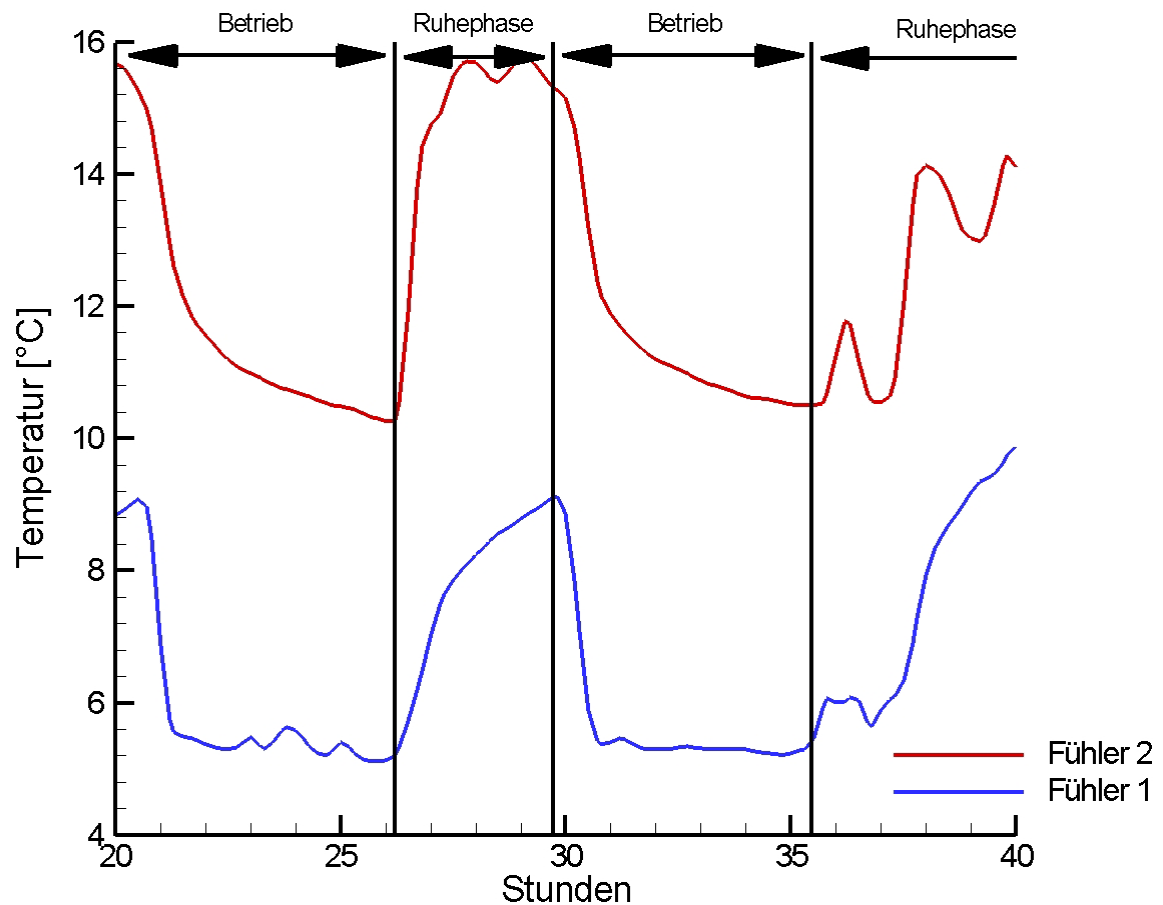
Figur 23 zeigt, dass Ende August die Vorlauftemperatur von maximal 14 °C für die Hochtemperaturkälte immer noch teilweise geliefert werden kann. Steigt die Temperatur über 14 °C, wird die Temperatur des Sondenfluids als Vorkühlung für die Kältemaschine genutzt. Die Tieftemperaturkälte kann nur über die Kältemaschine bereitgestellt werden. Dadurch, dass die Kältemaschine nur nachkühlen muss, leistet der Geothermiespeicher somit in allen Phasen seinen Beitrag zur Kühlung und zur Reduktion der CO₂-Emissionen.



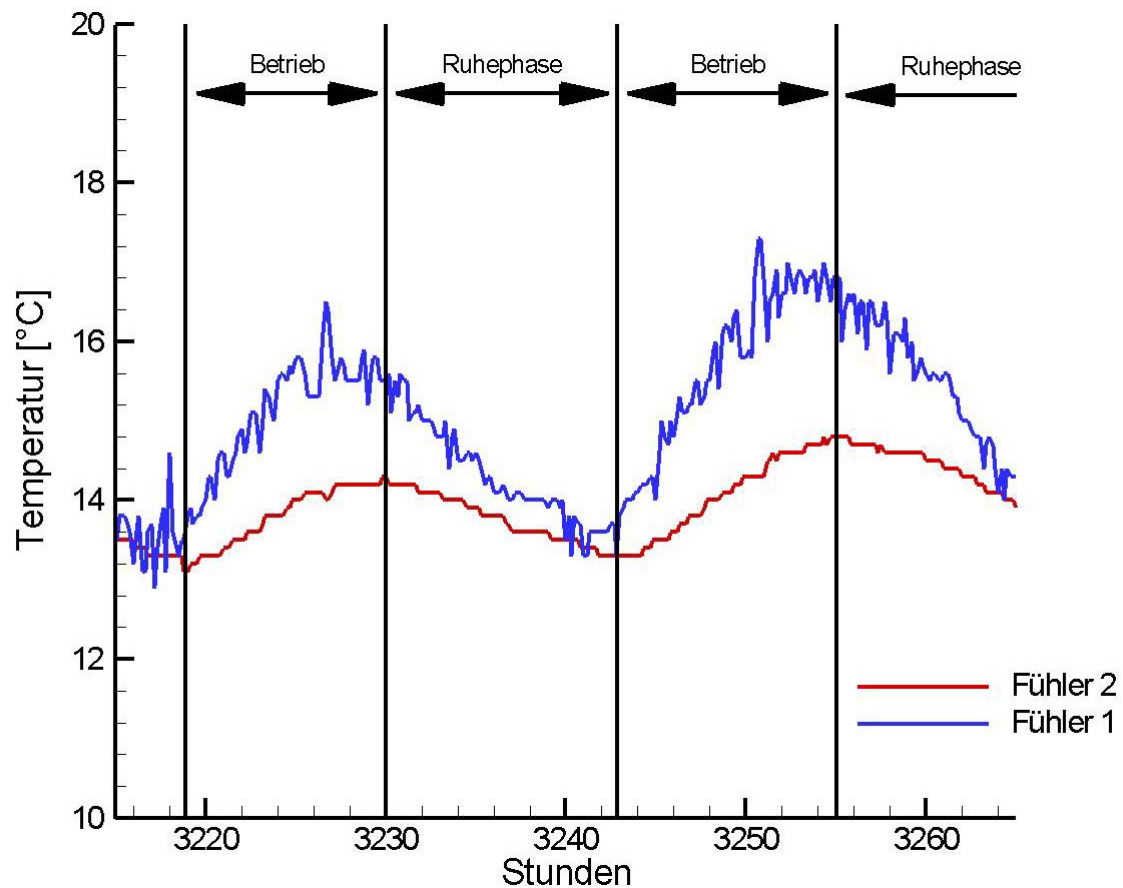
Figur 20: Ein- und Austrittstemperaturen (Nr. 20 und Nr. 19) und der Durchfluss des Gesamtfeldes (Nr. 22). Die Nummerierung der Fühler bezieht sich auf Tabelle 3 und Figur 19. Tag 0 ist der 1. April 2009.



Figur 21: Eintrittstemperaturen (im Heizfall Fühler 1; im Kühlfall Fühler 2) und Austrittstemperaturen (im Heizfall Fühler 2; im Kühlfall Fühler 1) des Erdwärmesondekreislaufes 16A/B beim Verteilerbalken. Tag 0 ist der 1. April 2009. Die Nummerierung der Fühler bezieht sich auf Tabelle 3 und Figur 19.



Figur 22: Ein- und Austrittstemperaturen (Nr. 2 und Nr. 1) des Erdwärmesondekreislaufes 16A/B beim Verteilerbalken während der Heizperiode am 1. April 2009. Die Nummerierung der Fühler bezieht sich auf Tabelle 3 und Figur 19.



Figur 23: Ein- und Austrittstemperaturen (Nr. 1 und Nr. 2) des Erdwärmesondekreislaufes 16A/B beim Verteilerbalken während der Kühlperiode am 29. August 2009. Die Nummerierung der Fühler bezieht sich auf Tabelle 3 und Figur 19.

3.3 Temperaturverhalten im Geothermiespeicher

3.3.1 Messkonzept

Um das Temperaturverhalten im Geothermiespeicher während des Betriebes untersuchen zu können, wurden die Temperaturprofile von verschiedenen Erdwärmesonden ausgemessen. Das Messkonzept sieht Messungen vor Inbetriebnahme sowie Messungen während des Sommers- und des Winterbetriebes im zweiten Betriebsjahre vor.

Es kamen zwei Messverfahren zum Einsatz: Temperaturmessungen mit der kabellosen Temperaturmesssonde NIMO-T in den Erdwärmesonden und faseroptische Messungen in Kabeln ausserhalb der Sonden. Die drei Glasfaserkabel sind fix installiert und stehen für weitere Messungen zur Verfügung.

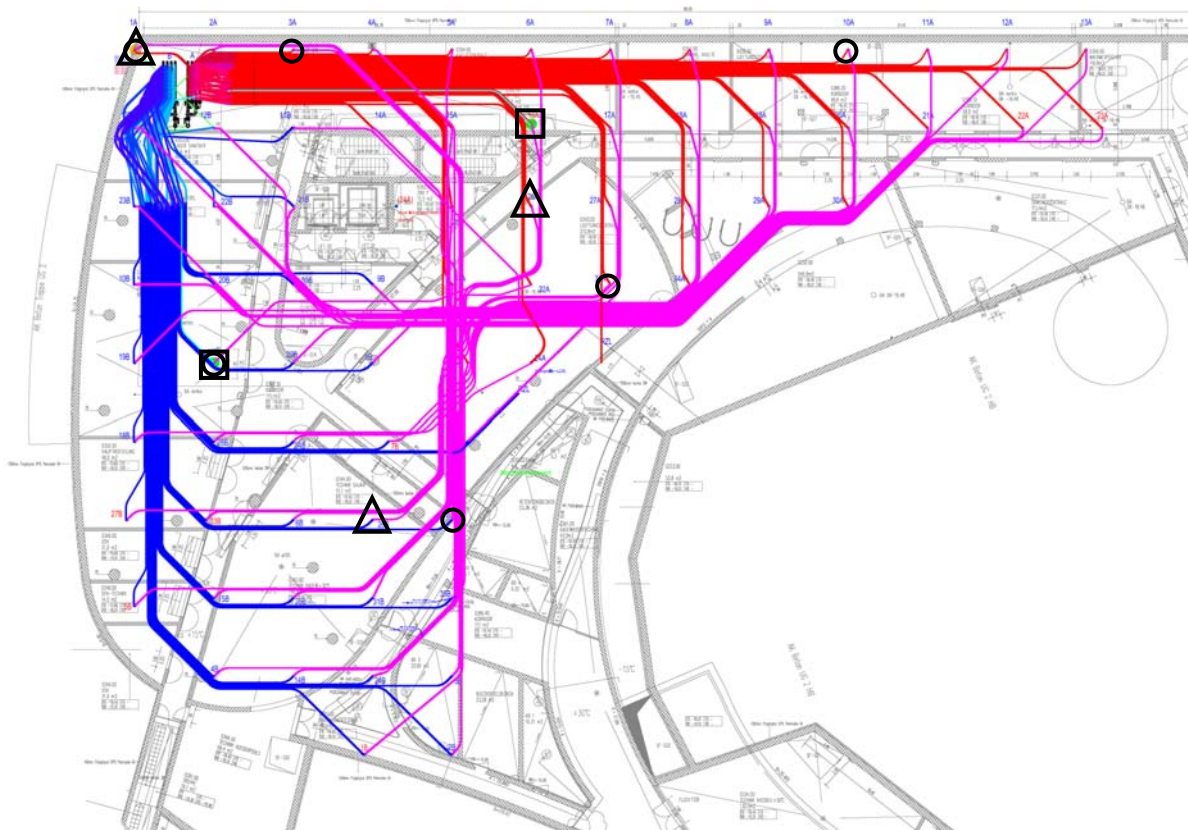
Da der Geothermiespeicher unter dem Gebäude erstellt wurde, hing die Auswahl der Bohrungen für die Initialmessungen mit NIMO-T in erster Linie von der Zugänglichkeit der Bohrungen während des Baus ab. Es wurde darauf geachtet, dass sie möglichst gut über den

Speicher verteilt sind. Temperaturmessungen mit der kabellosen Temperaturmesssonde NIMO-T wurden in sechs Erdwärmesonden (1A, 3A, 10A, 16B, 32B, 34A) durchgeführt und faseroptische Messungen in Kabeln wurden entlang von drei Sonden (1A, 26A, 26B) gemacht.

Nach Inbetriebnahme wurden im Sommer und Winter des zweiten Betriebsjahres 2009/2010 Temperaturprofile während des Betriebes gemessen. Die faseroptischen Messungen wurden in den drei dafür ausgerüsteten Sonden (1A, 26A, 26B) wiederholt. Für die NIMO-T-Profilmessungen sind die beiden Bohrungen 16A und 16B, welche für die Analyse des Betriebsverhaltens mit Temperaturfühlern ausgerüstet sind (siehe Kapitel 3.2), über einen Schacht zugänglich. Die ausgemessenen Bohrungen sind in Figur 24 markiert. Das Messprogramm ist in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Messprogramm Temperaturprofilmessungen.

	Bohrungen	Datum
Initialmessungen		
NIMO-T Messungen	Testbohrung (ca. 20 m höher gelegen als der Geothermiespeicher)	30.04.2004
NIMO-T Messungen	1A, 3A, 10A, 16B, 32B, 34A	2005 (kontinuierlich)
Faseroptische Messungen	1A, 26A, 26B	21.12.2006
Betriebsmessungen		
NIMO-T Messungen	16A, 16B	Sommer 2009
	16A, 16B	Winter 2010
Faseroptische Messungen	1A, 26A, 26B	Sommer 2009
	1A, 26A, 26B	Winter 2010



Figur 24: Sondenlayout mit der Position der ausgemessenen Sonden. In den mit Kreisen markierten Bohrungen (1A, 3A, 10A, 16B, 32B, 34A) wurden initiale Temperaturmessungen mit NIMO-T durchgeführt. Die mit Dreiecken markierten Bohrungen (1A, 26A, 26B) sind mit faseroptischen Kabeln ausgerüstet. Mit den Quadraten sind die zwei in Seriegeschalteten Erdwärmesonden (16A und 16B) markiert, deren Temperaturen beim Ein- und Austritt in den Verteiler sowie in verschiedenen Tiefen aufgezeichnet werden. Diese Bohrungen sind über einen Schacht weiterhin für Temperaturprofilmessungen zugänglich.

3.3.2 Initiale Messungen

1) NIMO-T - Messungen

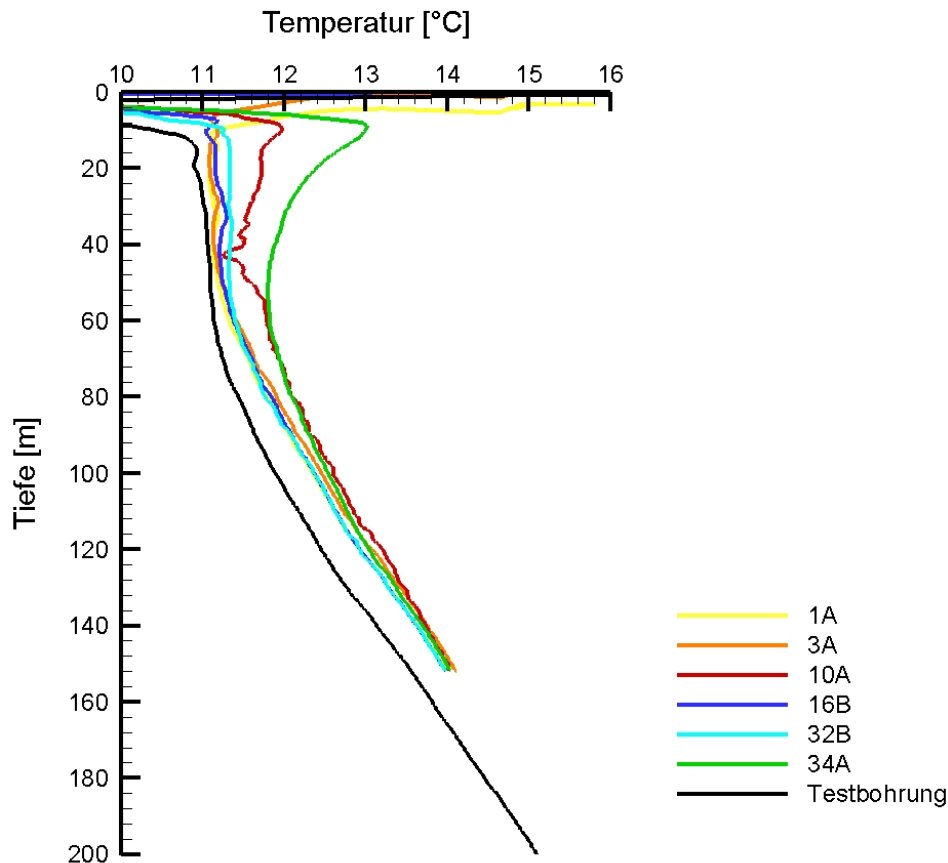
Für die Untersuchung des Temperaturverhaltens des Geothermiespeichers wurden von Januar bis Februar 2005 in den 6 Bohrungen 1A, 3A, 10A, 16B, 32B und 34A (siehe Figur 24) initiale Messungen durchgeführt.

Figur 25 zeigt die gemessenen Temperatur-Tiefenprofile ab Aushubsohle. Die Bohrungen fanden in der Baugrube statt, d.h. die obersten ca. 16 m wurden durch den Aushub abgeführt. Die Profile zeigen das erwartete Verhalten. Allgemein nimmt die Temperatur mit der Tiefe zu. Die ersten 20 m sind durch jahreszeitliche Temperaturschwankungen beeinflusst. Der geringe Temperaturanstieg zwischen 20 m und 80 m ist auf einen Temperaturanstieg der middle-

ren Oberflächentemperatur (globale Erwärmung, Besiedelung) zurückzuführen. Erst ab ca. 80 m verläuft dieser relativ linear und beträgt im Durchschnitt 2.8 K pro 100 m. Am Sondenfuss wurde eine sehr einheitliche Temperatur von 14.0 °C gemessen.

Die Temperatur-Tiefenprofile der Bohrungen 10A und 34A unterscheiden sich im oberen Bereich von denen der anderen Bohrungen. Die Temperaturen sind hier höher. Dies könnte damit zusammenhängen, dass diese Bohrungen im Bereich des ehemaligen Anbaus liegen. Wahrscheinlich wurde hier über die Jahre durch die geheizten Hotelräume der Untergrund aufgewärmt. Mit der Tiefe gleichen sich die Temperaturen wieder denen der anderen Bohrungen an.

Die Testerdwärmesonde liegt rund 20 m oberhalb des Geothermiespeichers, d.h. wurde nicht ab Aushubsohle abgeteuft. Entsprechend ist die Temperatur auf 152 m mit durchschnittlich 13.6 °C um ca. 0.5 K leicht tiefer. Am Sondenfuss auf 200 m beträgt die Temperatur 15.2 °C.

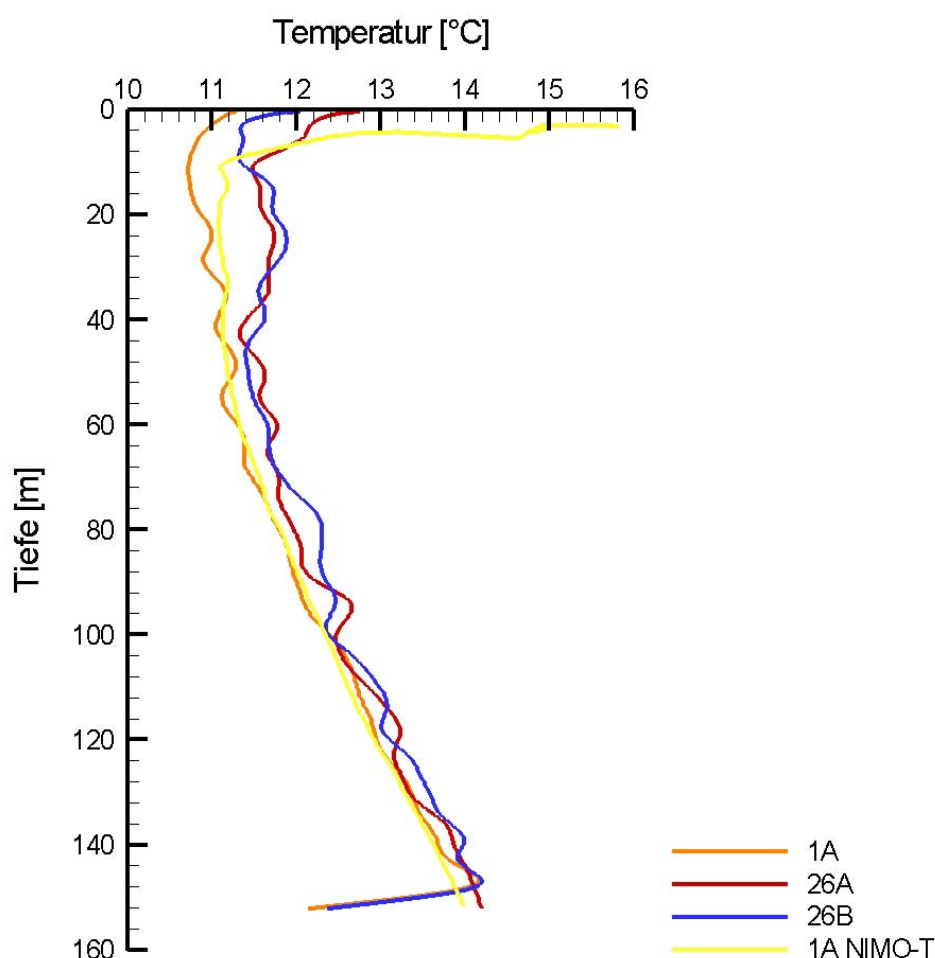


Figur 25: Temperaturprofilmessungen mit NIMO-T zur Bestimmung der initialen Temperaturverteilung im Geothermiespeicher vor der Inbetriebnahme, sowie in der Testbohrung. Die Testbohrung liegt in einem Wald ca. 16 m höher als die Bohrungen mit den übrigen Messungen. Wird die Kurve auf die Aushubsohle verschoben, ergibt sich für die Testbohrung die gleiche Temperatur bei einer Tiefe von 152m.

2) Faseroptische Messungen

Die Erdwärmesonde 1A und die in Serie geschalteten Sonden 26A und 26B sind mit faseroptischen Hybridkabel ausgerüstet (siehe Figur 24). Die faseroptischen Kabel sind fix installiert und am Erdwärmesondenverteiler zugänglich. Am 21.12.2006 wurden von der Firma GTC Kappelmeyer GmbH initiale faseroptische Messungen durchgeführt. Bei den Messungen wurde eine schlechte Koppelung der Messeinrichtung am Stecker der faseroptischen Kabel festgestellt. Dies ist auf eine Beschädigung des Steckers während der Bauphase und auf eine falsche Konfektionierung der Steckerverbindung zurückzuführen. Aufgrund der schlechten Koppelung kann die gemessene Temperatur einen Versatz bezüglich der tatsächlichen Temperatur haben. Durch den Vergleich mit der NIMO-T Messung konnte dieser Versatz (0.4 K) bestimmt und korrigiert werden.

Figur 26 zeigt die geglätteten Temperatur-Tiefenprofile entlang der Bohrungen 1A, 26A und 26B im Vergleich mit der NIMO-T Messung in 1A. Oberflächennah liegen die Temperaturen für die Bohrung 1A bei ca. 10.5 °C, für die Bohrungen 26A und 26B bei ca. 12 °C. Ab einer Tiefe von ca. 60 m ist der Temperaturanstieg mit der Tiefe nahezu linear. Anomal tiefe Temperaturen sind am Sondenfuss zu beobachten. Dies ist auf die engen Biegeradien an den Bohrlochenden zurückzuführen. Auf der Endtiefe von 152 m kann von Temperaturen zwischen 13.7 und 14.2 °C ausgegangen werden. Dies deckt sich mit den NIMO-T-Messungen (siehe Figur 25).



Figur 26: Faseroptische Temperaturprofilmessung zur Bestimmung der initialen Temperaturverteilung im Geothermiespeicher vor der Inbetriebnahme. Als Vergleichsmessung ist die NIMO-T-Messung in der Bohrung 1A dargestellt.

3.3.3 Messungen während des Betriebes

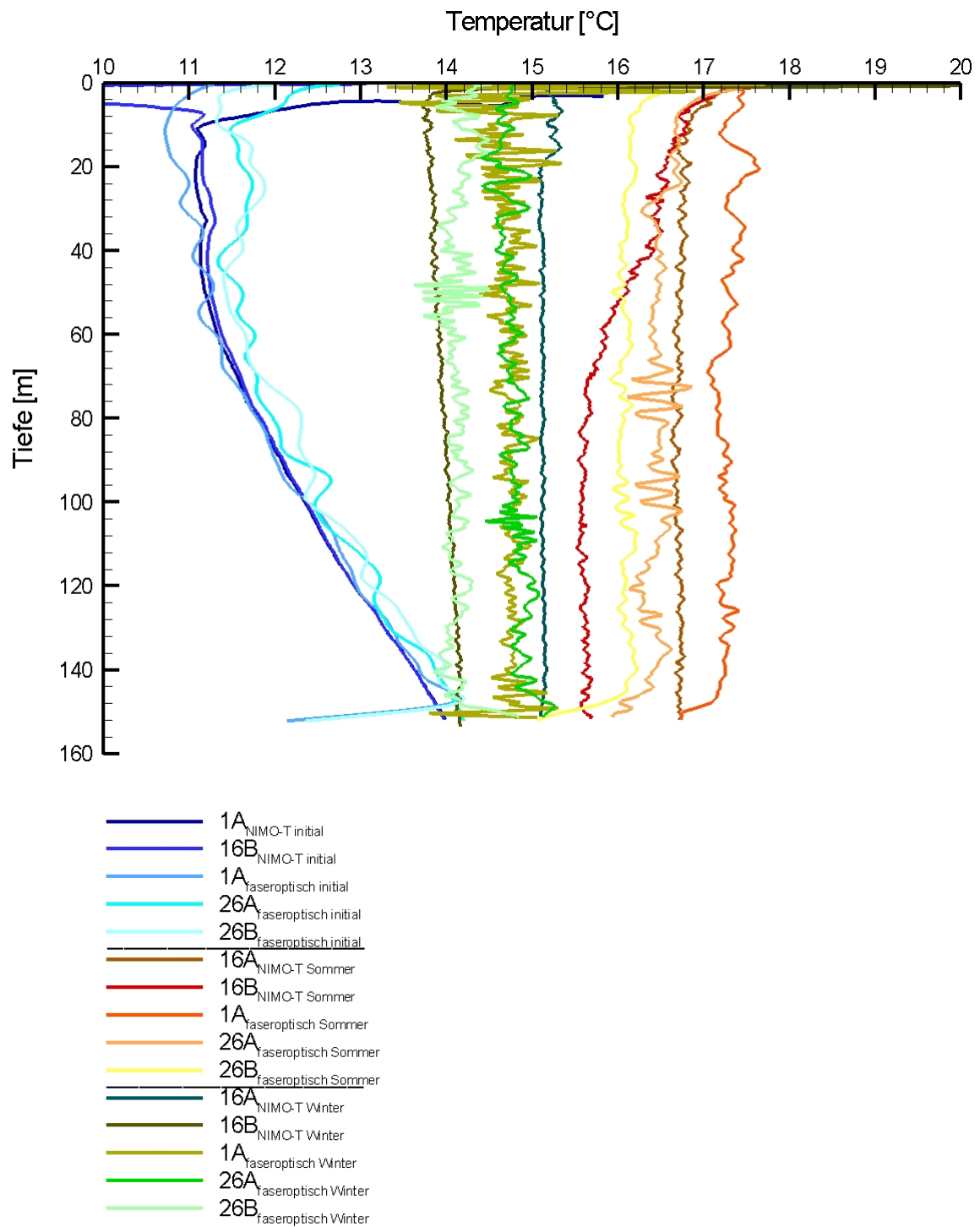
Im Sommer (Juli 2009) und im Winter (Februar 2010) des zweiten Betriebsjahres, wurden die Messungen der Temperaturprofile wiederholt und mit den Initialmessungen (Profile in blauen Tönen) in Figur 27 verglichen. Die Messungen wurden während des Betriebes durchgeführt.

Die faseroptischen Messungen wurden in den Messkabeln ausserhalb der Sondenrohre durchgeführt. Die Temperaturmessungen mit der Messsonde NIMO-T wurden in den Sondenrohren durchgeführt. Dazu wurden die Sondenkreise beim Verteiler geschlossen und die Temperaturen direkt in den Sonden gemessen. Da für beiden Messperioden leider keine Angaben zum Durchfluss in den Sonden vorhanden ist (siehe Kapitel 3.2), ist nicht eindeutig feststellbar, ob die Messungen während einer Betriebs- oder Stillstandsphase durchgeführt wurden.

Figur 27 zeigt die Temperaturen während des Betriebes zusammen mit den entsprechenden initialen Messungen. Während der Kühlperiode im Sommer wird der Untergrund durch die eingetragene Wärme aufgeheizt (Profile in roten Tönen). Die Temperaturverteilung ist entlang der Sonden relativ homogen. Die mittleren Temperaturen liegen zwischen 15.5 und 17.5 °C. Im Durchschnitt wurde der Untergrund bezüglich der Initialmessungen um 3 bis 5 K aufgewärmt.

Der Temperaturverlauf in den beiden in Serie geschalteten Sonden 16A und 16B zeigt für den Sommerbetrieb denselben charakteristischen Verlauf, wie dies die Berechnungen für die Dimensionierung in Kapitel 2.3.5. Figur 14 zeigt für 16A die Messungen aus dem aufsteigenden Rohr und für 16B die Messungen aus dem absteigenden Rohr. Das Sondenfluid wird in der Sonde 16A vorgekühlt und durchströmt danach die Sonde 16B. Beim Durchlaufen der zweiten Sonde wird das Sondenfluid nochmals um ca. 1 K abgekühlt. Diese Messungen zeigen, dass durch die Serieschaltung der Erdwärmesonden die gewünschte Vorkühlung durch die erste Sonde auch tatsächlich erreicht wird. Diese Feinheiten sind in den faseroptischen Messungen nicht zu sehen. Zum einen ist die Messauflösung geringer, zum anderen werden die Messungen ausserhalb der Sondenrohre durchgeführt.

Die Profile in den grünen Tönen zeigen die Temperaturverteilung im Geothermiespeicher im Winter 2010. Im Winter wird über das Erdwärmesondenfeld geheizt. Dem Untergrund wird über die Wärmepumpe Wärme entnommen. Durch den Heizbetrieb hat sich der Geothermiespeicher gegenüber den Sommermessungen um ca. 2 K auf 13 – 15 °C abgekühlt. Auch hier zeigt sich wieder der Effekt der Serieschaltung von Erdwärmesonden. Das Sondenfluid wird in der Sonde 16B vorgewärmt. Bei Durchströmen der nachgeschalteten Sonde 16A wird das Fluid zusätzlich um ca. 1 K nachgewärmt. Beide Messungen in Figur 14 zeigen den Temperaturverlauf im aufsteigenden Rohr.



Figur 27: Vergleich der initialen Temperaturmessung mit denen im Sommer und im Winter des zweiten Betriebsjahres.

3.4 Betriebserfahrung

Trotz der anderen Abnehmerstruktur mit mehr Kältebezüger kann die Anlage wie gebaut betrieben werden. Sie wird lediglich anders bewirtschaftet. Durch den höheren Kältebedarf sank der mögliche Anteil an Direktkühlung; das heisst, die Kältemaschine läuft früher und länger und die Abwärme der Klimatisierung, welche im Geothermiespeicher zwischengespeichert wird, wärmt den Untergrund stärker auf. Der Anteil an Direktkühlung über die Erdwärmesonden ist zwar relativ klein, aber dadurch, dass sie in Serie mit der Kältemaschine geschaltet sind, werden die Erdwärmesonden während der aktiven Kühlung zur Vorkühlung für die Kältemaschine verwendet. Die Kältemaschine läuft zwar mehr, kann aber durch die Vorkühlung effizienter betrieben werden. Die Erdwärmesonden leisten somit konstant ihren Beitrag zur Kühlung und zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Da bereits in der Planungsphase klar war, dass die Kältelasten nicht zu 100 % über die direkte Kühlung mit dem Geothermiespeicher gedeckt werden können, war bereits im ursprünglichen Konzept die Vorkühlung der Kältemaschine über den Geothermiespeicher vorgesehen.

Da der Untergrund durch die Abwärme der Klimatisierung "relativ" stark aufgewärmt wird, läuft die Wärmepumpe im Heizbetrieb auf einem hohen Temperaturniveau beim Verdampfer. Die Anlage kann somit im Heizfall effizienter betrieben werden als vorgesehen und der COP liegt höher als ursprünglich angenommen.

Im Winter 2009/2010 wurde der Heizbedarf über die Absorptionswärmepumpe erbracht. Mit einem COP von bis zu 2.5 bezieht sie im Vergleich zu ihrer Nutzleistung von 500 kW relativ wenig Leistung aus dem Boden. Es ist zu überlegen, ob der Heizbedarf alternativ auch hauptsächlich durch die Schraubenverdichter-Wärmepumpe bereitgestellt werden könnte. Diese besitzt ein COP von bis zu 6. Dadurch würde sich der Untergrund im Winter stärker auskühlen und könnte so im Sommer mehr Kälteenergie zur Verfügung stellen.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass mit der gebauten Anlage gut auf die starken Änderungen in der Bezügerstruktur reagiert werden konnte.

4. Schlussfolgerungen

Ziel des vorliegenden Projekts war es, den Betrieb des Geothermiespeichers des Hotels "The Dolder Grand" in Zürich für das volle zweite Betriebsjahr zu analysieren. Der Bericht enthält weiter eine Zusammenfassung des Vorgängerprojekts BFE-Nr. 100'878. Darin sind die wichtigsten Ergebnisse aus der Ausführungsplanung dargestellt. Eine direkte Gegenüberstellung der Grundlagen der Ausführungsplanung mit Messdaten des nun zweijährigen Betriebs erweist sich aus verschiedenen Gründen als schwierig. Die hauptsächlichen Gründe sind:

- Es wurden signifikant grössere Kältebezüge an das EWS-Feld angeschlossen als in der Ausführungsplanung geplant, die zudem ein tieferes Temperaturniveau benötigen als für die Auslegung angenommen.
- Während die Messdatenerfassung in den Erdwärmesonden zufriedenstellend durchgeführt werden konnte, ergaben sich durch zwischenzeitlich starke Umstellungen in der Leitzentrale bedeutende Messdatenverluste, resp. -ausfälle, so dass der Betrieb der Anlage nur ungenügend abgebildet ist.

Im Fokus standen daher die nachstehenden Fragestellungen:

- Entspricht das thermische Verhalten der Erdwärmesonden wie in der Planungsphase angegeben?
- Kann die Anlage auch unter dem geänderten Bewirtschaftungsregime (wesentlich höherer Kältebezug) nachhaltig betrieben werden?

Die Messdaten aus den Erdwärmesonden haben gezeigt, dass das thermische Verhalten bei Wärmeentzug als auch bei Wärmeeintrag (Kühlung) den berechneten Werten entspricht. Insbesondere der Vorerwärmungseffekt im Winterbetrieb, resp. der Vorkühlungseffekt im Sommerbetrieb wurde messtechnisch nachgewiesen. Die nun sehr kälte dominierte Nutzung bildet sich auch in relativ hohen EWS-Temperaturen während des gesamten Jahres ab.

Grundsätzlich hat sich das Betriebsschema der ausgeführten Anlage gegenüber der geplanten Anlage nicht geändert. Der nun erhöhte Kältebedarf und das teilweise notwendige tiefere Temperaturniveau für die Kühlung bewirken eine grundsätzlich erhöhte Laufzeit der Kältemaschine. Wie die Messresultate zeigen, liegt der Wärmeentzug im Winterbetrieb unterhalb des maximal möglichen Wertes. Daraus ergibt sich noch ein betriebliches Optimierungspotenzial, indem für den Wärmeentzug bevorzugt die Wärmepumpen mit den höheren COP eingeschaltet werden. Dadurch könnte mehr Wärme aus dem Geothermiespeicher entzogen werden, was die Laufzeit der Kältemaschine im Sommerbetrieb verringern würde. Die Folge

wäre eine Reduktion des Stromverbrauchs bei der Kälteerzeugung und eine Reduktion des Gasverbrauches bei der Wärmeerzeugung (Gas-Absorptionswärmepumpe).

Grundsätzlich ist durch das Anlagekonzept eine nachhaltige Bewirtschaftung des Geothermiespeichers gegeben.

5. Berichte

Rohner, E, Bassetti, S., 2004. Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich, Zwischenbericht Projekt Nr. 100'878, Bundesamt für Energie.

Kappelmeier GmbH, 2006. Faseroptische Temperaturmessungen – Erdwärmesondenanlage Dolder Zürich. Messungen 21. 12. 2006.

Kappelmeier GmbH, 2009. Faseroptische Temperaturmessungen – Erdwärmesondenanlage Dolder Zürich. Messungen 10. 07. 2009.