

# **Grundwassereinfluss auf Erdwärmesonden: Geländeuntersuchungen und Modellrechnungen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften an der  
Fakultät für Bau-, Geo- und Umweltwissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie KIT  
vorgelegte

## **Dissertation**

**von Dipl.-Geol. Thomas Kölbl**

aus Recklinghausen

Karlsruhe 2010

Tag der mündlichen Prüfung:	01. Dezember 2010
Referent:	Prof. Dr. Heinz Hötzl
Korreferent:	Prof. Dr. Thomas Kohl



## KURZFASSUNG

Ökologie, Wirtschaftlichkeit und Funktionalität einer Erdwärmesondenanlage werden ganz wesentlich von der angepassten Auslegung und Zusammenstellung aller Systemkomponenten geprägt. Zu üppige Systeme verursachen zumindest unnützlich hohe Installationskosten. Es kann aber auch durch die vergleichsweise höhere Leistungsaufnahme von Nebenaggregaten, wie etwa den Soleumwälzpumpen, zu Performanceverlusten der Gesamtanlage kommen. Noch problematischer sind nicht ausreichend dimensionierte Erdwärmesondenanlagen: Die Palette möglicher Folgen reicht hier von erhöhtem Stromverbrauch bis hin zum Anlagenausfall.

Die Prognose der Temperaturentwicklung im Untergrund beim Betrieb von Erdwärmesondenanlagen stellt eine besondere Herausforderung dar. Während auf der Gebäudeseite für Heiz- und Kühlsysteme seit langem praxisbewährte Regeln und Softwaretools existieren, ist die Simulation des Betriebsverhaltens geschlossener untertägiger Wärmetauscher eine recht junge Disziplin. Zwar kann für die Dimensionierung von Erdwärmesonden bei Projekten im Einfamilienhaussektor auf einfache Verfahren mit ausreichender Genauigkeit zurückgegriffen werden, größere Bauvorhaben weisen jedoch erhöhten Planungsbedarf auf und verlangen den Einsatz geeigneter Computerprogramme.

Die heute im Planungsalltag genutzten Softwarelösungen bedienen sich analytischer bzw. semi-numerischer Verfahren. Ihnen ist gemein, dass die unkomplizierte Bedienbarkeit und der vergleichsweise geringe Arbeitsaufwand mit verschiedenen Restriktionen einhergehen. Zwar kann hier mit moderner Software auf der Basis numerischer Verfahren Abhilfe geschaffen werden, ihr Einsatz ist jedoch im Hinblick auf gängige Planungshonorare im Markt oft genug nicht durchsetzbar. Um diesem Dilemma zu begegnen, bedarf es der Entwicklung einfacher, aber hinreichend genauer Verfahren zur optimierten Auslegung von Erdwärmesonden. Andernfalls wird auch künftig die Nutzung der oberflächennahen Geothermie bei größeren Bauvorhaben bereits während der Vorauswahl einer geeigneten Heiz-/Kühlvariante aufgrund unzureichender Planungssicherheit vom Bauherrn bzw. seinen Fachplanern allzu oft ausgeschieden werden.

Mit den heute praxisingängigen Verfahren zur Auslegung von Erdwärmesonden wird lediglich der konduktive Anteil am Wärmetransport im Untergrund berücksichtigt. Der Einfluss eines Grundwasserleiters auf die Performance einer Erdwärmesondenanlage wird dagegen in der Literatur uneinheitlich beurteilt: Einige Autoren unterstellen, dass dieser Einfluss vernachlässigt werden kann, während Untersuchungen mit numerischen Verfahren einen signifikant hohen Beitrag ausreichend leistungsstarker Grundwasserleiter auf die Performance einer Erdwärmesondenanlage anzeigen. Um die Frage nach dem Grundwassereinfluss zu beantworten, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Testfeld entworfen und in Herbrachhofen nahe Leutkirch im Allgäu realisiert, das durch die Kombination moderner Messtechnik mit einem analytischen Rechenverfahren die Grundlage zur einfachen Quantifizierung des Einflusses eines Grundwasserleiters auf die Leistung einer Erdwärmeanlage bildet.

Besonderes Augenmerk wurde auf das Design des untertägigen Monitoringsystems gelegt. In der Vergangenheit kamen für Temperaturmessungen an Erdwärmesonden nahezu ausschließlich PT100-Sensoren zum Einsatz. Ihrer Anzahl in einer vergleichsweise schlanken Erdwärmesondenbohrung sind aufgrund der Kabeldurchmesser jedoch enge Grenzen gesetzt. Um die Temperaturen bei verbesserter räumlicher Auflösung auf Vor- und Rücklauf einer Erdwärmesonden zu messen, bieten sich Lichtwellenleiter an (Distributed Temperature Sensing, kurz:

DTS). Mit ihnen wurden im Testfeld Herbrachhofen fünf von acht Erdwärmesonden auf Vorlauf und Rücklauf – insgesamt knapp 1.200 m Kabellänge – ausgestattet.

Die räumliche Auflösung des im Testfeld Herbrachhofen eingesetzten faseroptischen DTS-Systems kann als sehr gut bezeichnet werden. Um jedoch eine mit herkömmlichen PT100-Sensoren vergleichbare Messgenauigkeit zu erreichen, sind vergleichsweise langandauernde Messintervalle von etwa 20 Minuten notwendig. Für einzelne Detailbetrachtungen ist dies nicht ausreichend, die Messausrüstung am Standort wurde daher um PT100-Sensoren ergänzt.

Der Geologie am Standort Herbrachhofen folgend wurde der Untergrund für die Untersuchungen in drei Bereiche gegliedert. Die beiden oberflächennächsten werden von quartären Lockersedimenten mit und ohne Grundwasservorkommen gebildet, der tiefste baut sich aus den Gesteinen der Oberen Süßwassermolasse auf. Mit der Vereinfachung, dass diese drei Einheiten untereinander thermisch entkoppelt sind, kann mit dem DTS-System tiefenintervall- und zeitschrittbezogen die mittlere Temperatur im Nahbereich der Erdwärmesondenrohre bestimmt werden. Auf diese Weise konnte am Standort Herbrachhofen erstmalig der Einfluss eines Grundwasserleiters auf die Temperaturentwicklung im Untergrund beim Betrieb von Erdwärmesonden messtechnisch über die gesamte Aquifermächtigkeit erfasst werden.

Für die Simulation der Temperaturentwicklung wurden das Kelvinsche Linienquellenverfahren und die Zylinderquellenmethode, aber auch ein im Planungsalltag häufig genutztes, semi-numerisches Verfahren („g-functions“) eingesetzt. Für die beiden grundwasserfreien Tiefenintervalle am Standort liefert insbesondere das Kelvinsche Linienquellenverfahren sehr gute Ergebnisse. Für den Bereich des Grundwasserleiters konnten die Messungen dagegen weder mit dieser noch mit den beiden anderen Methoden hinreichend genau abgebildet werden. Für dieses Tiefenintervall wurde daher ein analytisches Verfahren auf der Grundlage der Theorie der Beweglichen Linienquellen verwendet. Dieses Verfahren wird vor allem zur Temperaturprognose beim Laserstrahlschneiden von Metallplatten verwendet. Im Prinzip entspricht eine Bewegliche Linienquelle einer Kelvinschen Linienquelle, die mit einer definierten virtuellen Quellengeschwindigkeit bewegt wird. Diese Quellengeschwindigkeit kann standortbezogen aus den thermo-hydraulischen Parametern von Grundwasserleitern berechnet werden.

Ein wesentliches Ziel der Temperaturprognose bei Erdwärmesonden ist die Bestimmung der Fluidtemperatur im Arbeitsmittel und damit letztlich der dem Untergrund unter den gegebenen Randbedingungen entziehbaren Energie. Hierzu ist die Kenntnis des thermischen Bohrlochwiderstands unerlässlich. Bei einem hinreichend leistungsstarken Aquifer wird er ebenfalls vom Grundwasserstrom beeinflusst. Hierfür wurde der Modellansatz um einen weiteren Term – ebenfalls auf der Grundlage der Bewegliche-Linienquellen-Theorie – ergänzt.

Die Theorie der Beweglichen Linienquellen wurde für Erdwärmesondenanlagen bisher nur in einzelnen theoretischen Arbeiten bzw. in einem Laborexperiment untersucht. Ihr Einsatz bei einer Testanlage stellte ein Novum dar. Die Untersuchungen in Herbrachhofen belegen, dass das Bewegliche-Linienquellen-Verfahren die Temperaturentwicklung im grundwassererfüllten Tiefenbereich sowohl unmittelbar am Erdwärmesondenrohr wie auch in einiger Entfernung weit besser abbildet, als die in den gängigen Planungstools implementierten Verfahren. Mit der Kombination von Kelvinscher und Beweglicher Linienquellenmethode war es möglich, den Einfluss des Grundwasserleiters in Herbrachhofen auf die Testanlage zu quantifizieren: im Vergleich mit einem vollständig grundwasserfreien Untergrund führte er bereits im ersten Betriebsjahr zu einer Einsparung bei der CO<sub>2</sub>-Emission von 4,7 % und bei den Jahres-

heizkosten von etwa 800 €. Im Hinblick auf den vergleichsweise geringen Anteil des grundwassererfüllten Tiefenintervalls von lediglich 5 % an der Gesamttiefe der Erdwärmesondenbohrungen wird deutlich, dass leistungsstarke Grundwasserleiter bei der Auslegung von Erdwärmeeinrichtungen von einiger Bedeutung sind.



**VORWORT**

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Angewandte Geologie (KIT AGW) der Universität Karlsruhe erstellt.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. H. Hötzl (KIT AGW). Er gab mir nicht nur die Möglichkeit, mich mit diesem äußerst interessanten Thema auseinandersetzen zu dürfen, sondern war stets auch mit Rat und Tat eine große Unterstützung.

Bei Herrn Prof. Dr. T. Kohl (KIT AGW) möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats sehr herzlich bedanken. Seine Kompetenz und Unterstützung hat sehr viel zum Ergebnis dieser Arbeit beigetragen. Die fruchtbaren Diskussionen mit ihm waren und sind für mich von hervorragender Bedeutung.

Großer Dank gilt auch Prof. Dr. W. Münch, Leiter des Bereichs Forschung & Innovation bei der EnBW Energie Baden-Württemberg AG. Seine Unterstützung ermöglichte überhaupt erst die Forschungsarbeiten im Testfeld Herbrachhofen, seine Geduld die Erstellung dieser Arbeit.

Ebenso schulde ich Frau Prof. Dr. S. Walker-Hertkorn (Fa. systherma), Frau Dipl.-Geok. G. Campillo (The World Bank, Mexiko), Herrn Dr. R. Zorn (ElFER) und Herrn Dr. H. Steger (KIT AGW), aber auch meinen Kollegen von der Forschung & Innovation der EnBW AG, und hier zuallererst Frau Dipl.-Geol. P. Orywall und Herrn Dr. habil. L. Walz, großen Dank für stete Diskussionsbereitschaft, Geduld und Freundschaft.

Danken möchte ich auch Herren Dr. M. Strohmenger und Herrn Dipl.-Geol. P. Lath vom Büro Dr. Ebel & Co. GmbH (Bad Wurzach), die mich an ihrem profunden Wissen zur lokalen Geologie und Hydrogeologie im Raum Herbrachhofen teilhaben ließen.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. G. Ulrich vom Baugrundinstitut Dr.-Ing. G. Ulrich, der mir vor Jahren die Möglichkeit eröffnete, in der Geothermie tätig zu werden.

Auch gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. P. A. Vermeer (Universität Stuttgart) sowie Herrn Dr. R. Brinkgreve (Plaxis bv, Delft), ganz besonders aber Herrn Dr. R. Al-Khoury von der TU Delft, Herrn Dr. R. Schramedei (Stadtwerke Düsseldorf AG) und Herrn Dipl.-Geol. D. Leyens (EnBW Energie Baden-Württemberg AG) für die Unterstützung gerade zu Beginn der Forschungsarbeiten in Herbrachhofen.

Viele haben beim Bau des Testfelds in Herbrachhofen geholfen. Hervorheben möchte ich die Mitarbeiter der Moräne Bohrgesellschaft mbH und des Baugrundinstituts Dr.-Ing. G. Ulrich (Leutkirch-Herbrachhofen), aber auch die Diplomanden der Angewandten Geologie der Universität Karlsruhe.

Ganz besonders dankbar bin ich meinen Eltern. Ohne ihre stete Unterstützung in allen Lebenslagen würde es diese Arbeit nicht geben.

Der größte Dank gebührt jedoch meiner Frau Rosa Sin Yee Lo für ihre Unterstützung und Geduld. Der großzügig bemessene Raum, den sie mir bei dieser Arbeit ließ, kann nicht hoch genug bewertet werden.

Für Tiffany

---

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>III</b>
<b>Vorwort .....</b>	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgabenstellung .....	5
<b>2 Aufbau und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen.....</b>	<b>8</b>
2.1 Funktionsprinzip einer Erdwärmesondenanlage.....	8
2.2 Auslegungsplanung von Erdwärmesondenanlagen .....	15
2.3 Wirtschaftlich-ökologische Kriterien bei der Auslegung .....	20
<b>3 Grundlagen des Wärmetransports bei Erdwärmesonden .....</b>	<b>25</b>
3.1 Ungestörte Untergrundtemperaturen .....	25
3.2 Wärmeübertragung im Untergrund.....	28
3.3 Thermische Widerstände .....	30
3.4 Analytische Lösungen für den Wärmetransport bei Erdwärmesonden .....	36
3.4.1 Kelvins Linienquelle .....	36
3.4.2 Bewegliche Linienquelle.....	41
3.4.3 Zylinderquelle .....	47
3.4.4 Eskilsons Verfahren .....	52
3.5 Gegenseitiger Einfluss von Erdwärmesonden und variabler Energieentzug.....	55
<b>4 Die Testanlage Herbrachhofen .....</b>	<b>58</b>
4.1 Geologisch-hydrogeologischer Überblick .....	58
4.2 Auslegung und Installationen .....	63
4.2.1 Heiz-/Kühlanlage, Lastprofil.....	63
4.2.2 Auslegung des Erdwärmesondenfelds .....	69
4.2.3 Bohr- und Installationsarbeiten .....	74
4.2.4 Messtechnik und -aufbau .....	76
<b>5 Messergebnisse und Parameterbestimmungen .....</b>	<b>83</b>
5.1 Geologie und geothermische Gesteinsparameter.....	83
5.2 DTS- und PT100-Temperaturmessungen .....	86
5.2.1 Fehlerbetrachtung und Plausibilitätskontrolle der DTS-Messungen .....	88
5.2.2 Ungestörte Temperatur, geotherm. Gradient und terrestr. Wärmestromdichte... 91	
5.2.3 Temperaturprofile und Inversionsberechnung .....	93

5.2.4 Grundwassereinfluss auf die Temperaturentwicklung .....	95
5.2.5 Identifikation des Aquifers aus Messwerten.....	98
5.3 Ermittlung des Lastprofils.....	102
5.4 Temperaturprofile für Modellrechnungen.....	105
<b>6 Modellrechnungen.....</b>	<b>108</b>
6.1 Modellparameter .....	108
6.2 Earth Energy Designer, Kelvinsche Linienquelle und Zylinderquelle .....	110
6.3 Bewegliche Linienquellen (Moving Line Sources) .....	115
6.3.1 Messwerte vs. Kernbohrung .....	121
6.3.2 Messwerte vs. EWS 6 .....	124
6.3.3 Kernbohrung, virtuelle Messpunkte und EWS 7 .....	125
6.3.4 Bestimmung der Entzugsleistung ohne und mit Grundwassereinfluss.....	127
6.4 Ökologisch-ökonomische Betrachtungen .....	129
<b>7 Zusammenfassung relevanter Ergebnisse, Ausblick.....</b>	<b>131</b>
7.1 Untersuchungsergebnisse .....	131
7.1.1 Monitoringsystem .....	131
7.1.2 Temperaturmessergebnisse .....	131
7.1.3 Modellergebnisse .....	132
7.2 Ausblick .....	133
<b>8 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>135</b>

---

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abb. 1-1: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren (nach VDEW 2006).....	1
Abb. 1-2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen weltweit (nach KALTSCHMITT & WITT 2005).....	2
Abb. 1-3: Absatzstatistik Wärmepumpen in Deutschland (nach BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE 2009).....	3
Abb. 1-4: Im Zeitraum Mai 2006 bis Februar 2007 geförderte Erdwärmesondenanlagen in Baden-Württemberg (nach CAMPILLO 2007) .....	4
Abb. 1-5: Auslegungsergebnisse an einem Referenzobjekt (nach STEINKAMP 2003, CAMPILLO 2007) .....	6
Abb. 2-1: Varianten erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen (ENBW 2007a).....	9
Abb. 2-2: Schemaskizze einer Erdwärmesondenanlage (umgezeichnet nach SANNER 2000).....	10
Abb. 2-3: Schemazeichnung einer Wärmepumpe (nach DIETZEL & WAGNER 1998).....	10
Abb. 2-4: Schnittzeichnungen durch verschiedene Erdwärmesondentypen, von links nach rechts: Einfach-U-Sonde, Doppel-U-Sonde, Koaxial-Sonde.....	11
Abb. 2-5: Schemazeichnung einer Doppel-U-Sonde.....	12
Abb. 2-6: Schematische Darstellung des langfristigen Temperaturtrends.....	15
Abb. 2-7: Bei der Planung angesetzte Entzugsleistungen von Erdwärmesonden (CAMPILLO 2007).....	18
Abb. 2-8: Overnight Capital Cost von Erdwärmesondenbohrungen .....	23
Abb. 2-9: Betriebskosten und CO <sub>2</sub> -Einsparung in Abhängigkeit von der Jahresarbeitszahl (Grunddaten aus Tab. 2-7) .....	24
Abb. 3-1: Abhängigkeit der oberflächennahen Untergrundtemperatur vom jahreszeitlichen Gang der Lufttemperatur nach KASUDA (1965).....	27
Abb. 3-2: Ungestörte Untergrundtemperaturen nach KASUDA (1965) und nach Gl. 3.01.....	28
Abb. 3-3: Bohrlochquerschnitt einer Einfach-U-Sonde (nach YOUNG 2004, HELLSTRÖM 1991).....	31
Abb. 3-4: Wärmeleitung beim Mehrschichtfall (nach WAGNER 2004) .....	32
Abb. 3-5: Vereinfachter Bohrlochquerschnitt und thermische Widerstände (nach KOENIGSDORFF ET AL. 2006).....	34
Abb. 3-6: Schnittzeichnung Doppel-U-Sonde im Bohrloch.....	34
Abb. 3-7: Einfluss der Temperaturleitfähigkeit auf den Koeffizienten $\gamma$ für Berechnungen nach LOOSE (2006) .....	38

Abb. 3-8: Vergleich von Näherungslösungen (LOOSE, YOUNG, GUERNSEY ET AL.) mit den Ergebnissen eines CAS-Programms (MATHCAD®).....	39
Abb. 3-9: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{so, fl}$ und der vol. Wärmekapazität $c_{vso, fl}$ aus arithmetischem bzw. geometrischem Mittel.....	42
Abb. 3-10: Linienquelle (Line Source) vs. Moving Line Source ohne Grundwassereinfluss .....	45
Abb. 3-11: Vergleich Linienquelle und Moving Line Source mit Grundwasserfluss.....	46
Abb. 3-12: Linienquelle (Line Source) und Moving Line Source mit Grundwasserfluss bei unterschiedlichen Winkeln $\varphi$ .....	46
Abb. 3-13: Schemazeichnung zum „Buried Electrical Cable“-Modell nach YOUNG (2004) ..	49
Abb. 3-14: Vergleich Linienquelle, Moving Line Source ( $U \approx 0$ ) und Zylinderquelle.....	51
Abb. 3-15: Superposition linearer Energieeintragsschritte (nach ESKILSON 1987, YAVUZTURK 1999) .....	56
Abb. 4-1: Übersichtsplan mit Lage des Testfelds Herbrachhofen .....	58
Abb. 4-2: Geologischer Schnitt im Bereich Unterzeil (HERRMANN 2003) .....	59
Abb. 4-3: Geologische Übersichtskarte, M 1:12.500 (HERRMANN 2003, RÜSGEN 2003) .....	60
Abb. 4-4: Lageplan Grundwasserbrunnen GWB I und GWB II im Testfeld Herbrachhofen.....	61
Abb. 4-5: Versorgungsschema der Heiz-Kühlanlage in Herbrachhofen (nach EISEN 2003) ...	63
Abb. 4-6: Abhängigkeit des Zuschlagfaktors von der Dauer der Sperrzeit .....	65
Abb. 4-7: Heizleistung, Leistungsaufnahme und COP der Wärmepumpe (umgezeichnet nach ALPHA INNOTEC 2002) .....	67
Abb. 4-8: Heiz- und Kühllastprofil der Testanlage Herbrachhofen (KÖLBEL 2003A) .....	68
Abb. 4-9: Datenbankwerte Wärmeleitfähigkeit (nach HELLSTRÖM & SANNER 2000) und Ergebnis eines TRT.....	70
Abb. 4-10: Datenbankwerte für die volumetrische Wärmekapazität (nach HELLSTRÖM & SANNER 2000) .....	70
Abb. 4-11: Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Oberen Süßwassermolasse in der Schweiz (umgezeichnet nach LEU ET AL. 2006) .....	71
Abb. 4-12: Prognose der Entwicklung der mittleren Soletemperatur über 25 Jahre ohne (obere Grafik) und mit Berücksichtigung von Lastspitzen (untere Grafik).....	73
Abb. 4-13: Ergebnisse der Auslegungsberechnung mit verschiedenen Verfahren (STEINKAMP 2003, KÖLBEL 2003A).....	74
Abb. 4-14: Lageplan des Erdwärmesondenfelds (rote Schrift: verwendeter Hinterfüllbaustoff).....	75
Abb. 4-15: DTS-Einheit bestehend aus Quelle, Empfänger und Lichtleiterkabel .....	77

---

Abb. 4-16: Schematische Darstellung des Spektrums des rückgestreuten Lichts bei DTS-Messungen (nach LÜBBECKE & GRUNWALD 2004, HINRICHS 2007).....	78
Abb. 4-17: Schemazeichnung einer Erdwärmesonde mit aufmontiertem Lichtleiterkabel.....	79
Abb. 4-18: Verlegungsschema Lichtleiterkabel .....	80
Abb. 4-19: Darstellung des Messrohres in EWS 1 (linke Teilabbildung) und des Bypass-Systems an EWS 7 (rechte Teilabbildungen).....	81
Abb. 4-20: Messausstattung des Erdwärmesondenfelds.....	82
Abb. 5-1: Profil der Kernbohrung und Wärmeleitfähigkeitsmessungen (nach HUNN 2004).....	84
Abb. 5-2: Vergleich der Messergebnisse im Testfeld Herbrachhofen mit Schweizer Daten ..	85
Abb. 5-3: Messung über die gesamte DTS-Kabellänge.....	87
Abb. 5-4: Messwerte EWS 2 und EWS 5 .....	87
Abb. 5-5: Klassenbezogene relative Messwertshäufigkeit am Sondenfuß (oben EWS 2, unten EWS 5).....	88
Abb. 5-6: Zeitlicher Gang der Messwerte EWS 2 (1 m Tiefe, freiliegend).....	90
Abb. 5-7: Abgleich PT100- und DTS-Messungen .....	90
Abb. 5-8: Temperaturentwicklung mit der Tiefe (links Messwerte DTS, rechts lineare Regression, Messung vom 23.12.04).....	91
Abb. 5-9: DTS-Messung Vorlauf-/Rücklauf-temperatur einer Einzel-EWS im Betrieb.....	93
Abb. 5-10: Temperaturprofile und Berechnungsergebnissen nach KASUDA (1965) .....	94
Abb. 5-11: Temperaturgang am Standort Herbrachhofen in Abhängigkeit von der Jahreszeit .....	95
Abb. 5-12: Temperaturgang in der Messbohrung (Messtag 103 bis 167 interpoliert).....	96
Abb. 5-13: Differenztemperaturen PT100-Sensoren in der Kernbohrung.....	97
Abb. 5-14: Mittlere Temperaturen in definierten Tiefenintervallen (EWS 2) .....	98
Abb. 5-15: Mittelwerte Temperaturmessung in EWS 2 im Betrieb bzw. im Stillstand.....	99
Abb. 5-16: Temperaturprofile und -gradienten an EWS 2 während Stillstand bzw. Betrieb.	100
Abb. 5-17: Prognostizierte Temperaturprofile nach KASUDA (1965) vs. Messwerte EWS2.	101
Abb. 5-18: Ein- bzw. Zwei-Verdichter-Betrieb .....	102
Abb. 5-19: Heiz-/Kühllastdaten, Stromaufnahme und <i>COP</i> .....	103
Abb. 5-20: Mittlere spezifische Entzugsleistung Erdwärmesonden je Zeitschritt .....	104
Abb. 5-21: Abgleich Lastprofile (Prognose und Realität).....	104
Abb. 5-22: Mittlere Temperaturen aus DTS-Messungen .....	105
Abb. 5-23: Mittlere Temperaturen aus DTS- und PT100-Messungen .....	106

Abb. 5-24: Mittlere Temperaturen in verschiedenen Tiefenintervallen aus DTS-Messungen .....	107
Abb. 6-1: Ergebnisse der EED-Simulation vs. Temperaturmessungen .....	111
Abb. 6-2: Temperaturprognosen nach der Kelvinschen Linienquelle für EWS 2 .....	112
Abb. 6-3: Zylinderquellengleichung nach YOUNG (2004) .....	113
Abb. 6-4: Kelvinsche Linienquelle und Zylinderquelle vs. Temperaturmessungen .....	114
Abb. 6-5: Geothermische Einheiten am Standort Herbrachhofen.....	115
Abb. 6-6: Schematisiertes Ablaufdiagramm .....	117
Abb. 6-7: Berechnete vs. gemessene Temperaturen ( $R_b$ nach SUTTON ET AL. bzw. EED) .	118
Abb. 6-8: Thermischer Bohrlochwiderstand $R_b$ in Abhängigkeit vom $k_f$ -Wert .....	119
Abb. 6-9: Thermischer Bohrlochwiderstand $R_b$ in Abhängigkeit von der Fließrichtung....	120
Abb. 6-10: Messwerte vs. Modellrechnung für 57,5 m Tiefe (Kernbohrung).....	122
Abb. 6-11: Messwerte Kernbohrung und Temperaturganglinie nach KASUDA (1965).....	122
Abb. 6-12: Mess- und Modellwerte für den Bereich des Grundwasserleiters .....	123
Abb. 6-13: Messwerte und Modellrechnung im Grundwasserbereich bei EWS 6.....	124
Abb. 6-14: Mittl. Temperaturen (DTS) und Prognose nach der Beweglichen Linienquelle .	125
Abb. 6-15: Lage der virtuellen Messpunkte .....	126
Abb. 6-16: Temperaturen zwischen Messbohrung (KB) und EWS7 (16 m bis 99 m) .....	126
Abb. 6-17: Temperaturen zwischen Messbohrung und EWS7 (Intervall von 11 m bis 16 m).....	127
Abb. 6-18: Tiefenintervallbezogene Entzugsleistungen und Originaldaten.....	128
Abb. 6-19: Tiefenintervallbezogene spezifischen Entzugsleistungen [ $W/m$ ].....	129

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tab. 1-1: Große erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen in Europa (SANNER 2008).....	5
Tab. 2-1: Auslegungsrelevante Kennzahlen typischer U-Sonden.....	12
Tab. 2-2: Anforderungen an Verpressbaustoffe (DIETRICH & PUFAHL 2007, DIETRICH ET AL. 2007, LEYENS ET AL. 2004).....	13
Tab. 2-3: Kennzahlen verschiedener Wärmeträgermedien („Sole“) (nach SANNER & HELLSTRÖM 2000).....	14
Tab. 2-4: Betriebsweise von Wärmepumpenanlagen für den Heizfall (ALPHA-INNOTEC 2000, WALKER-HERTKORN & THOLEN 2007).....	16
Tab. 2-5: Auslegungsverfahren für Erdwärmesonden (REUSS 2006).....	17
Tab. 2-6: Wesentliche Auslegungsparameter größerer Erdwärmesondenanlagen.....	20
Tab. 2-7: Abschätzung der Verbrauchskosten einer Erdwärmesondenanlage.....	21
Tab. 2-8: Einfluss der Entzugsleistung auf die Kosten einer virtuellen Referenzanlage.....	22
Tab. 3-1: Zusammenstellung Referenzfallparameter.....	27
Tab. 3-2: Parametersatz zu Abbildung 3-10, 3-11 und 3-12.....	45
Tab. 4-1: Hydrogeologischer Datensatz für den Standort Herbrachhofen.....	62
Tab. 4-2: Spezifischer Wärmebedarf verschiedener Gebäudetypen je Flächeneinheit (nach ALPHA-INNOTEC 2002). .....	64
Tab. 4-3: Sperrzeitabhängige Zuschlagsfaktoren (ALPHA-INNOTEC 2002). .....	65
Tab. 4-4: Ergebnisse der Heizleistungsermittlung.....	66
Tab. 4-5: Kenndaten der Wärmepumpe nach Herstellerangaben (ALPHA-INNOTEC 2002) ...	66
Tab. 4-6: Monatsbezogene Spitzenlasten.....	68
Tab. 4-7: Geologisches Grundsatzprofil am Standort Leutkirch-Herbrachhofen.....	69
Tab. 4-8: Kennzahlen Erdwärmesondenmaterial und Arbeitsmedium nach Herstellerangaben.....	72
Tab. 4-9: Ausbaudaten (Daten Hinterfüllung und Verpressvolumen nach HUNN 2004).....	76
Tab. 4-10: Überblick über das Monitoringsystem.....	82
Tab. 5-1: Generalisiertes geologisches Profil am Standort Herbrachhofen.....	83
Tab. 5-2: Mittelwerte geothermischer Parameter am Standort Herbrachhofen.....	86
Tab. 5-3: Fehlerrechnung für die Messergebnisse mit dem DTS-Kabel.....	89
Tab. 5-4: Kennzahlen des ungestörten Untergrunds.....	92
Tab. 5-5: Messergebnisse ungestörte Untergrundtemperaturen $T_0$ .....	92
Tab. 5-6: PT100-Sensoren in der Messbohrung mit Lage zum Grundwasserleiter.....	96

Tab. 6-1: Therm. Bohrlochwiderstände aus EED und Wärmeleitfähigkeit  
Hinterfüllmaterial ..... 112

## SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Definition	SI Einheit
$a$	Temperaturleitfähigkeit	$m^2/s$
$A$	Fläche	$m^2$
$b$	Verschiebungskonstante	-
$c_p$	spezifische Wärmekapazität	$J/(kg \cdot K)$
$c_v$	volumetrische Wärmekapazität	$J/(m^3 \cdot K)$
$CO_2RED$	Reduktion $CO_2$ -Emission	$kgCO_2/a$
$COP$	Coefficient of performance einer Wärmepumpe	-
$d$	Durchmesser	$m$
$d_d$	Dämpfung	$m$
$D$	thermisch isolierter Längenbereich einer Erdwärmesonde	$m$
$E_A$	Jahresheizarbeit	$kWh$
$Es$	Eskilson-Zahl	-
$E_V$	Jahresstromverbrauch	$kWh$
$ET$	Endteufe einer Erdwärmesonde	$m$
$FH$	beheizte Fläche	$m^2$
$f$	Grout Allocation Factor	-
$Fo$	Fourierzahl	-
$g$	g-function nach Eskilson	-
$G$	geothermischer Gradient	$K/m$
$h$	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
$H$	Tiefe Erdwärmesonde	$m$
$JHV$	Jahresheizölverbrauch	$l$
$J_n$	Besselfunktion erster Art, n-ter Ordnung	-
$L$	Einheitslänge	$m$
$L_S$	Abstand der Einzelrohre einer U-Sonde	$m$
$L_{EWS}$	Erdwärmesondenlänge (gesamt) einer Anlage	$m$
$m$	Geradensteigung	-
$K_H$	Jahresheizkosten	$€/a$
$K_S$	Stromtarif	$€/kWh$
$K_V$	Stromkosten	$€$
$\dot{m}$	Massenstrom	$kg/s$
$n$	Porosität	-
$Nu$	Nusselt-Zahl	-
$P_H$	Stromaufnahme Wärmepumpe	$kW$
$Pe$	Péclet-Zahl	-
$Pr$	Prandtl-Zahl	-

## Symbolverzeichnis

---

$Re$	Reynolds-Zahl	-
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	$W/m^2$
$\dot{q}_{geo}$	terrestrische Wärmestromdichte	$W/m^2$
$\dot{q}_l$	Wärmestromdichte je Meter Erdwärmesonde, spez. Entzugsleistung	$W/m$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$W$
$Q_0$	Kälteleistung Wärmepumpe bzw. Kälteentzugsleistung	$kW$
$Q_H$	Heizleistung	$kW$
$r$	Radius	$m$
$\bar{r}$	dimensionslose Radialkoordinate	-
$r_b$	Bohrlochradius	$m$
$r_{eq}$	Äquivalentradius	$m$
$r_o$	äußerer Zylinderradius	$m$
$R$	Wärmewiderstand	$K/W$
$R_b$	thermischer Bohrlochwiderstand	$m \cdot K/W$
$s$	Schichtdicke	$m$
$S$	Schicht	-
$S_1$	thermische Speicherkapazität des Sondenfluids	$J/(m \cdot K)$
$S_2$	thermische Speicherkapazität des Hinterfüllmaterials	$J/(m \cdot K)$
$SWB$	spez. Wärmebedarf	$W/m^2$
$t$	Zeit	$s$
$t_a$	Jahresbetriebsstunden	$h$
$t_s$	dimensionslose Zeit nach Eskilson	-
$T$	Temperatur	$^{\circ}C$
$T_{fl}$	Fluidtemperatur in der Erdwärmesonde	$^{\circ}C$
$T_{fl,i}$	Eintrittstemperatur des Fluids in die Erdwärmesonde	$^{\circ}C$
$T_{fl,o}$	Austrittstemperatur des Fluids aus der Erdwärmesonde	$^{\circ}C$
$T_0$	ungestörte Untergrundtemperatur	$^{\circ}C$
$T_{0,m}$	ungestörte mittlere Untergrundtemperatur	$^{\circ}C$
$T_{sur}$	Temperatur an der Erdoberfläche	$^{\circ}C$
$\overline{T}_{sur}$	mittlere Temperatur an der Erdoberfläche	$^{\circ}C$
$\Delta T_{sur}$	Amplitude der Oberflächentemperatur über ein Jahr	$K$
$\nabla T$	Temperaturgradient	$K$
$U$	Quellengeschwindigkeit (revised velocity)	$m/s$
$v_f$	Filtergeschwindigkeit	$m/s$
$v_{fl}$	Fluidgeschwindigkeit in einer Erdwärmesonde	$m/s$
$V$	Einheitsvolumen	$m^3$
$x$	Koordinate	$m$
$y$	Koordinate	$m$

$Y_n$	Besselfunktion zweiter Art, n-ter Ordnung	-
$z$	Koordinate, Tiefe	$m$

*Griechische Buchstaben*

<b>Symbol</b>	<b>Definition</b>	<b>SI Einheit</b>
$\beta$	Jahresarbeitszahl	-
$\varepsilon$	Leistungszahl	-
$\eta$	Wirkungsgrad	-
$\eta$	dynamische Viskosität	$N \cdot s/m^2$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$\nu$	kinematische Viskosität	$m^2/s$
$\omega$	Jahreszeitliche Schwankung	$1/d$

*Physikalische Konstanten*

<b>Symbol</b>	<b>Name</b>	<b>Wert</b>	<b>SI Einheit</b>
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante	$(5,6704 \cdot 10^{-8})$	$W/(m^2 \cdot K^4)$
$C$	$e^\gamma$	(1,7811)	-
$\gamma$	Euler-Mascheroni-Zahl	(0,57721566)	-

*Wichtige Indizes*

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>
$a$	außen bzw. bezogen auf ein Jahr
$b$	bezogen auf die Bohrlochwand
$cond$	konduktiv
$conv$	konvektiv
$core$	bezogen auf die Seele eines Stromkabels
$fl$	fluide Phase
$fluid$	bezogen auf das Wärmeträgermedium in einer Erdwärmesonde
$grout$	Bezogen auf das Hinterfüllmaterial
$gw$	Bezogen auf das Grundwasser
$i$	innen bzw. Solestrom in das Sondenrohr
$o$	außen bzw. Solestrom aus dem Sondenrohr

## Symbolverzeichnis

---

<i>pipe</i>	bezogen auf das Sondenrohrmaterial
<i>so</i>	feste Phase
<i>soil</i>	bezogen auf das Gestein
<i>sur</i>	bezogen auf die Erdoberfläche
<i>tube</i>	bezogen auf Außenfläche eines Erdwärmesondenrohrs

### *Wichtige Subindizes*

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>
'	dimensionslos

## 1 EINLEITUNG

In Anbetracht der Endlichkeit fossiler Energievorräte und des fortwährend steigenden Energiebedarfs der Weltbevölkerung stellen Erneuerbare Energien im Energiemix der Zukunft eine wesentliche Option dar. In der Vergangenheit wurden vor allem Wasser, Sonne und Wind mit dem Attribut „regenerativ“ in Verbindung gebracht. Zunehmend gerät jedoch auch die Geothermie in das Blickfeld der Öffentlichkeit.

Der VDI 4640 (2000) folgend wird unter Geothermie die in Form von Wärme unterhalb der Oberfläche der festen Erde gespeicherte Energie verstanden. Ihre Nutzung besitzt, bedenkt man die Anwendung thermaler Wässer in der Balneologie, Tradition. Selbst die geothermische Stromerzeugung kann auf eine mehr als hundertjährige Geschichte zurückblicken: erste Versuche wurden bereits 1904 im italienischen Larderello unternommen (SANNER 1992). Deutlicher jünger ist dagegen der Einsatz oberflächennah eingebauter Erdwärmetauscher zu Heiz- und Kühlzwecken. Erste Anlagen wurden in den 40er Jahren des 20. Jahrhundert in den USA getestet (SANNER 1992, KÖLBEL 2001).

Mit oberflächennah im Untergrund installierten Wärmeübertragern – konventionsgemäß sind sie in Deutschland auf eine Tiefe von maximal 400 m unter Gelände beschränkt (WALKERHERTKORN & THOLEN 2007) – wird eine Energiequelle auf vergleichsweise niedrigem Temperaturniveau aufgeschlossen. Von lokalen Ausnahmen abgesehen, sind in diesen Tiefen Quelltemperaturen oberhalb von 25 °C in unseren Breiten nicht zu erwarten (STOBER & LORINSER 2007). Die Nutzung oberflächennaher geothermischer Energie in Deutschland fokussiert daher vor allem auf die Wärme-/Kälteversorgung im Gebäudebereich.

KALTSCHMITT ET AL. (1999) beziffern das mit oberflächennahen Erdwärmeübertragern erschließbare technische Potential für Deutschland auf 960 PJ pro Jahr. Bezogen auf die Endenergie stand dieser Zahl nach Erhebungen des Verbands der Elektrizitätswirtschaft e.V. (VDEW 2006) in 2004 ein Wärmeverbrauch von knapp 5.400 PJ gegenüber (Abb. 1-1).

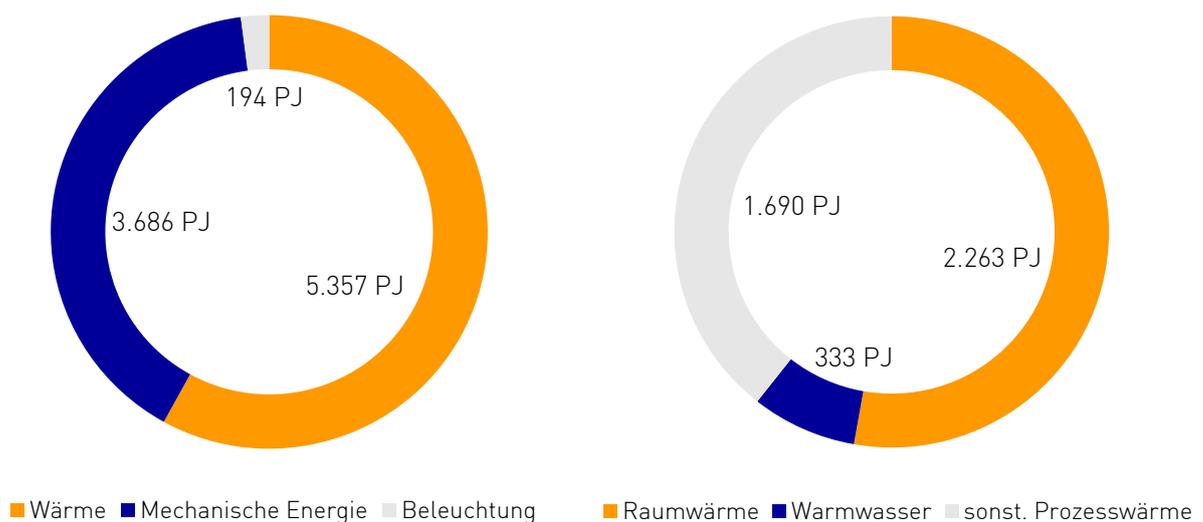


Abb. 1-1: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren (nach VDEW 2006)

Während eine Kühlung mit oberflächennaher Geothermie in Verbindung mit einer geeigneten Gebäudetechnik in Deutschland zumeist direkt aus dem Untergrund dargestellt werden kann, ist für den Heizfall der Einsatz einer Wärmepumpe die Regel. Aber auch mit einer Wärmepumpe sind den erreichbaren Zieltemperaturen technisch und wirtschaftlich Grenzen gesetzt, die eine Nutzung der oberflächennahen Geothermie im Bereich industrieller Prozesswärme in Deutschland zur Ausnahme werden lassen. Betrachtet man jedoch die Sektoren Raumwärme und Warmwasserbereitung – hier betrug der Jahresbedarf 2004 etwa 2.000 PJ – wird deutlich, dass nahezu die Hälfte der hierfür in Deutschland aufgewendeten Endenergie aus oberflächennaher Geothermie gedeckt werden kann.

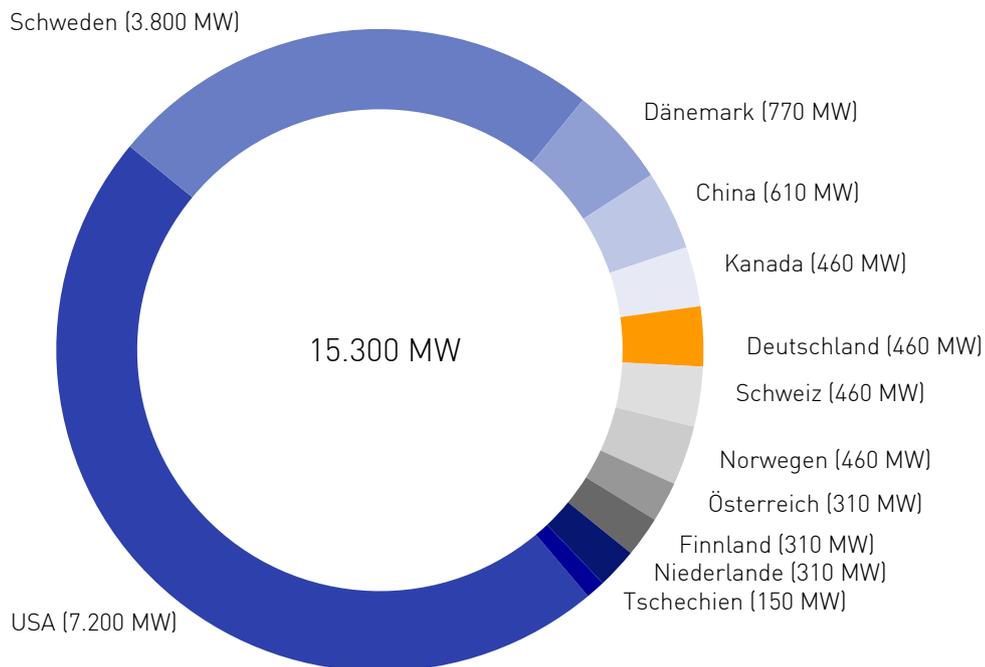


Abb. 1-2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen weltweit (nach KALTSCHMITT & WITT 2005)

Die weltweite Verteilung erdgekoppelter Wärmepumpenanlagen im Jahr 2004 unterstreicht das Potential der oberflächennahen Geothermie: zwar sind die USA mit einem Anteil von 15.300 MW an der weltweit installierten Leistung besonders hervorzuheben, berücksichtigt man jedoch für Schweden die weit geringere Bevölkerungszahl wird deutlich, welchen Beitrag die oberflächennahe Geothermie zur Wärmeversorgung zu leisten vermag (Abb. 1-2).

Nach KALTSCHMITT & WITT (2005) waren 2004 in Deutschland erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen mit einer Gesamtheizleistung von etwa 460 MW installiert. Folgt man der VDI 4640 (2001) und bringt 2.400 Betriebsstunden für die Warmwasser- und Raumwärmebereitung in Ansatz, standen dem technischen Potential von 960 PJ (KALTSCHMITT & WITT 2005)

in 2004 lediglich knapp 4 PJ erzeugter Heizenergie gegenüber. Auch wenn gerade nach 2005 der jährliche Anlagenzubaу weiter deutlich gestiegen ist (Abb. 1-3) und bereits für 2007 eine installierte Leistung von mehr als einem Gigawatt Heizenergie postuliert wurde (GEOTHERMISCHE VEREINIGUNG 2007), gibt es demnach noch erhebliche Entwicklungschancen.

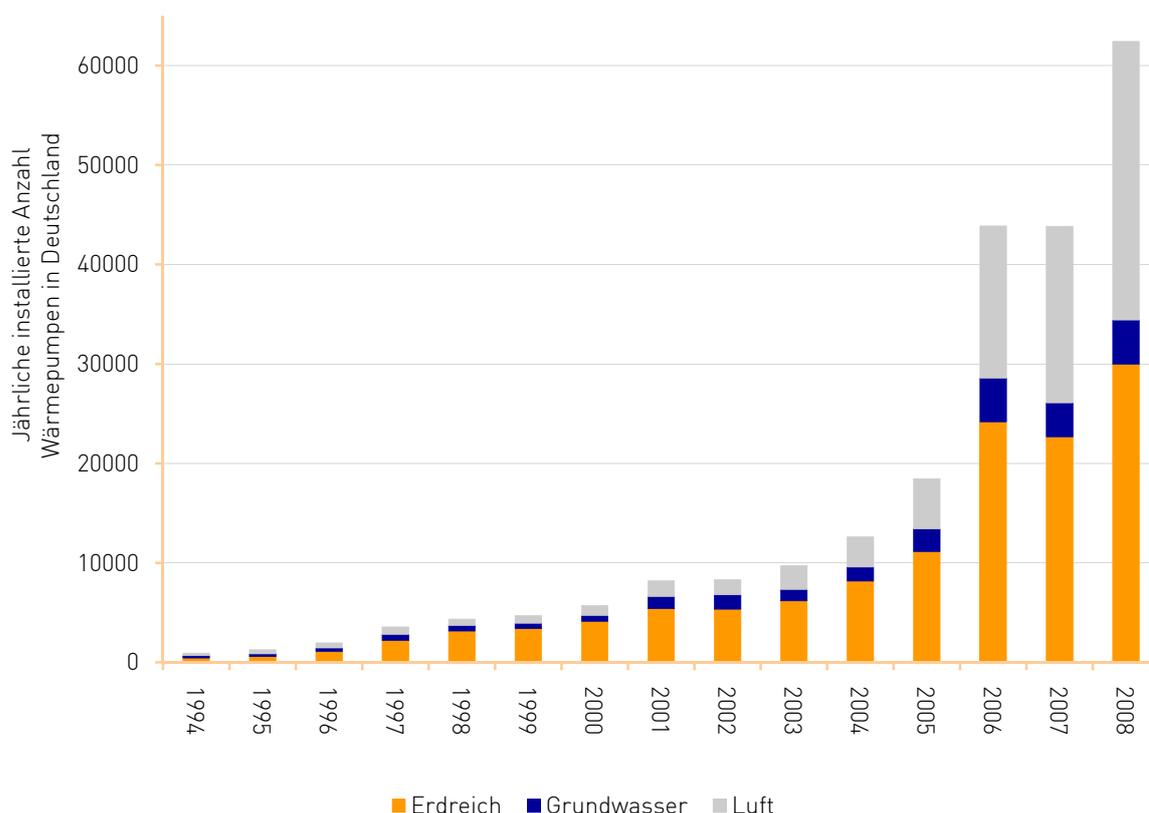


Abb. 1-3: Absatzstatistik Wärmepumpen in Deutschland (nach BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE 2009)

CAMPILLO (2007) folgend wurden allein in Baden-Württemberg zwischen Mai 2006 und Februar 2007 mehr als 1.200 Förderanträge für Erdwärmeeanlagen mit einem Heizwärmebedarf kleiner 17 kW, also für den Einfamilienhaussektor, gestellt. Die regionale Verteilung dieser Anlagen ist in Abb. 1-4 dargestellt. Summiert entsprechen diese 1.200 Einzelanlagen etwa 13.000 kW Heizleistung, die sich auf ca. 2.400 Bohrungen mit mehr als 210.000 Bohrmeter verteilen. Gekoppelt an diese Zahlen ist eine Gesamtinvestition von 26 Mill. €, welches sich recht gleichmäßig zu jeweils 50 % auf die untertägigen und obertägigen Anlagenkomponenten verteilen.

Für das typische Einfamilienhaus mit Erdwärmesondenanlage in Baden-Württemberg wurden folgende Eckdaten ermittelt (CAMPILLO 2007, KÖLBEL ET AL. 2008): die Heizleistung beträgt ca. 10 kW, die beheizte Wohnfläche etwa 190 m<sup>2</sup>. Es werden im Mittel zwei Erdwärmeson-

den mit einer Tiefe von jeweils 90 m je Einfamilienhaus (EFH) installiert. Bezogen auf den deutschen Heizenergiemix werden mit jedem dieser Häuser jährlich etwa 1.800 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart.

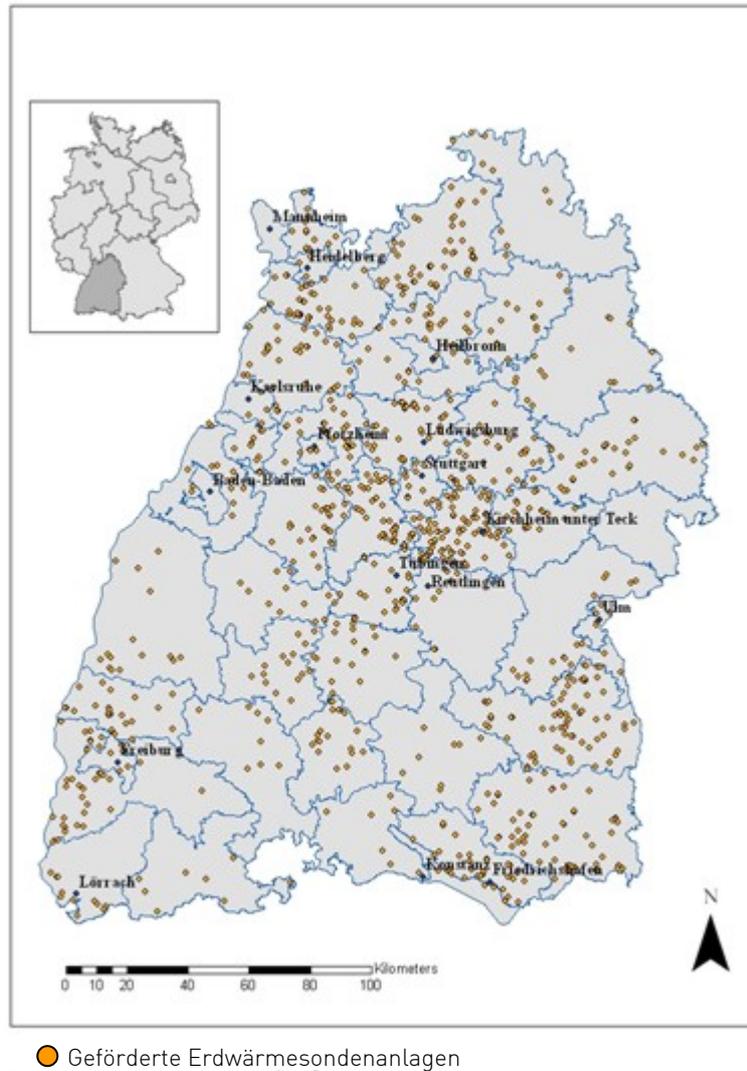


Abb. 1-4: Im Zeitraum Mai 2006 bis Februar 2007 geförderte Erdwärmesondenanlagen in Baden-Württemberg (nach CAMPILLO 2007)

## 1.1 Aufgabenstellung

Wirtschaftlichkeit und Funktionalität einer jeden Erdwärmeanlage hängen ganz wesentlich von der angepassten Auslegung und Zusammenstellung aller Anlagenteile im Gebäude und im Untergrund ab. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Dimensionierung der Erdwärmesonden selbst. Zu üppige Systeme verursachen zumindest unnütz hohe Installationskosten. Darüber hinaus kann es durch die vergleichsweise höhere Leistungsaufnahme der Nebenaggregate, wie etwa den Soleumwälzpumpen, sogar zu Performanceverlusten der Gesamtanlage kommen. Noch problematischer sind nicht ausreichend dimensionierte Wärmeübertragungssysteme: Die Palette möglicher Folgen reicht hier von erhöhtem Stromverbrauch bis hin zum Ausfall der Gesamtanlage.

Für kleine Erdwärmesondenanlagen, wie sie etwa im privaten Hausbau mit einem Leistungsbereich kleiner 20 kW eingesetzt werden, existieren recht einfache und ausreichend zuverlässige Verfahren zur Auslegung der untertägigen Wärmeübertrager. Neben diesen kleinen Anlagen werden jedoch zunehmend auch Verwaltungs- und Bürogebäude mit Erdwärmeanlagen ausgerüstet. Während für Deutschland Heiz-/Kühlleistungen um 1 MW bei einer Gesamtsondenlänge von etwa 15.000 m derzeit das Maximum darstellen (KÖLBEL ET AL. 2006), sind international längst weit größere Projekte umgesetzt worden (Tab. 1-1).

Tab. 1-1: Große erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen in Europa (SANNER 2008)

Projekt	Anzahl Bohrungen []	Bohrtiefe [m]	Bohrmeter, gesamt [m]
Nye Ahus Krankenhaus (Norwegen)	350	200	70.000
Komplex Nydalen (Norwegen)	180	200	36.000
Universität Lund (Schweden)	153	230	35.190
Vällingby Centrum (Schweden)	133	200	26.600
Kista Gallerie (Schweden)	125	200	25.000
Mollet de Valles (Spanien)	138	145	20.000

Gerade größere Systeme oder Anlagen mit Abweichungen vom durchschnittlichen Heizfall verlangen den Einsatz computergestützter Simulationstools (VDI 4640 2001). Eine Auswahl von ihnen wurde in verschiedenen Studien an Referenzobjekten geprüft und zeigen hinsichtlich der berechneten Erdwärmesondenlängen erhebliche Differenzen (SHONDER & HUGHES 1998, SHONDER ET AL. 1999, STEINKAMP 2003, KÖLBEL & LEYENS 2004).

In Abb. 1-6 sind Untersuchungsergebnisse von STEINKAMP (2003) und CAMPILLO (2007) zusammengefasst: In Abhängigkeit von der jeweils eingesetzten Dimensionierungsvariante bzw. Software entstehen bereits bei kleinen Objekten aus dem EFH-Bereich bei den Bohr-

/Installationskosten Unterschiede von bis zu mehreren tausend Euro. In Anbetracht von jährlichen Betriebskosten, wesentlich geprägt von der Stromaufnahme einer Wärmepumpenanlage, zwischen ca. 500 und 1.000 € p.a. (CAMPILLO 2007) nimmt dieser Umstand, wie in Kap. 2.2 weiter detailliert vorgestellt, einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf das Betriebsergebnis über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren.

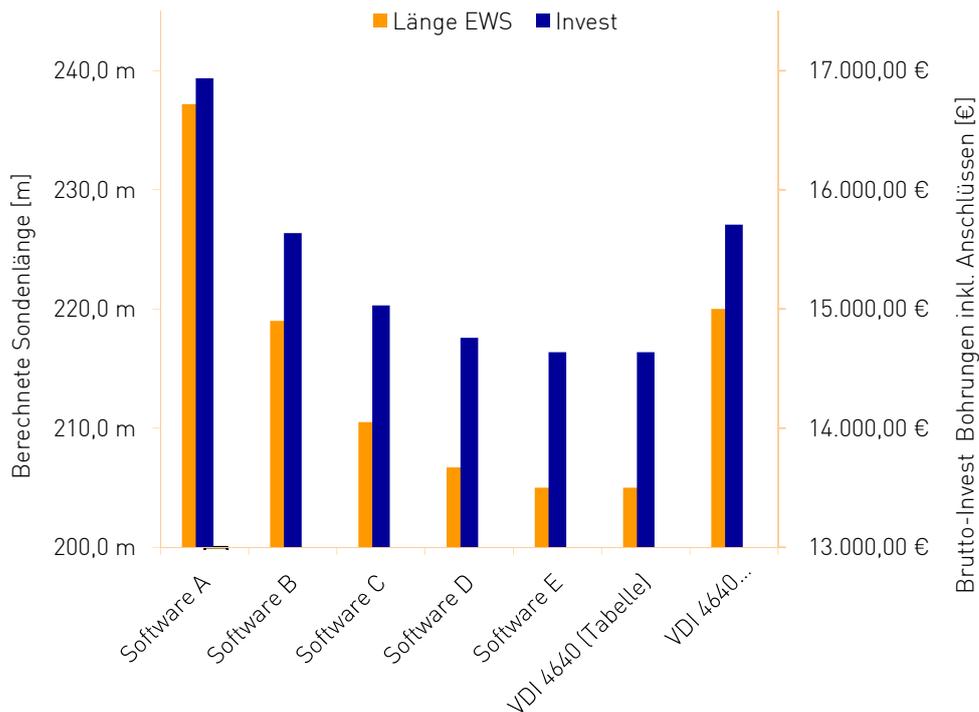


Abb. 1-5: Auslegungsergebnisse an einem Referenzobjekt (nach STEINKAMP 2003, CAMPILLO 2007)

Die heute am häufigsten eingesetzten Softwaretools kommen aus den USA, der Schweiz, Schweden, Frankreich und Deutschland. Sie bedienen sich verschiedener Ansätze, denen analytische, semi-analytische oder kombiniert numerisch-analytische Lösungen zugrunde liegen. Näheres hierzu findet sich in den Arbeiten von ESKILSON (1987) bzw. ESKILSON & CLAESSON (1988A/B), HELLSTRÖM (1991), SPITLER & YAVUZTURK (1999), HUBER & SCHULER (1997) sowie BERNIER (2001). Im deutschsprachigen Raum haben BREHM (1989), KOHL (1993), PAHUD & HELLSTRÖM (1996), CLAUSER (2003) und AL-KHOURY ET AL. (2004) darüber hinaus Algorithmen bzw. Softwarelösungen entwickelt, die auf numerischen Verfahren basieren.

Die Entscheidung, ob eine Erdwärmeanlage in einem konkreten Projekt zum Zuge kommen kann, wird in einem sehr frühen Planungsstadium vor allem anhand von wirtschaftlichen und ökologischen Kriterien gefällt. Computerprogramme, die bei der Planung von Erdwärmesondenanlagen eingesetzt werden, müssen daher die Planungsaufgaben nicht nur mit ausreichen-

der Genauigkeit, sondern vor allem auch mit angepasstem Arbeitsaufwand lösen. In der Praxis kommen daher komplexe Softwarelösungen, die sich numerischer Verfahren bedienen, in dieser Planungsphase eher selten zum Einsatz. Den stattdessen verwendeten Applikationen ist gemein, dass sie lediglich den konduktiven Anteil am Wärmetransport im Untergrund abbilden. Der Einfluss von Grundwasserleitern auf die Anlagenperformance bleibt dagegen unberücksichtigt. Ohnehin wird ein relevanter Einfluss von einigen Wissenschaftlern – etwa von ESKILSON (1987) – in Frage gestellt. Von anderen wird ihm bei hinreichend leistungsfähigen Aquiferen dagegen ein sehr hohes Gewicht zugeschrieben (PAHUD ET AL. 2002).

Alle wesentlichen Auslegungsprogramme wurden an Testanlagen – zum Teil mehrfach – validiert. Die messtechnische Ausrüstung an den jeweiligen Standorten bestand im Untergrund aus zuverlässigen, aber recht einfachen Systemen (PT100-Sensoren). Ihre Anzahl je Bohrung ist aus Platzgründen limitiert, wünschenswert wären jedoch Temperaturmessungen über die gesamte Länge und zudem separat für Vorlauf/Rücklauf einer Erdwärmesonde. Für diesen Zweck eignen sich weiter entwickelte Messverfahren wie faseroptische Systeme (Distributed Temperature Sensing, DTS) weit besser als PT100-Sensoren, jedoch wurden sie in der Vergangenheit bei Erdwärmesonden nur in Ausnahmen (ZORN ET AL. 2007A UND 2007B) bzw. nur für sehr kurze Zeiten eingesetzt (HURTIG ET AL. 1997, BRANDT, W. 2001). Für das Langzeitmonitoring eines Erdwärmesondenfelds oder zur Validierung einer Auslegungssoftware wurden DTS-Messeinheiten dagegen noch gar nicht genutzt.

DTS-Systeme weisen gegenüber PT100-Sensoren einen weiteren Vorteil auf: mit ihnen lässt sich über definierte Tiefenintervalle die mittlere Temperatur bestimmen. Ihr Einsatz verbessert damit die differenzierte Betrachtung der Temperaturentwicklung in verschiedenen Schichtkörpern – etwa eines grundwasserfüllten Bereichs im direkten Vergleich mit den hangenden und liegenden, nicht Grundwasser führenden Schichtgliedern – beim Betrieb einer Erdwärmesonde erheblich. Dieser Vorteil sollte bei der vorliegenden Arbeit dazu genutzt werden, erstmalig an einem konkreten Standort der Einfluss eines Grundwasserleiters auf die Performance einer Erdwärmesondenanlage zu messen und zu qualifizieren.

In einem zweiten Schritt sollte dann ein geeignetes Verfahren zur Auslegung von Erdwärmesondenanlagen entwickelt werden, welches den Einfluss eines Grundwasserleiters mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigt und gleichzeitig in punkto Handhabbarkeit dem Planungsalltag genügt. Hier bietet sich ein Lösungsansatz an, der auf der Theorie der Beweglichen Wärmequellen (Moving Heat Source Theory, SPRARGEN & CLAUSSEN 1937) basiert. In jüngster Vergangenheit durchgeführte theoretische Betrachtungen und einzelne Labormessungen lassen vermuten, dass dieser Lösungsansatz die Prognose der Temperaturfeldentwicklung bei Erdwärmesonden in einem vom Grundwasser durchströmten Untergrund leisten kann (DIAO ET AL. 2004, KATSURA ET AL. 2006).

### 2 AUFBAU UND AUSLEGUNG VON ERDWÄRMESONDENANLAGEN

Dieses Kapitel widmet sich in seinem ersten Abschnitt dem Aufbau und der Funktionsweise von Erdwärmesondenanlagen unter besonderer Berücksichtigung auslegungsrelevanter Parameter. Im zweiten Teil steht die Auslegungsplanung im Fokus: neben unterschiedlichen Betriebsszenarien und deren Konsequenzen für die Temperaturentwicklung im Untergrund mit der Zeit wird ein Überblick über die heute in der Praxis eingesetzten Dimensionierungsvarianten gegeben. Darauf aufbauend werden im Schlussteil Wirtschaftlichkeit und die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission bezogen auf den deutschen Heizmix beim Einsatz von Erdwärmesonden näher betrachtet.

#### 2.1 Funktionsprinzip einer Erdwärmesondenanlage

Für den Energieentzug aus dem Untergrund kann grundsätzlich zwischen offenen Systemen, etwa Brunnenanlagen, und geschlossenen Erdreichwärmeübertragern unterschieden werden (Abb. 2-1). Der Vorteil der geschlossenen Systeme liegt in ihrer weitgehend standortunabhängigen Einsetzbarkeit und ihrer Robustheit. Dagegen sind Brunnenanlagen vom Grundwasserchemismus, vor allem aber von der Verfügbarkeit eines Aquifers in wirtschaftlich attraktiver Tiefe abhängig. Dies mag der Grund für die – trotz aller energetischen Vorteile – im Vergleich zu geschlossenen Erdreichwärmeübertragern geringere Anzahl installierter Grundwasseranlagen in Deutschland sein.

Geschlossene Systeme lassen sich anhand ihrer Form, aber auch nach dem jeweils eingesetzten Wärmeträgermedium unterscheiden. Während die horizontal und in lediglich 1 bis 2 m Tiefe eingebauten Kollektoranlagen seit langem eingesetzt werden, stellen Energiekörbe eine vergleichsweise junge und damit auch in geringeren Stückzahlen verwendete Systemvariante dar.

Neben dem allgemeinen Funktionsprinzip weisen Kollektor- und Korbanlagen ein weitere Gemeinsamkeit auf: Aufgrund ihrer geringen Einbautiefe unterliegen sie sehr deutlich dem jahreszeitlich bedingten Temperaturgang. Gerade im Winter, also zu Zeiten des höchsten Wärmebedarfs, wird mit ihnen ein Untergrundabschnitt thermisch bewirtschaftet, der in Mitteleuropa für gewöhnlich zu dieser Zeit lediglich Temperaturen um die Frostgrenze aufweist. Bei Böden mit hohem Wassergehalten nutzen die beiden Systeme den Untergrund als Latentwärmespeicher (RAMMING 2007), bei vergleichsweise trockenen Böden ist dagegen die Effizienz der Anlagen deutlich gemindert.

Vorteilhaft ist bei beiden Systemen der maschinentechnisch wenig aufwendige Einbau und – wird während des Baus kein Grundwasserkörper aufgeschlossen, besitzen die Landeswasserhaushaltsgesetze keine Relevanz – die vergleichsweise unkompliziertere Genehmigungssituation.

Besonders bekannt aber sind derzeit in vertikale Bohrungen eingebaute Erdreichwärmeübertrager, so genannte Erdwärmesonden (EWS). Sie stellen gerade auch in Deutschland die weit überwiegende Mehrzahl aller erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen dar. Bereits zwischen 1980 und 1990 wurden sie in nennenswerten Stückzahlen verbaut, gerieten aber – vor allem wegen fehlerhafter Wärmepumpen – bis Anfang 2000 in Vergessenheit. Seitdem ist der Anla-

genzubau bedeutend gestiegen und erreicht heute einen zweistelligen Marktanteil per anno im Neubaumarkt (BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE 2009).



Brunnenanlage



Erdwärmesondenanlage



Kollektoranlage



Energiekorbanlage

Abb. 2-1: Varianten erdekoppelter Wärmepumpenanlagen (ENBW 2007a)

Erdwärmesondenanlagen können für den Heizfall in die Anlagenteile Heizsystem, Wärmepumpe und Erdwärmesonde gegliedert werden. Ist zusätzlich die Option einer Kühlung gefordert, kann diese entweder direkt aus dem Untergrund unter Umgehung der Wärmepumpe über einen separaten Wärmeübertrager („direct cooling“) oder aber – durch Umschaltung – über die Wärmepumpe erfolgen (Abb. 2-2).

## 2. Aufbau und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen

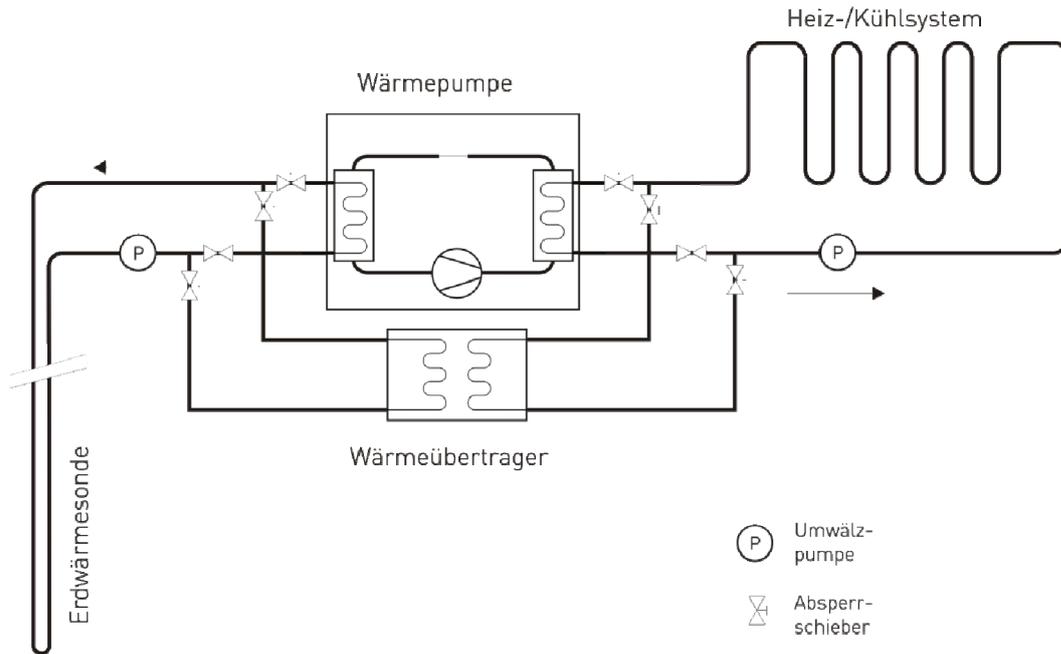


Abb. 2-2: Schemaskizze einer Erdwärmesondenanlage (umgezeichnet nach SANNER 2000)

In Aufbau und Wirkungsweise entspricht die Wärmepumpe einer Kältemaschine (DIETZEL & WAGNER 1998). Ihr Kältemittelkreislauf besteht im Wesentlichen aus vier Bausteinen (Abb. 2-3): im Verdampfer wird das Arbeitsmedium unter dem Einfluss einer externen Wärmequelle (Erdreich, Grundwasser, Luft etc.) isobar verdampft und anschließend im Verdichter isentrop komprimiert. Im Verflüssiger erfolgt dann eine isobare Enthitzung des Kältemittels und Abgabe der Heizwärme an eine Wärmesenke. Das Expansionsventil schließlich dient zur isenthalpen Drosselung auf Verdampfungsdruck und der Kreislauf kann von Neuem beginnen (RAMMING 2007).

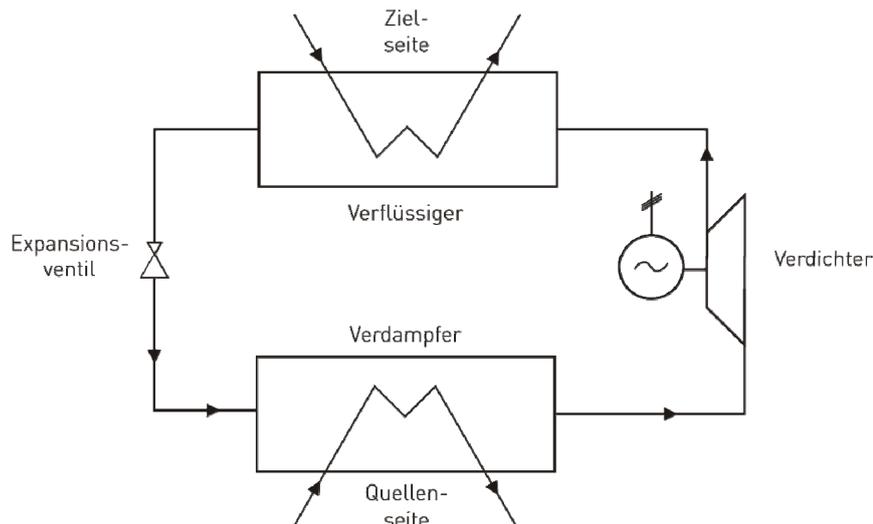


Abb. 2-3: Schemazeichnung einer Wärmepumpe (nach DIETZEL & WAGNER 1998)

Bei der Nutzung einer Wärmepumpe ist es das Ziel, mit möglichst geringem Arbeitseinsatz auf der Verdichterseite möglichst viel thermische Energie am Verflüssiger abzugeben, also das Verhältnis von aufgewendeter Energie zur bereitgestellten Nutzenergie zu optimieren. Da bei der abgegebenen thermischen Energie auch die Aufnahme von Energie aus der Umwelt (Erdreich, Grundwasser, Luft etc.) zu berücksichtigen ist, ergeben sich hier für den dimensionslosen Wirkungsgrad  $\eta$  Werte größer eins. Es wurde daher für Wärmepumpen die Leistungszahl  $\varepsilon$  [] eingeführt, die sich aus dem Quotienten von abgegebener Heizleistung der Wärmepumpe und der in Europa meist in Form von Strom, seltener auch gasmotorisch, zugeführten Leistung zu einem definierten Betriebspunkt ergibt (WALKER-HERTKORN & THOLEN 2007). Sie gilt nur für definierte Temperaturen auf der Quellen- und Zielseite und ist daher - ebenso wie der dimensionslose COP-Wert („coefficient of performance“), der zusätzlich die Energieaufnahme aller Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen etc. berücksichtigt - eine Momentaufnahme. Um die Effizienz einer Wärmepumpenanlage zu beschreiben, eignet sich daher die Jahresarbeitszahl  $\beta$  [] weit besser. Sie setzt die innerhalb eines Jahres von der Wärmepumpe abgegebene Wärmemenge zur im gleichen Zeitraum zugeführten elektrischen/gasmotorischen Arbeit ins Verhältnis (STIEBEL ELTRON 2007).

Nahezu 90 % der 2008 in Deutschland gebauten erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen werden quellenseitig von geschlossenen Erdreichwärmeübertragern mit Energie versorgt (BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE 2009). Weit überwiegend handelt es sich hierbei um U-förmige, seltener auch koaxiale Kunststoffrohre, die in vertikalen Bohrungen unterschiedlicher Tiefe eingebaut werden. In ihnen zirkuliert ein flüssiges Wärmeträgermedium, zumeist ein Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch, welches sich bei der Passage durch den Untergrund erwärmt oder abgekühlt (Abb. 2-4).

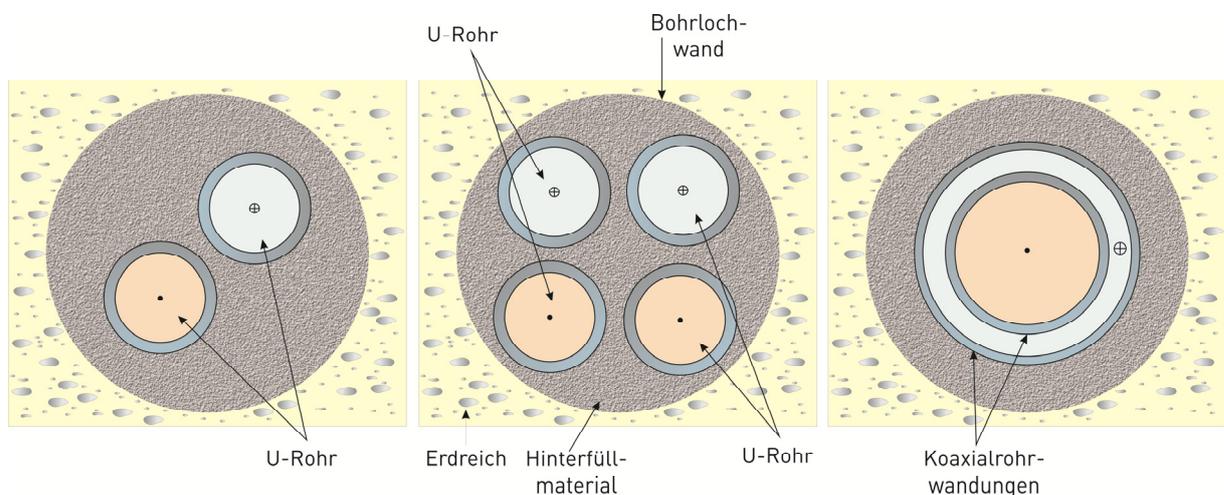


Abb. 2-4: Schnittzeichnungen durch verschiedene Erdwärmesondentypen, von links nach rechts: Einfach-U-Sonde, Doppel-U-Sonde, Koaxial-Sonde

Als Sonderform gelten ebenfalls in Bohrungen eingebaute Metallrohre mit Wärmeträgermedien, die bereits bei vergleichsweise geringen Temperaturen verdampfen ( $\text{CO}_2$  etc.). Diese Systeme sind in Deutschland zwar eher selten, werden aber anderenorts, wie etwa Österreich, in durchaus relevanten Stückzahlen verbaut (KRUSE 2004, ZORN ET AL. 2007A UND 2007B). In

## 2. Aufbau und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen

Deutschland ist jedoch die Doppel-U-Sonde besonders erfolgreich. Im Prinzip stellt sie nichts anderes dar, als zwei am Fußteil zusammengekoppelte Einfach-U-Sonden (Abb. 2-5).

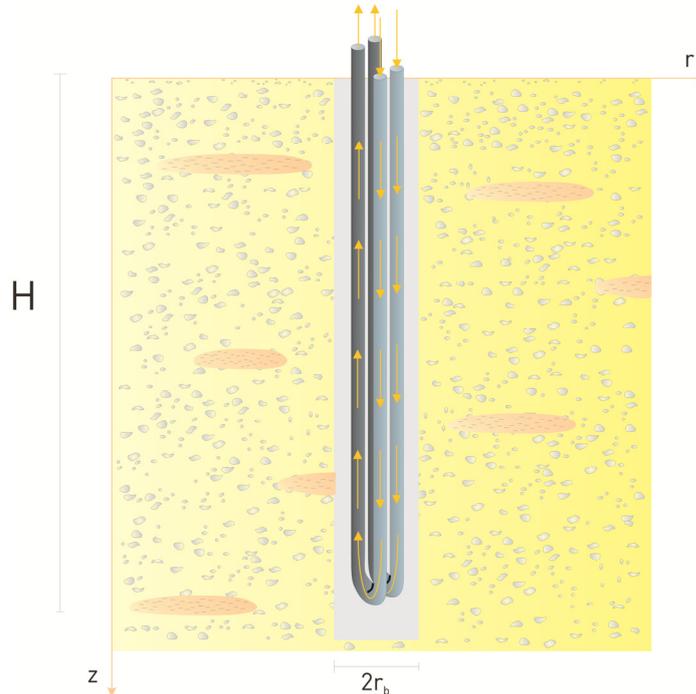


Abb. 2-5: Schemazeichnung einer Doppel-U-Sonde

Das Motiv für die Koppelung ist der – gerade bei Erdwärmesonden stark die Leistung beeinflussende – Volumenstrom durch die Sondenrohre: Bei den üblichen Rohrdurchmessern kann er ohne unmäßiges Anwachsen der Druckverluste nicht beliebig gesteigert werden, wird aber durch die Koppelung von zwei Einfachsonden praktisch druckverlustfrei verdoppelt (LOOSE 2006).

Als Erdwärmesondenmaterial wird sehr häufig High Density Polyethylen (HD-PE 100) eingesetzt. Es ist robust, gut zu verarbeiten, langlebig und im Rohrleitungsbau seit langem bewährt. Zwar besitzen andere Materialien, wie etwa hochdruckvernetztes Polyethylen (PE-Xa), gegenüber HD-PE grundsätzliche Vorteile wie eine höhere Temperaturbeständigkeit bei gleichzeitig geringerer Empfindlichkeit gegenüber Punktlasten und stark verzögertes Risswachstum (LIEBEL 2007), jedoch sind die Beschaffungskosten deutlich höher als bei den herkömmlichen HD-PE-Erdwärmesonden. Die auslegungsrelevanten Kennzahlen typischer Erdwärmesonden sind Tab. 2-1 zusammengestellt.

Tab. 2-1: Auslegungsrelevante Kennzahlen typischer U-Sonden

Rohraußendurchmesser [mm]	25	32	40
Wandstärke [mm]	2,3	2,9	3,7
Rohrinnendurchmesser [mm]	20,4	26,2	32,6
Wärmeleitfähigkeit HD-PE [ $W/(m \cdot K)$ ]	0,42		

Der Durchmesser der Rohre schwankt zwischen DN20 und DN32, wobei typischerweise DN25-Rohre (Rohraußendurchmesser 32 mm) gewählt werden (CAMPILLO 2007). Um einem thermischen Kurzschluss zwischen Vor- und Rücklauf der beiden Schenkel einer U-Sonde entgegenzuwirken, können Distanzhalter in definierten Abständen eingebaut werden.

Zum Schutz des Grundwassers (Abdichtung von Grundwasserstockwerken gegeneinander, Sicherung gegen auslaufende Arbeitsmedien) und zur besseren thermischen Anbindung der Erdwärmesonde an das umgebende Gestein wird in das jeweilige Bohrloch nach Einbringen des U-Rohrbündels ein geeigneter Baustoff eingepresst. Die Anforderungen an diese Baustoffe lassen sich nach Grundwasserschutz, Langzeitstabilität, thermischen Eigenschaften und Handling gliedern (Tab. 2-2).

Tab. 2-2: Anforderungen an Verpressbaustoffe (DIETRICH & PUFAHL 2007, DIETRICH ET AL. 2007, LEYENS ET AL. 2004)

Grundwasserschutz	Abdichten von Grundwasserstockwerkseinheiten gegeneinander
	Schutz des Grundwassers im Falle von Leckagen an Erdwärmesonden mit Austritt des Arbeitsmediums
	Unbedenklichkeit beim Einsatz in Grundwasserkörpern
	Ausreichende Fließeigenschaften zur Verhinderung der Hohlraumbildung
Langzeitstabilität	Volumenbeständigkeit
	Frostbeständigkeit
	Druckfestigkeit
Thermische Eigenschaften	Ausreichende Wärmeleitfähigkeit
	Ausreichende Fließeigenschaften zur Verhinderung der Hohlraumbildung
Handling	Einfache und sichere Verarbeitbarkeit auf der Baustelle
	Ausreichende Fließeigenschaften

Üblicherweise werden Dämmer-, Dämmer-Zement- oder Bentonit-Zement-Gemische, aber auch extra entwickelte Spezialbaustoffe für das Hinterfüllen der Erdwärmesondenbohrungen verwendet. In Ausnahmen – etwa bei erheblichen Suspensionsverlusten in verkarstetem oder geklüftetem Gebirge – wird Kiessand in die Bohrungen eingespült. Für diesen Spezialfall ist zusätzlich seit Kurzem ein Spezialbaustoff auf der Basis von Tonpellets verfügbar, der sich durch geringe hydraulische Leitfähigkeit, dauerhafte Plastizität und ein hohes Quellmaß auszeichnet (ZORN et al. 2008). Die Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials schwankt in Ab-

## 2. Aufbau und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen

---

hängigkeit vom verwendeten Baustoff zwischen 0,4 und 2,6 Watt pro Meter und Kelvin (WALKER-HERTKORN & THOLEN 2007).

Nach Abschluss der Bohr- und Einbauarbeiten müssen die Erdwärmesonden noch über horizontale Anbindeleitungen und ggf. ein Verteiler-/Sammler-System zur Wärmepumpe geführt und, nach Befüllung mit einem geeigneten Wärmeträgermedium („Sole“), noch einer Druck- und Dichtigkeitsprüfung unterzogen werden. Als Wärmeträgermedium findet in Deutschland sehr häufig eine Mischung aus Wasser und Mono-Ethylenglykol – meist 25 % Anteil (Gefrierpunkt:  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), bei höheren Anforderungen an den Frostschutz auch mehr (33 %, Gefrierpunkt:  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – Verwendung (Tab. 2-3).

Tab. 2-3: Kennzahlen verschiedener Wärmeträgermedien („Sole“) (nach SANNER & HELLSTRÖM 2000)

Wärmeträgermedium	Wasser bei $5^{\circ}\text{C}$	Wasser/Mono-Ethylenglykol (25%)	Wasser/Mono-Ethylenglykol (33%)
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]	0,572	0,480	0,453
Wärmekapazität $c_p$ [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]	4.202	3.795	3.565
Dichte $\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1.000	1.052	1.068
Kinematische Viskosität $\nu$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$1,52 \cdot 10^{-6}$	$4,94 \cdot 10^{-6}$	$7,12 \cdot 10^{-6}$
Temperaturleitfähigkeit $a$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$1,36 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-7}$

Außer Mono-Ethylenglykol werden, wenn auch weniger häufig, Propylenglykol, Methanol, Ethanol oder Kaliumkarbonat- und Calciumchlorid-Lösung eingesetzt. Die Wahl des jeweiligen Frostschutzmittels beeinflusst über die Parameter Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Dichte und Viskosität die thermischen Eigenschaften des Wärmeträgermediums und damit auch die Effizienz einer Erdwärmesondenanlage. Details hierzu finden sich bei HAIDER KHAN (2000).

Verschiedentlich wird derzeit aus Gründen des Grundwasserschutzes der Einsatz von Wasser anstelle des Monoethylenglykol-Wasser-Gemisches diskutiert. Bei typischen Erdwärmeeanlagen, wie etwa im Einfamilienhaus-Bereich, führt dies aufgrund der durch den Gefrierpunkt von Wasser verringerten Spreizung zwischen Quell- und Zieltemperatur zu deutlich größeren Gesamtlängen der Erdwärmesonden je Objekt und damit auch zu höheren Kosten.

## 2.2 Auslegungsplanung von Erdwärmesondenanlagen

Die Planung einer erdgekoppelten Wärmepumpenanlage umfasst die Konzeption des Heiz-/Kühlsystems und die Auswahl einer geeigneten Wärmepumpe auf der Gebäudeseite, nicht zuletzt aber auch die Auslegung der Erdwärmesonden. Die thermischen Untergrundeigenschaften und die Anlagentechnik haben einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung der Untergrundtemperaturen um eine Erdwärmesondenanlage und damit auf die Effizienz einer Erdwärmesondenanlage. Grundsätzlich hängt die Entwicklung des Temperaturfelds zunächst wesentlich vom Betriebskonzept ab. Mögliche Konzepte resultieren aus der gebäudeseitigen Energieanforderung. Am häufigsten in Deutschland ist zweifelsohne der einfache Wärmeentzug aus dem Untergrund beim Heizfall mit einer Wärmepumpe wie er typischerweise im Einfamilienhaus-Bereich zum Tragen kommt (LOOSE 2006, CAMPILLO 2007). Die Temperaturen im Wärmeträgermedium der Erdwärmesonden entwickeln sich dabei wie für Fall 1 in der Abb. 2-6 dargestellt: Sie sinken mit der Zeit bis sich idealerweise ein Gleichgewicht zwischen der aus dem betroffenen Volumenelement im Untergrund entnommenen und der von außen nachfließenden thermischen Energie eingestellt hat. Die Gleichgewichtstemperatur kann unter anderem über die Tiefe, Anordnung und Anzahl der Erdwärmesonden gesteuert werden.

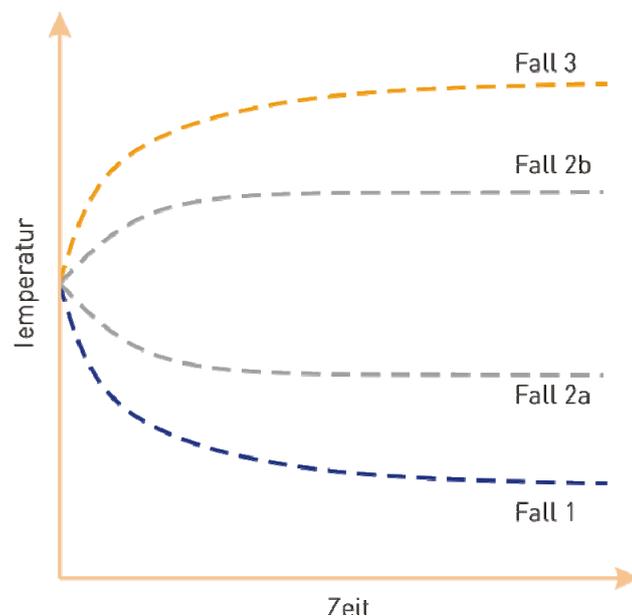


Abb. 2-6: Schematische Darstellung des langfristigen Temperaturtrends

Bei größeren Anlagen – etwa für Büro- und Verwaltungsgebäude – wird der Untergrund sehr häufig als Speicher genutzt. Die Erdwärmesonden übernehmen hier je nach Anforderung die Bereitstellung von Kühl- und Heizenergie. Bei den für Mitteleuropa typischen Quell-/Zieltemperaturen kann beim Einsatz von entsprechenden Wärmeübertragern auf der Gebäudeseite (Betonkernaktivierung etc.) auf den Einsatz einer Wärmepumpe bei der Kühlung zumeist verzichtet werden. Die Temperaturen im Wärmeträgermedium entwickeln sich dann bei heizlastigen Anlagen tendenziell wie für Fall 2a abgebildet, bei Dominanz der Kühlarbeit wie für Fall 2b dargestellt.

## 2. Aufbau und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen

---

Bei Gebäuden, in denen die Vorlauftemperaturen bei der Kühlung nicht direkt aus dem Untergrund darstellbar sind, kann eine umschaltbare Wärmepumpe das System ergänzen. Bei diesem Konzept – Fall 3 in Abb. 2-6 – kann eine deutlich größere Temperaturdifferenz zwischen Quell- und Zieltemperaturen aufgebaut werden. In Konsequenz steigen bei kühllastigen Nutzerprofilen die Temperaturen im Untergrund mit der Zeit deutlich stärker als bei einem kombinierten Heiz-/Kühlsystem, das sich der direkten Kühlung bedient.

Eine Kühlung über eine umschaltbare Wärmepumpe ist in Mitteleuropa eher selten. Zwar können die zugehörigen Erdwärmesondenfelder kleiner ausgelegt werden, allerdings verursacht dieses Konzept zusätzliche Betriebskosten durch den Energieeinsatz für die Wärmepumpe. Dieser Modus kommt daher nur zum Tragen, wenn das Erdwärmesondenfeld etwa aus Platzmangel nicht ausreichend groß genug dimensioniert werden kann oder aber bedingt durch das ausgewählte Kühlsystem gebäudeseits besondere Anforderungen an die Vorlauftemperaturen gestellt sind. In anderen Klimaten mit deutlich höheren ungestörten Untergrundtemperaturen und klimabedingt höheren Anforderungen an das Kühlsystem ist dagegen der Einsatz einer umschaltbaren Wärmepumpe bei der Kühlung in der Regel unerlässlich.

In Abhängigkeit von der Quelltemperatur und dem gebäudeseitigen bzw. nutzerspezifischen Anforderungsprofil können Wärmepumpenanlagen auf unterschiedliche Weise betrieben werden (Tab. 2-4).

Tab. 2-4: Betriebsweise von Wärmepumpenanlagen für den Heizfall (ALPHA-INNOTECH 2000, WALKER-HERTKORN & THOLEN 2007)

monovalent	Wärmepumpenanlage deckt den gesamten Wärmebedarf
bivalent-parallel	Bei erhöhtem Heizenergiebedarf wird ein weiterer Wärmeerzeuger zugeschaltet
bivalent-teilparallel	Bei erhöhtem Heizenergiebedarf wird zunächst ein weiterer Wärmeerzeuger zugeschaltet; bei weiterer Erhöhung des Heizenergiebedarfs wird die Wärmepumpe abgeschaltet und der zweite Wärmeerzeuger deckt den gesamten Bedarf allein
bivalent-alternativ	Wärmepumpenanlage deckt bis zu einer definierten Außentemperatur den Heizenergiebedarf allein, bei Unterschreiten dieser Temperatur übernimmt ein zweiter Wärmeerzeuger vollständig die Versorgung mit Heizenergie

Während kleinere erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen zumeist monovalent in Kombination mit einem elektrischen Heizstab für die Warmwasserbereitung arbeiten, wird für größere Objekte oft ein bivalent-paralleler Betrieb zur Abdeckung von Spitzenlasten mit einem zweiten Versorgungssystem gewählt.

Aus den vorstehend beschriebenen Zusammenhängen wird deutlich, dass die Auslegung von Erdwärmesondenanlagen das Zusammenspiel verschiedener Ingenieurdisziplinen verlangt. Im

EFH-Bereich werden die Aufgaben gebäudeseits zumeist vom Heizungsinstallateur übernommen, die Dimensionierung der Erdwärmesonden selbst sehr häufig von den Bohrunternehmen im Rahmen der Angebotsstellung. Bei größeren Objekten werden dagegen in aller Regel Planungsbüros aus den Bereichen Architektur, Technische Gebäudeausrüstung und Geologie gemeinsam mit der Klärung der anfallenden Fragestellungen beauftragt. Dem gebotenen Planungsaufwand folgend, gelangen zur Ermittlung der benötigten Erdwärmesondenkonfiguration und –gesamtlänge unterschiedliche Ansätze zur Anwendung (Tab. 2-5).

Tab. 2-5: Auslegungsverfahren für Erdwärmesonden (REUSS 2006)

Tabellenwerte	definierte Entzugsleistung für verschiedene Gesteine	EFH-Bereich ohne Kühlung, Heizleistung kleiner 30 kW
Nomogramm-Verfahren	graphische Lösung mit definierten Vorgaben	
Einfache Softwaretools	Analytische Gleichungen	Heiz-/Kühlanlagen, Objekte größer 30 kW Heizleistung
Komplexe Softwaretools	Finite-Elemente- bzw. Finite-Differenzen-Verfahren	Objekte mit besonderen Anforderungen

Im Einfamilienhaus-Bereich wird in Deutschland zumeist ein einfaches Tabellenverfahren eingesetzt, das im Teil 2 der VDI 4640 (2001) beschrieben ist. Dort sind einer Auswahl von Gesteinen unter definierten Bedingungen spezifische Entzugsleistungen je Meter Erdwärmesonde  $\dot{q}_l$  [W/m] zugewiesen. Sie beziehen sich auf die Kälteentzugsleistung  $Q_0$  [kW], die der jahresarbeitszahlabhängigen Differenz aus Heizleistung  $Q_H$  [kW] und dem Leistungsanteil der Wärmepumpe  $Q_H - Q_0$  [kW], und damit dem Beitrag des Untergrunds, entspricht. Der Quotient aus Kälteentzugsleistung und gesteinspezifischer Entzugsleistung ergibt die notwendige Erdwärmesondenlänge  $L_{EWS}$  [m] der betreffenden Anlage (Gl. 2.01).

$$L_{EWS} = \frac{\left(Q_H \cdot \frac{\beta - 1}{\beta}\right)}{\dot{q}_l} = \frac{Q_0}{q_l} \quad (2.01)$$

Die in der VDI 4640 (2001) aufgeführten gesteinspezifischen Entzugsleistungen  $\dot{q}_l$  wurden unter einer ganzen Reihe von Vorgaben entwickelt. So darf der Heizbedarf des Gebäudes 30 kW nicht überschreiten und die Erdwärmesonden selbst müssen Standardabmessungen entsprechen. Des Weiteren müssen bei Einzelsonden die Bohrungen in Tiefen zwischen 60 und 160 m, bei zwei Erdwärmesonden pro Objekt in Tiefen zwischen 40 und 100 m ausgeführt sein. Der Abstand zwischen zwei Bohrungen darf bei 40 bis 50 m Tiefe fünf Meter, bei Bohrtiefen zwischen 50 und 100 m sechs Meter nicht unterschreiten. Grundsätzlich soll die

## 2. Aufbau und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen

---

jährlich dem Untergrund entnommene Wärme im Bereich zwischen 100 und 150  $kWh$  pro Meter Erdwärmesonde und Betriebsjahr liegen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass ein Wertesatz für den reinen Heizfall mit 1.800 Jahresbetriebsstunden, ein weiterer für den Heizfall in Koppelung mit Warmwasserbereitung (2.400 Jahresbetriebsstunden) entwickelt wurde. Befinden sich mehrere Erdwärmesondenanlagen an einem Standort, so ist die der VDI-Tabelle entnommene spezifische Entzugsleistung um 10 bis 20 % zu reduzieren (REUSS 2006). Zudem nehmen die ungestörten Untergrundtemperaturen mit steigender topographischer Höhe klimabedingt ab, was ebenfalls mit reduzierten Tabellenwerten zu kompensieren ist (EUGSTER ET AL. 1992, WALKER-HERTKORN & THOLEN 2007). Bei einer Anlage, die ausschließlich zur direkten Kühlung vorgesehen ist, aber auch im kombinierten Heiz-/Kühlfall sollen die Tabellenwerte der VDI 4640 (2001) grundsätzlich nicht angewendet werden. In Abbildung 2-7 sind die in Baden-Württemberg im Zeitraum 2006/2007 angesetzten Entzugsleistungen je Meter Erdwärmesonden von ca. 1.100 verschiedenen Erdwärmesondenprojekten aus dem EFH-Bereich dargestellt. Im Durchschnitt wurden 48  $W/m$  zugrunde gelegt (CAMPILLO 2007).

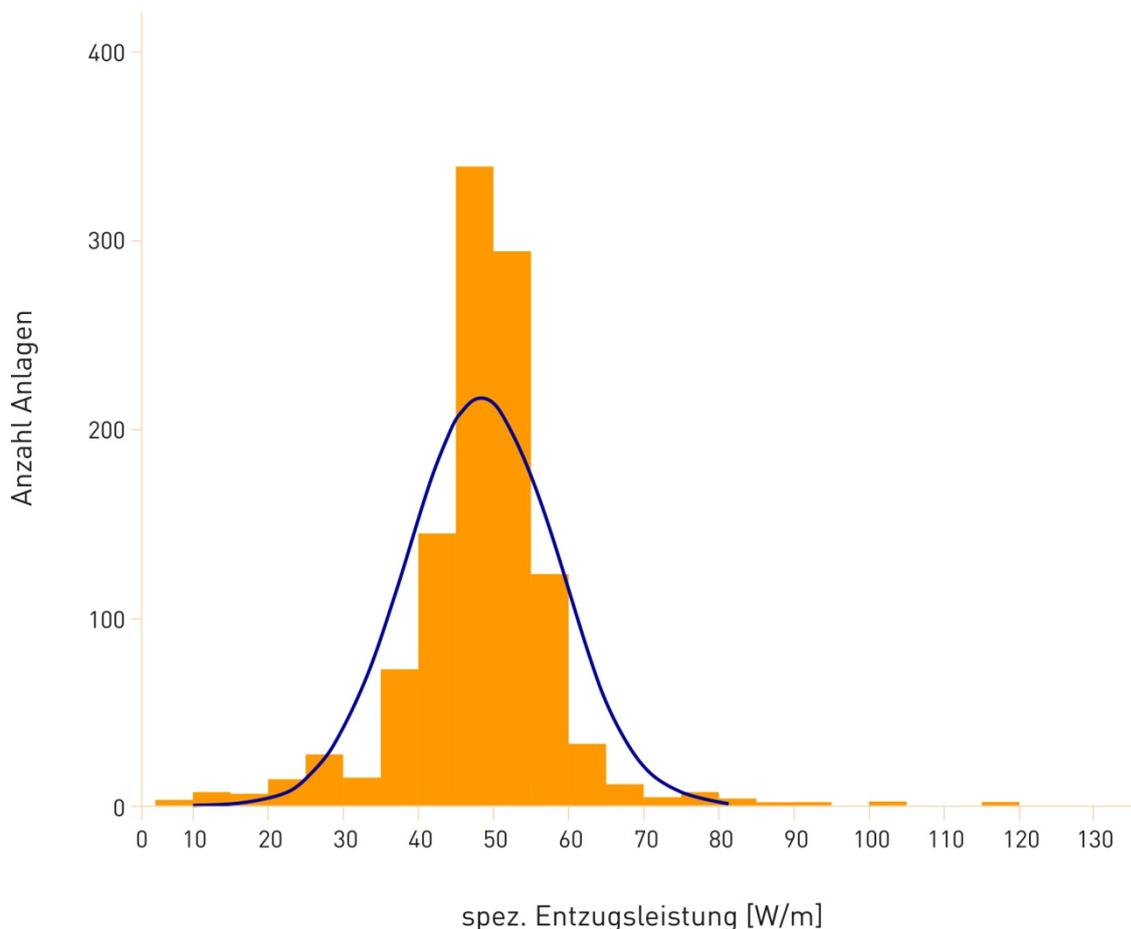


Abb. 2-7: Bei der Planung angesetzte Entzugsleistungen von Erdwärmesonden (CAMPILLO 2007)

Neben der Auslegung anhand von spezifischen Entzugsleistungen existiert mit einem im Auftrag des Schweizer Bundesamts für Energie entwickelten Nomogramms ein weiteres einfaches Verfahren (STADTLER ET AL. 1995). Zwar wurde das Nomogramm aus Simulationsberechnungen entwickelt, eine Validierung mit Geländemessungen wurde jedoch nicht vorgenommen (REUSS 2006). In der Praxis wird es in Deutschland eher selten verwendet.

Bei größeren Erdwärmesondenanlagen fordert die VDI 4640 (2001) den Einsatz von Computerprogrammen. Besonders populär sind in Europa die Produkte Earth Energy Designer (<http://www.buildingphysics.com/earth1.htm>), ein deutsch-schwedisches Produkt, und EWS (<http://www.hetag.ch>), das in der Schweiz entwickelt wurde. Während sich der Earth Energy Designer so genannter „g-functions“ bedient, arbeitet EWS mit einem Crank-Nicholson-Ansatz im Nahbereich einer Erdwärmesonde und nutzt die „g-functions“ lediglich für die weitere Umgebung (ESKILSON 1987, ESKILSON & CLAESSON 1988A, HELLSTRÖM 1991, HUBER & SCHULER 1997).

In den USA wurde für die Auslegung von Erdwärmesondenfeldern das Programm GLHEPRO (<http://www.hvac.okstate.edu/glhepro>) entwickelt (KAVANAUGH 1985, KAVANAUGH & RAFFERTY 1997, SPITLER & YAVUZTURK 1999). Es bedient sich, wie auch das französisch-kanadische Produkt GEOEASE (BERNIER 2001), der Zylinderquellentheorie und wird von der Oklahoma State University gepflegt. Alle genannten Programme zeichnen sich durch eine einfache Bedienung und hohe Rechengeschwindigkeiten aus. Nachteilig sind dagegen Einschränkungen bei der Anordnung der Erdwärmesonden eines Felds zueinander und die fehlende Berücksichtigung des Einflusses von fließendem Grundwasser im Untergrund.

Eher selten werden in der Praxis komplexe Softwarelösungen eingesetzt, die sich der Finite-Elemente- bzw. Finite-Differenzen-Methode bedienen. REUSS (2006) gibt einen Überblick über verschiedene Programme, von denen das Transient Energy System Simulation Tool (TRNSYS, [www.trnsys.com](http://www.trnsys.com)) mit dem DST-Modul eine gewisse Verbreitung besitzt (PAHUD & HELLSTRÖM 1996). Auch die Programmpakete SHEMAT und FRACTURE bieten die Option, Erdwärmesondenfelder auszulegen. Beide bedienen sich der Finite-Elemente-Methode und erlauben die Berücksichtigung fließenden Grundwassers (KOHL ET AL. 1993, PAHUD ET AL. 2002, CLAUSER ET AL. 2003). Aktuell nur in einer Beta-Version verfügbar ist das Geothermiemodul des Finite-Elemente-Pakets PLAXIS, mit dem ebenfalls der Grundwassereinfluss berücksichtigt werden kann (AL-KHOURY ET AL. 2004, WAGNER & CLAUSER 2005).

Gerade Softwarelösungen, die sich numerischer Verfahren bedienen, erlauben eine detaillierte Analyse des Wärmetransports im Untergrund beim Einsatz von Erdwärmesonden. Allerdings ist ihr Einsatz in Anbetracht der gängigen Planungshonorare für die Auslegung von Erdwärmesondenfeldern im Büroalltag eher selten.

Unabhängig vom gewählten Simulationsprogramm sind bei der Dimensionierung von Erdwärmesonden im ersten Schritt die relevanten Planungsparameter zu erheben. Mit dem Studium von Akten, Plänen und Karten kann ein erster Überblick verschafft werden. Neben den geothermischen Eigenschaften des Untergrunds sind dabei die Genehmigungsaspekte und der Grundwasserschutz, aber auch die Bedingungen für das Abteufen der Bohrungen (Karst, artesisches Grundwasser etc.) relevant. In Tabelle 2-6 ist bezogen auf die Anlagentechnik ein Mindestparametersatz zusammengestellt (KÖLBEL 2003A).

Tab. 2-6: Wesentliche Auslegungsparameter größerer Erdwärmesondenanlagen

Zuordnung	Parameter
Geologie, Geothermie	Gesteinswärmeleitfähigkeit, Gesteinswärmekapazität, ungestörte Untergrundtemperatur, geothermische Wärmestromdichte, Bohrdurchmesser
Bohrung	Thermische Eigenschaften des Hinterfüllmaterials, Bohrl Lochdurchmesser
Erdwärmesonde	Typ (Koaxial, Einfach- oder Doppel-U), Abmessungen (Durchmesser, Wandstärke), thermische Materialeigenschaften
Arbeitsmittel	Thermische Eigenschaften, Dichte, Viskosität, Gefrierpunkt
Gebäudekennwerte	Heiz- und Kühllastprofil, Spitzenlasten, zulässige Min-/Max.-Vorlauftemperatur
Wärmepumpe	Leistung, Sole- und Wasservolumenstrom, Coefficient of Performance bzw. Jahresarbeitszahl

Zusätzlich zu diesem Datensatz können weitere Dimensionierungsparameter mit Gelände- oder Labormessungen bestimmt werden. Gerade bei größeren Erdwärmesondenprojekten empfiehlt sich die Durchführung eines Thermal Response Tests (TRT), bei dem an einer bereits am Standort installierten Erdwärmesonde die spezifische Entzugsleistung und der thermische Bohrlochwiderstand gemessen werden. Ein Überblick zum TRT findet sich bei WALKER-HERTKORN & THOLEN (2007) bzw. bei EUGSTER & LALOUI (2001), detailliert widmen sich GEHLIN (2002) und GUSTAFSON (2006) diesem Thema. Auf der Grundlage der ermittelten Parameter sind anschließend Simulationsberechnungen zur Kurz- und Langzeitprognose der Temperaturentwicklung des Arbeitsmediums in der Erdwärmesonde, aber auch im Untergrund durchzuführen. Hierbei empfiehlt sich die enge Abstimmung mit dem Planer aus dem Bereich der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA). Ziel der Simulation ist die Entwicklung einer optimalen Konfiguration des Erdwärmesondenfelds unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Randbedingungen (KÖLBEL & LEYENS 2004).

### 2.3 Wirtschaftlich-ökologische Kriterien bei der Auslegung

Untersuchungen zur Kostenstruktur von Erdwärmesondenanlagen haben für Baden-Württemberg ergeben, dass das Invest je Kilowatt Heizleistung im Zeitraum 2006 bis 2007 im Einfamilienhaus-Bereich im Mittel bei ca. 2.000 € (netto) lag, die sich recht gleichmäßig zu jeweils 50 % auf die untertägigen und gebäudeseitigen Anlagenteile verteilen (CAMPILLO 2007). Die Verbrauchskosten lassen sich unter Annahme der Jahresarbeitszahl abschätzen. Die in Tabelle 2-7 zusammengestellten Daten für die Heizleistung  $Q_H [kW]$ , die Jahresbetriebsstunden  $t_a [h]$  und die Jahresheizarbeit  $E_A [kWh]$  entsprechen in etwa dem Durchschnittswert für Einfamilienhäuser in Baden-Württemberg (CAMPILLO 2007) bzw. wurden den Vorgaben der VDI 4640 (2001) für den Heizfall mit Warmwasserbereitung folgend gewählt.

Ein Strompreis in der Größenordnung von 0,13 €/kWh wird von verschiedenen Energieversorgern in Form eines Sondertarifs für Wärmepumpen angeboten (ENBW 2007b). Zusätzlich ist hier noch ein jährlicher Grundpreis für einen zweiten Tarifzähler – ca. 60 €/a – zu berücksichtigen. Der Jahresstromverbrauch  $E_V$  [kWh] lässt sich aus dem Quotienten von Jahresheizarbeit  $E_A$  [kWh] und Jahresarbeitszahl  $\beta$  [] ermitteln (WALKER-HERTKORN & THOLEN 2007) und kann dann mit dem Stromtarif inkl. Zählergebühr  $K_S$  [€/kWh] multipliziert werden. Alternativ lassen sich die Jahresheizkosten  $K_H$  [€/a] auch nach Gl. 2.02 berechnen.

$$K_H = \left( Q_H - \left( Q_H \cdot \frac{\beta - 1}{\beta} \right) \right) \cdot t_a \cdot K_S \quad (2.02)$$

Tab. 2-7: Abschätzung der Verbrauchskosten einer Erdwärmesondenanlage

Heizleistung $Q_H$ [kW]	11			
Jahresbetriebsstunden $t_a$ [h]	2.400			
Jahresheizarbeit $Q_A$ [kWh]	24.000			
Stromtarif $K_S$ [€/kWh]	0,13			
Jahresarbeitszahl $\beta$ []	3,0	3,5	4,0	4,5
Jahresstromverbrauch $E_V$ [kWh]	8.800	7.543	6.600	5.867
Jährl. Kosten inkl. Zähler $K_H$ [€/a]	1.204	1.040	918	823

Werden nur die Verbrauchskosten betrachtet, so ist Tab. 2-7 folgend, eine möglichst hohe Jahresarbeitszahl erstrebenswert. Wegen der Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl von der Differenz zwischen Quell- und Zieltemperatur lässt sie sich prinzipiell mit einem möglichst großen Erdwärmetauscher im Untergrund optimieren. Wärmepumpentechnisch lässt sich die Jahresarbeitszahl jedoch nicht beliebig hoch entwickeln, bezogen auf die Gesamtanlage ist ein derartiges Anlagenkonzept bei Bohrkosten um 40 bis 60 € je Meter (CAMPILLO 2007) wirtschaftlich nicht attraktiv. Die Untergrenze für eine akzeptable Jahresarbeitszahl bei Erdwärmesondenanlagen muss neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten auch ökologische Kriterien berücksichtigen. Der GEMIS-Datenbank des Öko-Instituts kann für den bundesdeutschen Strommix bezogen auf den Endkunden, also inklusive der Vorketten und Transportverluste, ein Wert von 625,4 CO<sub>2</sub>-Äquivalent je produzierter Kilowattstunde entnommen werden (ÖKO-INSTITUT E.V. 2008). Zu niedrige Jahresarbeitszahlen und die damit einhergehende höhere Stromaufnahme der Wärmepumpe sind ökologisch somit nicht sinnvoll. Dies gilt selbstverständlich nur, wenn der eingesetzte Strom nicht aus CO<sub>2</sub>-freier bzw. nahezu CO<sub>2</sub>-freier Quelle stammt. Unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien wird daher eine Jahresarbeitszahl von 4 [] oder größer für erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen vorgeschlagen (UBA 2007).

## 2. Aufbau und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen

An einem virtuellen Objekt kann der Einfluss der Entzugsleistung auf die Anlagenkosten gezeigt werden (Tab. 2-8).

Tab. 2-8: Einfluss der Entzugsleistung auf die Kosten einer virtuellen Referenzanlage

Vorgaben	Berechnung
Kälteentzugsleistung eines Einfamilienhauses mit einer Heizleistung von 12 kW bei einer Jahresarbeitszahl von 4 []	$P_H = \frac{Q_H}{\beta} = \frac{12kW}{4[ ]} = 3kW$
Elektr. Aufnahme der Wärmepumpe $P_H$ [kW]	$Q_0 = Q_H - P_H = 9kW$
Länge EWS bei 50 W/m spez. Entzugsleistung	$L_{EWS} = \frac{Q_0}{\dot{q}_l} = \frac{9kW}{0,05 kW/m} = 180m$
Monatliche Verbrauchskosten (Heizung und Warmwasserbereitung: 2.400 Betriebsstunden p.a.)	$K_V = \frac{P_H \cdot 2.400h \cdot 0,13 \text{ €/kWh}}{12} = \frac{3kW \cdot 2.400h \cdot 0,13 \text{ €/kWh}}{12} = 83\text{€}$
Bohrkosten <sup>1)</sup> (brutto)	$180m \cdot 77,35\text{€} = 13.923\text{€}$
Länge EWS bei 60 W/m spez. Entzugsleistung	$L_{EWS} = \frac{Q_0}{\dot{q}_l} = \frac{9kW}{0,06 kW/m} = 150m$
Monatliche Verbrauchskosten (Heizung und Warmwasserbereitung: 2.400 Betriebsstunden p.a.)	$\frac{P_H \cdot 2.400h \cdot 0,13 \text{ €/kWh}}{12} = \frac{3kW \cdot 2.400h \cdot 0,13 \text{ €/kWh}}{12} = 83\text{€}$
Bohrkosten <sup>1)</sup> (brutto)	$150m \cdot 77,35\text{€} = 11.603\text{€}$

<sup>1)</sup> Kosten enthalten die Erdwärmesondenbohrung inkl. Anschlüsse und Befüllung nach CAMPILLO (2007)

Bei den Berechnungen in Tabelle 2-8 ändert sich durch Ansatz einer konstanten Jahresarbeitszahl der Stromverbrauch für die Wärmepumpe nicht. Dementsprechend wirkt sich die gesteinspezifische Entzugsleistung lediglich auf die Kosten der Bohrung inkl. Nebenarbeiten, nicht aber auf die Verbrauchskosten aus.

In Abb. 2-8 sind die Baukosten ohne Kapitaldienst, also als Overnight Capital Cost, auf der Grundlage der Daten aus Tab. 2-8 dargestellt. Es wird deutlich, dass sich bereits geringfügig kleinere spezifische Entzugsleistungen bei einer angenommenen Jahresarbeitszahl von 4 []

sehr deutlich auf die Baukosten auswirken. Selbst wenn der Beitrag fließenden Grundwassers zur Entzugsleistung einer Erdwärmesonde klein ausfiele, sind die Auswirkungen auf der Kostenseite demnach durchaus bemerkenswert. Eine verbesserte Jahresarbeitszahl bei konstanter spezifischer Entzugsleistung macht sich dagegen kostenseitig weit weniger bemerkbar.

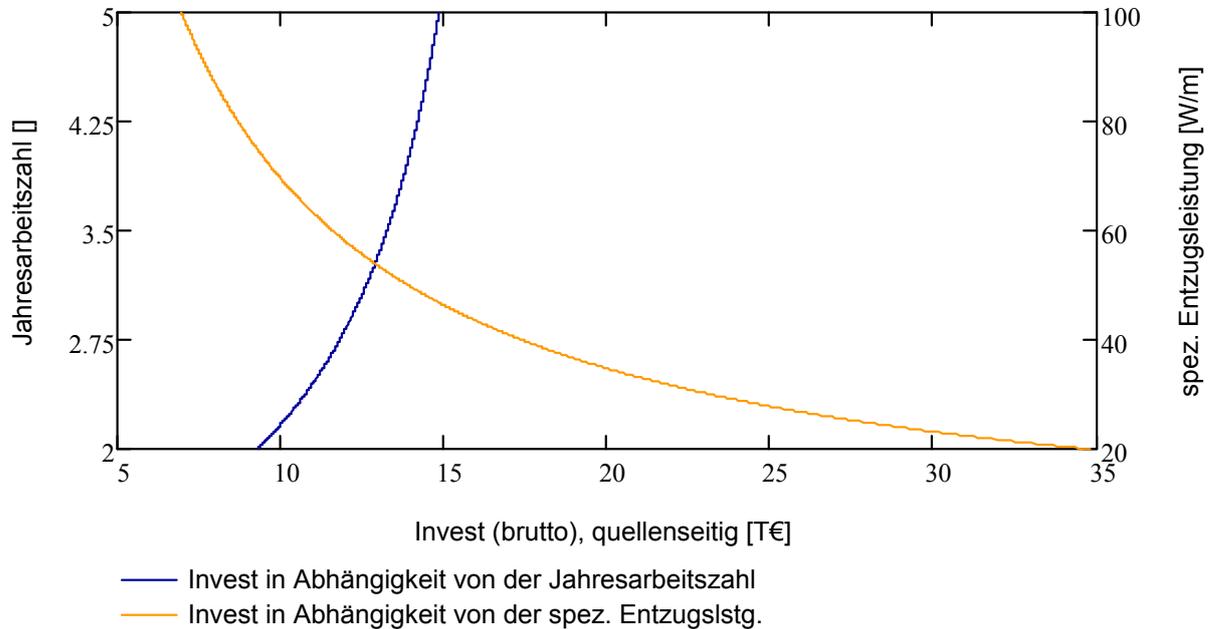


Abb. 2-8: Overnight Capital Cost von Erdwärmesondenbohrungen

In konkreten Zahlen ausgedrückt würde sich, wie in Tab. 2-8 gezeigt, eine höhere spezifische Entzugsleistung von  $60 \text{ W/m}$  bei gleichbleibender Jahresarbeitszahl mit etwa  $30 \text{ m}$  geringerer Gesamtsondenlänge oder  $2.320 \text{ €}$  (brutto) Kostenreduktion auswirken. Im umgekehrten Fall – eine Abnahme der spezifischen Entzugsleistung um  $10 \text{ W/m}$  – müssten  $45 \text{ m}$  mehr gebohrt werden und die Anlage verteuert sich um  $3.480 \text{ €}$  (brutto). Ohne diese zusätzlichen Bohrmeter ergäbe sich eine Jahresarbeitszahl von nur noch  $2,5$  []. Eine sinkende Jahresarbeitszahl führt zwangsläufig zu höherer Leistungsaufnahme der Wärmepumpe und damit auch zu höheren Betriebskosten (Abb. 2-9). Im genannten Beispiel würde ein zusätzlicher Betrag von  $475 \text{ €/a}$  anfallen, der die eingesparten Installationskosten in wenigen Jahren aufzehrt.

Die Änderung der Jahresarbeitszahl wirkt sich zudem auf die durch den Einsatz einer Erdwärmanlage im Vergleich zum bundesdeutschen Heizungsmix erzielbare Reduktion der  $\text{CO}_2$ -Emission aus (Abb. 2-8). Mit einem vereinfachenden Ansatz kann der Betrag der  $\text{CO}_2$ -Einsparung  $\text{CO}_2\text{RED} [\text{kgCO}_2/\text{kWh}]$  überschlägig abgeschätzt werden (Gl. 2.03).

$$\text{CO}_2\text{RED} = (Q_H \cdot 2.400 \cdot 0,229) - \left[ \left( Q_H - Q_H \cdot \frac{\beta - 1}{\beta} \right) \cdot 2.400 \cdot 0,6254 \right] \quad (2.03)$$

$\text{CO}_2$ -Emission deutscher  
Heizwärmemix

$\text{CO}_2$ -Emission  
Wärmepumpenanlage

## 2. Aufbau und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen

---

In Gl. 2.03 entspricht der Wert 0,229 der  $\text{CO}_2$ -Emission des deutschen Heizwärmemixes für den privaten Sektor in  $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$  (STAIB 2007). Die  $\text{CO}_2$ -Emission auf der Seite der Wärmepumpenanlage ( $0,6245 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ ) rührt aus der Stromproduktion und wurde der GEMIS-Datenbank des ÖKO-INSTITUTS E.V. (2008) entnommen.

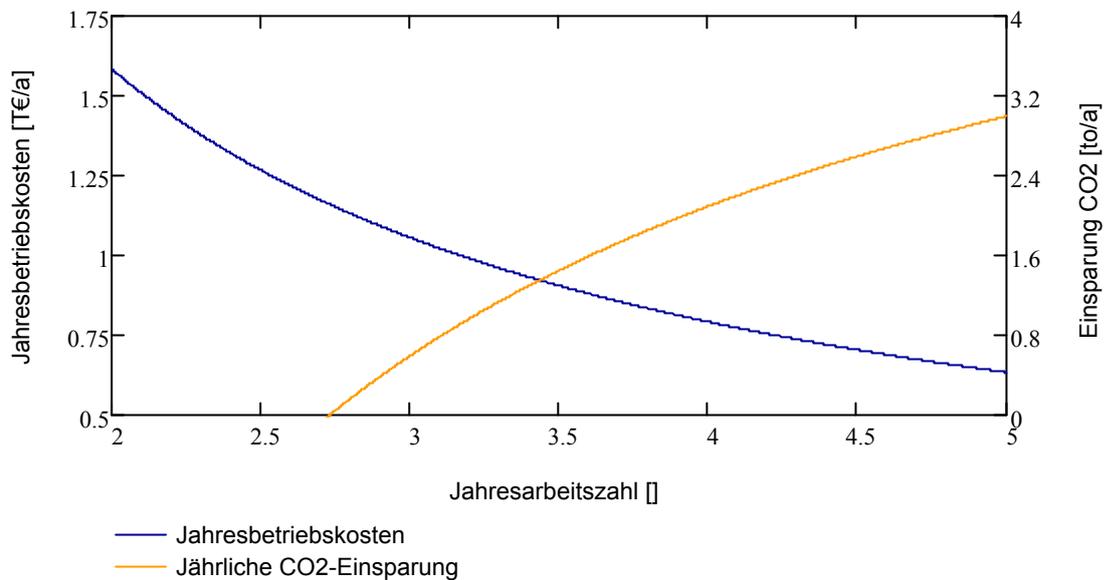


Abb. 2-9: Betriebskosten und  $\text{CO}_2$ -Einsparung in Abhängigkeit von der Jahresarbeitszahl (Grunddaten aus Tab. 2-7)

### 3 GRUNDLAGEN DES WÄRMETRANSPORTS BEI ERDWÄRMESONDEN

Bei der Auslegung von Erdwärmesonden steht die Prognose der Temperaturentwicklung im Wärmeträgermedium, insbesondere der Ein- und Austrittstemperatur an den Erdwärmerohrleitungen, im Mittelpunkt. Die thermische Interaktion des Wärmeträgermediums mit dem umgebenden Gestein stellt ein instationäres Problem dar, bei dem eine Vielzahl von Faktoren zu berücksichtigen ist: die thermischen Untergrundeigenschaften, die verschiedenen Materialparameter, der Bohrungsausbau und die Geometrie eines Erdwärmesondenfelds, vor allem aber auch das nutzerspezifische Heiz-/Kühllastprofil dürfen keinesfalls vernachlässigt werden. Eine zusätzliche Herausforderung stellt der Einfluss des Grundwassers auf die Erdwärmesonden dar.

Üblicherweise sollen Erdwärmesondenanlagen über mehrere Jahrzehnte hinweg thermische Energie bereitstellen. Bei der Auslegung muss dementsprechend eine Langzeitprognose gestellt werden. Da dem Erdreich beim Einsatz von Erdwärmeübertragern kurzzeitig Lastspitzen aufgeprägt werden, sind diese im Sinne einer nachhaltigen thermischen Bewirtschaftung des Untergrunds bei der Prognose ebenfalls zu berücksichtigen.

Im folgenden Kapitel sollen daher die geothermischen Eigenschaften des Untergrunds, vor allem aber auch die Grundlagen des Wärmetransports zwischen dem in der Erdwärmesonde zirkulierenden Wärmeträgermediums und dem Untergrund vorgestellt werden. Des Weiteren wird ein Überblick über heute existierende, analytische bzw. semi-numerische Lösungsansätze gegeben, mit denen sich die Temperaturentwicklung in und um eine Erdwärmesonde beschreiben lassen.

Die wesentlichen Berechnungen in diesem und den Folgekapiteln wurden mit einem Computer Algebra System (CAS) durchgeführt. Zum Einsatz kam dabei MATHCAD<sup>®</sup> des US-amerikanischen Herstellers Parametric Technology Corporation (PTC) in der Version 14.

#### 3.1 Ungestörte Untergrundtemperaturen

Unterhalb eines von den jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen betroffenen Intervalls steigen die Temperaturen im Untergrund mit der Tiefe. Der geothermische Gradient  $G$  [ $K/m$ ] als Quotient der terrestrischen Wärmestromdichte  $\dot{q}_{geo}$  [ $W/m^2$ ] und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [ $W/(m \cdot K)$ ] beträgt für Mitteleuropa etwa  $3 K$  je hundert Meter, kann aber in geologisch besonders ausgezeichneten Gebieten auch deutlich darüber liegen. Typische Werte für die Gesteinswärmeleitfähigkeit schwanken zwischen  $2$  und  $4 W/(m \cdot K)$ , können – zum Beispiel für Torf – aber auch geringer oder wie etwa bei Quarzit höher sein (CLAUSER ET AL. 2006). Die terrestrische Wärmestromdichte in tektonisch inaktiven Gebieten weist im Durchschnitt einen Wert von ca.  $0,06 W/m^2$  auf, kann jedoch in Regionen mit hydrothermaler Aktivität auf mehr als das Zehnfache ansteigen (EISBACHER 1996). Mit Hilfe des geothermischen Gradienten und der mittleren Jahrestemperatur an der Erdoberfläche  $\overline{T}_{sur}$  [ $^{\circ}C$ ] kann die ungestörte Temperatur  $T_0$  [ $^{\circ}C$ ] in einer definierten Tiefe  $z$  [ $m$ ] unter Zuhilfenahme von Gl. 3.01 bestimmt werden (ESKILSON 1988B).

$$T_0(z) = \overline{T}_{sur} + G \cdot z = \overline{T}_{sur} + \frac{\dot{q}_{geo}}{\lambda} \cdot z \quad (3.01)$$

Dieser Ansatz fand mit der Erweiterung um einen thermisch isolierten Bereich der Mächtigkeit  $D$  [m] im obersten Teil der Erdwärmesonde und der Sondentiefe  $H$  [m] in Form von Gl. 3.02 Eingang bei der Abschätzung der mittleren ungestörten Untergrundtemperatur  $T_{0m}$  [°C] in verschiedene Softwarelösungen zur Auslegung von Erdwärmesondenfeldern (ESKILSON 1987, KOENIGSDORFF 2006).

$$T_{0m} = \overline{T_{sur}} + G \cdot \left( \frac{D + H}{2} \right) \quad (3.02)$$

Der oberflächennahe, von der Witterung beeinflusste und damit steten Temperaturänderungen unterliegende Bereich kann mit einem von KASUDA (1965) entwickelten Ansatz weiter detailliert werden (Gl. 3.03).

$$T_0(z) = \overline{T_{sur}} - \Delta T_{sur} \cdot e^{-z \cdot \left( \frac{\pi}{365 \cdot a \cdot 86400} \right)} \cdot \cos \left[ \frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \left( t - \Delta t - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot a \cdot 86400}} \right) \right] \quad (3.03)$$

Für  $\overline{T_{sur}}$  [°C] kann die Lufttemperatur im Jahresdurchschnitt angesetzt werden,  $\Delta T_{sur}$  [K] entspricht ihrer jährlichen Amplitude. Für sie kann die Amplitude der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur verwendet werden (LOOSE 2006). Mit  $z$  [m] geht die Tiefe ein und mit  $\Delta t$  [d] wird eine Zeitverzögerung in die Gleichung eingeführt, mit der der kälteste Tag eines Jahres definiert wird. Die Gesteinstemperaturleitfähigkeit  $a$ , hier mit der Einheit [ $m^2/d$ ], berücksichtigt die Untergrundparameter Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [ $W/(m \cdot K)$ ], Dichte  $\rho$  [ $kg/m^3$ ] und spezifische Wärmekapazität  $c_p$  [ $J/(kg \cdot K)$ ] (Gl. 3.04). Die Variable  $t$  [d] schließlich steht für den betrachteten Tag eines Jahres.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (3.04)$$

Bei WU & NOFZIGER (1999) ist eine von HILLEL (1982) vorgeschlagene Variante zur Bestimmung der ungestörten Untergrundtemperatur aufgeführt (Gl. 3.05), die dem Ansatz von KASUDA (1965) im Grundsatz entspricht.

$$T_0(z) = \overline{T_{sur}} - \Delta T_{sur} \cdot e^{-\frac{z}{d_d}} \cdot \sin \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot (t - \Delta t)}{365} - \frac{z}{d_d} - \frac{\pi}{2} \right] \quad (3.05)$$

$$\text{mit } d_d = \sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot 86400}{\omega}} \text{ und } \omega = \frac{2 \cdot \pi}{365}$$

In Abbildung 3-1 sind mit dem Kasuda-Verfahren berechnete Ergebnisse für einen Referenzfall bis 20 m Tiefe dargestellt (linke Teilabbildung). Der rechten Teilabbildung kann zudem der jahreszeitenabhängige Temperaturgang über ein Kalenderjahr in verschiedenen Tiefen entnommen werden. Als Lokalität für den Referenzfall wurde das Testfeld Herbrachhofen gewählt. Die gesteinspezifischen Parameter stellen Mittelwerte dar, die über den Anteil der jeweiligen geologischen Einheit am Profil gewichtet sind (Tab. 3-1).

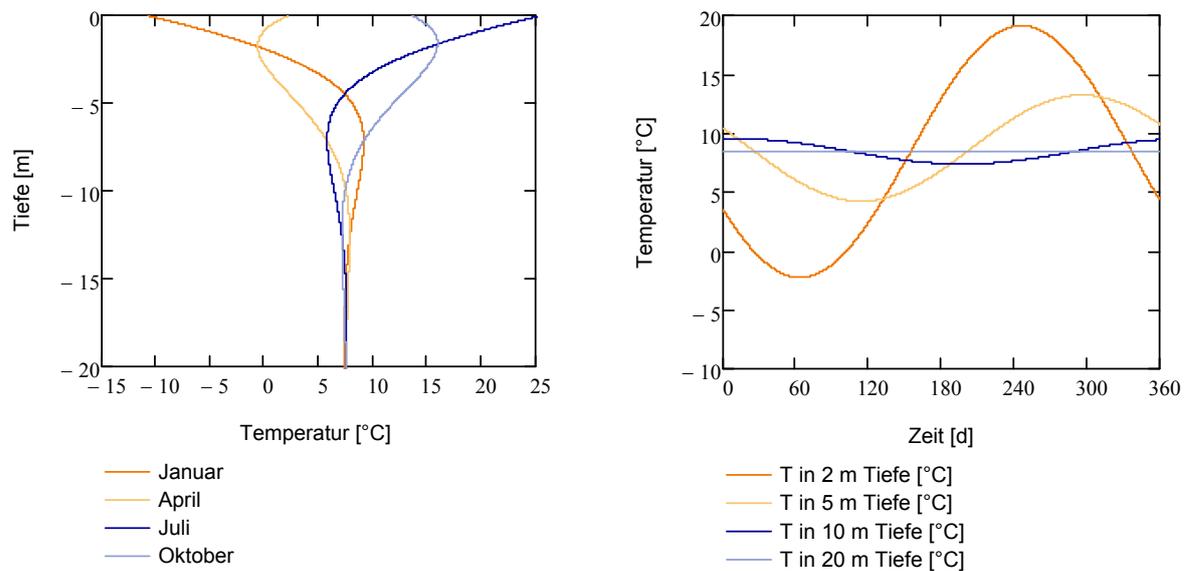


Abb. 3-1: Abhängigkeit der oberflächennahen Untergrundtemperatur vom jahreszeitlichen Gang der Lufttemperatur nach KASUDA (1965)

Tab. 3-1: Zusammenstellung Referenzfallparameter

Parameter	Wert	Quelle
Mittleren Jahreslufttemperatur	7,5 °C	Wetterdaten Stadt Leutkirch
Geothermischer Gradient	3,3 K/100m	siehe Kapitel 5
Wärmeleitfähigkeit Gestein	2,3 W/(m · K)	siehe Kapitel 5
Dichte Gestein	2.365 kg/m <sup>3</sup>	siehe Kapitel 5
Spezifische Wärmekapazität Gestein	902 J/(kg · K)	siehe Kapitel 5
Terrestrische Wärmestromdichte	0,075 W/m <sup>2</sup>	siehe Kapitel 5
Temperaturleitfähigkeit	1,2 · 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	Berechnet nach Gl. 3.04

Beide Abbildungen zeigen, dass für den Standort Herbrachhofen ab einer Tiefe von etwa 20 m unter Gelände der jahreszeitlich bedingte Gang der Lufttemperaturen keinen Einfluss mehr auf die Temperaturprognose nach dem Kasuda-Verfahren nimmt. Dagegen ist etwa in einer

Tiefe von 2 m unter Gelände mit einer saisonal bedingten Temperaturschwankung von ca. 20 K zu rechnen.

In Abb. 3-2 sind in der linken Teilabbildung die Prognosen der ungestörten Temperaturen bis in 100 m Tiefe nach KASUDA (1965) bzw. den geothermischen Gradienten nach Gl. 3.01 berücksichtigend dargestellt. Wird die von KASUDA formulierte Beziehung mit dem geothermischen Gradienten in der Form  $T(z) = T_{Kasuda}(z) + G \cdot z - \overline{T}_{sur}$  erweitert, ergibt sich der in der rechten Teilabbildung gezeigte Graph.

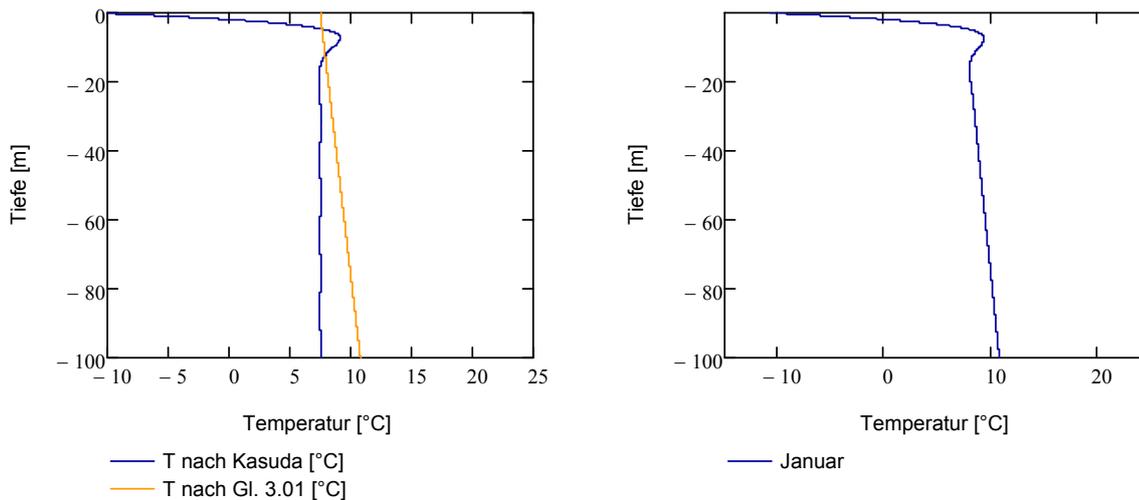


Abb. 3-2: Ungestörte Untergrundtemperaturen nach KASUDA (1965) und nach Gl. 3.01

### 3.2 Wärmeübertragung im Untergrund

Mit Wärmeübertragung bezeichnet man ganz allgemein den Energietransport zwischen Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen aufgrund eines Temperaturgefälles (WAGNER 2004). Konduktion, Konvektion und Strahlung sind die drei zugehörigen Mechanismen. In flüssigen oder gasförmigen Medien sind alle drei beteiligt. In Feststoffen, sofern nicht ausreichend durchlässig für Strahlung, ist dagegen einzig der konduktive Transport relevant. Die Wärmeübertragung zwischen einem Feststoff und einer flüssigen Phase wird als Wärmeübergang bezeichnet, zwischen zwei Fluiden durch einen Körper, etwa eine Wand, hindurch als Wärmedurchgang (MERKER & EIGLMEIER 1999, WAGNER 2004).

Im Untergrund kann die Strahlung vernachlässigt werden. Hier dominieren vielmehr Konduktion als Energietransport infolge atomarer und molekularer Wechselwirkungen und die an Massenbewegungen gekoppelte Konvektion (MERKER & EIGLMEIER 1999). Bei der Konduktion ist nach dem Fourierschen Wärmeleitungssatz die Wärmestromdichte  $\dot{q}_{cond} [W/m^2]$  proportional zum Temperaturgradienten  $\nabla T [K]$ :

$$\dot{q}_{cond} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (3.06)$$

Der Proportionalitätsfaktor  $\lambda$  [ $W/(m \cdot K)$ ] ist die druck- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit. Wegen der geringen Druck-/Temperaturänderungen, die beim Betrieb von Erdwärmesonden im Heiz-/Kühlfall dem Untergrund aufgeprägt werden, wird die Wärmeleitfähigkeit im Folgenden für das jeweils betroffene Material als Konstante betrachtet.

Aus dem Energieerhaltungssatz folgt, dass – bezogen auf ein Volumenelement  $V$  – die Differenz aus pro Zeiteinheit ein- und ausgetragener Wärmemenge der Änderung der thermischen Energie im Volumenelement entspricht. Mit der Dichte  $\rho$  [ $kg/m^3$ ] und der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  [ $J/(kg \cdot K)$ ] kann die zeitliche Änderung der Temperatur gemäß Gl. 3.07 ausgedrückt werden (SIGNORELLI 2004).

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) \quad (3.07)$$

Für den konvektiven Wärmetransport im oberflächennahen Untergrund, lässt man Gebiete mit aktiven Massenbewegungen heißen Gesteins außer Betracht, ist der Grundwasserfluss von zentraler Bedeutung. Es wird zwischen freier und erzwungener Konvektion unterschieden. Erstere wird über die Temperaturabhängigkeit der Dichte gesteuert, letztere – auch als Advektion bezeichnet – über Druckdifferenzen.

Trotz der gegenüber Feststoffen fast immer geringeren Wärmeleitfähigkeit von Fluiden vermögen sie mittels Massenbewegung durch die Wegigkeiten im Untergrund erhebliche Mengen thermischer Energie zu transportieren. Der konvektionsbedingte Wärmestrom  $\dot{Q}$  [ $W$ ] kann mit der Gl. 3.08 beschrieben werden (SIGNORELLI 2004). Hierbei charakterisiert der Index  $fl$  die flüssige Phase. Die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  [ $m/s$ ] stellt das Verhältnis eines Wasservolumens je Zeiteinheit zu einem durchströmten Filterquerschnitt, also einen flächenbezogenen Durchfluss, dar (HÖLTING 2009).

$$\dot{Q} = \rho_{fl} \cdot c_{p_{fl}} \cdot v_f \cdot \nabla T \quad (3.08)$$

Beim Wärmeübergang zwischen fester und flüssiger Phase im Untergrund ist der Wärmestrom  $\dot{Q}$  [ $W$ ] proportional zum Produkt aus Temperaturdifferenz  $T_1 - T_2$  [ $K$ ] zwischen den beiden Phasen und der Austauschfläche  $A$  [ $m^2$ ]. Als Proportionalitätsfaktor dient, wie in Gl. 3.09 gezeigt, der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  [ $W/(m^2 K)$ ].

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.09)$$

KOHL (1992) weist darauf hin, dass dieser Ansatz stark vereinfacht und dass sich mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz der Wärmestrom aus der Differenz der Abstrahlungsleistung und Rückstrahlungsleistung zweier Körper ergibt (Gl. 3.10). Hierbei entspricht  $\sigma$  [ $W/(m^2 K^4)$ ] der Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5,6704 \cdot 10^{-8}$ ).

$$\dot{Q} = 4 \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \approx 4 \cdot \sigma \cdot A \cdot T^3 \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.10)$$

Aus den vorstehenden Gleichungen lassen sich die Wärmetransportgleichungen für die feste und die flüssige Phase entwickeln (KOHL 1992, SIGNORELLI & KOHL 2002). Die Indices  $so$  und  $fl$  stehen für die feste bzw. die flüssige Phase.

$$\rho_{so} \cdot c_{pso} \cdot \frac{\partial T_{so}}{\partial T} = \nabla(\lambda_{so} \cdot \nabla T_{so}) + h \cdot v_f \cdot A \cdot (T_{fl} - T_{so}) \quad (3.11)$$

$$\rho_{fl} \cdot c_{fl} \cdot \frac{\partial T_{fl}}{\partial T} = -\rho_{fl} \cdot c_{fl} \cdot v_f \cdot \nabla T_{fl} + \nabla(\lambda_{fl} \cdot \nabla T_{fl}) + h \cdot v_f \cdot A \cdot (T_{so} - T_{fl}) \quad (3.12)$$

Wird vorausgesetzt, dass die Temperaturen in der festen und flüssigen Phase identisch sind, können die Gl. 3.11 und 3.12 mit gemittelten Materialwerten zur Gl. 3.13 vereinfacht werden (KOHL 1992, SIGNORELLI & KOHL 2002):

$$\overline{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\bar{\lambda} \cdot \nabla T) - \rho_{fl} \cdot c_{pfl} \cdot v_f \cdot \nabla T \quad (3.13)$$

*zeitl. Variation      Konduktion      Konvektion*

Die mit Querstrich versehenen Parameter enthalten Werte aus beiden Phasen, die mit der Gesteinsporosität  $n$  [] gewichtet werden können. Mit der Temperaturleitfähigkeit  $a$  [ $m^2/s$ ], über die Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität in Zusammenhang stehen, kann Gleichung 3.13 in die allgemein bekannte Form der instationären Wärmetransportgleichung gebracht werden (Gl. 3.14).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \left( \frac{\rho_{fl} \cdot c_{pfl}}{\rho \cdot c_p} \right) \cdot \left( v_f \frac{\partial T}{\partial x} + v_f \frac{\partial T}{\partial y} + v_f \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.14)$$

*zeitl. Variation      Konduktion      Konvektion*

### 3.3 Thermische Widerstände

Wenn Energie aus dem Erdreich an das Fluid in einer Erdwärmesonde übergeben wird, müssen verschiedene Grenzflächen, und damit auch thermische Übergangswiderstände, überwunden werden. Für den Fall einer Einfach-U-Sonde sind diese in Abb. 3-3 illustriert.

Wie bereits in Abb. 2-6 gezeigt, kann die Entwicklung der mittleren Fluidtemperatur des in einer Erdwärmesonde zirkulierenden Arbeitsmediums in erster Näherung in zwei Schritte untergliedert werden: Instationarität zu Beginn des Betriebs mit anschließendem Übergang in ein quasi-stationäres Verhalten, das sich einstellt, sobald Arbeitsmittel, Sondenrohre und das Hinterfüllmaterial untereinander für einen konstanten Wärmestrom keine Temperaturänderung mit der Zeit mehr erfahren. In diesem Fall sind auch die thermischen Widerstände  $R$  [ $K/W$ ] konstant (Abb. 3-3 mit  $T_{fl1}$  und  $T_{fl2}$  [ $K$ ] für die Fluidtemperaturen und  $T_b$  [ $K$ ] für die Temperatur an der Bohrlochwand).

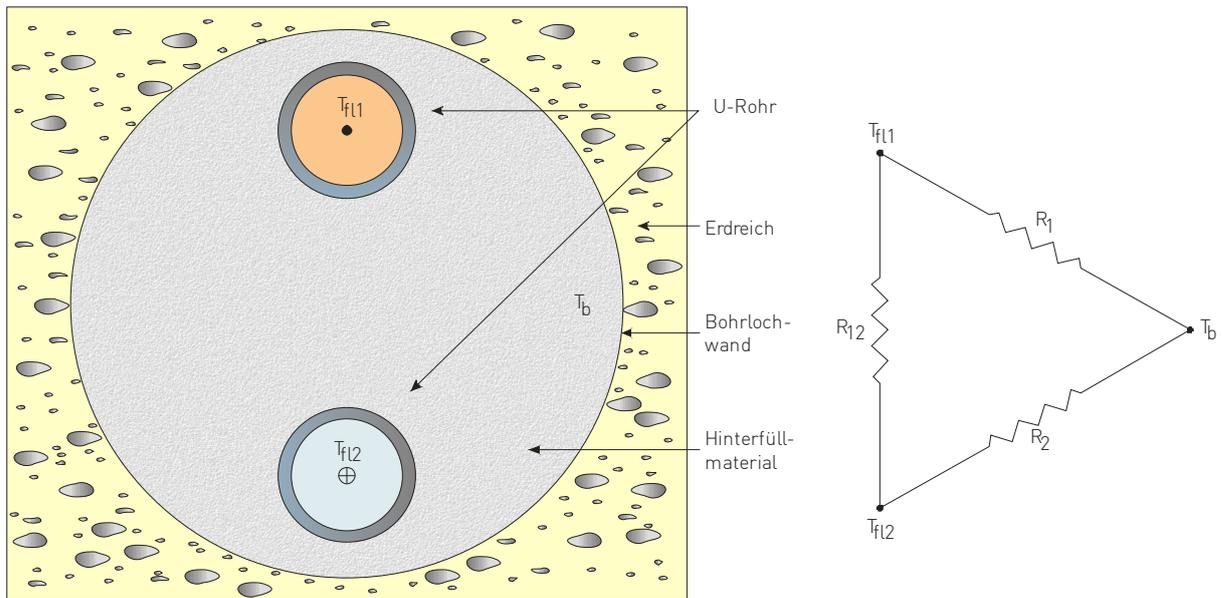


Abb. 3-3: Bohrlochquerschnitt einer Einfach-U-Sonde (nach YOUNG 2004, HELLSTRÖM 1991)

Betrachtet man, wie in Abb. 3-4 dargestellt, die quasi-stationäre Wärmeleitung durch eine ebene Wand und löst die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  zum Quotienten aus Wärmestrom  $\dot{Q}$  und einer isothermen Fläche  $A$  auf, kann Gl. 3.06 zu

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.15)$$

umgeschrieben werden. Bei konstanter Fläche  $A$  und mit der Schichtdicke  $s$  kann dann für den Einschichtfall Gl. 3.16

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.16)$$

und für den Fall von  $n$  Schichten  $S$  die Gl. 3.17 formuliert werden (WAGNER, 2004).

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_n}{S_n} \cdot A \cdot (T_n - T_{n+1}) \quad (3.17)$$

Durch Umstellen der Gl. 3.17 und Addition der Temperaturdifferenzen der  $n$  Einzelschichten ergibt sich die Temperaturdifferenz  $T_1 - T_{n+1}$  (Gl. 3.18, Abb. 3-4):

$$T_1 - T_{n+1} = \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{s_i}{\lambda_i} \quad (3.18)$$

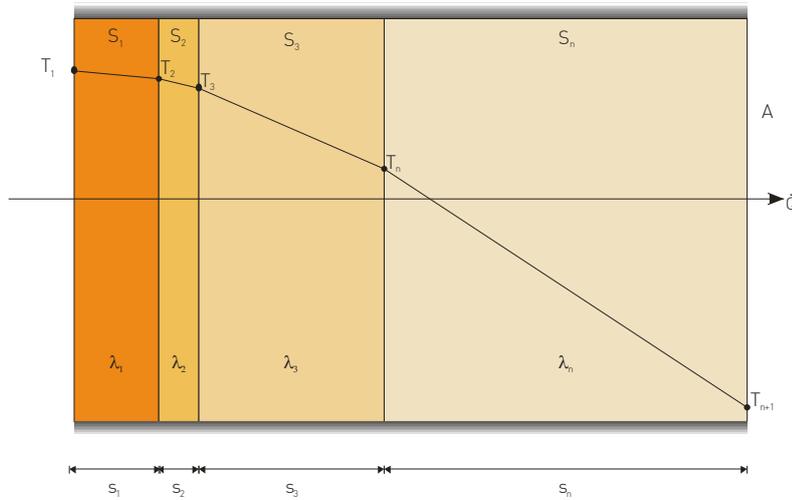


Abb. 3-4: Wärmeleitung beim Mehrschichtfall (nach WAGNER 2004)

Im Gegensatz zur ebenen Wand ist beim hohlzylinderförmigen Sondenrohr die wärmedurchströmte Fläche eine Funktion des Radius  $r$  und Gl. 3.15 muss daher in die Form

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dr} \quad (3.19)$$

gebracht werden. Mit der Zylindermantelfläche  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot L$  und durch Umformung erhält man dann Gl. 3.20:

$$\frac{dr}{r} = -\lambda \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\dot{Q}} \cdot dT \quad (3.20)$$

Nach Integration in den Grenzen  $r_i$  (Innenradius) und  $r_a$  (Außenradius) und Umformung ergibt sich schließlich die Gleichung für den Wärmestrom durch einen Hohlzylinder (WAGNER, 2004):

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \cdot (T_i - T_a) \quad (3.21)$$

Die Gesamttemperaturdifferenz kann beim Hohlzylinder analog zur ebenen Wand (Gl. 3.18) bestimmt werden (Gl. 3.22):

$$T_i - T_a = \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right)}{\lambda_i} \quad (3.22)$$

Der Wärmeübergang zwischen einer Wand und einem strömenden Fluid kann mit Hilfe des Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  beschrieben werden. Setzt man in Gleichung 3.08 die Tem-

peraturen  $T_1 = T_{fl}$  und  $T_2 = T_{so}$  kann für die ebene Wand die Temperaturdifferenz zwischen fluider und fester Phase gemäß Gl. 3.23 als Produkt aus Wärmestromdichte  $\dot{q}$  und Wärmewiderstand  $R$  [ $m \cdot K/W$ ] beschrieben werden (WAGNER 2004).

$$T_{fl} - T_{so} = \frac{\dot{Q}}{A \cdot h} = \dot{q} \cdot R \quad (3.23)$$

Für den Hohlzylinder ergibt sich Gl. 3.24 beim Einschichtfall und Gl. 3.25 beim Mehrschichtfall.

$$T_i - T_a = \dot{Q} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot r_i \cdot h_i} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} \cdot \ln \frac{r_a}{r_i} \right) = \dot{q} \cdot R \quad (3.24)$$

$$T_i - T_a = \dot{Q} \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot r_i \cdot h_i} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\ln \left( \frac{r_{i+1}}{r_i} \right)}{\lambda_i} \right] = \dot{q} \cdot R \quad (3.25)$$

Der Wärmewiderstand  $R$  setzt sich im Mehrschichtfall aus seinen Teilwärmewiderständen  $R_n$  zusammen (Gl. 3.26).

$$T_i - T_a = \Delta T = \dot{q} \cdot \Sigma R_n \quad (3.26)$$

Ähnlich dem Ohmschen Gesetz ergibt sich auch der thermische Gesamtwiderstand aus der Summe seiner Teilwiderstände (REUSS 2007, WAGNER 2004). Für Erdwärmesonden lassen sich in erster Näherung zwei thermische Widerstände definieren: der thermische Widerstand in dem das Bohrloch umgebenden Erdreich  $R_{soil}$  und der thermische Bohrlochwiderstand  $R_b$ , der den Bereich des Bohrlochs umfasst (HELLSTRÖM 1996). Letzterer hängt im Wesentlichen von der Art und den thermischen Eigenschaften der Erdwärmesonde sowie von der Verteilung der Sondenrohre im Bohrloch ab (REUSS 2007).

Wird die Erdwärmesonde in einem Bohrloch in der Betrachtung auf eine linienförmige Quelle, wie in Abb. 3-5 dargestellt, reduziert, dann gilt für den thermischen Bohrlochwiderstand  $R_b$  die Gleichung 3.27 (KOENIGSDORFF 2006).

$$R_b = \frac{(T_{fl} - T_b)}{\dot{Q}} \quad (3.27)$$

Der thermische Bohrlochwiderstand  $R_b$  kann in die Teilwiderstände für das Sondenfluid  $R_{fluid}$ , das Sondenmaterial  $R_{pipe}$  und das Hinterfüllmaterial  $R_{grout}$  zerlegt werden. Dementsprechend lässt sich die Summe aller thermischen Widerstände unter der Annahme eines homogenen und unendlich ausgedehnten Gesteinsmaterials um die Erdwärmesondenbohrung herum Gl. 3.28 formulieren:

$$R_{total} = R_{soil} + R_b = R_{soil} + R_{fluid} + R_{pipe} + R_{grout} \quad (3.28)$$

### 3. Grundlagen des Wärmetransports bei Erdwärmesonden

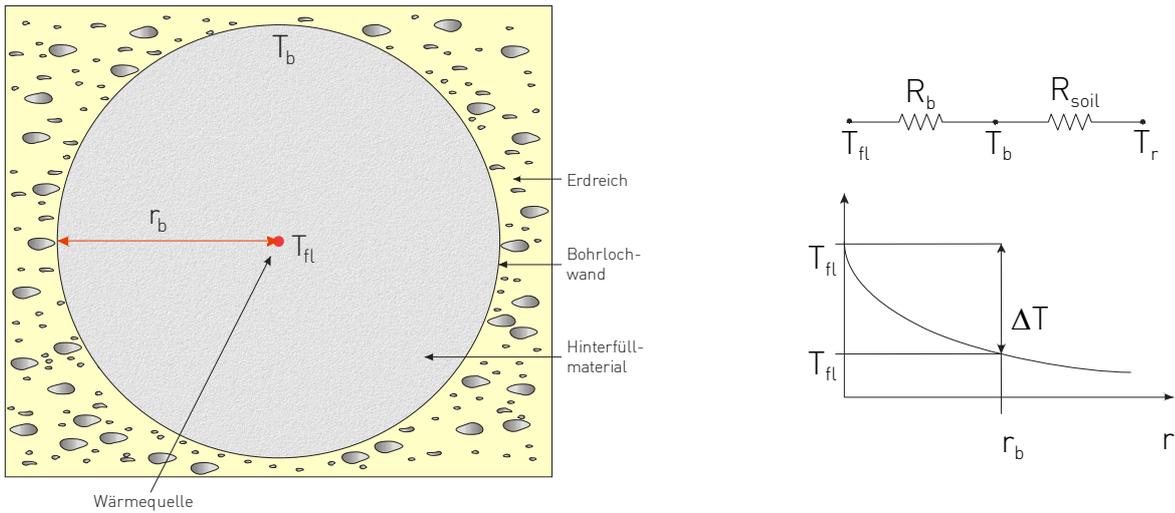


Abb. 3-5: Vereinfachter Bohrlochquerschnitt und thermische Widerstände (nach KOENIGSDORFF ET AL. 2006)

Für den Wärmeübergang von einem Fluid durch einen mehrschichtigen Hohlzylinder gilt nach WAGNER (2004) Gl. 3.29

$$R_{total} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot h_{fluid} \cdot L} + \left[ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\lambda_1} \cdot \left( \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right) \right] \quad (3.29)$$

mit der die Teilwiderstände  $R_{fluid}$  und  $R_{pipe}$  näher definiert werden können (Gl. 3.30 und Abb. 3-6).

$$R_{fluid} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot h_{fluid}} \quad R_{pipe} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{pipe}} \cdot \ln \left( \frac{r_a}{r_i} \right) \quad (3.30)$$

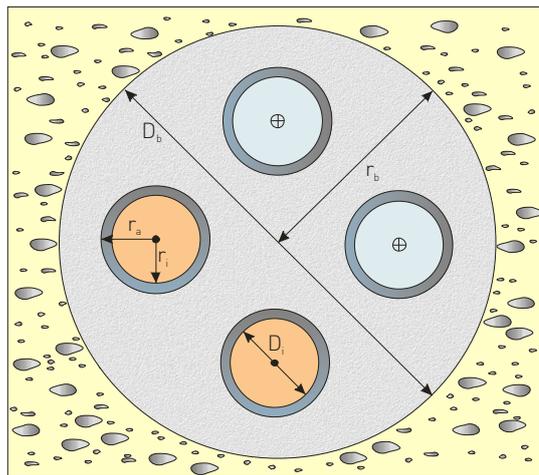


Abb. 3-6: Schnittzeichnung Doppel-U-Sonde im Bohrloch

Für die Berechnung des Teilwiderstands  $R_{fluid}$  wird der Quotient aus Wärmestromdichte und der Temperaturdifferenz Sondenfluid und –material, also der Wärmeübergangskoeffizient  $h$ , benötigt, der gemäß Gl. 3.31 über die dimensionslose Nusseltzahl  $Nu$  berechnet werden kann.

$$h = \frac{\dot{q}}{(T_{fluid} - T_{pipe})} = Nu \cdot \frac{\lambda_{fluid}}{d_{pipe}} \quad (3.31)$$

Die Nusseltzahl ist abhängig vom Strömungsregime (laminar/turbulent) und damit von der Reynolds-Zahl  $Re$  [] und der Prandtlzahl  $Pr$  [], dem Quotienten aus kinematischer Viskosität  $\nu$  [ $m^2/s$ ] und Temperaturleitfähigkeit  $a$  [ $m^2/s$ ]. Bei laminarer Rohrströmung, das heißt für eine Reynolds-Zahl  $Re < 2.300$ , ergibt sich die Nusseltzahl zu 4,634 (HUBER & PAHUD 1999A, WAGNER 2004). SIGNORELLI (2004) verweist für den laminaren Bereich auf die Sieder-Tate-Gleichung (Gl. 3.32).

$$Nu = 1,86 \cdot \left( \frac{d_{pipe} \cdot Re \cdot Pr}{L} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\eta_{fluid}}{\eta_{pipe}} \right)^{0,14} \quad (3.32)$$

Der Quotient der dynamischen Viskositäten  $\eta_{fluid}/\eta_{pipe}$ , auch bekannt als Sieder-Tate-Term, dient zur Korrektur des temperaturbedingten Viskositätsunterschieds zwischen dem zentralen Rohrbereich und dem Rohrwandbereich (THOME 2006). Bei den für Erdwärmesonden typischen Temperaturdifferenzen ist er nahezu 1 und der betreffende Term in Gl. 3.32 vereinfacht sich entsprechend.

Zur Bestimmung der Nusseltzahl bei turbulentem Strömungsregime kann dagegen Gl. 3.33 angewendet werden (WAGNER 2004). Für den Fall, dass die Fluidtemperatur höher ist als die Temperatur des Sondenmaterials ergibt sich der Exponent  $m$  zu 0,4 [], im umgekehrten Fall zu 0,3 [] (SIGNORELLI 2004).

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^m \quad (3.33)$$

Während die Berechnung des Wärmewiderstands des Sondenmaterials  $R_{pipe}$  in Gl. 3.30 lediglich die Kenntnis der Materialparameter notwendig ist, gestaltet sich die zeitabhängige Ermittlung des thermischen Widerstands des Hinterfüllmaterials  $R_{grout}$  weit schwieriger. Ein rein stationärer Ansatz ist nicht ausreichend (KOENIGSDORFF 2006), da sich mit jedem Anfahren der Erdwärmesonde die Temperaturen im Hinterfüllmaterial zunächst signifikant ändern. Analog zu Gl. 3.27 kann hier mit der Temperatur  $T_{tube}$  an der Sondenwandung folgender Ansatz herangezogen werden (YAVUZTURK 1999, YOUNG 2004):

$$R_{grout} = \frac{(T_{tube} - T_b)}{\dot{Q}} \quad (3.34)$$

In der Literatur finden sich etliche Veröffentlichungen, die sich mit der Ermittlung des thermischen Bohrlochwiderstands  $R_b$  auseinandersetzen. PAUL (1996) führt hierzu einen Formfaktor ein, mit dem sich in Kombination mit verschiedenen Koeffizienten für unterschiedliche Anordnung der Sondenrohre im Bohrloch zueinander  $R_{grout}$  annähern lässt.

GU und O'NEAL (1998) entwickelten ein Modell, bei dem für Einfach-U-Sonden ein Äquivalentdurchmesser eingeführt wird. HELLSTRÖM (1991) zerlegt den dagegen den thermischen Bohrlochwiderstand in die beiden Teilwiderstände „internal thermal resistance“ und „thermal borehole resistance“. Sie sind in dieser Form in die Software Earth Energy Designer (EED) integriert und werden dort nach dem Multipole-Verfahren berechnet (HELLSTRÖM & SANNER 2000). Dieses Verfahren ist in BENNET ET AL. (1987) und in YOUNG (2004) detailliert beschrieben, die Ergebnisse der Berechnungen nach dem Multipole-Verfahren können dem EED-Logfile entnommen werden.

YOUNG beschreibt in seiner Arbeit zusätzlich das BFTM-Modell (Borehole Fluid Thermal Mass Model), dass er aus dem Buried Cable Modell (CARSLAW & JAEGER 1947) entwickelte. LIU und HELLSTRÖM stellten 2006 ein weiteres Verfahren vor, das bei verringertem Rechenaufwand dem Multipole-Verfahren vergleichbare Ergebnisse liefert.

Darüber hinaus haben SUTTON ET AL. (2003) ein Modell zur Prognose des thermischen Widerstands unter Berücksichtigung des Grundwasserstroms beschrieben, auf das im folgenden Kapitel näher eingegangen wird.

#### 3.4 Analytische Lösungen für den Wärmetransport bei Erdwärmesonden

Schon mit der Installation der ersten Erdwärmesonden in den Vereinigten Staaten um 1950 wurde die Notwendigkeit eines geeigneten Prognosetools zur Auslegung offensichtlich (SANNER 1992). Erste Ansätze bedienten sich der Kelvinschen Linienquellen-Theorie, allerdings wurden in der Folgezeit, ganz wesentlich aufbauend auf den Arbeiten von CARSLAW & JAEGER (1947), immer aufwendigere analytische Lösungsansätze entwickelt.

##### 3.4.1 Kelvins Linienquelle

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts hatte KELVIN (1884) ein Modell aufgestellt (Gl. 3.35), mit dem der konduktive Wärmetransport um eine unendlich ausgedehnte, linienförmige Wärmequelle in einem unendlichen und homogenen Medium beschrieben werden kann (INGERSOLL & PLASS 1948, INGERSOLL ET AL. 1955). Eine ausführliche Herleitung von Gl. 3.35 findet sich unter anderem in LOOSE (2006).

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{2\pi\lambda} \int_x^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \cdot Ei(X) \quad (3.35)$$

$$\text{mit } X = \frac{r}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}$$

Wegen der im Verhältnis zum Radius großen Länge und bei Vernachlässigung der Effekte am oberen und unteren Ende kann Kelvins Modellvorstellung einer unendlichen, linienförmigen Energiequelle auf eine Erdwärmesonde übertragen werden. In diesem Fall entspricht  $T_0$  [°C] in Gl. 3.35 der ungestörten Untergrundtemperatur und  $T$  [°C] die sich während des Betriebs der Erdwärmesonde einstellende Temperatur. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bezieht sich auf das

entsprechende Gestein und soll, wie weiter oben bereits beschrieben, als konstant betrachtet werden. Das gleiche gilt für die spezifische Wärmekapazität, die zusammen mit der Gesteinsdichte über die Temperaturleitfähigkeit  $a$  in Gl. 3.35 Eingang findet. Alle Gesteinsparameter, die ungestörte Untergrundtemperatur eingeschlossen, müssen zudem, um der Anforderung eines homogenen Mediums Rechnung zu tragen, zum Zeitpunkt  $t = 0$  auch im Raum konstant sein. Die längenbezogene Wärmestromdichte  $\dot{q}_l = \dot{q}/H [W/m]$  als Quotient aus Wärmestromdichte und Tiefe der Erdwärmesonde soll hier, wie auch im Weiteren, für den Heizfall mit positivem und im Kühlfall mit negativem Vorzeichen angegeben werden.

Für die Gl. 3.35 gibt es mehrere Approximationen. Unter anderem ist sie in einer von GUERNSEY ET AL. (1949) vereinfachten Form in der VDI 4640, Teil 2 (2001), aufgeführt (Gl. 3.36).

$$T_0 - T = \Delta T = \frac{0,1833 \cdot \dot{q}_l}{4\pi\lambda} \left( \log_{10} \cdot \frac{a \cdot t}{r^2} + 0,106 \cdot \frac{r^2}{a \cdot t} + 0,351 \right) \quad (3.36)$$

Das Integral in Gl. 3.35 lässt sich für hinreichend große Zeiten mit  $y = X^2 = r^2/(4 \cdot a \cdot t)$  auch mit einer Reihenentwicklung approximieren (Gl. 3.37); die Konstante  $\gamma = 0,5772157$  ist dort die Euler-Mascheroni-Zahl (LOOSE 2006, ERBAS 2001, MOGENSEN 1983).

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \int_y^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \left[ -\gamma - \ln y + y - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot y^n}{n \cdot n!} \right] \quad (3.37)$$

In der Literatur sind weitere Approximationen für das Integral in Gl. 3.35 aufgeführt. Bei YOUNG (2004) findet sich ebenfalls mit  $y = X^2 = r^2/(4 \cdot a \cdot t)$  eine Näherungslösung für Zeiten kleiner 10 Stunden (Gl. 3.38).

$$Ei(y) = e^{-y} \cdot \left( w_{41} \cdot \frac{1}{y+z_{41}} + w_{42} \cdot \frac{1}{y+z_{42}} + w_{43} \cdot \frac{1}{y+z_{43}} + w_{44} \cdot \frac{1}{y+z_{44}} \right) \quad (3.38)$$

mit	$w_{41} = 0,6031541043$	$z_{41} = 0,32254768961$
	$w_{42} = 0,357418692438$	$z_{42} = 1,745761101158$
	$w_{43} = 0,0388879085150$	$z_{43} = 4,536620296921$
	$w_{44} = 0,00053929470561$	$z_{44} = 9,395070912301$

LOOSE (2006) nennt für den Bereich  $10^{-3} \leq r^2/(4 \cdot a) \leq 10^3$  für unterschiedlich große  $y = X^2 = r^2/(4 \cdot a \cdot t)$  folgende Näherungsgleichungen und Koeffizienten (Gl. 3.39 für kleine  $y$ , Gl. 3.40 für sonstige  $y$ ):

$$Ei(y) = A + B \cdot \ln(y) + C \cdot y + D \cdot y^2 \quad (3.39)$$

$$Ei(y) = C \cdot e^{-\frac{(y-A)^B}{D}} \quad (3.40)$$

### 3. Grundlagen des Wärmetransports bei Erdwärmesonden

mit	y	A	B	C	D
	> 0,501257	0,404919	0,820728	0,731276	0,542190
	> 0,063097	-0,563271	-0,996011	0,947691	-0,165432
	< 0,063097	-0,576830	-0,999945	0,983655	0,043556

Die Werte für  $y$  berücksichtigen über die Temperaturleitfähigkeit  $a$  die Gesteinseigenschaften, die bei großen Zeiten oder bei kleinen Betrachtungsradien entsprechenden Einfluss nehmen. Zur Verdeutlichung sind in Abb. 3-7 den von Loose angegebenen Werten für  $y$  die zugehörigen Zeiten für verschiedene Gesteine bei einem betrachteten Radius von  $76 \text{ mm}$  – dies entspricht einem bei Erdwärmesonden durchaus typischen Bohrlochradius – einander gegenübergestellt. Die Temperaturleitfähigkeit wurde mit Werten aus der EED-Datenbank für die Wärmeleitfähigkeit, spezifischen Wärmekapazität und Dichte der betreffenden Gesteine berechnet (SANNER & HELLSTRÖM 2000). Es zeigt sich, dass der große Koeffizient für  $y$  Zeiten von ca.  $5.000 \text{ s}$ , der kleine Koeffizient ( $0,063097$ ) dagegen Zeiten zwischen etwa  $25.000 \text{ s}$  und  $35.000 \text{ s}$  repräsentiert.

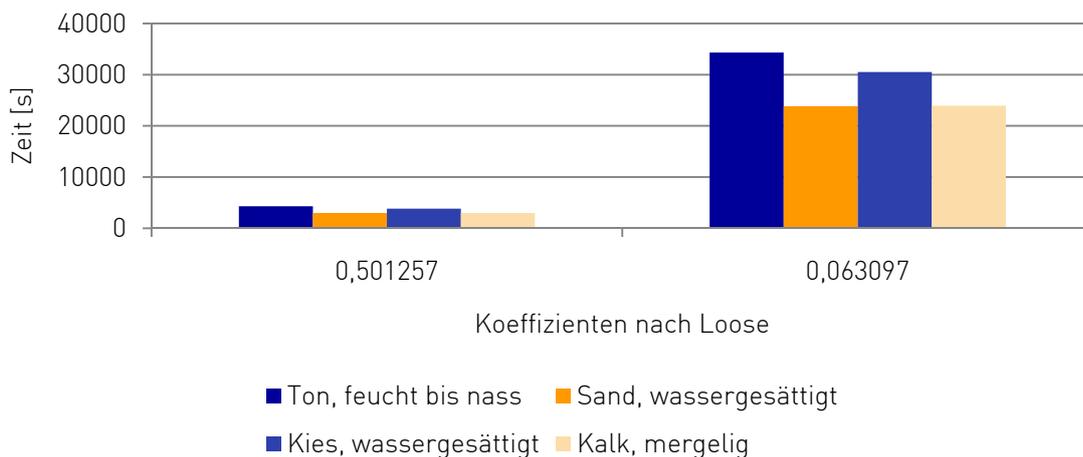


Abb. 3-7: Einfluss der Temperaturleitfähigkeit auf den Koeffizienten  $y$  für Berechnungen nach LOOSE (2006)

Unabhängig von den hier vorgestellten Vereinfachungen kann Gl. 3.35 auch mit einem geeigneten CAS-Programm (Computer-Algebra-System) wie etwa MATHCAD<sup>®</sup>, MAPLE<sup>®</sup> oder MATLAB<sup>®</sup> weiter untersucht werden. Ein Vergleich für die bei GUERNSEY ET AL., YOUNG und LOOSE genannten Näherungslösungen für einen Referenzfall bei kurzen und langen Laufzeiten mit den Berechnungsergebnissen eines CAS-Programms ist in Abb. 3-8 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Approximation nach GUERNSEY (1949) für den Referenzfall ab Zeiten größer  $2.000 \text{ s}$  sehr gute Übereinstimmung mit dem Ergebnis eines CAS-Programms zeigt, bei kleinen Zeiten dagegen deutliche Abweichungen auftreten (Teilabbildung a).

Dagegen bietet die Näherung nach LOOSE (2006), mit Ausnahme des Zeitintervalls zwischen  $400$  und  $750 \text{ s}$ , bei Auswahl der entsprechenden Teilgleichung eine recht gute (Teilabbildung

b), für sehr kurze Zeiten kleiner 400 s sogar die größte Übereinstimmung mit dem CAS-Ergebnis (Teilabbildung d). Die von YOUNG (2004) für Zeiten kleiner 6.000 s vorgeschlagene Näherungslösung weist gerade für diesen Bereich Abweichungen von bis zu 0,4 K auf (Teilabbildung c).

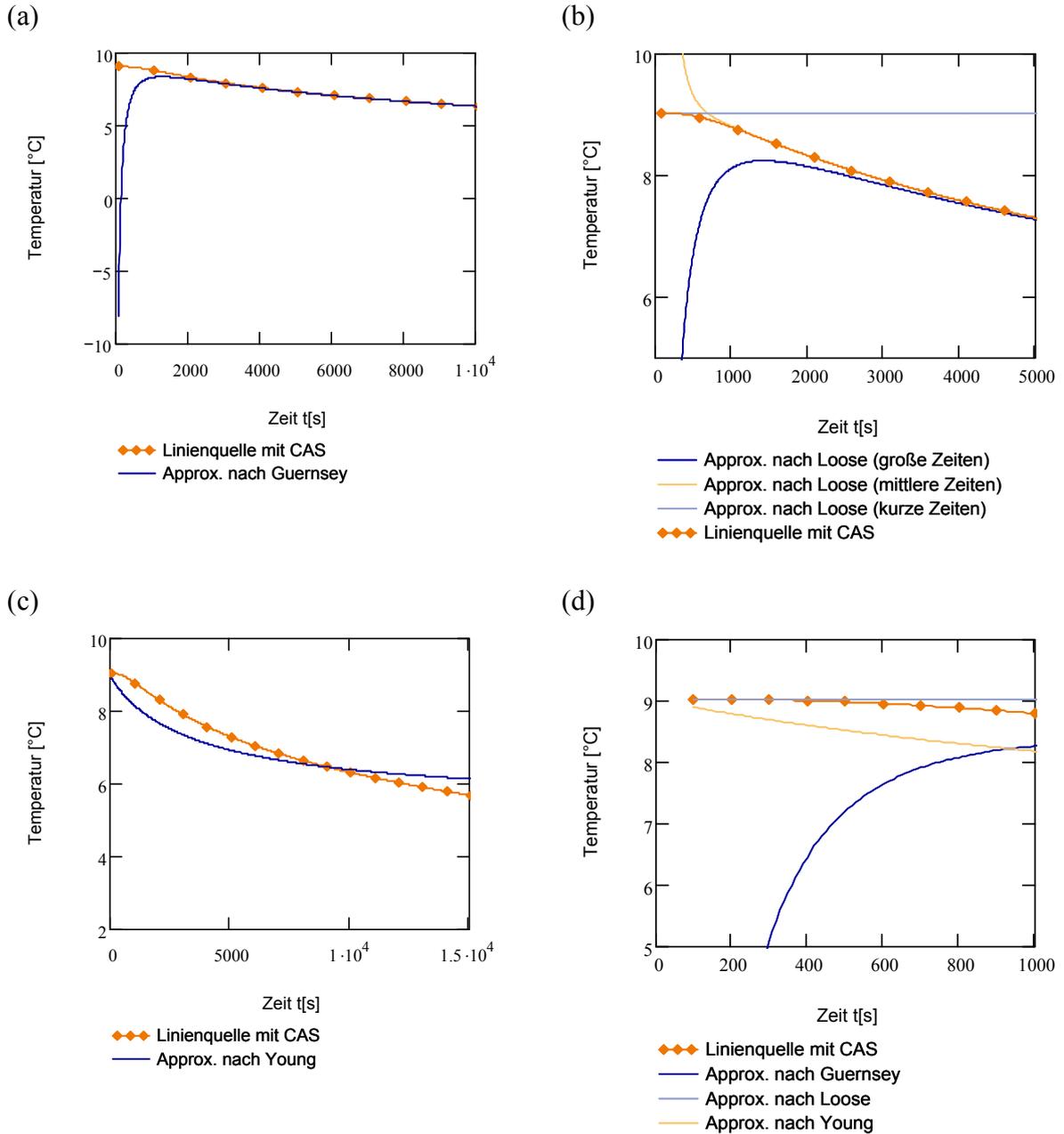


Abb. 3-8: Vergleich von Näherungslösungen (LOOSE, YOUNG, GUERNSEY ET AL.) mit den Ergebnissen eines CAS-Programms (MATHCAD®)

Unter den weiter oben genannten Voraussetzungen kann mit Gl. 3.35 zwar die Temperaturentwicklung um eine linienförmige Quelle thermischer Energie in einem homogenen Untergrund beschrieben werden, für die bei Erdwärmesonden bedeutsame mittlere Fluidtemperatur  $T_{fl}$  ist sie jedoch noch, wie mit Gl. 3.26 gezeigt, um den thermischen Bohrlochwiderstand  $R_b$  zu erweitern (Gl. 3.41).

$$T_{fl} = T_0 - \left[ \frac{\dot{q}_l}{4\pi\lambda} \cdot Ei \left( \frac{r_b^2}{4 \cdot a \cdot t} \right) + q_l \cdot R_b \right] \quad (3.41)$$

Für ausreichend lange Zeiten, bei denen der thermische Bohrlochwiderstand quasi-stationär wird, sind nur wenige Parameter in Gl. 3.41 unbekannt. Neben der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  sind dies noch die thermische Leistung je Bohrmeter  $\dot{q}_l$  und die Temperaturleitfähigkeit  $a$ , in die zusätzlich noch Dichte und Wärmekapazität des Gesteins eingehen. Diesen Umstand macht sich der Thermal Response Test (TRT) zu Nutze: Durch das Einspeisen von warmem Wasser mit konstanter Wärmeleistung in eine U-Sonde und das Aufzeichnen der Temperaturen an Vor- und Rücklauf der Sonde werden, vor allem bei größeren Bauvorhaben, die auslegungsrelevanten Parameter spezifische Wärmeleitfähigkeit und thermischer Bohrlochwiderstand im Gelände bestimmt. MOGENSEN (1983) hat hierzu die Linienquellen-Gleichung 3.35 in eine für die Auswertung eines Thermal Response Tests notwendige Form gebracht (Gl. 3.42).

$$\Delta T(r_b, t) = \frac{\dot{q}}{4\pi\lambda} \left( \ln \frac{4 \cdot a \cdot t}{r_b^2} - \gamma \right) \quad (3.42)$$

mit  $t > \frac{4r_b^2}{a}$

Die Gleichung 3.42 muss für die Auswertung eines TRT noch um den thermischen Bohrlochwiderstand erweitert werden. In Analogie zu Gl. 3.41 folgen Gl. 3.43 und schließlich Gl. 3.44 (GEHLIN 1998).

$$\Delta T = \dot{q} \left[ \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln \frac{4 \cdot a \cdot t}{r_b^2} - \gamma \right) + R_b \right] \quad (3.43)$$

$$\overline{T}_{fl} = \frac{T_{fl,in} + T_{fl,out}}{2} = \frac{\dot{q}}{4\pi\lambda} \cdot \ln(t) + \left[ \dot{q} \left( \frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \left( \ln \left( \frac{4 \cdot a}{r_b^2} \right) - \gamma \right) - R_b \right) + T_0 \right] \quad (3.44)$$

Der Term  $(T_{fl,in} + T_{fl,out})/2$  stellt die mittlere Fluidtemperatur  $\overline{T}_{fl}$  aus Vorlauf und Rücklauf der Erdwärmesonde dar. Unter Berücksichtigung des Zeitkriteriums  $t > 4r_b^2/a$  kann Gl. 3.44 auch in der allgemeinen Form

$$\overline{T}_{fl} = m \cdot \ln(t) + b \quad (3.45)$$

geschrieben werden. Mit der Bedingung  $\dot{q} = konst$  wird die Geradensteigung  $m$  proportional zur spezifischen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ . Werden die Messwerte der mittleren Fluidtemperatur eines Thermal Response Test gegen die dimensionslose Zeit  $\tau = \ln(t)$  abgetragen, ist über die Geradensteigung eine graphische Bestimmung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit und somit letztlich auch – durch Umstellen von Gl. 3.43 und Einsetzen der spezifischen Wärmeleitfä-

higkeit – die rechnerische Ermittlung des thermischen Bohrlochwiderstands möglich. Alternativ können mit Gl. 3.44 die spezifische Wärmeleitfähigkeit und der thermische Bohrlochwiderstand mit einer geeigneten Software über ein Best-Fit-Verfahren bestimmt werden (GELIN 1998).

### 3.4.2 Bewegliche Linienquelle

Kelvins Linienquellen-Gleichung (Gl. 3.35) berücksichtigt lediglich den konduktiven Anteil des Wärmetransports. Nach DIAO ET AL. (2003, 2004) und SUTTON ET AL. (2003) kann sie jedoch mit Hilfe der Theorie der Beweglichen Wärmequellen („moving heat sources“) so erweitert werden, dass der thermische Effekt fließenden Grundwassers berücksichtigt wird.

ZUBAIR & CHAUDRY (1998) nennen SPRARGEN & CLAUSSEN (1937) als die Autoren, die die ersten Ansätze der Theorie der beweglichen Wärmequellen beschrieben haben. ROSENTHAL (1946) entwickelte wenig später die Theorie, dass eine bewegliche Wärmequelle mit konstanter Geschwindigkeit  $U$  [m/s] parallel zur Raumachse  $x$  die Temperaturantwortfunktion  $T(x, y, z, t)$  der instationären Transportgleichung bei konduktivem Wärmetransport beschreibt.

CARSLAW & JAEGER (1947) schließlich formulierten Gleichungen für den quasi-stationären Zustand von beweglichen Punkt- und Linienquellen konstanter Leistung. Später hat die Theorie der Beweglichen Wärmequellen Einzug in die Welt der Metallverarbeitung, insbesondere bei der Laserschneide-Technik, gehalten (ZUBAIR & CHAUDRY 1998).

Von DIAO ET AL. (2003, 2004) sowie von SUTTON ET AL. (2003) wurde die Theorie einer Beweglichen Linienquelle auf die Betrachtung von Erdwärmesonden angewendet, die über ihre gesamte Länge in einen Grundwasserleiter einbinden. Hierzu ist zunächst, dem Ansatz in Gl. 3.13 bzw. 3.14 folgend, die Dichte und die Wärmekapazität des Gesteins und des darin enthaltenen Wassers über die Porosität  $n$  [ ], dem Verhältnis von Porenvolumen zum Gesamtvolumen, zu gewichten.

DIAO ET AL (2003) schlagen hierzu für die Wärmeleitfähigkeiten bzw. die volumetrischen Wärmekapazitäten  $c_v = \rho \cdot c_p$  des Grundwassers und Gesteins das arithmetische Mittel gem. Gl. 3.46 bzw. Gl. 3.47 vor.

$$\lambda_{so,fl} = n \cdot \lambda_{fl} + (1 - n)\lambda_{so} \quad (3.46)$$

$$c_{v_{so,fl}} = n \cdot c_{v_{fl}} + (1 - n) \cdot c_{v_{so}} \quad (3.47)$$

Anstatt des gewichteten arithmetischen Mittels empfehlen andere Autoren (COTÉ & KONRAD 2005, JOHANSEN 1975) für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{so,fl}$  die Verwendung des geometrischen Mittels und verweisen auf entsprechende Messergebnisse (Gl. 3.48).

$$\lambda_{so,fl} = \lambda_{fl}^{1-n} \cdot \lambda_{so}^n \quad (3.48)$$

Beide Ansätze, das gewichtete arithmetische und das geometrische Mittel, sind für einen Referenzfall ( $c_{v_{so}} = 2,2 \cdot 10^6$  und  $c_{v_{fl}} = 4,191 \cdot 10^6$ ,  $\lambda_{so} = 2,4$  und  $\lambda_{fl} = 0,58$ ) in Abb. 3-9 einan-

der gegenübergestellt. Weiterführende Informationen zu dieser Fragestellung finden sich unter anderem bei PERZLMAIER (2007).

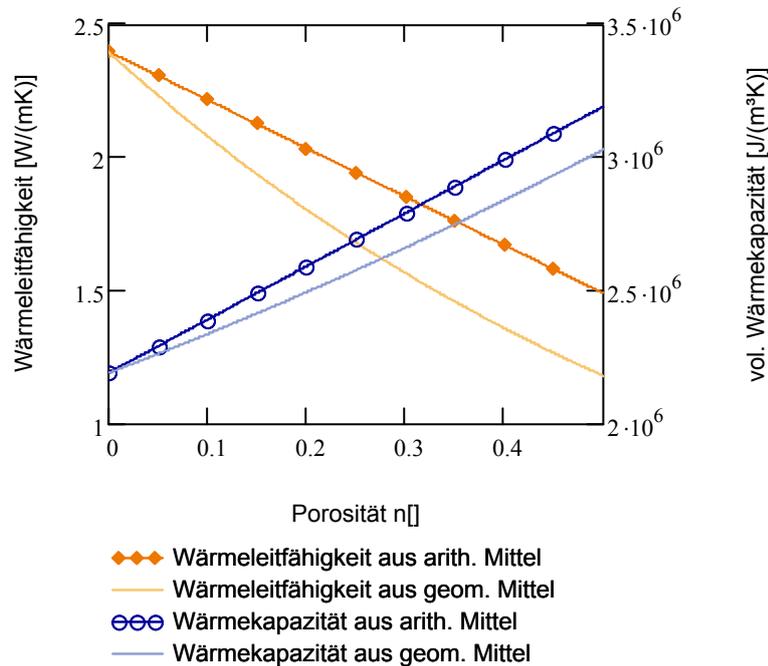


Abb. 3-9: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{so,fl}$  und der vol. Wärmekapazität  $c_{v_{so,fl}}$  aus arithmetischem bzw. geometrischem Mittel

Unter der Bedingung, dass das Grundwasser im betrachteten Bereich mit gleichförmiger Geschwindigkeit fließt und keine weiteren Wärmequellen/–senken vorliegen, kann nach DIAO ET AL. (2004) Gl. 3.13 zu

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = a_{so,fl} \cdot \nabla^2 T \quad (3.49)$$

umgeformt werden. Die Temperaturleitfähigkeit  $a_{so,fl}$  kann analog zu Gleichung 3.04 als Quotient aus Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität bestimmt werden, nur dass an dieser Stelle die gemittelten Werte nach Gl. 3.46 und Gl. 3.47 bzw. nach Gl. 3.47 und 3.48 anzusetzen sind. Die von DIAO ET AL. (2004) als „revised velocity“ bezeichnete Quellengeschwindigkeit  $U$  [m/s] ergibt sich aus

$$U = \frac{v_f \cdot \rho_{fl} \cdot c_{v_{fl}}}{c_{v_{so,fl}}} \quad (3.50)$$

und führt zusammen mit der Temperaturleitfähigkeit und der Einheitslänge  $L$  (m) zur dimensionslosen Péclet-Zahl  $Pe$ , die das Verhältnis von konvektivem zu konduktivem Wärmetransport beschreibt. Bei der zylinderförmigen Erdwärmesondenbohrung entspricht bei Betrachtung

tung der Temperaturentwicklung an der Bohrlochwand die Einheitslänge  $L$  dem Bohrlochradius  $r_b$  (Gl. 3.51).

$$\frac{U \cdot L}{a} = \frac{v_f \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot L}{c_{v,so,fl}} \cdot \frac{1}{a_{so,fl}} = \frac{v_f \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot r_b}{\lambda_{so,fl}} = Pe \quad (3.51)$$

Nach DIAO ET AL. (2004) stellt Gl. 3.49 die mathematische Beschreibung der Temperaturentwicklung um eine bewegliche Quelle thermischer Energie dar. Bereits CARSLAW & JAEGER (1947) hatten hierfür unter Annahme stationärer Verhältnisse eine Lösung entwickelt, die von DIAO ET AL. für instationäre Betrachtungen zu Gl. 3.52 erweitert wurde.

$$\Delta T(x, y, t) = T_0 - T(x, y, t) = \frac{\dot{q}_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{so,fl}} \int_0^t \frac{1}{(t-t')} \cdot e^{-\left\{ \frac{[x-U \cdot (t-t')]^2 + y^2}{4 \cdot a_{so,fl} \cdot (t-t')} \right\}} dt' \quad (3.52)$$

Mit  $\eta = 4 \cdot a_{so,fl} \cdot (t-t')/r^2$  und nach Integration ergibt sich Gl. 3.53 mit  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  bzw., in Polarkoordinaten geschrieben, die Gl. 3.54. Der Winkel  $\varphi$  beschreibt dabei die Lage der Erdwärmesonde zur Grundwasserfließrichtung ( $\varphi = 0$  für die Betrachtung in Abstromrichtung,  $\varphi = \pi$  für die Betrachtung in Zustromrichtung). Die beiden Gleichungen 3.53 und 3.54 sind in der dargestellten Form geeignet, um mit einem CAS-Programm weiter untersucht zu werden.

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{\dot{q}_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{so,fl}} \cdot e^{\left(\frac{U \cdot x}{2 \cdot a_{so,fl}}\right)} \int_0^{\frac{4 \cdot a_{so,fl} \cdot t}{r^2}} \frac{1}{\eta} \cdot e^{\left(\frac{1}{\eta} - \frac{U^2 \cdot r^2 \cdot \eta}{16 \cdot a_{so,fl}^2}\right)} d\eta \quad (3.53)$$

$$\Delta T(r, \varphi, t) = \frac{\dot{q}_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{so,fl}} \cdot e^{\left(\frac{U}{2 \cdot a_{so,fl}} \cos \varphi\right)} \int_0^{\frac{4 \cdot a_{so,fl} \cdot t}{r^2}} \frac{1}{\eta} \cdot e^{\left(\frac{1}{\eta} - \frac{U^2 \cdot r^2 \cdot \eta}{16 \cdot a_{so,fl}^2}\right)} d\eta \quad (3.54)$$

Für den Fall  $U = 0$  vereinfachen sich die oben stehenden Gleichungen zur Kelvinschen Linienquellengleichung, wie sie in Gl. 3.35 dargestellt ist. Geht die Zeit gegen unendlich, also für stationäre Verhältnisse, kann nach DIAO ET AL. (2004) die Gl. 3.53 durch Gl. 3.55 ersetzt werden, in der  $K_0$  die modifizierte Besselfunktion zweiter Art ist.

$$\Delta T(x, y) = \frac{\dot{q}_l}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{so,fl}} \cdot e^{\left(\frac{U \cdot x}{2 \cdot a_{so,fl}}\right)} \cdot K_0 \left( \frac{U \cdot r}{2 \cdot a_{so,fl}} \right) \quad (3.55)$$

DIAO ET AL. (2004) setzen für die Gültigkeit der Gl. 3.53, 3.54 und 3.55 folgende Annahmen voraus:

- › der Untergrund ist homogen und semi-infinite
- › die physikalischen Gesteinseigenschaften sind temperaturunabhängig

- › die Erdoberfläche als Grenzfläche und die finite Abmessung einer Erdwärmesonde können vernachlässigt werden
- › die Erdwärmesonde wird als Linienquelle betrachtet
- › der Untergrund hat eine einheitliche Starttemperatur zum Zeitpunkt  $t = 0$
- › der Wärmeentzug/-eintrag ist konstant

SUTTON ET AL. haben 2003, ebenfalls der Theorie der Beweglichen Wärmequellen folgend, einen Weg zur Berechnung des thermischen Bohrlochwiderstands  $R_b$  unter Berücksichtigung des Grundwasserflusses aufgezeigt. Mit der Péclet-Zahl  $Pe$  und der dimensionslosen Radialkoordinate  $\bar{r} = r/r_b$  formulierten sie Gleichung 3.52 zu Gleichung 3.56, in der die dimensionslose Fourier-Zahl  $Fo = a \cdot t/\bar{r}^2$  das Verhältnis von konduktiv transportierter und eingespeicherter thermischer Energie beschreibt.

$$\Delta T(\bar{r}, \varphi, t) = \frac{\dot{q}_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{so,fl}} \cdot e^{\left(\frac{Pe}{2} \bar{r} \cdot \cos(\varphi)\right)} \int_{\bar{r}^2/4 \cdot Fo}^{\infty} \frac{e^{\left(-\eta - \frac{Pe^2 \cdot \bar{r}^2}{16} \cdot \frac{1}{\eta}\right)}}{\eta} d\eta \quad (3.56)$$

Um die Temperatur des Sondenfluids zu berechnen, ist Gleichung 3.56 noch um die thermischen Widerstände zu erweitern. SUTTON ET AL. (2003) verweisen hierzu auf eine von CHAUDRY & ZUBAIR 1994 publizierte generalisierte unvollständige Gamma-Funktion (Gl. 3.57). Mit dieser Funktion und mit  $T_{fl} - T_0 = q_l \cdot (R_{soil} + R_b) = q_l \cdot R(\varphi, t)$  lässt sich die Gl. 3.56 dann zu Gl. 3.58 umformulieren.

$$\Gamma(a, x; b) = \int_x^{\infty} \xi^{a-1} \cdot e^{\left(-\xi - \frac{b}{\xi}\right)} d\xi \quad (3.57)$$

$$R(\varphi, t) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{so,fl}} \cdot \frac{\Gamma\left(0, \frac{1}{4 \cdot Fo}; \frac{Pe^2}{16}\right)}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} e^{\left(\frac{Pe}{2} \cos(\varphi)\right)} d\varphi \quad (3.58)$$

Mit Gl. 3.58 kann nach SUTTON ET AL. (2003) mit  $r = r_b$  der instationäre thermische Widerstand  $R_b$  einer Erdwärmesonde unter Berücksichtigung des konvektiven Wärmetransports berechnet werden.

In den Abb. 3-10 und 3-11 sind für den in Tab. 3-2 beschriebenen Referenzfall die Rechenergebnisse nach Gl. 3.54 abgebildet. Der Vergleich der Ergebnisse nach der Kelvinschen Linienquellen-Gleichung gemäß Gl. 3.35 mit der Linienquellen-Gleichung nach der Theorie der Beweglichen Linienquellen gem. Gl. 3.54 zeigt ohne konvektiven Einfluss – der Theorie entsprechend – keine Unterschiede (linke Teilabbildung).

In der rechten Teilabbildung wurde bei der Berechnung nach der Linienquelle für den thermischen Bohrlochwiderstand  $R_b$  Werte nach Gl. 3.58 bei 216.000 s gesetzt. Für den Graph der Moving Line Source dagegen wurde der Wert für  $R_b$  instationär über Gl. 3.58 ermittelt. Die beiden Kurven schneiden sich – wiederum der Theorie entsprechend – bei  $t = 216.000$  s.

Tab. 3-2: Parametersatz zu Abbildung 3-10, 3-11 und 3-12

Variante	Parameter	Wert
Ohne Grundwasserfluss	Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$	$5 \cdot 10^{-14}$ m/s
	Filtergeschwindigkeit $v_f$	$\sim 0$ m/s
	Quellengeschwindigkeit $U$	$\sim 0$ m/s
	Hydraulischer Gradient $i$	0 []
Mit Grundwasserfluss	Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$	$5 \cdot 10^{-4}$ m/s
	Filtergeschwindigkeit $v_f$	$5,0 \cdot 10^{-6}$ m/s
	Quellengeschwindigkeit $U$	$8,4 \cdot 10^{-6}$ m/s
	Hydraulischer Gradient $i$	0,01 []

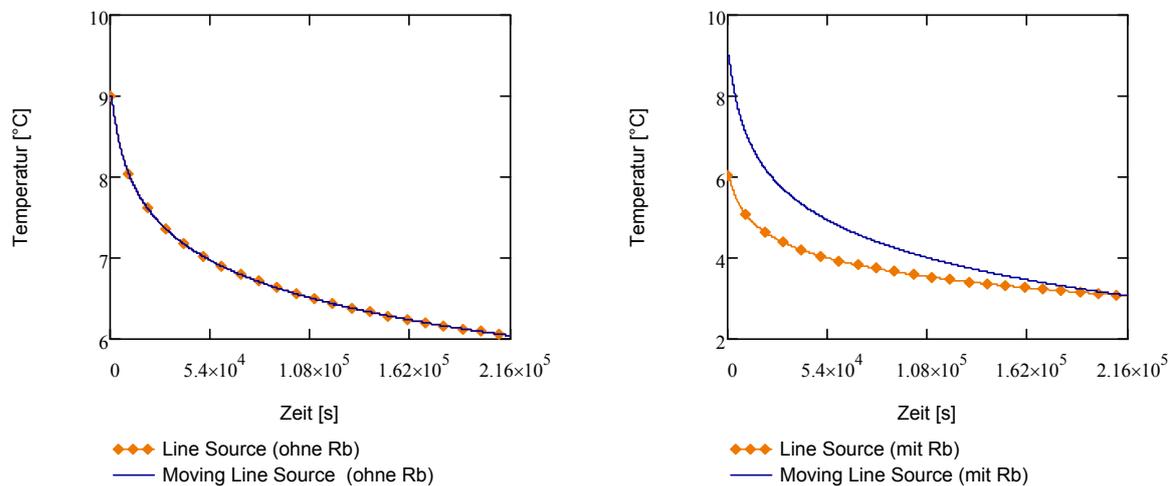


Abb. 3-10: Linienquelle (Line Source) vs. Moving Line Source ohne Grundwassereinfluss

In einer zweiten Betrachtung (Abb. 3-11) ist der Einfluss des Grundwasserstroms berücksichtigt. Bei den Moving-Line-Source-Graphen wurde  $\varphi = 0$  gesetzt, also der Abstrom einer Erdwärmesonde betrachtet. In der linken Teilabbildung ist der Grundwassereinfluss gut erkennbar: zunächst kühlt sich die Temperatur an der Bohrlochwand nach der Bewegliche-Linienquellen-Theorie stärker ab als bei der Berechnung nach Kelvins Linienquelle, um dann, bedingt durch nachströmendes – bei gleichzeitig zunehmend größerem  $\Delta T$  zwischen Bohrlochwand und Grundwasser – Wasser, in quasi-stationäre Verhältnisse überzugehen. Gleichzeitig kühlt sich der Untergrund nach dem Linienquellenverfahren weiter ab. In der rechten Teilabbildungen wurde wie zuvor beim grundwasserfreien System verfahren: Erwartungsgemäß sinken die Temperaturen deutlich weniger stark als in der linken Teilabbildung und die beiden Graphen schneiden sich nicht.

### 3. Grundlagen des Wärmetransports bei Erdwärmesonden

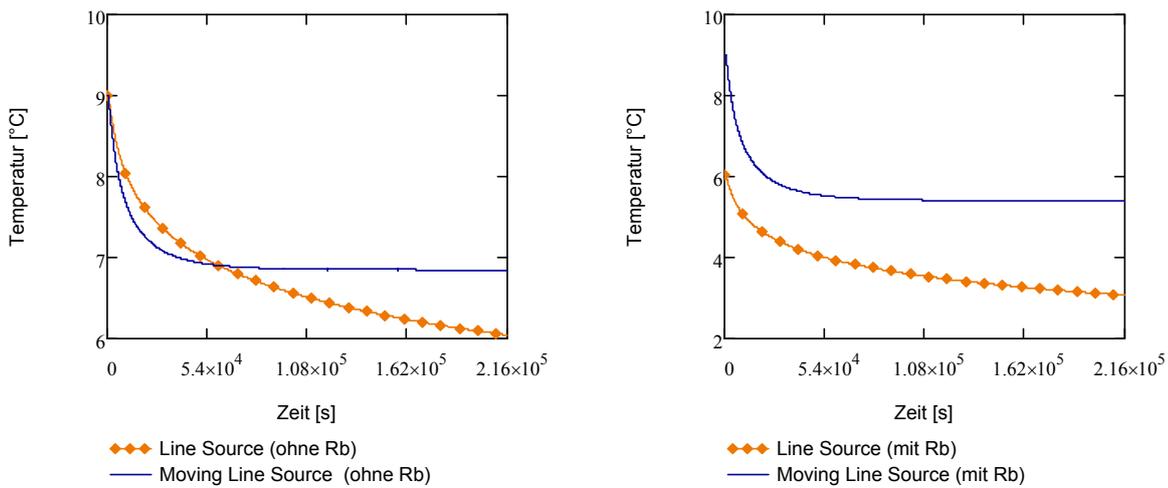


Abb. 3-11: Vergleich Linienquelle und Moving Line Source mit Grundwasserfluss

In Abb. 3-12 ist die Temperaturentwicklung mit der Zeit für die Kelvinsche Linienquellen-Gleichung und für die Moving Line Source nach Gl. 3.54 bei verschiedenen Winkeln  $\varphi$  einander gegenübergestellt. Deutlich ist ein zunehmender Einfluss des Grundwassers auf die Temperaturentwicklung mit steigendem Winkel  $\varphi$  von der Betrachtung in Abstromrichtung ( $\varphi = 0$ ) hin zum Zustrom ( $\varphi = \pi$ ) zu erkennen. Gleichzeitig zeigt der Vergleich mit der lediglich den konduktiven Wärmetransport berücksichtigenden Linienquellen-Gleichung nach Kelvin die erwartungsgemäß sich deutlich früher einstellenden quasi-stationären Verhältnisse.

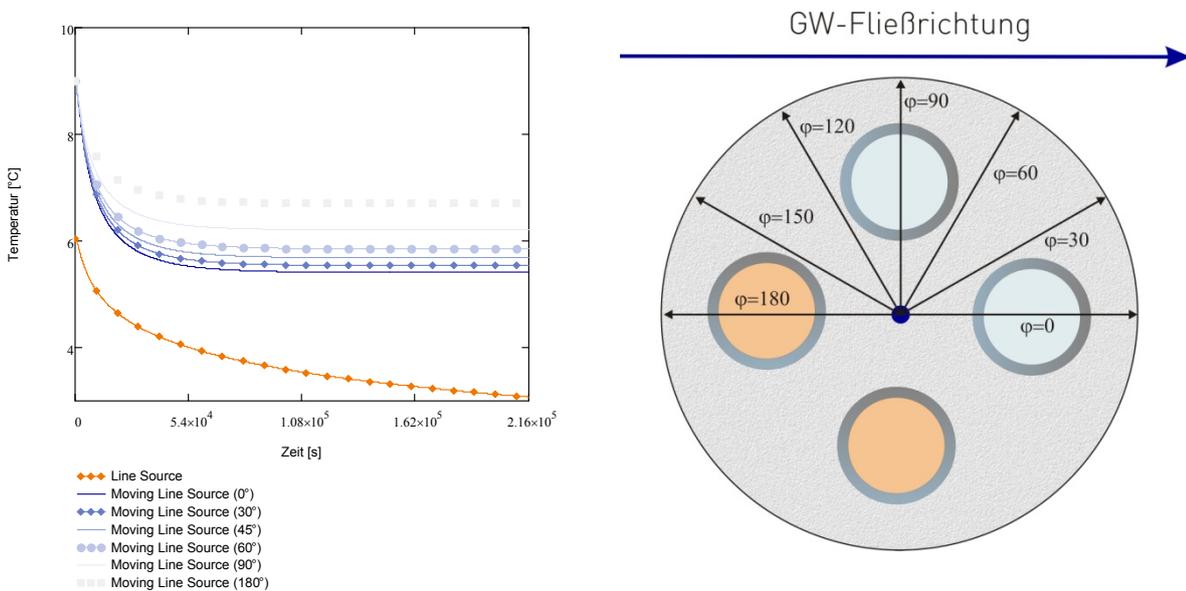


Abb. 3-12: Linienquelle (Line Source) und Moving Line Source mit Grundwasserfluss bei unterschiedlichen Winkeln  $\varphi$

Die hier gezeigten Graphen, die nach der Theorie der Beweglichen Linienquelle entwickelt wurden, entsprechen grundsätzlich den Erwartungen an Temperaturverläufen bei Erdwärmesonden im Grundwasserbereich. Getestet wurde die Theorie bisher jedoch nur an Labormesswerten. Der Versuchsaufbau bestand aus einem zylinderförmigen Bodenkörper, der mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchströmt wurde. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten eine sehr gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Werten (KATSURA ET AL. 2006).

### 3.4.3 Zylinderquelle

Das Zylinderquellen-Verfahren basiert auf der Annahme einer zylindrischen Wärme-/Kälte-Quelle in einem unendlich ausgedehnten und homogenen Untergrund mit perfektem thermischem Kontakt zwischen der Energiequelle und dem umgebenden Medium. Die wesentlichen Grundlagen für das Verfahren wurden von CARSLAW & JAEGER (1947) sowie von INGERSOLL & PLASS (1948) gelegt. KAVANAUGH (1985) entwickelte das Verfahren zur Berechnung der Temperaturfeldentwicklung um Erdwärmesonden und zur Bestimmung der Arbeitsmitteltemperatur weiter. Die Grundgleichung des Zylinderquellen-Verfahrens lautet:

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{\lambda_{so}} \cdot G(Fo, p) \quad (3.59)$$

In der Gleichung entspricht  $Fo = a \cdot t / r_0^2$  der dimensionslosen Fourier-Zahl und  $p$  dem Verhältnis eines Äquivalentradius  $r_{eq}$ , der die U-Sonden in einem Bohrloch repräsentiert, zum Zylinderradius  $r_0$ . Zur Ermittlung des Äquivalentradius  $r_{eq}$  schlägt BOSE (1984) die Beziehung  $r_{eq} = \sqrt{2}r_0$  vor. KAVANAUGH (1985) ergänzte diese Gleichung um den Abstand  $L_s$  der einzelnen Sondenrohre zueinander („shank spacing“) zu  $r_{eq} = \sqrt{2}r_0 + L_s$ . SUTTON ET AL. dagegen formulieren den Äquivalentradius mit  $r_{eq} = r_b / 10^{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R_b}$  in Abhängigkeit vom thermischen Bohrlochwiderstand.

Zur Betrachtung der Temperatur an der Bohrlochwand wird  $r_{eq} = r_0 = r_b$  und damit  $p = 1$ . Die Funktion  $G(Fo, p)$  als Antwort auf die thermische Beanspruchung ergibt sich dann zu Gl. 3.60.

$$G(Fo, p) = \frac{1}{\pi^2} \cdot \int_0^{\infty} (e^{-\beta^2 \cdot Fo} - 1) \cdot \left[ \frac{J_0(p \cdot \beta) \cdot Y_1(\beta) - J_1(\beta) \cdot Y_0(p \cdot \beta)}{((J_1(\beta))^2 + (Y_1(\beta))^2) \cdot \beta^2} \right] d\beta \quad (3.60)$$

In dieser Gleichung ist  $J_n$  die Besselfunktion erster Art, n-ter Ordnung,  $Y_n$  die Besselfunktion zweiter Art, n-ter Ordnung, und  $\beta$  die Integrationsvariable.

In KAVANAUGH (1985) sind Werte für die Funktion  $G(Fo, p)$  für  $p = 1$ , also für die Temperatur an der Bohrlochwand, graphisch dargestellt. BERNIER (2001) hat für denselben Fall Gleichung 3.61 zur Ermittlung der Temperaturdifferenz  $T_0 - T_b$  vorgestellt (DENG 2004).

$$T_b = T_0 - \frac{q_l}{\lambda_{so}} \cdot 10^{[-0,89129+0,36081 \cdot (\log_{10}(Fo))^2 + 3,59617 \cdot 10^{-3} \cdot (\log_{10}(Fo))^3]} \quad (3.61)$$

DENG (2004) weist darauf hin, dass bereits CARSLAW & JAEGER (1947) bezogen auf die Temperatur  $T_b$  an der Bohrlochwand eine Lösung formuliert hatten, die die thermische Speicherkapazität  $S_1$  [ $J/(kg \cdot K)$ ] des Bohrlochs und den thermischen Bohrlochwiderstand berücksichtigt (Gl. 3.62).

$$T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{\lambda_{so}} \cdot G(h, a_1, \infty, Fo) \quad (3.62)$$

$$\text{mit } G(h, a_1, \infty, Fo) = \frac{2 \cdot a_1^2 \cdot a_2^2}{\pi^3} \int_0^\infty \left[ \frac{(1 - e^{-u^2 \cdot Fo})}{u^3 \cdot \Delta_1(u)} \right] du$$

Der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  und die Temperaturleitfähigkeiten  $a_n$  sind wie folgt definiert:

$$h = 2 \cdot \pi \cdot R_b \cdot \lambda_{so} \quad a_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot \rho \cdot c_p}{S_1} \quad a_2 \rightarrow \infty \quad (3.63)$$

Die thermische Speicherkapazität  $S_1$  ergibt sich aus dem Produkt der Zylinderquerschnittsfläche  $A$  und der volumetrischen Wärmekapazität  $c_v$ ; die Fourier-Zahl wird hier zu  $a \cdot t/r_b^2$  und  $\Delta_1(u)$  mit der Integrationsvariablen  $u$  zu:

$$\Delta_1(u) = [u \cdot (a_1 + a_2 - h \cdot u^2) \cdot J_0(u) - a_2(a_1 - h \cdot u^2) \cdot J_1(u)]^2 + [u \cdot (a_1 + a_2 - h \cdot u^2) \cdot Y_0(u) - a_2(a_1 - h \cdot u^2) \cdot Y_1(u)]^2 \quad (3.64)$$

Für große Werte von  $Fo$  ( $Fo \gg 1$ ) kann Gl. 3.62 zu Gl. 3.65 vereinfacht werden. Die Konstante  $C = 1,7811$  ergibt sich aus  $e^\gamma$  mit der Euler-Mascheroni-Zahl  $\gamma$  (DENG 2004).

$$T_0 - T = \frac{q_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{so}} \left[ 2 \cdot h + \ln\left(\frac{4 \cdot Fo}{C}\right) - \frac{(4 \cdot h - a_1)}{2 \cdot a_1 \cdot Fo} + \frac{a_1 - 2}{2 \cdot a_1 \cdot Fo} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot Fo}{C}\right) + Fo \cdot \left(\frac{1}{Fo^2}\right) \right] \quad (3.65)$$

YOUNG (2004) hat Gl. 3.62 mit dem Modell des „Buried Electrical Cable“, das bereits bei CARSLAW & JAEGER (1947) beschrieben ist, weiter detailliert (Gl. 3.66). Der Ansatz fußt auf der Analogie zwischen einer Erdwärmesonde und einem im Erdreich geführten Stromkabel (Abb. 3-13). Die thermische Speicherkapazität der Kabelseele  $S_1$  entspricht bei einer Erdwärmesonde der des Sondenfluids, die des Schutzmantels ( $S_2$ ) ist der des Hinterfüllmaterials und der thermische Widerstand der Isolation ist dem thermischen Bohrlochwiderstand gleichzusetzen. Der äußere Radius des Schutzmantels entspricht dem Bohrlochradius. Während die thermischen Speicherkapazitäten von Seele und Schutzmantel im Modell als endlich betrachtet werden, kann die der Isolation vernachlässigt werden (YOUNG 2004). Seele und Isolation

werden zudem als perfekte Wärmeleiter betrachtet. Die wesentliche Verbesserung zu den oben vorgestellten Linienquellen- und Zylinder-Gleichungen ist die Einführung separater thermischer Speicherkapazitäten für das Sondenfluid und das Hinterfüllmaterial und damit die Option, die jeweiligen Materialparameter direkt zu berücksichtigen.

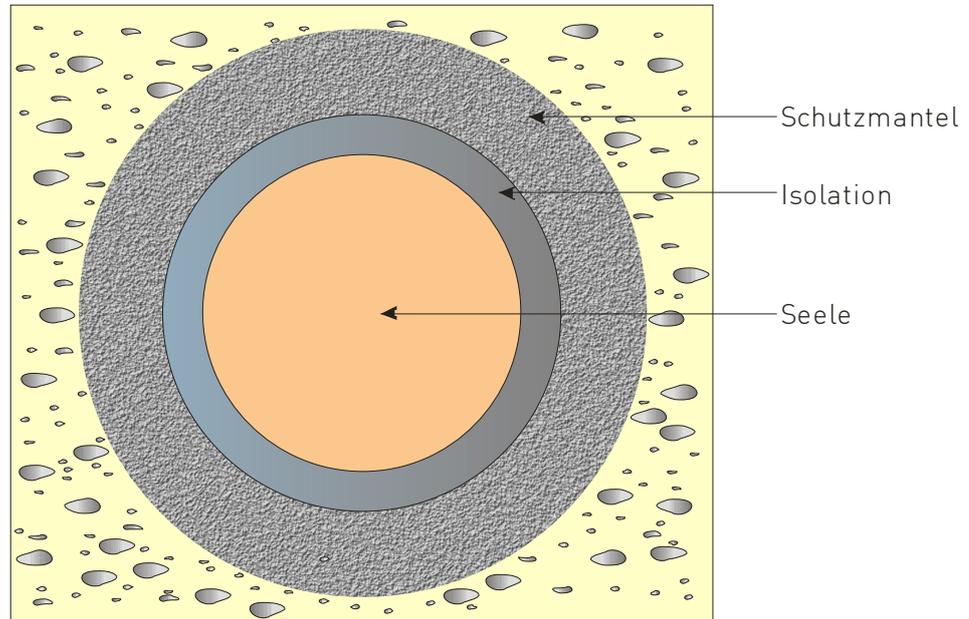


Abb. 3-13: Schemazeichnung zum „Buried Electrical Cable“-Modell nach YOUNG (2004)

$$T_0 - T = \frac{\dot{q}_l}{\lambda_{so}} \cdot G(h, a_1, a_2, Fo) \quad (3.66)$$

$$\text{mit } G(h, a_1, a_2, Fo) = \frac{2 \cdot a_1^2 \cdot a_2^2}{\pi^3} \int_0^\infty \frac{[1 - e^{-u^2 \cdot Fo}]}{u^3 \cdot \Delta 1(u)} du$$

Während der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  und die Temperaturleitfähigkeit  $a_1$  analog zu Gleichung 3.63 berechnet werden können, ergibt sich die Temperaturleitfähigkeit  $a_2$  zu  $2 \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot \rho \cdot c_p / S_2$ . Die thermische Kapazität des Sondenfluids  $S_1$  bzw. die des Hinterfüllmaterials  $S_2$  lassen sich über die Gleichungen 3.67 und 3.68 ermitteln;  $r_{core}$  ergibt sich aus  $\sqrt{2} \cdot r_{tube}^2$  für Einfach-U-Sonden und aus  $\sqrt{4} \cdot r_{tube}^2$  bei Doppel-U-Sonden (LAMARCHE & BEAUCHAMP 2007a, YOUNG 2004).

$$S_1 = \rho_{fl} \cdot c_{p_{fl}} \cdot A_{fl} = \rho_{fl} \cdot c_{p_{fl}} \cdot r_{core}^2 \cdot \pi \quad (3.67)$$

$$S_2 = \rho_{gr} \cdot c_{p_{grout}} \cdot (A_{grout} - A_{fl}) = \rho_{gr} \cdot c_{p_{grout}} \cdot (r_b^2 \cdot \pi - r_{core}^2 \cdot \pi) \quad (3.68)$$

YOUNG (2004) hat sein Modell zusätzlich durch die Einführung eines so genannten dimensionslosen Grout Allocation Factor  $f$  [] weiter detailliert, der in Abhängigkeit zum Abstand der Sondenschenkel zueinander, dem Bohrlochdurchmesser und einem Faktor für das verwendete Sondenfluid steht. Mit ihm können verbesserte Werte für die thermische Speicherkapazität gemäß  $S_{1f} = S_1 + S_2 \cdot f$  und  $S_{2f} = S_1 - (1 - f)$ , also der Übertragung von thermischer Speicherkapazität des Hinterfüllmaterials auf die des Sondenfluids, generiert werden. Der Arbeit von YOUNG (2004) können Grout Allocation Factor  $f$  für verschiedene Konfigurationen entnommen werden.

Ausgehend von der Zylinderquellengleichung 3.59 bzw. 3.60 haben LAMARCHE & BEAUCHAMP (2007A) ein weiteres Zylinderquellenmodell für sehr kurze Betriebszeiten entwickelt. Dabei separieren die Autoren gedanklich zwei ineinander stehende Zylinder, von denen der erste das Bohrloch mit der Erdwärmesonde und der zweite den umgebenden Untergrund darstellt. Unter der Bedingung, dass die ungestörten Temperaturen innerhalb des Doppelzylinders an jeder Stelle gleich sind, haben die Autoren die Gleichung 3.69 hergeleitet:

$$T_1(r', t') = T_0 - \frac{q_l}{\lambda_{grout}} \cdot \frac{8 \cdot \lambda'}{\pi^5 \cdot \delta^2} \int_0^\infty \left[ \frac{(1 - e^{-\beta \cdot t'})}{\beta^5 \cdot (\phi^2 + \psi^2)} \right] d\beta \quad (3.69)$$

$$\text{mit } \phi^2 = Y_1(\beta) \cdot [Y_0(\beta\delta\gamma) \cdot J_1(\beta\delta) - Y_1(\beta\delta\gamma) \cdot J_0(\beta\delta) \cdot \lambda' \cdot \gamma] - J_1(\beta) \cdot [Y_0(\beta\delta\gamma) \cdot Y_1(\beta\delta) - Y_1(\beta\delta\gamma) \cdot Y_0(\beta\delta) \cdot \lambda' \cdot \gamma]$$

$$\text{und } \psi^2 = J_1(\beta) \cdot [J_0(\beta\delta\gamma) \cdot Y_1(\beta\delta) - J_1(\beta\delta\gamma) \cdot Y_0(\beta\delta) \cdot \lambda' \cdot \gamma] - Y_1(\beta) \cdot [J_0(\beta\delta\gamma) \cdot J_1(\beta\delta) - J_1(\beta\delta\gamma) \cdot J_0(\beta\delta) \cdot \lambda' \cdot \gamma]$$

$$r' = \frac{r}{r_{eq}} \quad \lambda' = \frac{\lambda_{so}}{\lambda_{grout}} \quad \delta = \frac{r_b}{r_{eq}} \quad t' = \frac{a_{grout} \cdot t}{r_{eq}^2} \quad \gamma = \sqrt{\frac{a_{grout}}{a_{so}}}$$

In Abb. 3-14 finden sich hierzu verschiedene Graphen für die Zylinderquellenlösungen nach Gl. 3.62, 3.66 und 3.68 für einen Referenzfall im Vergleich zu Ergebnissen nach dem Linienquellenverfahren (Gl. 3.35) bzw. der Moving-Line-Source-Lösung (Gl. 3.54). Der thermische Bohrlochwiderstand  $R_b$  wurde für die Graphen nach der Moving-Line-Source-Theorie über Gl. 3.58 berechnet, für die anderen Graphen, soweit notwendig, wurde der Wert zum Zeitpunkt  $t = 216.000 \text{ s}$  gemäß Gl. 3.58 eingesetzt. Der besseren Vergleichbarkeit wegen wurde ein konvektiver Anteil am Wärmetransport nicht berücksichtigt.

Die Teilabbildung a zeigt nur geringe Unterschiede zwischen der Linienquellenlösung und der in DENG (2004) zitierten Variante der Zylinderquellenmethode nach Gl. 3.62. Bei YOUNG's Modell (Gl. 3.66), in dem die thermischen Speicherkapazitäten innerhalb des Bohrlochs bereits berücksichtigt sind, sinkt die Temperatur mit der Zeit erwartungsgemäß zunächst weniger stark als beim Linienquellen-Verfahren bzw. beim Zylinderquellen-Verfahren nach DENG (2004), nähert sich aber mit der Zeit an die Prognosen nach den beiden anderen Methoden sukzessive an (Teilabbildung b). Im Vergleich mit der Temperaturprognose nach der Moving

Line Source zeigt YOUNG's Modell zunächst einen stärkeren Temperaturabfall (Teilabbildung c), um sich dann erwartungsgemäß nach 216.000 s – d.h. nach etwa 60 Stunden – mit den anderen Graphen zu verschneiden. Das von LAMARCHE & BEAUCHAMP (2007A) für sehr kurze Zeiten vorgeschlagene Verfahren zeigt gegenüber YOUNG's Modell kaum signifikante Unterschiede (Teilabbildung d), erfordert jedoch in MATHCAD® im Vergleich zu den anderen aufgeführten Ansätze erheblich mehr Rechenzeit.

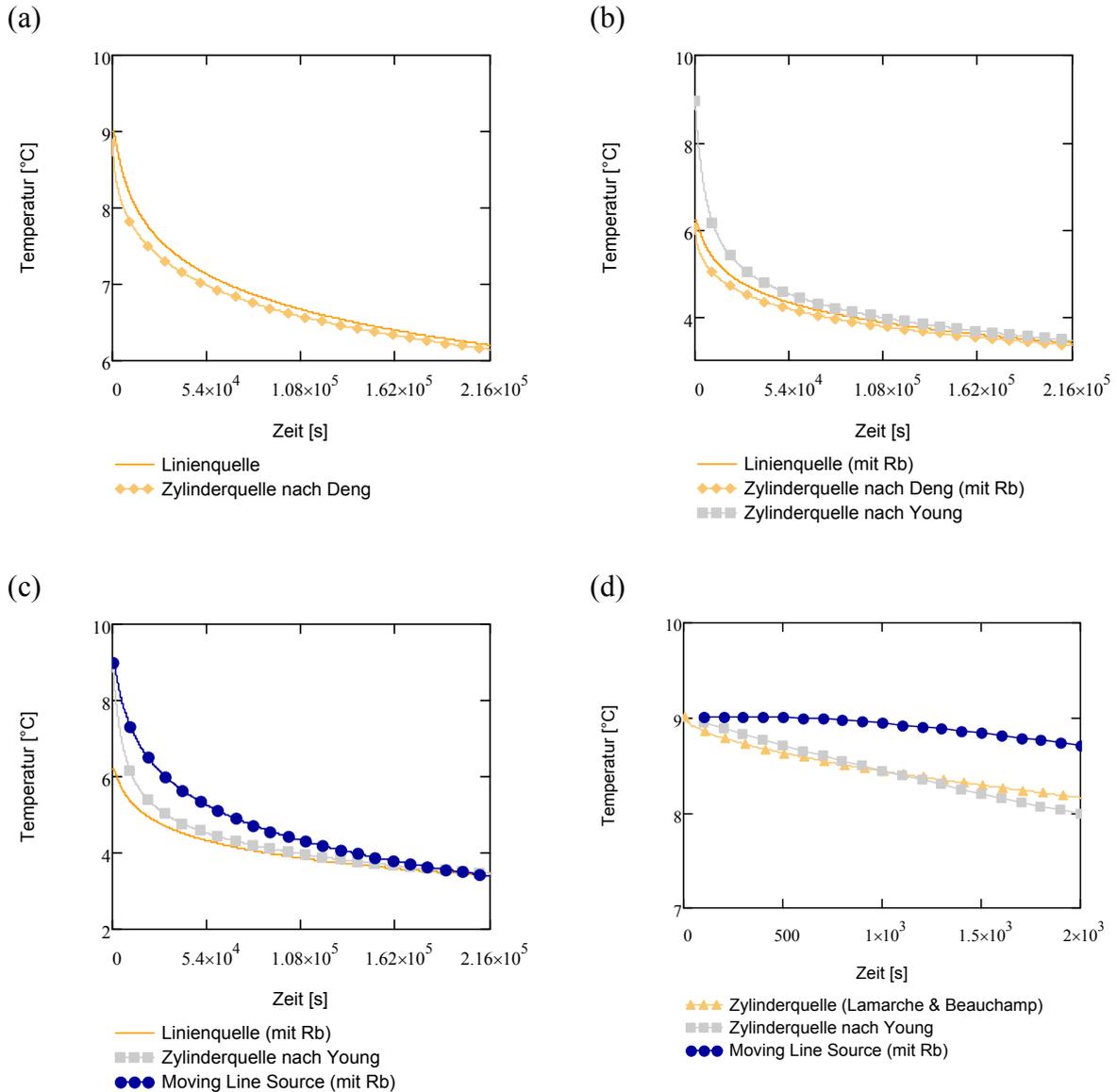


Abb. 3-14: Vergleich Linienquelle, Moving Line Source ( $U \approx 0$ ) und Zylinderquelle

Die verschiedenen, hier vorgestellten Zylinderquellen-Lösungen wurden in der Vergangenheit wiederholt mit numerischen Verfahren abgeglichen, die Korrelation der Ergebnisse war zufriedenstellend (YOUNG 2004, FUJII ET AL. 2005, LAMARCHE & BEAUCHAMP 2007A).

### 3.4.4 Eskilson's Verfahren

Bereits 1987 hat ESKILSON ein Modell entwickelt, bei dem die Temperaturantwort des Untergrunds auf die thermische Beanspruchung durch Erdwärmesonden mit so genannten „g-functions“, die keinesfalls mit den G-Funktionen der einzelnen Zylinderquellengleichungen zu verwechseln sind, beschrieben wird. Diese Antwortfunktionen ersetzen geometrische Angaben zu einem Erdwärmesondenfeld. Sind sie bekannt, werden keine weiteren Angaben zu Form und Lage eines Erdwärmesondenfelds mehr benötigt (HUBER & PAHUD 1999b). Als Zeitmaßstab definierte Eskilson mit der Sondenlänge  $H$  [m] und der Temperaturleitfähigkeit  $a$  die dimensionslose Zeit  $t_s = H^2/9 \cdot a$  bzw. die dimensionslose Eskilsonzahl  $Es = t \cdot 9 \cdot a/H^2 = t/t_s$ . Bis zum Zeitpunkt  $Es = 1$  kann für eine Einzelsonde die vertikale Wärmeleitung im Untergrund bei einem Fehler von maximal 7 % vernachlässigt werden (ESKILSON 1987, HUBER & PAHUD 1999). Für Zeiten  $Es > 10$  hat sich im Untergrund ein quasi-stationärer Gleichgewichtszustand eingestellt, das heißt, es fließt genau so viel thermische Energie nach, wie von der Erdwärmesonde entzogen wird.

Auch das Eskilson-Modell setzt eine einheitliche ungestörte Bodentemperatur  $T_0$  voraus, die über die Sondenlänge gemittelt wird. Zu ihrer Abschätzung schlägt ESKILSON (1987) vor, den jahreszeitlichen Einfluss auf die Untergrundtemperaturen zu vernachlässigen. Da die mittlere Jahrestemperatur gleichzeitig als Randbedingung dient, ist die betrachtete Sondenlänge  $H$  [m] um eine thermisch inaktive Länge  $D$  [m] zu reduzieren (siehe auch Gl. 3.02). Die Werte für  $D$  betragen üblicherweise 4-5 m (ESKILSON 1987, MARAINI 2000).

Nach ESKILSON (1987) ist die dimensionslose Temperaturantwort  $g$  einzig eine Funktion der dimensionslosen Zeit  $t/t_s = Es$  und dem Verhältnis von Bohrlochradius  $r_b$  zur Sondenlänge  $H$  und kann gemäß Gl. 3.70 definiert werden.

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) = \frac{\Delta T \cdot 2 \cdot \pi \cdot \lambda}{q_l} \quad (3.70)$$

Durch Umstellung und Berücksichtigung der Starttemperatur  $T_0 = T_{0m}$  kann mit Gl. 3.71 die Temperaturentwicklung an der Bohrlochwand bei gegebenem Energieentzug  $q_l$  mit der Zeit bestimmt werden.

$$T(r_b, t) = T_0 - \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) \quad (3.71)$$

Für die Untergrundtemperaturen außerhalb der Erdwärmesondenbohrung, also im Radius  $r_1 > r_b$ , ergibt sich nach ESKILSON (1987) folgender Zusammenhang:

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_1}{H}\right) = g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) - \ln\left(\frac{r_1}{r_b}\right) \quad (3.72)$$

Für eine einzelne Erdwärmesondenbohrung kann die zugehörige „g-function“ nach HUBER & PAHUD (1999), wie in Gl. 3.73 dargestellt, für den Zeitraum  $5 \cdot r_b^2/a < t < t_s$  mit einem Fehler von 7 % berechnet werden. Für Zeiten größer  $t_s$  strebt die Einzelsonde dem Gleichgewichtszustand zu und Gl. 3.73 vereinfacht sich zu Gl. 3.74 (HUBER & PAHUD 1999).

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) = \ln\left(\frac{H}{2 \cdot r_b}\right) + \frac{\ln(Es)}{2} \quad (3.73)$$

$$g(r_b, H) = \ln\left(\frac{H}{2 \cdot r_b}\right) \quad (3.74)$$

Um die mittlere Fluidtemperatur im Sondenrohr aus der mittleren Temperatur an der Bohrlochwand zu bestimmen, kann, analog zur den oben beschriebenen Vorgehensweise, Gl. 3.26 herangezogen und umformuliert werden (Gl. 3.75).

$$T_{fl} - T_b = q_l \cdot R_b \quad (3.75)$$

Die Eintritts- und Austrittstemperaturen einer Erdwärmesonde ergeben sich dann zu Gl. 3.76 bzw. Gl. 3.77 (MARAINI 2000, LAMARCHE & BEAUCHAMP 2007a). Der Index  $i$  steht dabei für den Solestrom in das Sondenrohr hinein, der Index  $o$  dementsprechend für den Auslass.

$$T_{fl,i} = T_{fl} - \frac{q_l \cdot H}{2 \cdot c_{p,fl} \cdot \rho_{fl} \cdot v_{fl}} = \frac{q_l \cdot H}{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,fl}} \quad (3.76)$$

$$T_{fl,o} = T_{fl} + \frac{q_l \cdot H}{2 \cdot c_{p,fl} \cdot \rho_{fl} \cdot v_{fl}} = \frac{q_l \cdot H}{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,fl}} \quad (3.77)$$

ESKILSON (1987) hat für verschieden konfigurierte Sondenfelder die zugehörigen „g-functions“ numerisch ermittelt. In einer Bibliothek gespeichert kommen sie in verschiedenen Softwaretools wie EED oder für den Bereich in größerer Entfernung von einer Erdwärmesonde auch in EWS (HUBER & SCHULER 1997) zum Einsatz. Gerade in Europa wurden und werden mit diesen beiden Softwarelösungen viele größere Erdwärmeprojekte berechnet.

Durch die bibliotheksbedingten Vorgaben für die geometrische Anordnung der Erdwärmesonden zueinander ergeben sich jedoch erhebliche Einschränkungen für den Planer, da es nur mit einigem Aufwand möglich ist, weitere „g-functions“ mit der von Eskilson beschriebenen Methode zu berechnen. CLAESSION & ESKILSON (1987) haben allerdings einen Ansatz zur analytischen Ermittlung von „g-functions“ publiziert. Ausgehend von Gl. 3.78 gelangten die Autoren mit  $z = 3/2 \cdot \sqrt{Es}$ ,  $z = H/2$ ,  $\beta = r_b/H$  und  $r = r_b$  zu Gl. 3.79.

$$T(r, z, t) = T_0 - \frac{q_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^H \left[ \frac{\operatorname{erfc}(r^+/\sqrt{4 \cdot a \cdot t})}{r^+} - \frac{\operatorname{erfc}(r^-/\sqrt{4 \cdot a \cdot t})}{r^-} \right] ds \quad (3.78)$$

mit  $r^+ = \sqrt{r^2 + (z - s)^2}$   $r^- = \sqrt{r^2 + (z + s)^2}$

$$T\left(r_b, \frac{1}{2}H, Fo\right) = T_0 - \frac{q_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^1 \left[ \frac{\operatorname{erfc}\left(\tilde{r}^+ / 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{Fo}\right)}{\tilde{r}^+} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\tilde{r}^- / 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{Fo}\right)}{\tilde{r}^-} \right] d\xi \quad (3.79)$$

mit  $\tilde{r}^+ = \sqrt{\beta + (0,5 - \xi)^2}$   $\tilde{r}^- = \sqrt{\beta + (0,5 + \xi)^2}$

CLAESSON & ESKILSON (1987) führen weiter aus, dass Gl. 3.78 mit  $Es = t/t_s = 9 \cdot \beta^2 \cdot Fo$  eine Approximation für ihre „g-functions“ gemäß Gl. 3.69 darstellt (Gl. 3.80).

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \beta\right) \approx \frac{1}{2} \cdot \int_0^1 \left( \frac{\operatorname{erfc}\left(3\tilde{r}^+ / 2 \cdot \sqrt{Es}\right)}{\tilde{r}^+} - \frac{\operatorname{erfc}\left(3\tilde{r}^- / 2 \cdot \sqrt{Es}\right)}{\tilde{r}^-} \right) d\xi \quad (3.80)$$

LAMARCHE & BEAUCHAMP (2007B) haben den Ansatz von CLAESSON & ESKILSON (1987) erneut aufgegriffen und weiter detailliert (Gl. 3.81):

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \beta\right) = \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \frac{\operatorname{erfc}(\gamma \cdot z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_A - \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \frac{\operatorname{erfc}(\gamma \cdot z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_B \quad (3.81)$$

mit  $D_A = \sqrt{\beta^2 + 1} \cdot \operatorname{erfc}\left(\gamma \cdot \sqrt{\beta^2 + 1}\right) - \beta \cdot \operatorname{erfc}(\gamma \cdot \beta) - \frac{e^{-\gamma^2 \cdot (\beta^2+1)} - e^{-\gamma^2 \cdot \beta^2}}{\beta \cdot \sqrt{\pi}}$

und  $D_B = \sqrt{\beta^2 + 1} \cdot \operatorname{erfc}\left(\gamma \cdot \sqrt{\beta^2 + 1}\right) - \frac{1}{2} \left[ \beta \cdot \operatorname{erfc}(\gamma \cdot \beta) + \sqrt{\beta^2 + 4} \cdot \operatorname{erfc}\left(\gamma \cdot \sqrt{\beta^2 + 4}\right) \right] - \frac{e^{-\gamma^2 \cdot (\beta^2+1)} - \frac{1}{2} \left[ e^{-\gamma^2 \cdot \beta^2} + e^{-\gamma^2 \cdot (\beta^2+4)} \right]}{\beta \cdot \sqrt{\pi}}$

Um den Energietransport mit dem fließenden Grundwasser in das „g-function“-Konzept zu integrieren führten CLAESSON & HELLSTRÖM (2000, zitiert in DENG 2004) Gl. 3.82 ein, in der  $q_w$  der Filtergeschwindigkeit  $v_f$  entspricht.

$$g_{total}(t; q_w) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{q} T_b(t) = g(t; q_w = 0) - g_{gw}(t) \quad (3.82)$$

Der Term  $g(t; q_w = 0)$  repräsentiert die oben beschriebene „g-function“ für den konduktiven Wärmetransport,  $g_{gw}(t)$  ist eine „g-function“, die den Einfluss des Grundwassers beschreibt. Für sie stellten CLAESSON & HELLSTRÖM (2000, zitiert in DENG 2004) folgende Beziehung auf:

$$g_{gw}(t', h) = \int_0^{\tau} \frac{1}{2 \cdot s} \cdot (1 - e^{(h^2 \cdot s)/4}) \cdot \operatorname{erfm}(1/\sqrt{s}) \cdot ds$$

mit  $t' = \frac{4 \cdot a \cdot t}{H^2}$   $h = \frac{H \cdot \rho_{gw} \cdot c_{gw} \cdot q_{gw}}{2 \cdot \lambda}$  (3.83)

und  $\operatorname{erfm}(x) = \frac{1}{x} \int_0^x \operatorname{erf}(s) ds = \operatorname{erf}(x) - \frac{1 - e^{x^2}}{\sqrt{\pi} \cdot x}$

Für hinreichend große Zeiten ( $t' > 1$ ) entwickelten die Autoren die Beziehung 3.84 und für kurze Zeiten ( $t' < 1$ ) bei gleichzeitig vergleichsweise geringen Grundwasservolumenströme ( $h < 1$ ) Gl. 3.85 (DENG 2004).

$$g_{gw}(\tau, h) \cong \frac{1}{2} \operatorname{Ein} \left( \frac{h^2 \cdot t'}{4} \right) - \frac{1}{h} \left( \frac{h \cdot \sqrt{t'}}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{erf} \left( \frac{h \cdot \sqrt{t'}}{2} \right) \right)$$
 (3.84)

mit  $\operatorname{Ein}(x) = \int_0^x \frac{1 - e^{-s}}{s} ds \cong \ln(x + e^{-x}) + 0.577 \cdot (1 - e^{-7 \cdot x/4})$

und  $g_{gw}(t', h) \cong \frac{h^2 \cdot \tau}{8} \left( 1 - \sqrt{\frac{4 \cdot t'}{9 \cdot \pi}} \right)$  (3.85)

### 3.5 Gegenseitiger Einfluss von Erdwärmesonden und variabler Energieentzug

Um die Beschreibung der Temperaturentwicklung beim Einsatz von Erdwärmesonden zu vervollständigen, sind die oben beschriebenen Verfahren noch um die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden in einem Sondenfeld und um die Reaktion auf variablen Energieentzug bzw. –eintrag zu erweitern. Gerade Projekte, die den Einsatz von Softwareapplikationen zur Auslegung voraussetzen, bestehen in aller Regel aus mehreren Erdwärmesonden, die bei den gängigen Abständen zueinander und bei hinreichend langem Betriebszeitraum thermisch miteinander interagieren. KÄLIN & HOPKIRK (1991) geben an, dass bei Sondenabständen gleich oder größer 15 m der Effekt der gegenseitigen Beeinflussung vernachlässigt werden kann. Typische Abstände in Erdwärmesondenfelder sind jedoch oft um 5 m, ein Wert, der in der VDI 4640 (2001) auch für kleine Projekte aus dem Einfamilienhausbereich als Mindestabstand angegeben wird. Der Einfluss von Erdwärmesonden untereinander ist in ESKILSON (1987), ESKILSON & CLAESSION (1988A) bzw. CUI ET AL. (2006) sowohl für vertikale als auch für geneigte Systeme ausführlich diskutiert. Für den Fall, dass die Erdwärmesonden in vertikale Bohrungen eingebaut sind, schlagen unter anderem LAMARCHE & BEAUCHAMP

(2007B) und ZENG ET AL. (2002) vor, ESKILSON (1987) zu folgen und die Temperaturänderungen benachbarter  $n$  Erdwärmesonden nach dem Superpositionsprinzip mit

$$T(r, z, t) = \sum_{i=1}^n T_{i(r_i, z_i, t)} \quad (3.86)$$

zu summieren. Der Radius  $r_i$  ist die Distanz zwischen der  $i$ -ten und der betrachteten Erdwärmesonde.

Zusätzlich zur Interaktion von Erdwärmesonden untereinander ist für die Temperaturprognose bei realen Gebäuden zu berücksichtigen, dass sich die thermischen Lasten, die ein Gebäude dem Untergrund über die Erdwärmesonden aufprägt, nicht gleichmäßig verteilen, sondern je nach Witterung unterschiedliche Anforderungen an das Erdwärmesondenfeld gestellt werden. ESKILSON (1987) schlägt zur Lösung des Problems vor, das Lastprofil eines Gebäudes in  $Q_i$  Teilschritte konstanten Energieentzugs zu zerlegen und diese nach dem Superpositionsprinzip zu addieren (Abb. 3-15).

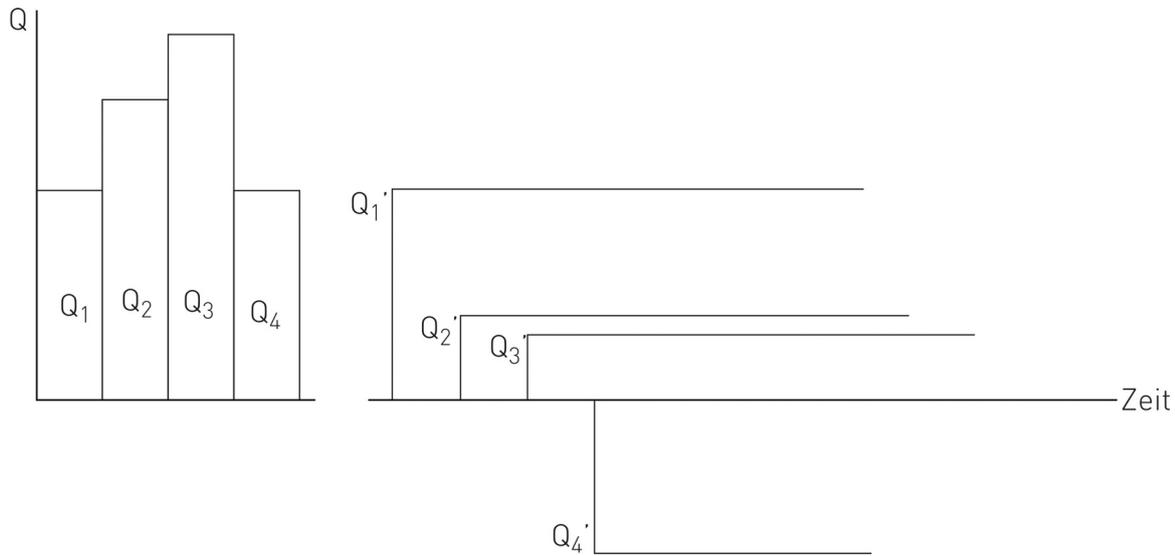


Abb. 3-15: Superposition linearer Energieentzugsschritte (nach ESKILSON 1987, YAVUZTURK 1999)

Die resultierenden Temperaturen ergeben sich somit aus der Summe variabler Entzugsschritte und ein Energieentzug in der  $i$ -ten Woche kann als Superposition einer konstanten Entzugsleistung  $Q_i$  (beginnend am Anfang der  $i$ -ten Woche) und einer konstanten Entzugsleistung  $-Q_i$  (beginnend am Ende der  $i$ -ten Woche) bestimmt werden (HUBER & PAHUD 1999A). Mathematisch ergibt die Superposition, hier am Beispiel des Eskilsonschen „g-function“-Modells gezeigt, gemäß

$$T_b = T_0 - \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{i-1})}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot g\left(\frac{t_n - t_{i-1}}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) \quad (3.87)$$

die Bohrlochtemperatur  $T_b$  zum Ende des  $i$ -ten Zeitschritts (YAVUZTURK 1999).

Grundsätzlich kann das Superpositionsprinzip nach Gl. 3.87 auch auf die Linien- und Zylinderquellenlösung sowie auf das Moving-Line-Source-Verfahren übertragen werden. Hierzu ist in Gl. 3.87 der Term  $2 \cdot \pi \cdot \lambda$  durch  $4 \cdot \pi \cdot \lambda$  und die „g-function“  $g(\cdot)$  durch folgende Terme in der Reihenfolge Linienquelle (Gl. 3.88), Zylinderquelle nach YOUNG (2004, Gl. 3.89) und Moving Line Source (Gl. 3.90) zu substituieren:

$$\int_x^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (3.88)$$

$$\frac{2 \cdot a_1^2 \cdot a_2^2}{\pi^3} \int_0^\infty \frac{[1 - e^{-u^2 \cdot Fo}]}{u^3 \cdot \Delta 1(u)} du \quad (3.89)$$

$$e^{\left(\frac{U}{2 \cdot a_{so,fl}} \cdot \cos \varphi\right) \frac{4 \cdot a_{so,fl} \cdot t}{r^2}} \int_0^{\frac{4 \cdot a_{so,fl} \cdot t}{r^2}} \frac{1}{\eta} \cdot e^{\left(\frac{1}{\eta} - \frac{U^2 \cdot r^2 \cdot \eta}{16 \cdot a_{so,fl}^2}\right)} d\eta \quad (3.90)$$

#### 4 DIE TESTANLAGE HERBRAZHOFEN

Finanziert von der EnBW Energie Baden-Württemberg AG und in Kooperation mit dem Baugrundinstitut Dr.-Ing. G. Ulrich wurde für den Standort Herbrazhofen 2003 eine Testanlage konzipiert und gebaut. Die wesentlichen Schritte bei der Planung, aber auch die Anlagentechnik selbst stehen im Mittelpunkt dieses Kapitels. Zusätzlich wird ein geologisch-hydrogeologischer Abriss, ergänzt um relevante geothermische Gesteinsparameter und deren Evaluierung, gegeben. Abschließend werden die am Standort eingesetzte Messtechnik und deren Aufbau näher erläutert.

##### 4.1 Geologisch-hydrogeologischer Überblick

Das Testfeld in Leutkirch-Herbrazhofen wurde auf dem Firmengelände des Baugrundinstituts Dr.-Ing. Georg Ulrich im Tal der Wurzacher Aach auf einer topographischen Höhe von ca. 640 m über NN eingerichtet. Es befindet sich damit knapp vier Kilometer nord-nord-westlich von Leutkirch im Allgäu, unweit von der Autobahn A96 in Herbrazhofen. Wenige Meter nördlich schließt sich der Anstieg zur Zeiler Hochfläche mit dem Schloss Zeil an (Abb. 4-1).

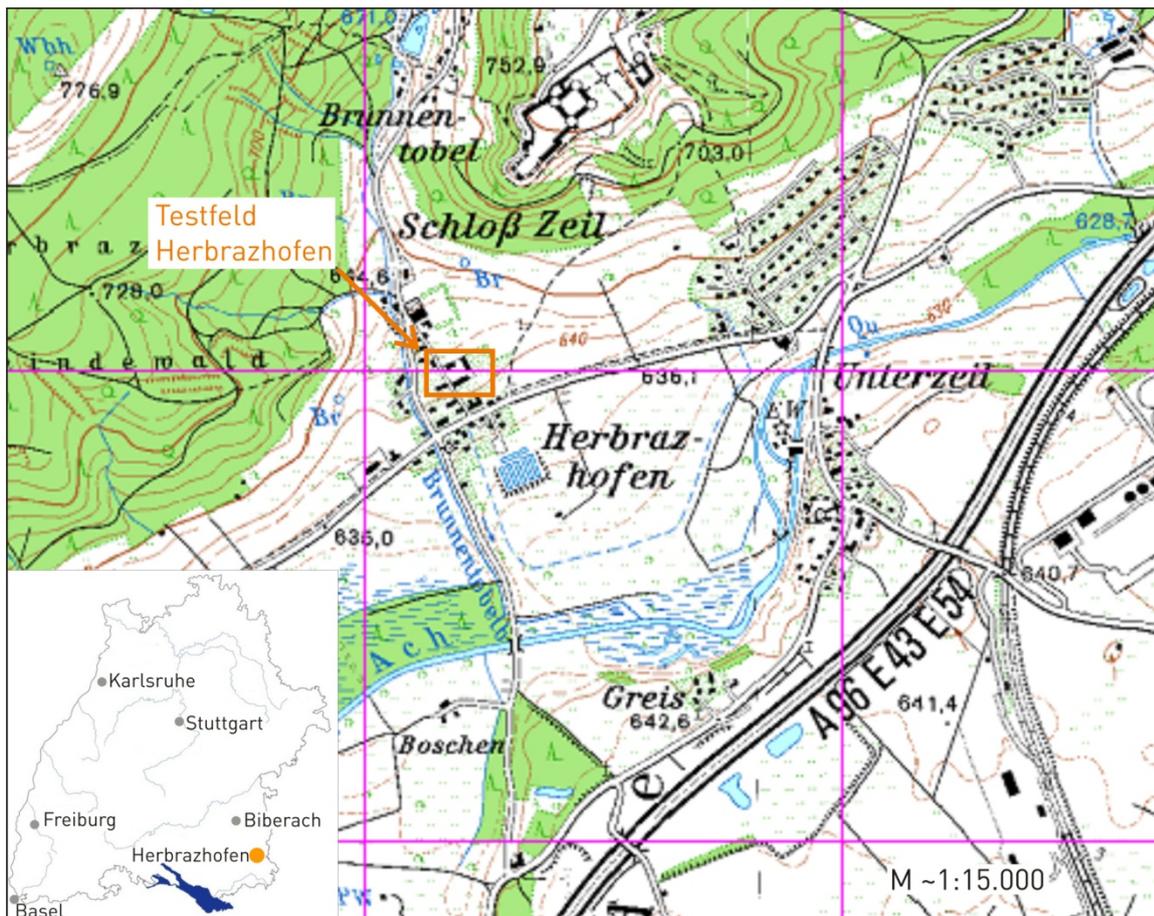


Abb. 4-1: Übersichtsplan mit Lage des Testfelds Herbrazhofen

Aus geologischer Sicht befindet sich das Testfeld im Bereich des Süddeutschen Molassebeckens, einem Vorlandbecken, das sich im Zuge der Kollision der afrikanischen und eurasiatischen Platten nördlich der Alpen entwickelte (EISBACHER 1996). Der Eintrag klastischer Sedimente verstärkte die Subsidenz des Beckens, so dass die Beckenfüllung heute bis zu 5.000 m Mächtigkeit aufweist. Der Anteil des Sedimentpakets, der dem Tertiär zuzuordnen ist, lässt sich vom Liegenden zum Hangenden in die Einheiten Untere Meeresmolasse, Untere Süßwassermolasse, Obere Meeresmolasse und Obere Süßwassermolasse gliedern (GEYER & GWINNER 1991).

Im Raum Herbrachhofen stellt die Obere Süßwassermolasse das älteste, aufgeschlossene Schichtpaket dar (RÜSGEN 2003, HERRMANN 2003). Die Aufschlüsse finden sich im unmittelbar nördlich des Testfelds gelegenen Hang, der das Tal der Wurzacher Ach von der Zeiler Hochfläche trennt. Sowohl im Tal selbst als auch auf der Hochfläche werden die Gesteine der Oberen Süßwassermolasse von jüngeren, quartären Sedimenten überlagert. Während es sich hierbei auf der Hochfläche um günzzeitliche Schotter („Zeiler Schotter“) unter Moränenmaterial (Riß) handelt, bauen sich die Ablagerungen im Achtal aus würmeiszeitlichen Kiessandrinnenfüllung auf, die von geringmächtigen holozänen Sedimenten überlagert werden. Ein in Abb. 4-2 dargestellter, unweit des Testfelds 2003 aufgenommener Profilschnitt zeigt den lokalen Schichtaufbau, eine geologische Übersicht gibt die Karte in Abb. 4.3 nach RÜSGEN (2003) und HERRMANN (2003).



Abb. 4-2: Geologischer Schnitt im Bereich Unterzeil (HERRMANN 2003)

Die würmeiszeitlichen Kiessande stellen einen ergiebigen Grundwasserleiter dar, der in der Vergangenheit verschiedentlich, vor allem aber im Zuge der hydrogeologischen Kartierung der Leutkircher Heide und des Aitrachtals, untersucht wurde (WERNER ET AL. 1974, BRANDSTETTER 1979, HERRLING 1982, KUPSCH ET AL. 1989).

#### 4. Die Testanlage Herbrazhofen

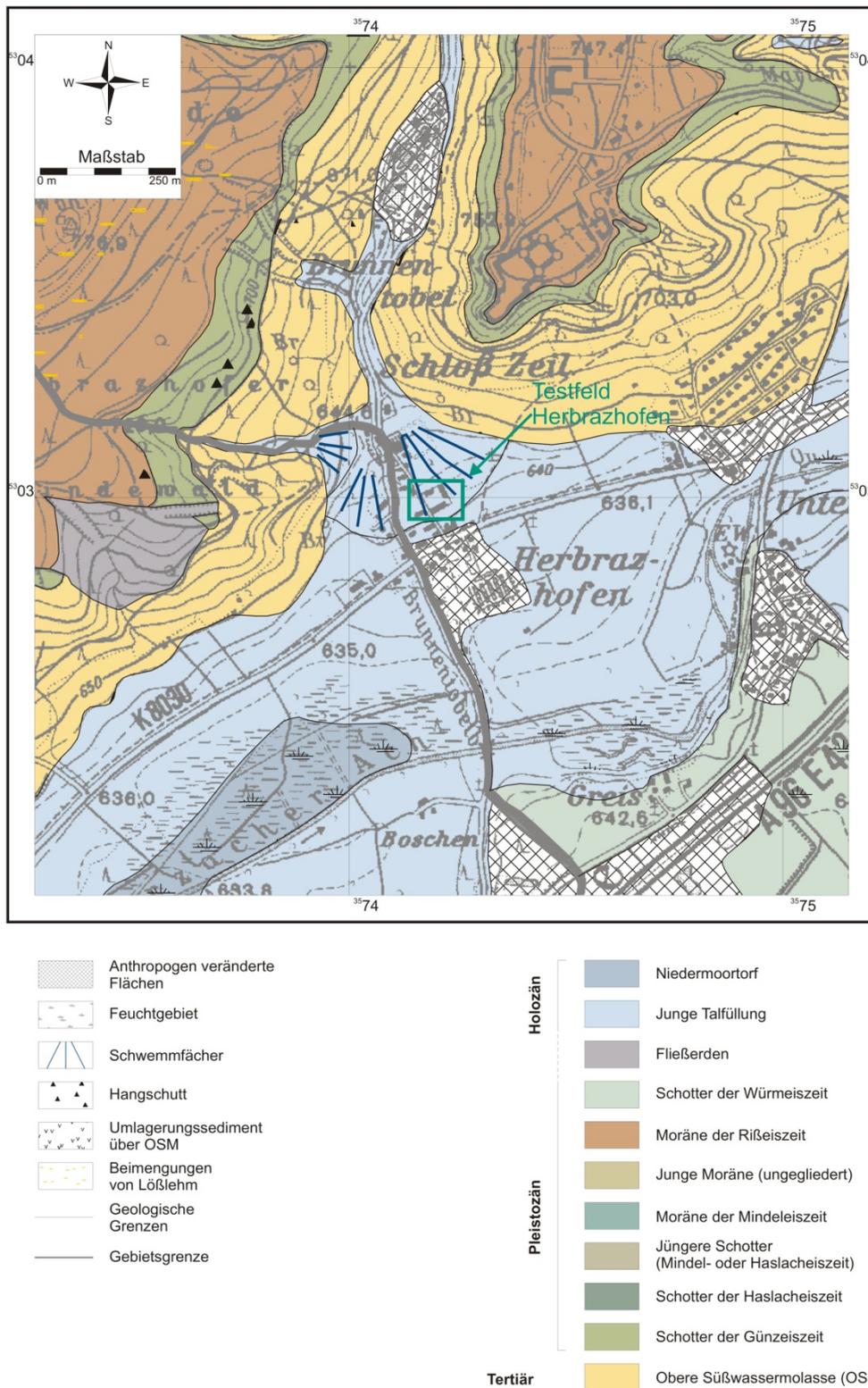


Abb. 4-3: Geologische Übersichtskarte, M 1:12.500 (HERRMANN 2003, RÜSGEN 2003)

Unweit des Testfelds Herbrachhofen wurde 1976 ein knapp 200-stündiger Pumpversuch im Brunnen Leutkirch-Unterzeil durchgeführt, bei dem gleichzeitig die Wasserstände in 12 weiteren Grundwassermessstellen in einer Distanz von bis zu 338 m aufgezeichnet wurden. Die Auswertung dieses Pumpversuchs belegte die Zweiteilung der Kiessande in eine obere und eine untere Rinnenfüllung, die sich nicht nur hydraulisch sondern auch petrographisch unterscheiden (KUPSCH ET AL. 1989). Das Testfeld Herbrachhofen selbst liegt im auskeilenden Randbereich der Schmelzwasserrinne, die Kiessande sind hier der oberen Rinnenfüllung zuzuordnen (KUPSCH ET AL. 1989). Der oben zitierte Pumpversuch ergab für diese Rinnenfüllung einen Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  von 0,019 bis 0,026  $m/s$ , die Fließrichtung wurde zu ENE bestimmt. Diese Daten decken sich mit den Ergebnissen von Kurzpumpversuchen, die im Zuge der Einrichtung zweier Brunnen (GWB I und II) im unmittelbaren Bereich des Testfelds Herbrachhofen ermittelt wurden (freundliche mündliche Mitteilung Herr Dr.-Ing. G. Ulrich). Die beiden Brunnen dienten zeitweilig zur Bereitstellung von Grundwasser für eine Wärmepumpenanlage, mit denen die Gebäude des Baugrundinstituts Dr.-Ing. G. Ulrich in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts beheizt wurden. Bei grundwassergekoppelten Wärmepumpenanlagen sind die Ermittlung der Fließrichtung zur Vermeidung thermisch-hydraulischer Kurzschlüsse und die Bestimmung der Brunnenergiebigkeit wesentliche Planungsbestandteile. Dementsprechend erfolgte die Ausrichtung der beiden Brunnen – GWB I zur Grundwasserförderung, GWB II für die Reinjektion in den oberflächennahen Grundwasserleiter – parallel zur lokalen Grundwasserfließrichtung (Abb. 4-4).

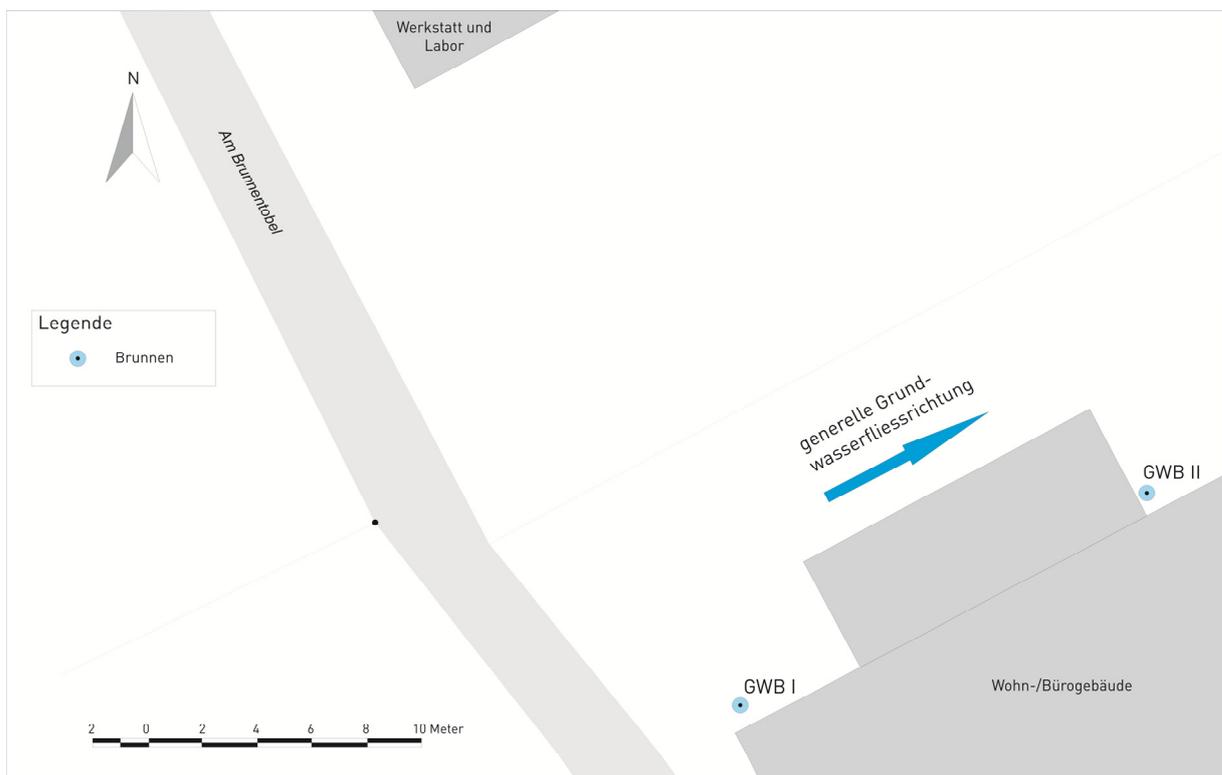


Abb. 4-4: Lageplan Grundwasserbrunnen GWB I und GWB II im Testfeld Herbrachhofen

#### 4. Die Testanlage Herbrachhofen

Von den Aufzeichnungen, die im Zuge der Einrichtung der beiden Brunnen angefertigt wurden, stehen für diese Arbeit leider nur die Profil- und Ausbauzeichnungen sowie die Ergebnisse einer Stichtagsmessung zur Verfügung (KÖLBEL 2003B). Zusammen mit den Daten der oben zitierten hydrogeologischen Untersuchungen sind die wesentlichen Untersuchungsergebnisse in Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tab. 4-1: Hydrogeologischer Datensatz für den Standort Herbrachhofen

Parameter	Werte	Quelle
Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ [m/s]	$1,3 \cdot 10^{-2}$	Hydrogeol. Karte (KUPSCH ET AL. 1989)
Hydraulischer Gradient $i$ []	0,002	Hydrogeol. Karte (KUPSCH ET AL. 1989)
Filtergeschwindigkeit $v_f$ [m/s]	$2,6 \cdot 10^{-5}$	Berechnet aus $v_f = k_f \cdot i$
Aquifermächtigkeit [m]	ca. 10	Geländeuntersuchung (1980, 2003)
Grundwassermächtigkeit $m$ [m]	ca. 5	Geländeuntersuchung (1980, 2003)
Porosität $n$ []	0,2	Hydrogeol. Karte (KUPSCH ET AL. 1989)
Abstandsgeschwindigkeit $v_a$ [m/s]	$1,3 \cdot 10^{-4}$	Berechnet aus $v_a = \frac{v_f}{n}$
Transmissivität $T$ [m <sup>2</sup> / s]	$9,5 \cdot 10^{-2} - 1,3 \cdot 10^{-1}$ ( $\emptyset 1,13 \cdot 10^{-1}$ )	Berechnet aus $T = k_f \cdot m$

Den dargestellten Parametern folgend stellt der Schmelzwasserkieskörper einen leistungsfähigen Grundwasserleiter dar. Wird die Abstandsgeschwindigkeit zugrunde gelegt, lässt sich vereinfachend und bildhaft festhalten, dass das gesamte verfügbare Grundwasservolumen im Bereich des eigentlichen Testfelds praktisch einmal pro Tag vollständig ausgetauscht wird.

In der Summe ist festzuhalten, dass der oberflächennahe Kiesgrundwasserleiter am Standort Herbrachhofen weit überdurchschnittlich gut untersucht wurde. Fließrichtung und –geschwindigkeit, aber auch Porosität, hydraulischer Gradient und die grundwassererfüllte Mächtigkeit wurden verschiedentlich und unabhängig voneinander in hydraulischen Tests bzw. in Stichtagsmessungen bestimmt. Weitere Details zum Grundwasservorkommen können dem Beiheft zur hydrogeologischen Karte und den dort angelegten Kartenwerken entnommen werden (KUPSCH ET AL. 1989).

## 4.2 Auslegung und Installationen

### 4.2.1 Heiz-/Kühlanlage, Lastprofil

Zwei der Firmengebäude der Unternehmensgruppe Dr.-Ing. G. Ulrich, der Büro-Komplex und das durch einen Innenhof getrennte Labor- bzw. Werkstattgebäude, wurden 2003 mit einer Erdwärmesondenanlage zum Heizen und Kühlen ausgestattet. Das Bürogebäude mit integriertem Privatbereich wurde bereits 1853 errichtet und früher als Gutshof genutzt. Der ehemalige Stall wurde 1914 nach einem Brand neu errichtet, der gesamte Komplex zudem 1980 renoviert und dabei zu Dämmzwecken mit einer Innenschale ausgestattet (BEUTINGER 2005). In weiten Bereichen erfolgt die Heizwärmeversorgung über eine Fußbodenheizung. Das Hauptgebäude wurde bereits früher mit der oben erwähnten Wärmepumpenanlage versorgt (Brunnenanlage), die im Zuge sinkender Heizölpreise aus wirtschaftlichen Gründen später stillgelegt wurde. In der Folgezeit übernahm ein Heizölkessel die Wärmeversorgung und Warmwasserbereitung. Diese Anlage wurde 2003 mit der neuen, erdgekoppelten Heiz-/Kühlanlage zu einem bivalenten System ergänzt. In Abbildung 4-5 ist das zugehörige Versorgungsschema wiedergegeben.

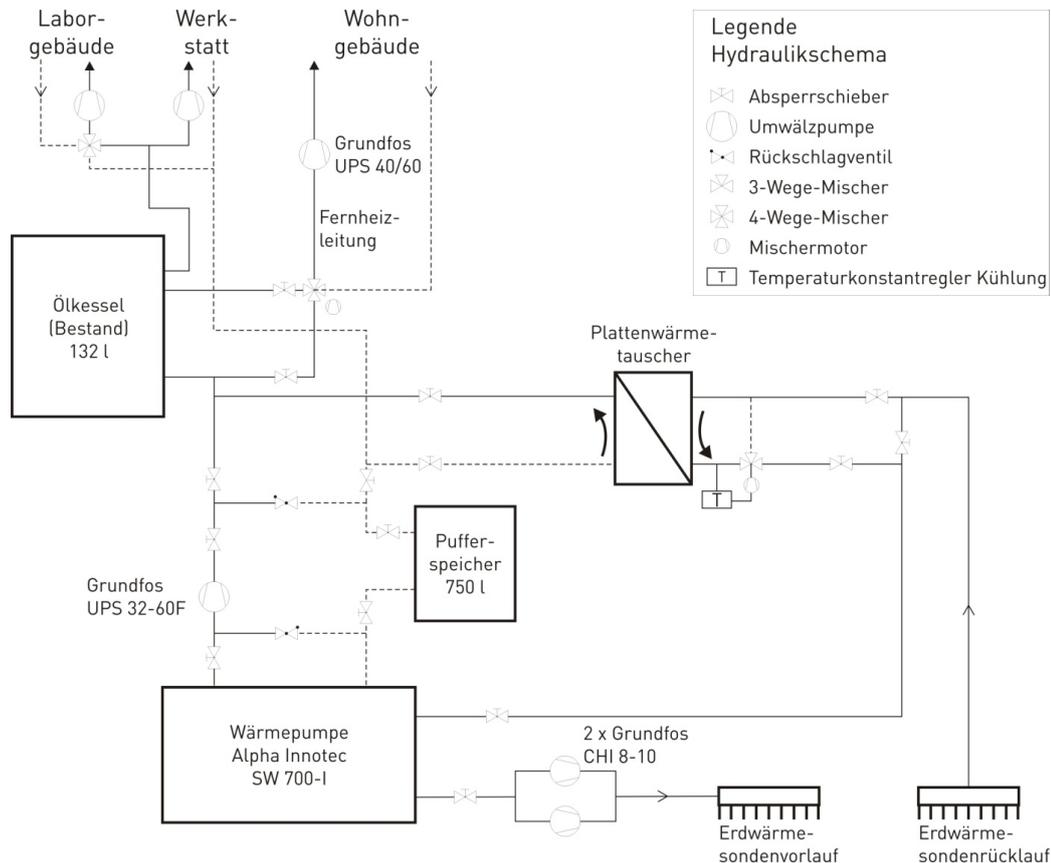


Abb. 4-5: Versorgungsschema der Heiz-/Kühlanlage in Herbrachhofen (nach EISEN 2003)

Neben dem Erdwärmesondenfeld und der Wärmepumpe sind der bestehende Heizölkessel, ein Plattenwärmetauscher, ein Pufferspeicher (Volumen: 750 l) und das Fußbodenheizsystem

#### 4. Die Testanlage Herbrachhofen

wesentliche Anlagenbestandteile. Erdwärmesondenseitig erfolgt die Umwälzung des Solevolumens mit zwei Grundfos-Pumpen vom Typ CHI 8-10.

Mit der kombinierten Heizkessel-/Wärmepumpenanlage sollen das Wohn- und Bürogebäude mit einer beheizten Fläche von etwa  $615 \text{ m}^2$  und der Labor-/Werkstattbereich ( $125 \text{ m}^2$ ) klimatisiert werden. Die Summe der zu beheizenden Fläche beträgt somit etwa  $740 \text{ m}^2$  (BEUTINGER 2005). Vor dem Zubau der erdgekoppelten Wärmepumpenanlage lag der Heizölverbrauch im langjährigen Mittel bei etwa  $20.000 \text{ l}$  Heizöl per anno (BEUTINGER 2005). Mit diesem Wert kann die Gesamtheizleistung abgeschätzt werden (OCHSNER 2007, ALPHAINNOTEC GMBH 2002). Sie ergibt sich aus dem Quotienten des jährlichen Heizölverbrauchs  $JHV$  und eines aus dem Heizwert von Heizöl abgeleiteten Faktors –  $250 \text{ l}$  Heizöl besitzen einen Brennwert von knapp  $2.400 \text{ kWh}$  und damit bei einer Jahresheizdauer von  $2.400 \text{ h/a}$  etwa  $1 \text{ kW}$  Heizleistung – zu etwa  $80 \text{ kW}$  (Gl. 4.01).

$$\text{Heizleistung } Q_H [\text{kW}] \approx \frac{\text{Jahresheizölverbrauch } JHV [\text{l}]}{250 []} \quad (4.01)$$

Da die Warmwasserbereitung weiterhin über den Heizölkessel erfolgen sollte, ist zur Auswahl der Wärmepumpe noch die hierfür in der Vergangenheit aufgebrachte Leistung abzuziehen. Pro Person sind hierfür im Privatbereich zwischen  $0,25$  und  $0,3 \text{ kW}$  anzusetzen. Diese Leistung berücksichtigt einen Warmwasserbedarf pro Kopf und Tag von  $50 \text{ l}$  auf einem Temperaturniveau von  $45 \text{ °C}$  (ALPHAINNOTEC 2002, OCHSNER 2007). Der Einfluss des Bürobetriebs auf die Warmwasserbereitung ist vernachlässigbar.

Alternativ zum oben beschriebenen Vorgehen kann die Heizleistung auch über das Produkt der zu beheizenden Fläche und eines spezifischen Heizleistungsbedarf je Flächeneinheit abgeschätzt werden (Gl. 4.02). Der spezifische Wärmebedarf je Flächeneinheit kann für verschiedene Gebäudetypen den Werten der Tab. 4-2 entnommen werden.

$$Q_H = \text{beheizte Fläche } FH \cdot \text{spez. Wärmebedarf } SWB \quad (4.02)$$

Für die beiden Gebäude in Herbrachhofen wurde unter Berücksichtigung des Baudatums und der 1980 vorgenommen Sanierung der spezifische Wärmebedarf auf  $90 \text{ W/m}^2$  geschätzt. Die benötigte Heizleistung ergibt sich damit zu ca.  $67 \text{ kW}$ .

Tab. 4-2: Spezifischer Wärmebedarf verschiedener Gebäudetypen je Flächeneinheit (nach ALPHAINNOTEC 2002).

Gebäudetyp	Spez. Wärmebedarf
Neubau nach Wärmeschutzverordnung von 1995	$50 - 60 \text{ W/m}^2$
Gebäude vor 1995 errichtet, normale Wärmedämmung	$70 - 90 \text{ W/m}^2$
Altbau, ohne besondere Wärmedämmung	$120 \text{ W/m}^2$

Viele Energieversorger in Deutschland gewähren beim Bezug von Strom für Wärmepumpenanlagen einen vergünstigten Sondertarif. An diese Tarife ist für die Versorgungsunternehmen die Option geknüpft, dass die Stromlieferung zwei- bzw. dreimal für insgesamt maximal sechs Stunden pro Tag unterbrochen werden darf. Diese Sperrzeiten werden in aller Regel auf die netzseitigen Spitzenlastzeiten gelegt (ENBW 2007b) und führen aufgrund der Speichermasse des Gebäudes und bei Installation eines Pufferspeichers zu keinerlei Komforteinbußen. Im Zuge der Heizleistungsermittlung ist diesem Umstand jedoch mit einem Zuschlagfaktor zu begegnen (Tab. 4-3).

Tab. 4-3: Sperrzeitabhängige Zuschlagsfaktoren (ALPHAInNOtec 2002).

Dauer Sperrzeit	Zuschlagsfaktor [ ]
1 x 2 h/d	1,10
2 x 2 h/d	1,20
3 x 2 h/d	1,33

Bei der Testanlage in Herbrachhofen waren tägliche Sperrzeiten von 3 x 1,5 h/d zu berücksichtigen. Die in Tabelle 4-3 gelisteten Werte können mit einem einfachen Polynomansatz interpoliert werden, der Zuschlagsfaktor für die Anlage Herbrachhofen ergibt sich dann zu 1,23 [ ] bei einer Sperrzeit von 4,5 h pro Tag (Abb. 4-6).

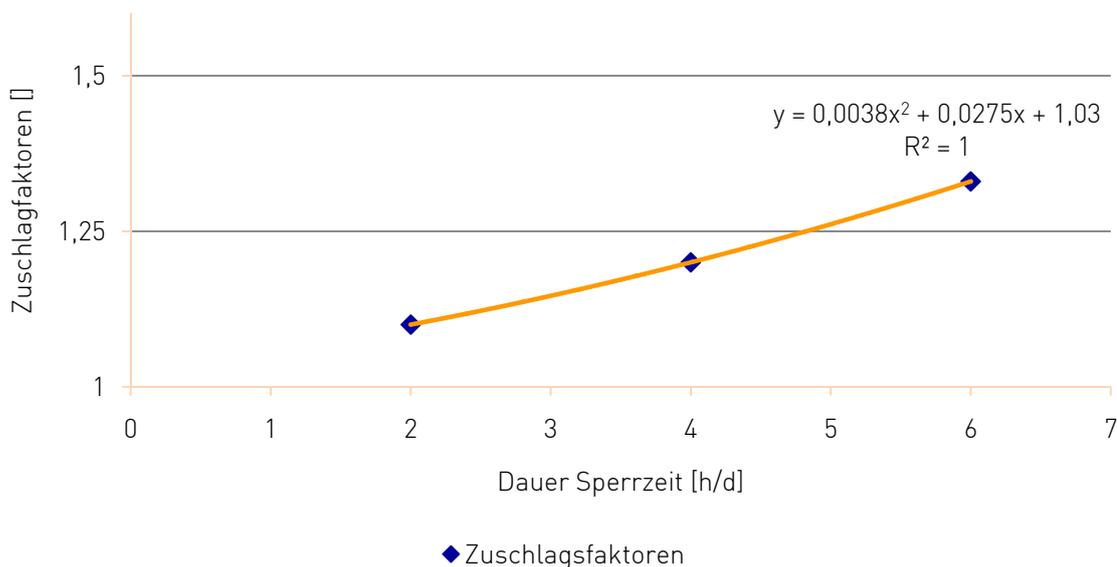


Abb. 4-6: Abhängigkeit des Zuschlagfaktors von der Dauer der Sperrzeit

Je nach Verfahren wurden für die benötigte Heizleistung  $Q_H$  der Anlage Herbrachhofen Werte von 67 bzw. 80 kW ermittelt (Tab. 4-4). Die benötigte Leistung  $Q_H$  der Wärmepumpe ergibt

#### 4. Die Testanlage Herbrachhofen

sich aus dem Produkt der benötigten Heizleistung und des Zuschlagsfaktors und beträgt für das Beispiel Herbrachhofen ca. 82 kW (ermittelt über beheizte Wohnfläche) beziehungsweise ca. 98 kW (ermittelt über mittleren Jahresheizölverbrauch abzgl. Warmwasserbereitung).

Tab. 4-4: Ergebnisse der Heizleistungsermittlung

Heizleistung aus Heizölverbrauch	80 kW
Heizleistung über beheizte Fläche	67 kW
Warmwasser	1,0 kW
Zuschlagsfaktor	1,23 [ ]

Mit diesen Daten und unter Berücksichtigung der Option, die bestehende Heizölanlage zu schalten zu können, wurde eine Wärmepumpe der Fa. AlphaInnoTec (Kasendorf) vom Typ SW 700 I ausgewählt. Die wesentlichen Maschinendaten sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst, die Parameter mit konkretem Leistungsbezug in Abbildung 4-7.

Tab. 4-5: Kenndaten der Wärmepumpe nach Herstellerangaben (ALPHAINNOTEC 2002)

Parameter	Maschinendaten	
Solevolumenstrom (min./nom./max.)	15.000/15.000/34.000 l/h	
Heizwasservolumenstrom (min./nom./max.)	5.900/5.900/14.000 l/h	
Temperatur-Betriebsgrenze Sole	-5 bis 25°C	
Temperaturspreizung bei B0/W35	9,8 K	
	Betrieb mit einem Verdichter	Betrieb mit beiden Verdichtern
$Q_H / COP$ bei B0/W35	36 kW / 4,4 [ ]	67,6 kW / 4,2 [ ]
$Q_H / COP$ bei B0/W50	36 kW / 3,1 [ ]	67,7 kW / 3,0 [ ]
$Q_H / COP$ bei B-5/W35	32 kW / 3,8 [ ]	60,7 kW / 3,8 [ ]
$Q_H / COP$ bei B-5/W50	32 kW / 2,7 [ ]	59,9 kW / 2,7 [ ]
$P_H$ bei B../W35	8,2 kW	16,2 kW
$P_H$ bei B../W50	11,6 kW	22,4 kW

Die Leistungsdaten von Wärmepumpen sind auf den  $COP$  bezogen. Damit gelten heizungs- und erdwärmesondenseitig definierte Temperaturen, die bezogen auf das Arbeitsmedium (Sole) mit einem „B“ („Brine“) und die Heizwasservorlauftemperatur mit einem „W“ („Water“) gekennzeichnet werden. Das Kürzel „B0/W35“ steht dementsprechend für eine Rücklauftemperatur des Arbeitsmediums aus den Erdwärmesonden von 0 °C und für eine Vorlauftempera-

tur in das Heizsystem von 35 °C. Alternativ kann zur Beurteilung einer Wärmepumpe auch der Gütegrad – Quotient aus COP und maximalem COP – als Maß für die inneren Verluste herangezogen werden. Für die in Herbrachhofen eingesetzte Maschine ergeben sich hier Werte zwischen 0,48 und 0,5 (ein Verdichter) bzw. 0,46 und 0,49 (zwei Verdichter). Diese Werte liegen deutlich über dem in der Schweiz geforderten Referenzwert von 0,425 für Retrofit-Wärmepumpenanlagen (ZINGERLI & EHRBAR 2001).

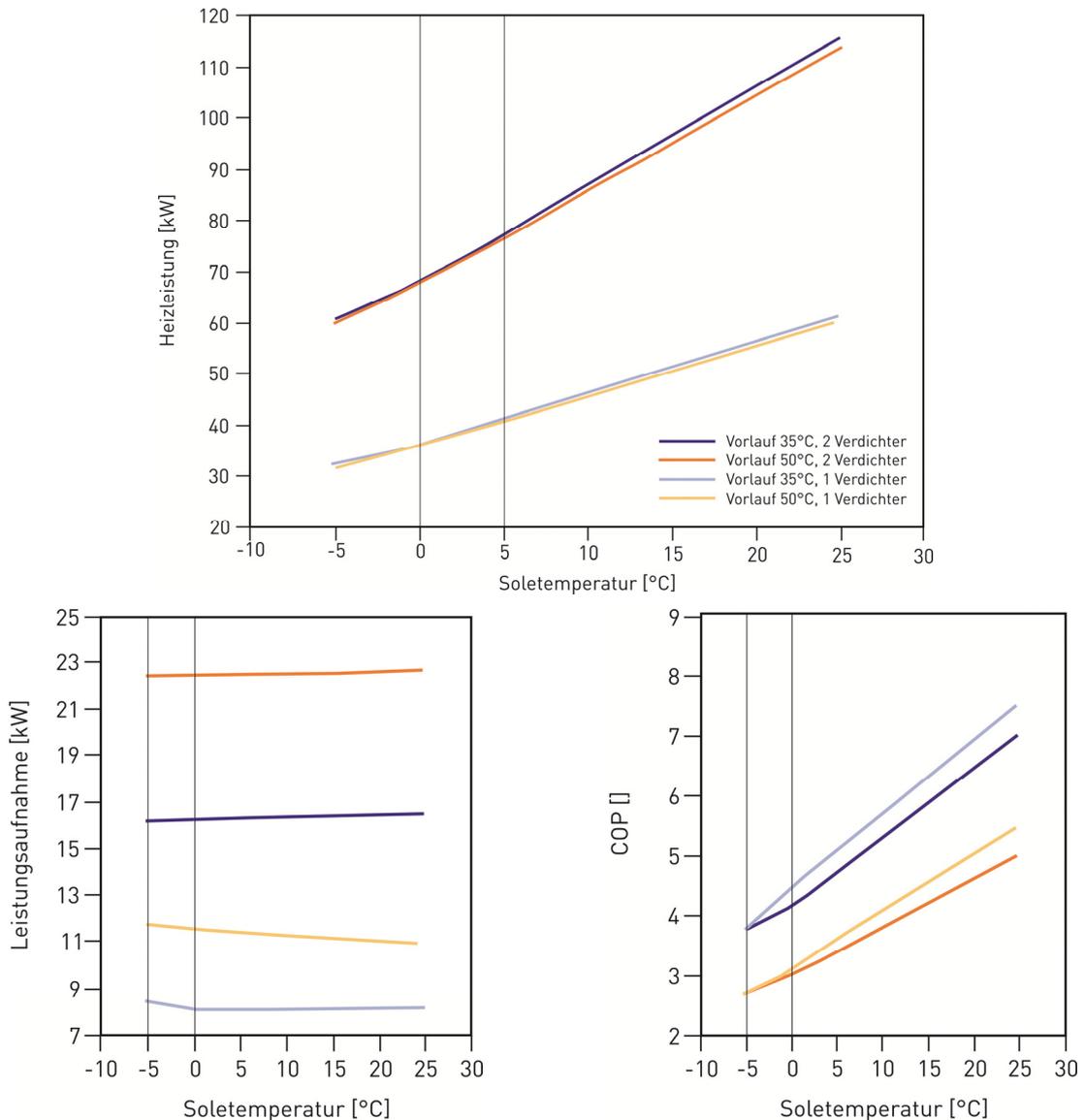


Abb. 4-7: Heizleistung, Leistungsaufnahme und COP der Wärmepumpe (umgezeichnet nach ALPHAINNOTEC 2002)

Da die Gebäude im Testfeld weitestgehend mit Fußbodenheizungen ausgerüstet sind, wurde bei der Auswahl der Wärmepumpe eine Heizungsvorlauftemperatur von 35 °C angesetzt. Die Heizleistung der Wärmepumpe entspricht damit je nach Temperatur des Arbeitsmediums ca.

#### 4. Die Testanlage Herbrachhofen

60 – 70 kW und deckt damit überschlägig 60 bis 85 % der benötigten Heizleistung ab. Für die Jahresbetriebsstunden der Wärmepumpenanlage in Herbrachhofen wurde, der VDI 4640 (Teil 2) folgend, ein Wert von 1.800 h angesetzt, da die Warmwasserbereitung vom bestehenden Heizölkessel übernommen werden sollte. Die Jahresheizarbeit ergibt sich damit bei einer Heizleistung von 68 kW zu 122,4 MWh. Auf Grund der klimatischen Bedingungen, aber auch der Bauweise der Gebäude und ihrer Nutzung wurde nur geringer Kühlbedarf erwartet. Dieser wurde auf 12 kW Leistung bei einer jährlichen Laufzeit von insgesamt 400 Stunden – verteilt auf die Monate Juni bis August – geschätzt. Dies entspricht 4,8 MWh Kühlarbeit. Das aus der geschätzten Heiz- und Kühlarbeit entwickelte Lastprofil ist in Abb. 4-8 dargestellt.

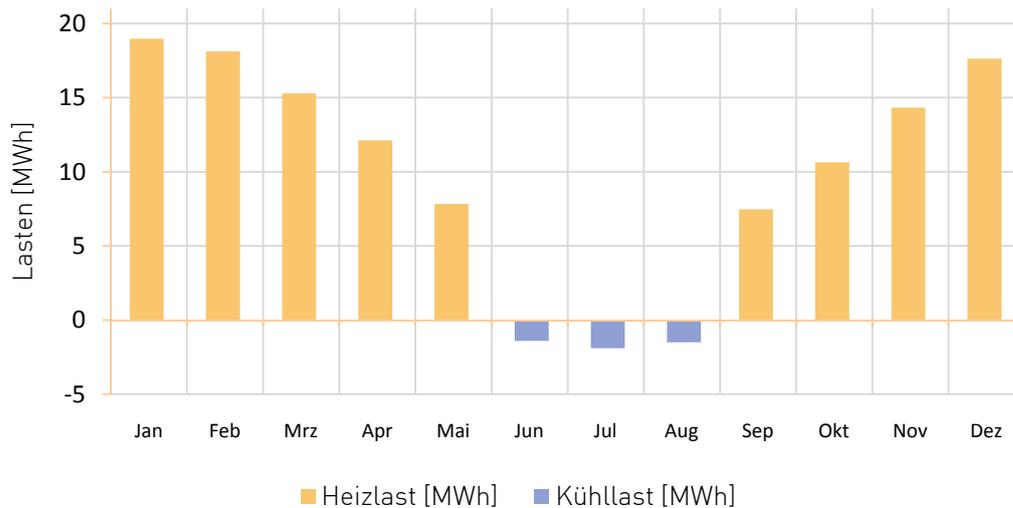


Abb. 4-8: Heiz- und Kühllastprofil der Testanlage Herbrachhofen (KÖLBEL 2003A)

Zusätzlich zur Heiz- und Kühlarbeit waren, um verschiedenen Dimensionierungstools gerecht zu werden, im Rahmen der Anlagenauslegung noch die Spitzenlasten abzuschätzen, die dem Erdwärmesondenfeld am Standort Herbrachhofen aufgeprägt werden. Die Schätzwerte berücksichtigen für die Monate Dezember bis Februar die Sperrzeiten der Stromversorgung, für die anderen Monate wurde auf Erfahrungswerte zurückgegriffen (Tab. 4-6).

Tab. 4-6: Monatsbezogene Spitzenlasten

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Dauer Heizlastspitzen [h/d]	18	18	12	4	--	--	--	--	--	6	12	18
Dauer Kühllastspitzen [h/d]	--	--	--	--	--	4	5	4	--	--	--	--

#### 4.2.2 Auslegung des Erdwärmesondenfelds

Die wesentlichen Auslegungsparameter für ein Erdwärmesondenfeld sind in Tabelle 2-8 bereits vorgestellt worden. Sie lassen sich in die Kategorien Standortbedingungen, Erdwärmesonden- und Arbeitsmediumdaten, Heiz- und Kühllastprofile sowie Wärmepumpenkennwerte gliedern. Zu den Standortbedingungen sind die geologisch-geothermischen und hydrogeologischen Datensätze, aber auch relevante Klimafaktoren zu zählen.

Der geologische Schichtaufbau im Bereich des Testgeländes konnte im Rahmen der Planung aus den zwei am Standort befindlichen und weiter oben bereits beschriebenen Brunnen zusammen mit Angaben aus der hydrogeologischen Karte Leutkircher Heide und Aitrachtal (KUPSCH ET AL. 1989) und Archivdaten der am Standort ansässigen Moräne Bohrgesellschaft mbH abgeschätzt werden. Das geologische Grundsatzprofil am Standort ist in Tabelle 4-7 zusammengestellt.

Tab. 4-7: Geologisches Grundsatzprofil am Standort Leutkirch-Herbrachhofen

0 m – 0,4 m	Anthropogene Auffüllung, Schotter und kiesige Sande
0,4 m – 3,5 m	Wechselagerung von stark schluffigen Tonen und kiesigen Sanden (Holozän)
3,5 m – 16 m	Kiessand, z. T. Steine (würmeiszeitliche Schotter)
16 m – Endteufe	Wechselagerung von unterschiedlich verfestigten Ton-, Schluff- und Sandsteinen, lokal Konglomeratlagen (Obere Süßwassermolasse)

Frei ausspiegelndes Grundwasser war bei 10 m unter Gelände zu erwarten, den Stauer des Grundwasserleiters bildet das Top der Oberen Süßwassermolasse bei ca. 16 m unter Gelände.

Für die Dimensionierung der Erdwärmesonden wurden den am Standort zu erwartenden Gesteinseinheiten Wärmeleitfähigkeits- und Wärmekapazitätswerte anhand der EED-Datenbank zugewiesen (HELLSTRÖM & SANNER 2000). Zudem konnte auf das Ergebnis eines unweit von Herbrachhofen in Lindenberg ebenfalls in den Einheiten der Oberen Süßwassermolasse durchgeführten Thermal-Response-Tests (TRT) zurückgegriffen werden (KÖLBEL 2003A). Die ermittelten Werte sind in Abb. 4-9 zusammengestellt und verdeutlichen die vergleichsweise hohe Unsicherheit bei der Abschätzung gesteinspezifischer Wärmeleitfähigkeiten.

Mit den in der EED-Datenbank empfohlenen Werten wurde, gewichtet über den jeweiligen Anteil an der Profilstrecke, eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von  $2,6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  abgeschätzt. Dieser Wert ist unwesentlich geringer als das Ergebnis des TRT in Lindenberg, der an einer Bohrung durchgeführt wurde, die hinsichtlich Bohrdurchmesser und Ausbau mit den geplanten Erdwärmesonden in Herbrachhofen identisch ist und ebenfalls in Gesteinseinheiten der Oberen Süßwassermolasse niedergebracht wurde.

#### 4. Die Testanlage Herbrachhofen

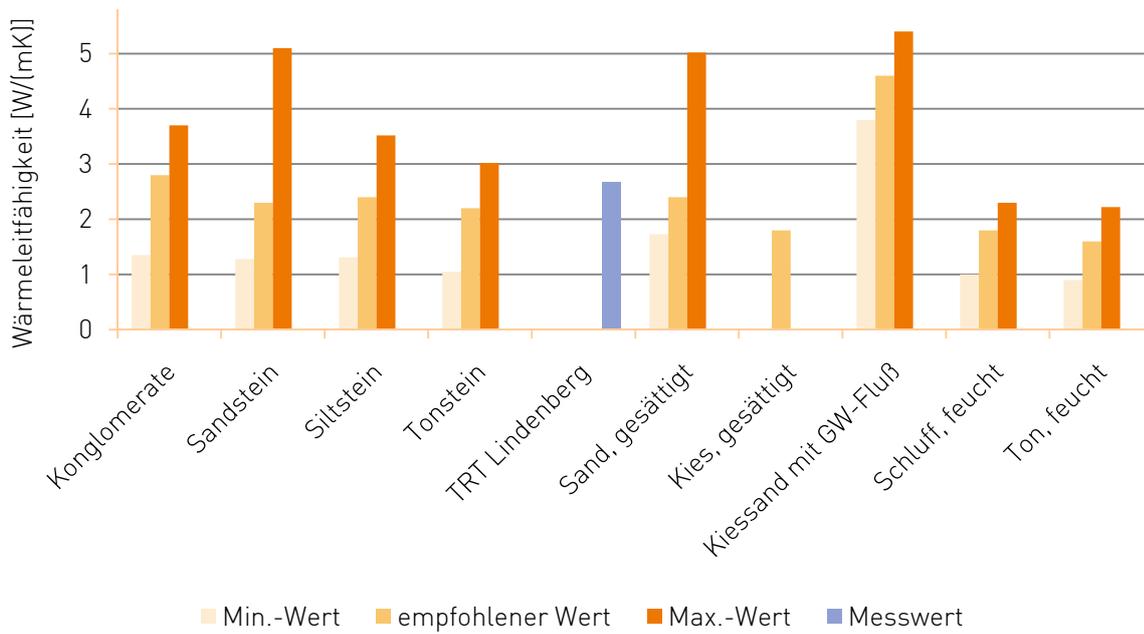


Abb. 4-9: Datenbankwerte Wärmeleitfähigkeit (nach HELLSTRÖM & SANNER 2000) und Ergebnis eines TRT

Analog zur Wärmeleitfähigkeit wurde die mittlere vol. Wärmekapazität der Gesteinseinheiten am Standort zu  $2,3 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$  abgeschätzt (Abb. 4-10).



Abb. 4-10: Datenbankwerte für die volumetrische Wärmekapazität (nach HELLSTRÖM & SANNER 2000)

Die in der Planung berücksichtigten Werte für die Wärmeleitfähigkeit von  $2,6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und Wärmekapazität –  $2,3 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$  entsprechen  $1.000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  bei einer Dichte von  $2.300 \text{ kg}/\text{m}^3$  – liegen im Bereich von Schweizer Laboruntersuchungen an verschiedenen Gesteinseinheiten der Oberen Süßwassermolasse (Abb. 4-11).

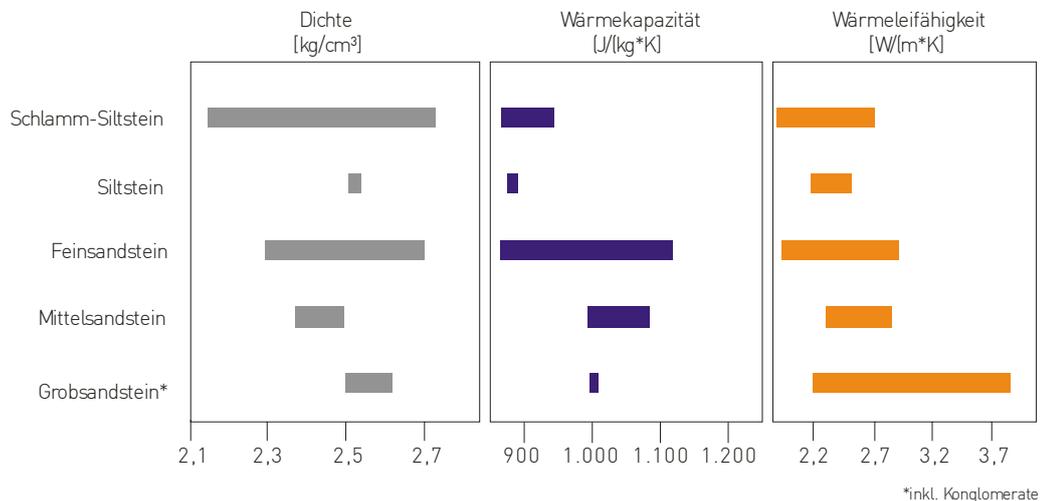


Abb. 4-11: Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Oberen Süßwassermolasse in der Schweiz (umgezeichnet nach LEU ET AL. 2006)

Zur Ermittlung der ungestörten Untergrundtemperatur nach Gl. 3.01 bzw. 3.02 wird die Lufttemperatur im Jahresmittel und die terrestrische Wärmestromdichte benötigt. Der Standort in Herbrachhofen liegt im Klimabezirk des schwäbischen Alpenvorlands auf einer topographischen Höhe von etwa  $640 \text{ m}$  über NN. Der Jahresniederschlag beträgt im langjährigen Mittel  $1.100 \text{ mm}$ , die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei  $7,5 \text{ °C}$  (STADTBAUAMT LEUTKIRCH 2007).

Für die geothermische Wärmestromdichte sind in der Datenbank des Earth Energy Designer (EED) für verschiedene Standorte in Deutschland entsprechende Referenzwerte in einer Bibliothek zusammengefasst. Dort wird etwa für München ein Wert von  $0,08 \text{ W}/\text{m}^2$ , für Stuttgart ein Wert von  $0,065 \text{ W}/\text{m}^2$  vorgeschlagen. Für den Standort Herbrachhofen wurde im Rahmen der Planung ein Wert von  $0,075 \text{ W}/\text{m}^2$  geschätzt (KÖLBEL 2003A).

Bei der Auswahl der Erdwärmesonden und des Arbeitsmediums wurde mit Doppel-U-Sonden (HD-PE) und einem Monoethylenglykol-Wasser-Gemisch auf handelsübliche Standards zurückgegriffen. Die auslegungsrelevanten Kennzahlen sind in Tabelle 4-8 zusammengefasst.

Über die bisher vorgestellten Werte hinaus waren für die Dimensionierung des Erdwärmesondenfelds in Herbrachhofen weitere Parameter notwendig. So wurde ein Bohrdurchmesser von  $152 \text{ mm}$  geplant, der Abstand der Sonden voneinander sollte  $15 \text{ m}$  betragen. Um die Leistung der Erdwärmesonden zu optimieren, wurde der Einsatz von Abstandshaltern vorgesehen, um so den Abstand der Sondenschenkel zueinander bezogen auf das jeweilige Rohrzentrum auf ca.  $100 \text{ mm}$  einzustellen.

#### 4. Die Testanlage Herbrachhofen

Tab. 4-8: Kennzahlen Erdwärmesondenmaterial und Arbeitsmedium nach Herstellerangaben

	Parameter	Kennzahlen
Erdwärmesonden	Durchmesser Sondenrohr Außen/Innen	32 mm / 29,1 mm
	Wandstärke	2,9 mm
	Wärmeleitfähigkeit Wandmaterial	0,42 W/(m · K)
	Anzahl U-Schlaufen	2 []
Arbeitsmedium	Wärmeleitfähigkeit	0,48 W/(m · K)
	Spez. Wärmekapazität	3.795 J/(kg · K)
	Dichte	1.052 kg/m <sup>3</sup>
	Dyn. Viskosität	0,0052 kg/(m · s)
	Typ	Wasser/Monoethylenglykol (25%)
	Gefrierpunkt	-14 °C

Als Hinterfüllmaterial sollten verschiedene Spezialbaustoffe, vor allem auch Produkte eines anderen Forschungsprojekts der Universität Karlsruhe, zum Einsatz kommen, deren Wärmeleitfähigkeit zwischen 1,05 und 3,04 W/(m · K) schwanken (HUNN 2004). Für die Auslegungsrechnungen wurde hier ein mittlerer Wert von 2,5 W/(m · K) angenommen. Der Solevolumenstrom durch die Erdwärmesondenanlage hindurch wurde, den Herstellerangaben zum Kaltwasserdurchsatz der Wärmepumpe folgend, mit 18 m<sup>3</sup>/h veranschlagt (ALPHAINNOTEC 2002).

Zusammen mit dem weiter oben beschriebenen Lastprofil und den hier genannten Daten wurde das Erdwärmesondenfeld am Standort Herbrachhofen mit dem Earth Energy Designer (EED, Vers. 2.0) ausgelegt. Im Ergebnis sind in der Summe 924 m Erdwärmesonden verteilt auf acht Bohrungen festzuhalten. Die prognostizierte Entwicklung der mittleren Soletemperatur in den Erdwärmesonden über eine 25-jährige Betriebsdauer ist aus Abbildung 4-12 zu entnehmen.

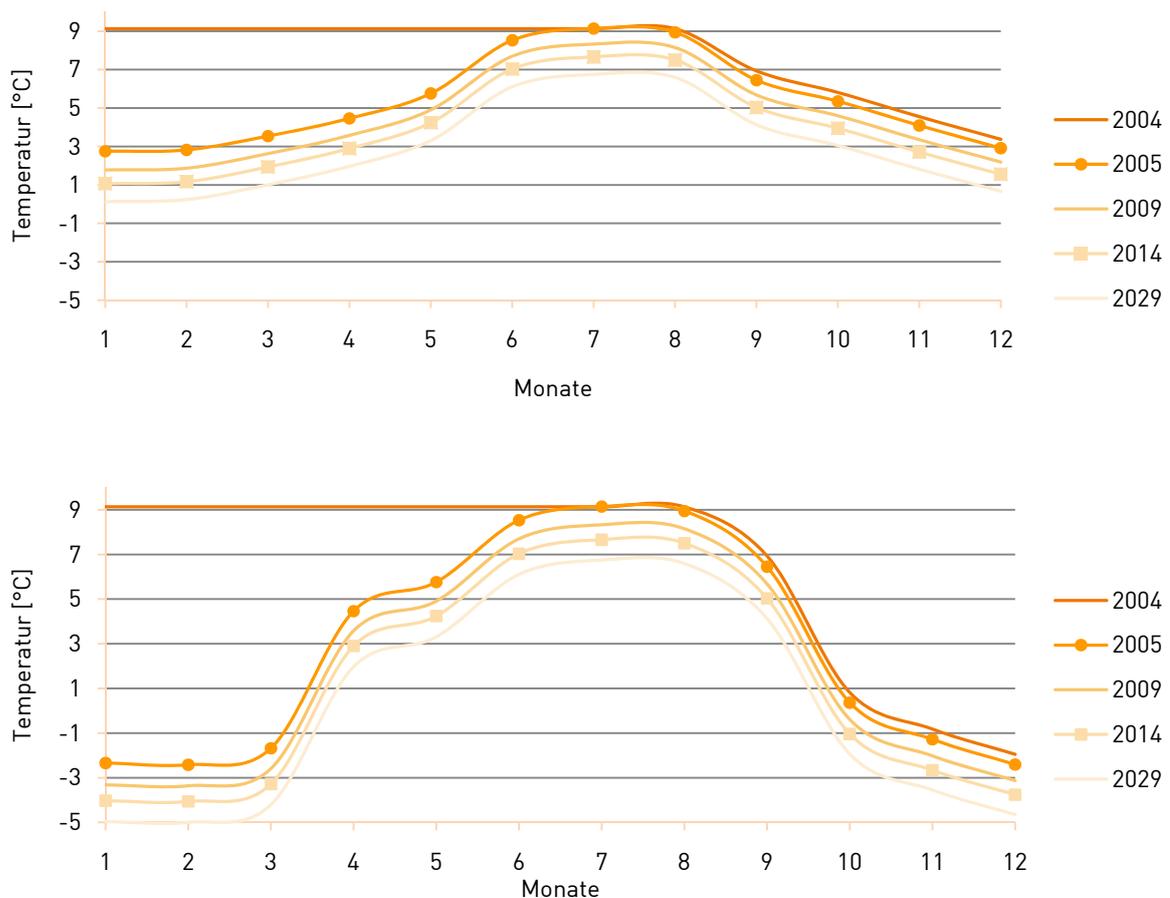


Abb. 4-12: Prognose der Entwicklung der mittleren Soletemperatur über 25 Jahre ohne (obere Grafik) und mit Berücksichtigung von Lastspitzen (untere Grafik)

Wie erwartet sinken die prognostizierten Temperaturen mit der Zeit ab, um im ungünstigsten Fall, also im Januar des 25. Betriebsjahres und bei Berücksichtigung von Lastspitzen, die Marke von  $-5\text{ °C}$  zu erreichen. Deutlich ist der Einfluss der Spitzenlasten auf die mittlere Soletemperatur zu erkennen: im Vergleich zum Grundlastfall sinkt diese in den Wintermonaten um etwa  $5\text{ K}$ .

Neben EED wurden verschiedene Handverfahren und Programme zur Dimensionierung des Erdwärmesondenfelds herangezogen. Berechnungen mit dem DST-Modul des Programms TRNSYS ergaben, dass bereits acht Erdwärmesonden mit je  $99\text{ m}$  Tiefe den Anforderungen des Heiz-/Kühl-Lastprofils genügen (HELLMANN 2003). STEINKAMP (2003) nutzte darüber hinaus Programme EWS und GEOEASE sowie das Produkt WDIM, das sich der Tabellenwerte der VDI 4640 (Teil 2) bedient. Eine zusammenfassende Darstellung der Simulationsergebnisse ist in Abbildung 4-13 gegeben.

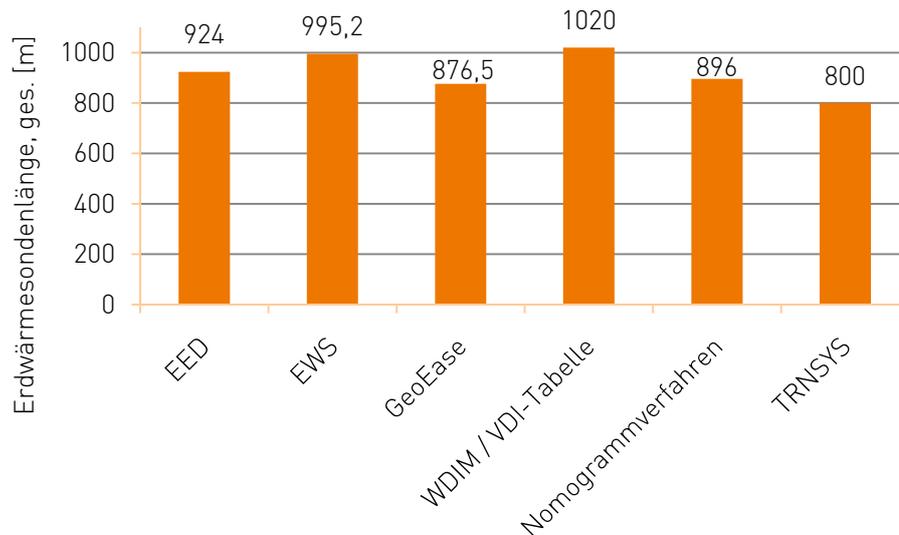


Abb. 4-13: Ergebnisse der Auslegungsberechnung mit verschiedenen Verfahren (STEINKAMP 2003, KÖLBEL 2003A)

Die weitaus größte Gesamtlänge Erdwärmesonden ergibt die Auslegung nach der VDI-Tabelle resp. mit WDIM. Der Mittelwert der anderen Verfahren liegt bei ca. 900 m. Hiervon weichen insbesondere EWS und TRNSYS ab. Das einfache Nomogrammverfahren zeigt ein Ergebnis, das dem Mittelwert aller anderen Verfahren nahezu exakt entspricht. Bei der Auslegung des Felds in Herbrachhofen wurde, gerade auch vor dem Hintergrund, dass die angewendeten Verfahren zusätzliche Gewinne aufgrund des Einflusses eines Grundwasserstroms nicht berücksichtigen, entschieden, dem Ergebnis von TRNSYS<sup>®</sup> zu folgen und am Standort acht Erdwärmesonden mit jeweils 99 m Tiefe zu installieren. Ein weiteres Kriterium für diese Entscheidung waren wirtschaftliche Zwänge im Hinblick auf das Projektbudget.

### 4.2.3 Bohr- und Installationsarbeiten

Alle Erdwärmesondenbohrungen wurden von der Moräne Bohrgesellschaft mbH mit einem Klemm-Bohrgerät vom Typ KR 806-3, ausgestattet mit einem Doppel-Rotor-Kopf, abgeteuft. Der Verrohrungsdurchmesser betrug 152 mm, der eingesetzte Flügelmeißel wies einen Durchmesser von 130 mm auf. Die Verrohrung dient zur Stützung des Bohrlochs und wurde nur wenige Meter tief in die, die Lockersedimente unterlagernden Gesteine der Oberen Süßwassermolasse mitgeführt. Ab einer Tiefe von ca. 20 m unter Aufsatzpunkt wurde die Bohrung bis zur Endteufe mit dem Flügelmeißel fertiggestellt. Aufgrund des Bohrdurchmessers und in Anbetracht der zu installierenden Messeinheiten war es nicht möglich, die Erdwärmesonden über die gesamte Bohrlochtiefe mit Abstandshaltern auszustatten.

Bereits vor der Einrichtung des Testfelds wurde im April 2003 eine erste Erdwärmesondenbohrung abgeteuft. In Ergänzungen der relativ flachen Brunnenbohrungen sollten mit ihr die geologischen Verhältnisse am Standort bis in eine Tiefe von 100 m unter Gelände vorkundet werden. Die verbleibenden Erdwärmesondenbohrungen wurden im Dezember 2003 nie-

dergebracht. Zusätzlich zu den acht Erdwärmesondenbohrungen wurde Anfang 2004 eine Messbohrung (D 100 mm, gekernt) gleicher Tiefe hergestellt. Neben der Aufnahme von Messseinheiten sollte mit dieser Bohrung vor allem auch der Untergrund detailliert erkundet werden (Abb. 4-14).

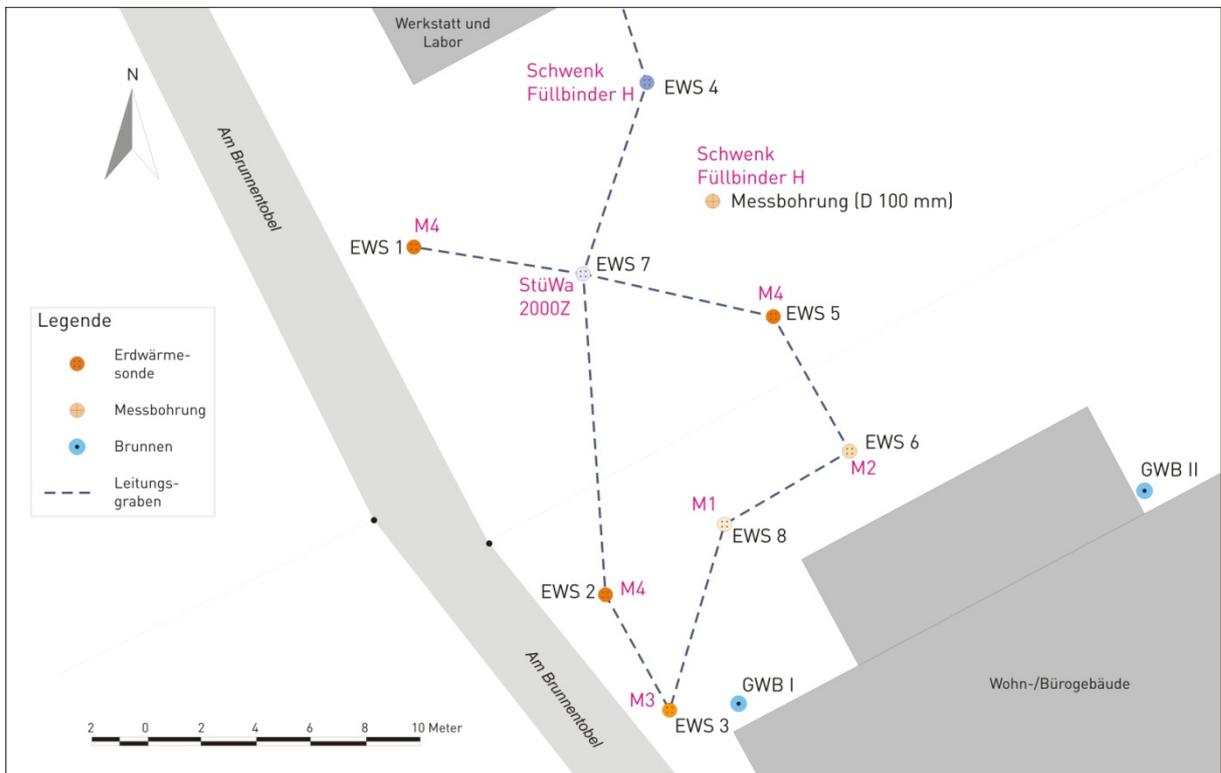


Abb. 4-14: Lageplan des Erdwärmesondenfelds (rote Schrift: verwendeter Hinterfüllbaustoff)

Abweichend von der Planung musste das Erdwärmesondenfeld aufgrund von temporären Platzproblemen (genutzte Lagerflächen) und aus Gründen der Leitungsfreiheit neu konfiguriert werden. Die letztlich realisierte Verteilung der Bohrungen im Testfeld kann Abb. 4-14 entnommen werden. Die Installation der Erdwärmesonde in der Bohrung EWS 7 gestaltete sich sehr schwierig: Aufgrund der unzureichenden Standfestigkeit des Bohrlochs oder aber durch Nachfall konnte diese Erdwärmesonde nur auf 86 m Tiefe gestellt werden. Die Hinterfüllung der Erdwärmesondenbohrungen wurde von Mitarbeitern der Fa. Dorfner-Anzaplan (Hirschberg) und der Universität Karlsruhe im Rahmen eines weiteren Forschungsvorhabens der EnBW Energie Baden-Württemberg AG durchgeführt (HUNN 2004). Ziel dieses Vorhabens war es, thermisch verbesserte Hinterfüllmaterialien zu entwickeln. Im Testfeld Herbrachhofen wurden daher neben herkömmlichen Baustoffen (Schwenk Füllbinder H und Stüwa therm 2000 Z) vor allem neu entwickelte Mixturen der Fa. Dorfner-Anzaplan mit den Bezeichnungen M1-4 eingesetzt. In Abbildung 4-13 ist den verschiedenen Bohrungen der jeweilige Hinterfüllbaustoff zugeordnet.

#### 4. Die Testanlage Herbrachhofen

In Tabelle 4-9 sind die relevanten Daten zum Ausbau der Erdwärmesonden zusammengefasst. Zu den tatsächlich in die Bohrungen verpressten Hinterfüllmaterialvolumen ist anzumerken, dass die genannten Volumina – für eine 99 m tiefe Erdwärmesondenbohrung sind knapp  $0,8 \text{ m}^3$  Baustoff-/Wassergemisch zu erwarten – auch nach Abzug des Volumens, das die Messeinrichtungen beanspruchen, in der Regel nicht ausreichen, um eine hohlraumfreie Verfüllung aller Bohrung sicherzustellen.

Tab. 4-9: Ausbaudaten (Daten Hinterfüllung und Verpressvolumen nach HUNN 2004)

Erdwärmesonde	Bohrtiefe [m]	Einbautiefe EWS [m]	Hinterfüllmaterialtyp	Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllmaterial [W/(m · K)]	realisiertes Verpressvolumen [m <sup>3</sup> ]
EWS 1	99,0	99,0	M4	3,4	0,59
EWS 2	99,0	99,0	M4	3,4	0,52
EWS 3	99,0	99,0	M3	2,7	0,617
EWS 4	99,0	99,0	Schwenk Füllbinder H	1,1	nicht bestimmt
EWS 5	99,0	99,0	M4	3,4	0,555
EWS 6	99,0	99,0	M2	2,5	0,723
EWS 7	99,0	86,0	StüWa 2000Z	1,9	0,601
EWS 8	99,0	99,0	M1	2,7	0,645

Unmittelbar im Anschluss an die Erdwärmesondenbohrungen wurden die horizontalen Anbindeleitungen fertiggestellt. Hierzu wurden die beiden Vor- und Rückläufe der Erdwärmesonden zunächst mit Y-förmigen HD-PE-Formstücken zu jeweils einer Rohrleitung gebündelt und dann über in ca. 1,2 m Tiefe installierte HD-PE-Leitungen (DA 40 mm) zum parallel Sammler/Verteiler geführt, der sich in einem Lichtschacht an der Süd-Ost-Seite des Werkstatt-/Laborgebäudes befindet. Mit der Befüllung mit einem Alkohol-Wasser-Gemisch (25 % Monoethylenglykol) und mit der Entlüftung und Einregulierung der Volumenströme wurden die untergrundseitigen Installationsarbeiten abgeschlossen. Im Gebäude wurde die Wärmepumpe von einem Heizungs- und Sanitärbetrieb mit der Sondenanlage und dem Heiz-/Kühlsystem verbunden. Der erste Probetrieb der Anlage, noch ohne Einsatz der Wärmepumpe, fand am 20.12.2003 statt. Im März 2004 wurde die Gesamtanlage in Betrieb genommen.

#### 4.2.4 Messtechnik und -aufbau

Die Temperaturentwicklung in einem Erdwärmesondenfeld bzw. an einer Erdwärmesonde ist zeit- und ortsabhängig. Um die Temperaturänderung messtechnisch mit einfachen Punktsen-

soren zu erfassen ist daher bei angepasster Ortsauflösung eine überaus hohe Anzahl von Messfühlern notwendig. Während der Aufwand messtechnisch und auch finanziell grundsätzlich kein Ausschlusskriterium darstellt, ist das Platzproblem gerade bei Messungen in Bohrungen sehr konkret: Die zu den Fühlern gehörigen Messkabel verbieten aufgrund ihrer Querschnittsweite eine ausreichende große Fühlerzahl je Bohrloch.

Eine Alternative bieten hier so genannte Distributed-Temperature-Sensing-Systeme, kurz DTS-Systeme, die bei hinreichend langen Messzeitintervallen eine ausreichende Temperaturauflösung gestatten. DTS-Messungen in tiefen Bohrungen sind im Rahmen der Gas- und Öl-exploration keine Seltenheit und wurden auch in der Tiefen Geothermie bereits mehrfach eingesetzt (HUENGES & WINTER 2005, HINRICHS 2007). Zur Aufzeichnung der Temperaturentwicklung bei Erdwärmesonden wurden DTS-Systeme bisher dagegen nur selten und dann auch nur für sehr kurze Messkampagnen genutzt (HURTIG ET AL. 1997, BRANDT 2001, ZORN ET AL. 2007A UND 2007B). In Abb. 4-15 sind die wesentlichen Bestandteile einer DTS-Messeinheit – Glasfaserlichtleiter-Kabel und ein Sender-/Empfänger-System – dargestellt.

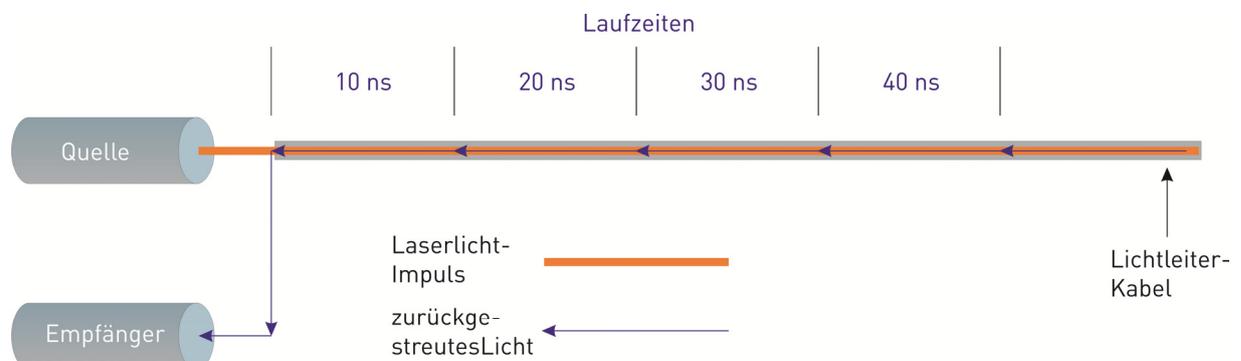


Abb. 4-15: DTS-Einheit bestehend aus Quelle, Empfänger und Lichtleiterkabel

Das Messverfahren basiert auf der OTDR-Methode (Optical Time Domain Reflectometry): Kurze Laserlichtimpulse werden in das Glasfaserkabel emittiert und an den Molekülen des Lichtwellenleiters gestreut. Gemessen wird die Intensität des rückgestreuten Lichts und, zur Ortsbestimmung, die Laufzeit zwischen Einkopplung des Lichtimpulses und dem Empfang des rückgestreuten Signals (PERZLMAIER 2007). Die bei der DTS-Messung erhaltenen Temperaturwerte beziehen sich nicht auf einen Punkt, sondern auf einen Faserabschnitt.

Hinsichtlich des rückgestreuten Lichts sind drei Wellenlängenbereiche zu unterscheiden (Abb. 4-16):

- › das Rayleigh-Band,
- › die Brillouin-Bereich und
- › die Raman-Bänder.

Rückgestreutes Licht mit Wellenlängen aus dem Bereich des Rayleigh-Bands weist die größte Intensität und die gleiche Wellenlänge wie das eingestrahlte Licht auf. Wellenlängen aus dem Brillouin-Bereich werden vornehmlich bei Dehnungsmessungen eingesetzt, während für Temperaturmessungen vor allem rückgestreutes Licht aus dem Raman-Stokes- und vor allem

dem Raman-Anti-Stokes-Band der Vorzug zu geben ist. In diesem Bereich ist die Intensität temperaturabhängig und erlaubt zusammen mit der Laufzeit die orts aufgelöste Temperaturbestimmung (DANNOWSKI 2002, PERZLMAIER 2007).

DTS-Messungen können heute an Kabellängen von mehr als 10.000 m ausgeführt werden. Die verwendeten Wellenlängen liegen zwischen 750 und 1.550 nm. Größere Wellenlängen sind ungünstig für die Ortsauflösung, kürzere bedingen größere Lichtverluste und damit geringere Reichweiten. Gleichzeitig streuen die Messergebnisse mit wachsender Kabellänge zunehmend stärker.

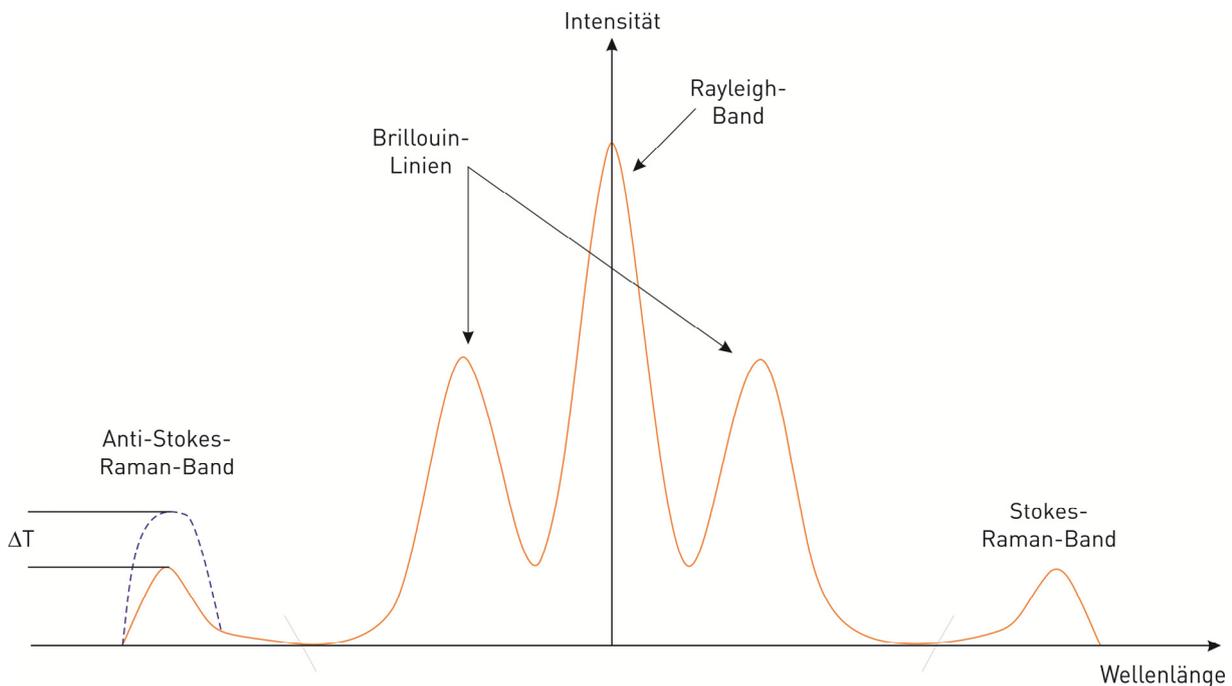


Abb. 4-16: Schematische Darstellung des Spektrums des rückgestreuten Lichts bei DTS-Messungen (nach LÜBBECKE & GRUNWALD 2004, HINRICHS 2007)

Da die Lichtintensität gerade im Stokes-Raman-Band relativ gering ist, erhöht sich die Messgenauigkeit mit der Messzeit. Auch die Faserlänge nimmt auf die Messgenauigkeit Einfluss: je kürzer die Faser, desto genauer das Messergebnis. Muss das Lichtleiterkabel im Rahmen der Verlegearbeiten durchtrennt und anschließend gespleißt werden, verringern die Spleißstellen ebenfalls die Messgenauigkeit (HURTIG ET AL. 1997, PERZLMAIER 2007).

Im Testfeld Herbrachhofen wurden insgesamt ca. 1.200 m Lichtleiterkabel verlegt (Abb. 4-18), die einbaubedingt an zehn Stellen gespleißt werden mussten. Das Kabel wurde am Vor- und Rücklauf von insgesamt fünf Erdwärmesonden mit Kabelbindern befestigt (Abb. 4-17). Aufgrund des geringen zulässigen Biegeradius der Glasfaser wurde das Kabel am Sondenfuß zum Schutz über eine dort montierte Umlenkrollen mit einem Durchmesser von 100 mm geführt.

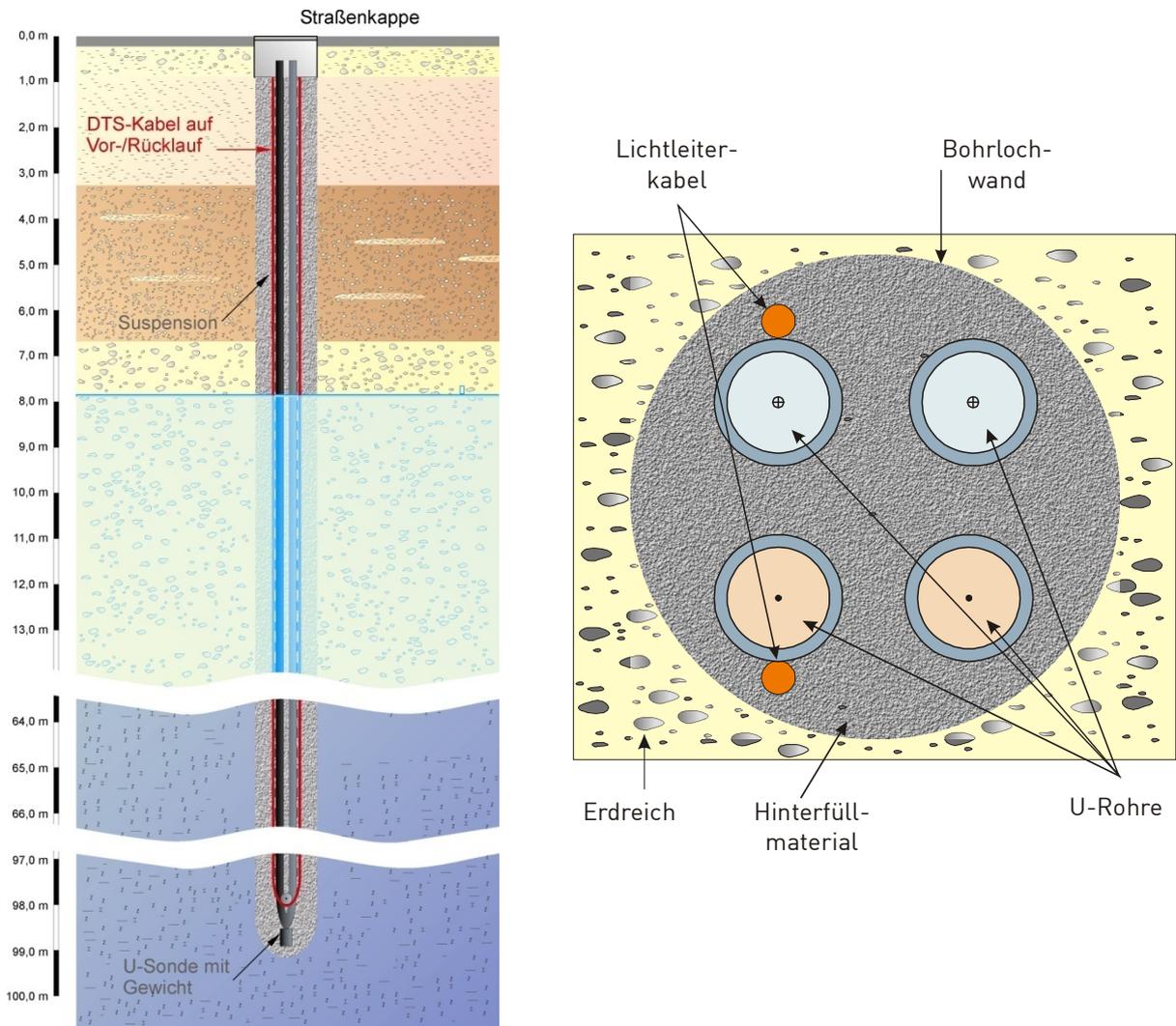


Abb. 4-17: Schemazeichnung einer Erdwärmesonde mit aufmontiertem Lichtleiterkabel

Das Messgerät von Typ TimePipe 100 der Fa. PicoQuant (Berlin) wurde im Labor-/Werkstattgebäude aufgebaut. Der Laser weist eine Wellenlänge von  $785\text{ nm}$  und damit eine sehr gute Ortsauflösung auf. Als Glasfasertyp wurde eine Gradienten-Index-Faser  $50/125\text{ }\mu\text{m}$  von der Fa. Geso GmbH (Jena) geliefert.

Dem Lichtleiterkabel ist eine Metrierung aufgeprägt. Alle relevanten Metermarken, etwa am jeweiligen Ein- und Auslass der einzelnen Sondenbohrungen, wurde nach dem Einbau mit einem Kältespray markiert und das Temperatursignal mit dem zugehörigen Datenpunkt abgeglichen. Jeder Datenpunkt steht für  $\sim 0,5\text{ m}$  Kabellänge. Die Messgenauigkeit schwankt nach Angaben der Fa. Geso in Abhängigkeit von der Messdauer zwischen  $2\text{ K}$  ( $1\text{ min}$  Messdauer) und  $0,1\text{ K}$  ( $20\text{ min}$  Messdauer).

#### 4. Die Testanlage Herbrachhofen

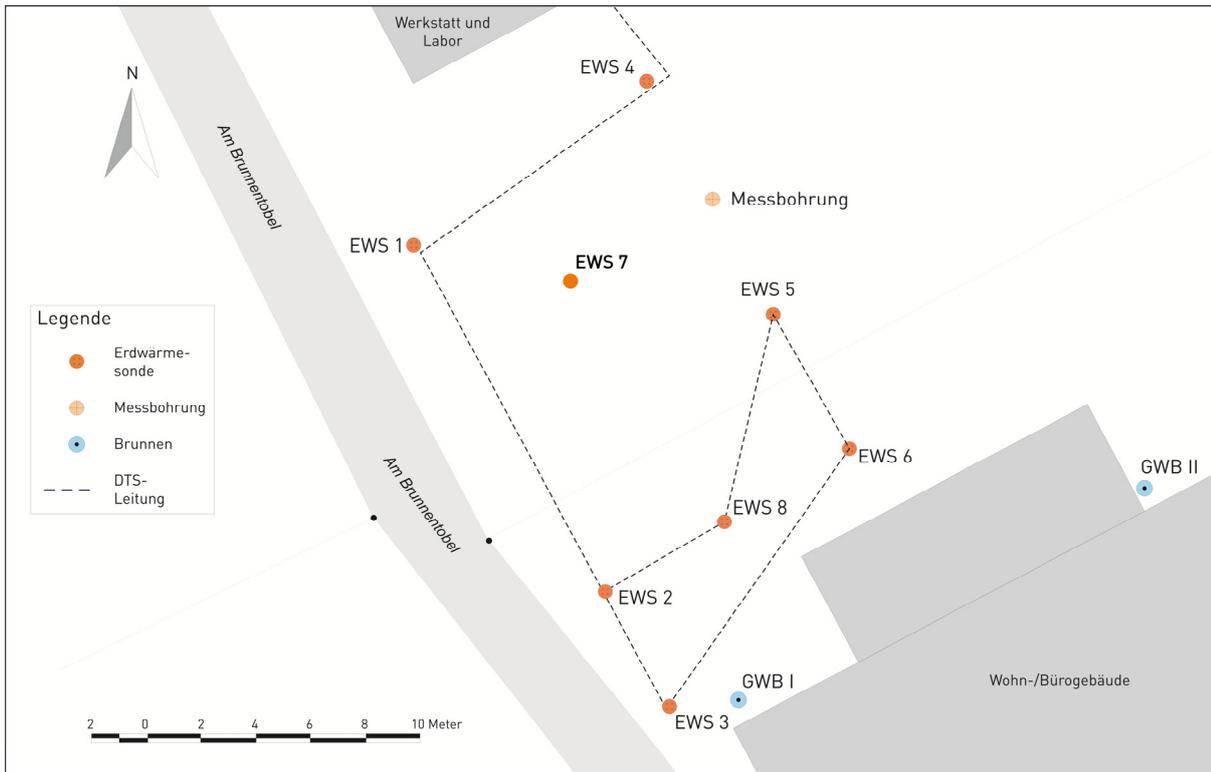


Abb. 4-18: Verlegungsschema Lichtleiterkabel

Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen im Betrieb können sehr kurze Einschaltzeiten aufweisen. Zur detaillierten Aufnahme der so den Erdwärmesonden aufgeprägten Kurzzeit-Temperatursignalen sind Platin-Widerstandsthermometer wegen ihrer höheren Genauigkeit bei kurzen Messintervallen besser geeignet als ein DTS-System. Es gibt sie in verschiedenen Bauformen (Dünnschichtsensoren, drahtgewickelte Glas- oder Keramikwiderstände etc.) und unterschiedlicher Messgenauigkeit. Der elektrische Widerstand der Platinelemente ist temperaturabhängig und verhält sich in kleinen Temperaturintervallen praktisch linear. Ihre Messgenauigkeit ist in der DIN EN 60751 (2009) bzw. IEC 60751 (2008) festgelegt. Dort ist der Klasse B eine Ungenauigkeit von max.  $0,3\text{ K}$  zugeordnet. Die in Herbrachhofen eingesetzten Sensoren vom Typ PT100 (Hersteller: Ahlborn, FP032201000) sind herstellereits als 1/3 Klasse B, das entspricht einer Messungenauigkeit von  $0,1\text{ K}$ , spezifiziert. Insgesamt wurden im Testfeld Herbrachhofen 17 PT100-Sensoren – drei in der Kernbohrung, die verbleibenden in verschiedenen Erdwärmesondenbohrungen – in unterschiedlichen Tiefen installiert. Dabei wurde jeweils ein Sensor auf dem Vorlauf, der andere auf dem Rücklauf desselben U-Rohres befestigt. Die Kalibrierung der Sensoren wurde im Institut für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe, vorgenommen (HUNN 2004). Die fest installierten Einheiten des Monitoring-systems wurden in der Bohrung EWS 1 durch ein Vollrohr (Außendurchmesser 1"), das bis zur Endteufe reicht, ergänzt. Dieses Rohr war für die Aufnahme eines 100 m langen DTS-Messkabels vorgesehen. Darüber hinaus wurde an der EWS 7 ein Bypass installiert, mit dem

Lichtleiter-Messungen im Arbeitsmedium der Erdwärmesonden während des Anlagenbetriebs ermöglicht werden sollten (Abb. 4-19).

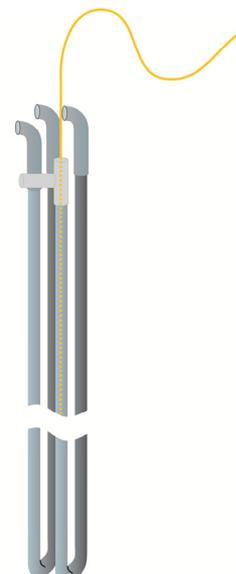
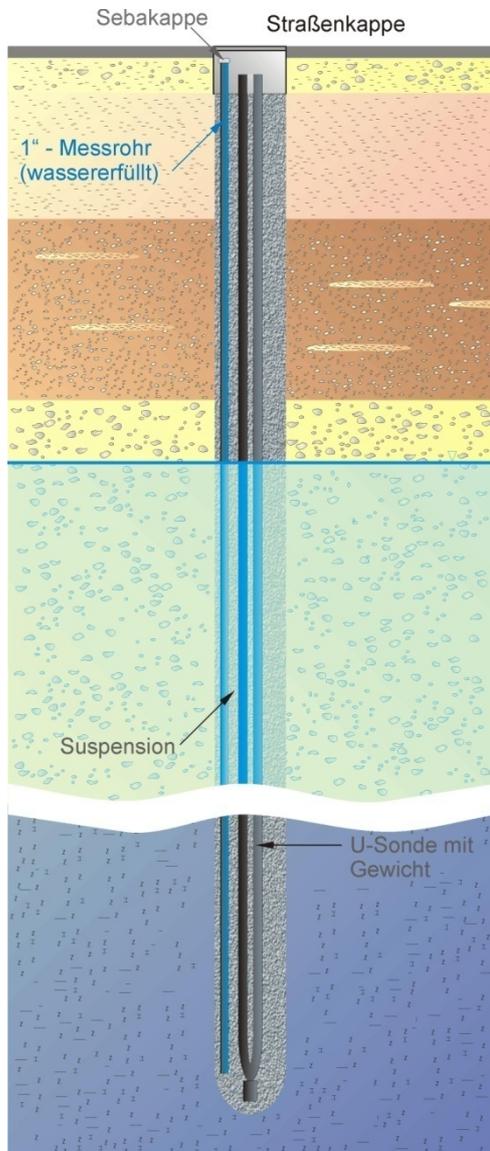


Abb. 4-19: Darstellung des Messrohres in EWS 1 (linke Teilabbildung) und des Bypass-Systems an EWS 7 (rechte Teilabbildungen)

Die relevanten Messeinrichtungen auf der Gebäudeseite betreffen die elektrische Aufnahme und die Laufzeiten der Wärmepumpe, die ca. wöchentlich protokolliert wurden. Zusätzlich wurde bei den Ablesungen die Temperatur des in die Wärmepumpe ein- und ausströmenden Fluids dokumentiert. In Tabelle 4-10 ist das Monitoringsystem des Testfelds kurz zusammengefasst, Abb. 4-20 gibt einen graphischen Überblick über das Sondenfeld und die Messeinrichtungen.

#### 4. Die Testanlage Herbrachhofen

Tab. 4-10: Überblick über das Monitoringsystem

Zuordnung	DTS	PT100-Sensor	1"-Rohr	Bypass
EWS 1	--	X	X	--
EWS 2	X	X	--	--
EWS 3	X	X	--	--
EWS 4	--	--	--	--
EWS 5	X	X	--	--
EWS 6	X	X	--	--
EWS 7	--	X	--	X
EWS 8	X	X	--	--
Kernbohrung	--	X	--	--
Wärmepumpe	Stundenzähler Laufzeit, Stromaufnahme, $T_{in}$ und $T_{out}$			

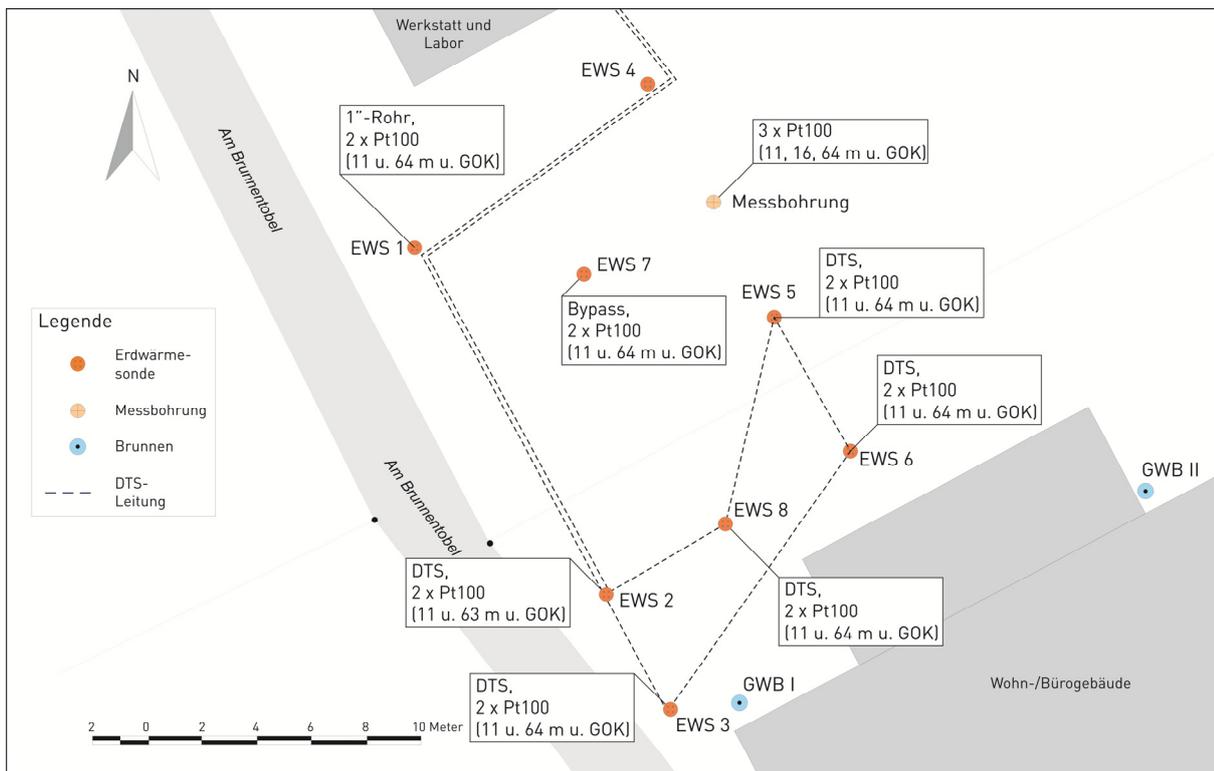


Abb. 4-20: Messausstattung des Erdwärmesondenfelds

## 5 MESSERGEBNISSE UND PARAMETERBESTIMMUNGEN

Am Standort in Herbrachhofen konnten mit den Bohrungen, vor allem aber auch mit dem DTS-System und den PT100-Sensoren eine große Zahl an Daten gewonnen werden. Nachfolgend werden relevante Messergebnisse und aus ihnen abgeleitete Parameter – wie etwa geothermischer Gradient, terrestrische Wärmestromdichte, aber auch das Lastprofil – vorgestellt.

### 5.1 Geologie und geothermische Gesteinsparameter

Die Doppelrotorkopftechnik mit Flügelmeißel und Luftspülung ist gerade im Molassegestein ein vergleichsweise schnelles Bohrverfahren, das recht feine Cuttings bei schwer einzuschätzender Aufstiegs geschwindigkeit der unterschiedlich großen Partikel mit der Luftspülung liefert. Dementsprechend ist die Gesteinsansprache und Tiefenzuordnung im Vergleich zu einer Kernbohrung nur mit Qualitätseinbußen zu leisten. Unter Berücksichtigung der beiden bereits früher am Standort abgeteufte Brunnenbohrungen und mit der Kernbohrung lässt sich die Geologie im Bereich des Testfelds jedoch sehr zuverlässig beschreiben und entspricht im Wesentlichen der in Kapitel 4 bei der Vorabschätzung angenommen Situation (Tab. 5-1).

Tab. 5-1: Generalisiertes geologisches Profil am Standort Herbrachhofen

0 m – 0,4 m	Anthropogene Auffüllung, Schotter und kiesige Sande
0,4 m – 1,3 m	Sand, kiesig, schluffig, gering tonig, z. T. Steine (Holozän)
1,3 m – 3,6 m	Ton, stark schluffig (Holozän)
3,6 m – 15,5 m	Kiessand, sehr gering schluffig, z. T. Steine (würmeiszeitliche Schotter)
15,5 m – 64,0 m	Wechselagerung von unterschiedlich verfestigten Ton-, Schluff- und Sandsteinen (Obere Süßwassermolasse)
64,0 m – 65,2 m	Kies, konglomeratisch, gering verfestigt (Obere Süßwassermolasse)
65,2 m – Endteufe	Wechselagerung von unterschiedlich verfestigten Ton- und Sandsteinen (Obere Süßwassermolasse)

Demnach stehen unter geringmächtiger anthropogener Auffüllung aus Schottern und Kiessand bis in eine Tiefe von 3,6 m schluffige Tone des Holozän an, die ihrerseits von würmeiszeitlichen kiesig-sandigen Schottern mit einer Mächtigkeit von etwa 12 m unterlagert werden. Ab 15,5 m unter Gelände wurden Einheiten der Oberen Süßwassermolasse erbohrt, die sich aus Wechsellagen von feineren und gröberen Partien aufbauen. Schluff- und sanddominierte Partien überwiegen, untergeordnet finden sich aber auch tonige Lagen. Bei 64 m unter Ansatzpunkt wurde in allen Bohrungen ein geringer verfestigtes Konglomerat mit einer Mächtigkeit von ca. 1,2 m aufgeschlossen (Abb. 5-1). Der würmeiszeitliche Kiessand zeigte bei den Bohrungen einen mit den beiden bereits früher eingerichteten Brunnen korrelierenden, frei aus-

## 5. Messergebnisse und Parameterbestimmungen

spiegelnden Grundwasserstand bei etwa 10,0 m unter Gelände (grundwasserfüllte Mächtigkeit ca. 5,5 m). HUNN (2004) interpretierte im Rahmen einer Diplomarbeit die gering verfestigte Konglomeratlage im Teufenintervall von 64 bis 65,2 m unter Ansatzpunkt ebenfalls als Grundwasserleiter, während das Bohrmeisterprotokoll zur Kernbohrung hier keine relevanten Wassergehalte dokumentiert.

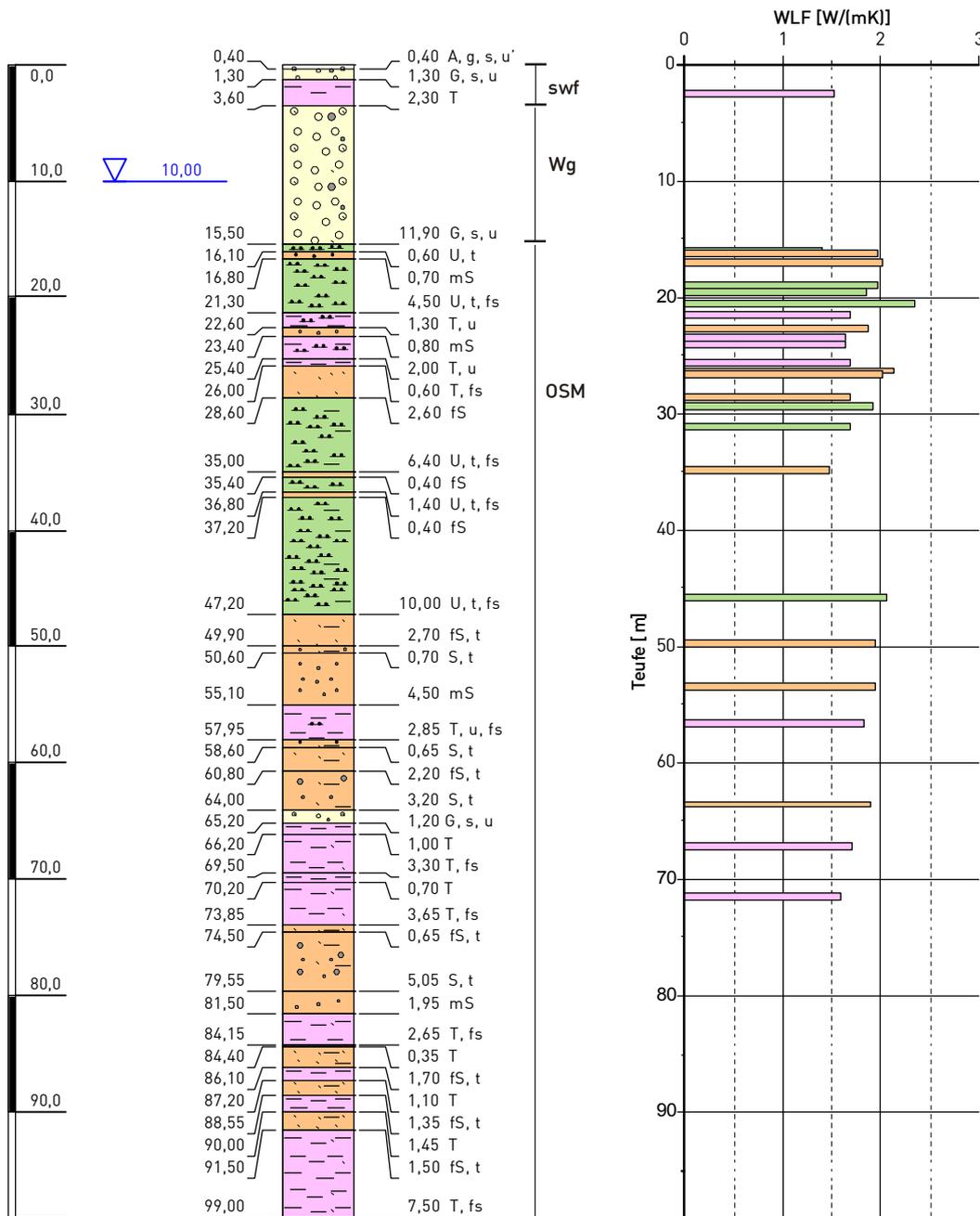


Abb. 5-1: Profil der Kernbohrung und Wärmeleitfähigkeitsmessungen (nach HUNN 2004)

Während der Herstellung der Kernbohrung wurden aus verschiedenen Tiefen Proben entnommen und im Labor der Angewandten Geologie der Universität Karlsruhe auf ihre Wärme-

leitfähigkeit untersucht. Die Messungen wurden mit einem Gerät der Firma Applied Precision (Bratislava) vom Typ Isomet 2104 durchgeführt (HUNN 2004). Die Messgenauigkeit beträgt im Bereich von 0,7 bis 6,0  $W/(m \cdot K)$  nach Herstellerangaben ca. 10 % des Messwerts. Die Messergebnisse und die Zuordnung der Proben zur Entnahmetiefe können Abb. 5-1 entnommen werden.

Proben aus dem Kiesmaterial im Hangenden wurden nicht im Labor untersucht. Setzt man hier der EED-Datenbank folgend einen Wert von 1,4  $W/(m \cdot K)$  für einen nicht vollständig und 1,8  $W/(m \cdot K)$  für einen vollständig wassergesättigten Kies an (HELLSTRÖM & SANNER 2000), ergibt sich das geometrische Mittel der Wärmeleitfähigkeit nach Wichtung über den jeweiligen Anteil am Bohrprofil zu  $1,68 \pm 0,17 W/(m \cdot K)$ .

Die Messergebnisse von HUNN (2004) decken sich nur ungenügend mit den in Kapitel 4 bereits vorgestellten Untersuchungen an Probenmaterial aus Gesteinen der Oberen Süßwassermolasse der Schweiz (LEU ET AL. 2006). Dort wurden durchweg nicht nur höhere Mittelwerte für die Wärmeleitfähigkeit bestimmt, die große Mehrzahl der Herbrachhofer Messwerte liegt auch nach Abzug von 10 % des Messwerts – darüber hinaus außerhalb der Bandbreite der Schweizer Untersuchungsergebnisse (Abb. 5-2).

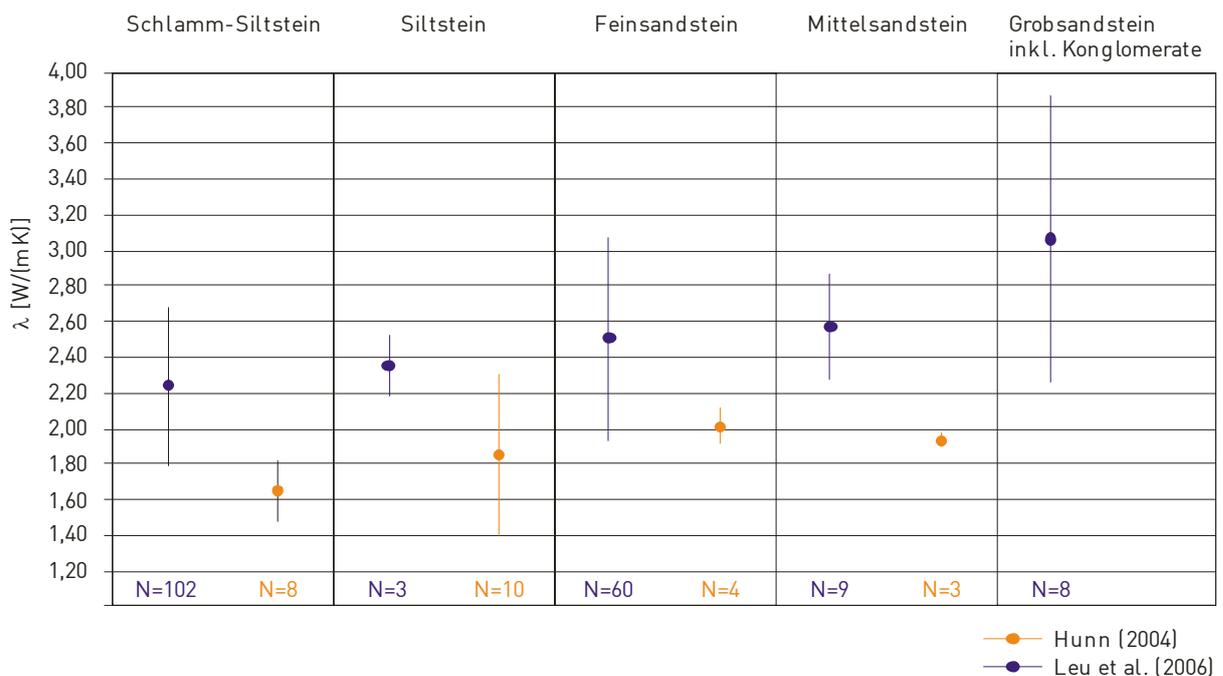


Abb. 5-2: Vergleich der Messergebnisse im Testfeld Herbrachhofen mit Schweizer Daten

HUNN (2004) berichtet in seiner Arbeit von Problemen bei der Anpassung der Bohrkernschnittflächen an die Messplatten im Zuge der Wärmeleitfähigkeitsmessungen. Lufteinschlüsse zwischen Messplatten und Probenmaterial führen jedoch wegen der vergleichsweise schlechten Wärmeleitfähigkeit von Luft zwangsläufig zu kleineren Messwerten und können eine Erklärung für die Diskrepanz zwischen den Messungen in Herbrachhofen und der Schweiz sein. Für alle nachfolgenden Berechnungen wurden daher die Mittelwerte der Schweizer Un-

tersuchung nach LEU ET AL. (2006) für das Molassegestein zusammen mit entsprechenden Daten aus der EED-Datenbank für die Lockersedimente im Hangenden mit dem jeweiligen Anteil der verschiedenen Gesteine am Bohrprofil gemittelt. Die so bestimmten Daten sind in Tab. 5-2 zusammengefasst.

Tab. 5-2: Mittelwerte geothermischer Parameter am Standort Herbrachhofen

Gestein \ Parameter	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/(m · K)]	Wärmekapazität $c_p$ [J/(kg · K)]	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperaturleitfähigkeit <sup>1)</sup> $a$ [m <sup>2</sup> / s]
Kiessand, feucht	1,4	600	1.700	$1,37 \cdot 10^{-6}$
Ton, feucht	1,8	900	1.800	$1,11 \cdot 10^{-6}$
Kiessand, gesättigt	1,8	1.000	1.800	$1,00 \cdot 10^{-6}$
Tonstein	2,25	864	2.436	$1,07 \cdot 10^{-6}$
Siltstein	2,36	882	2.527	$1,06 \cdot 10^{-6}$
Feinsandstein	2,52	973	2.498	$1,04 \cdot 10^{-6}$
Mittelsandstein	2,58	1.022	2.425	$1,04 \cdot 10^{-6}$
Mittelwerte	2,3	902	2.365	$1,08 \cdot 10^{-6}$

1) berechnet nach Gl. 3.04

## 5.2 DTS- und PT100-Temperaturmessungen

Insgesamt wurden während der Messungen im Testfeld Herbrachhofen mehrere Millionen Einzeltemperaturdaten gewonnen. Während die PT100-Messungen mit unwesentlichen Unterbrechungen vom Dezember 2003 bis September 2005 vorgenommen wurden, liegen DTS-Daten für den Zeitraum Dezember 2003 bis Februar 2005 vollständig, bis September 2005 in Auszügen vor. Die erste Messung mit dem DTS-System erfolgte am 18.12.2003. Die Erdwärmesonden waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Betrieb genommen worden und die Gräben für die horizontalen Anbindungsleitungen noch nicht wieder verfüllt. Der Witterung entsprechend zeigt diese Stichtagsmessung daher bei ca. 225 m, 425 m, 625 m, 825 m und 1.025 m Lauflänge vergleichsweise deutlich niedrigere Temperaturen für das in den Leitungsgräben freiliegende Kabel. Dazwischen sind die unmittelbar auf dem Vor- und Rücklauf der Erdwärmesonden EWS 2, EWS 3, EWS 8, EWS 6 und EWS 5 gemessenen Temperaturen zu erkennen (Abb. 5-3). Vorbehaltlich des oberflächennächsten Bereichs mit dem freiliegenden Kabel bilden die Messungen im Dezember 2003 die ungestörten Untergrundtemperaturen bis in eine Tiefe von knapp 100 m ab. Ein relevanter Einfluss durch Konvektion innerhalb der

wassergefüllten Sondenrohre kann wegen der geringen Rohrdurchmesser weitgehend vernachlässigt werden. Auch ist zu erwarten, dass Störungen des natürlichen Temperaturfelds durch die bereits einige Tage zurückliegenden Bohrarbeiten zwischenzeitlich abgeklungen waren. In Abb. 5-3 ist aber auch eine mit zunehmender Lauflänge des Lichtwellenleiterkabels steigende Streuung der Messwerte erkennbar, die im direkten Vergleich der Temperatur-/Tiefenprofile von EWS 2 und EWS 5 noch deutlicher werden (Abb. 5-4).

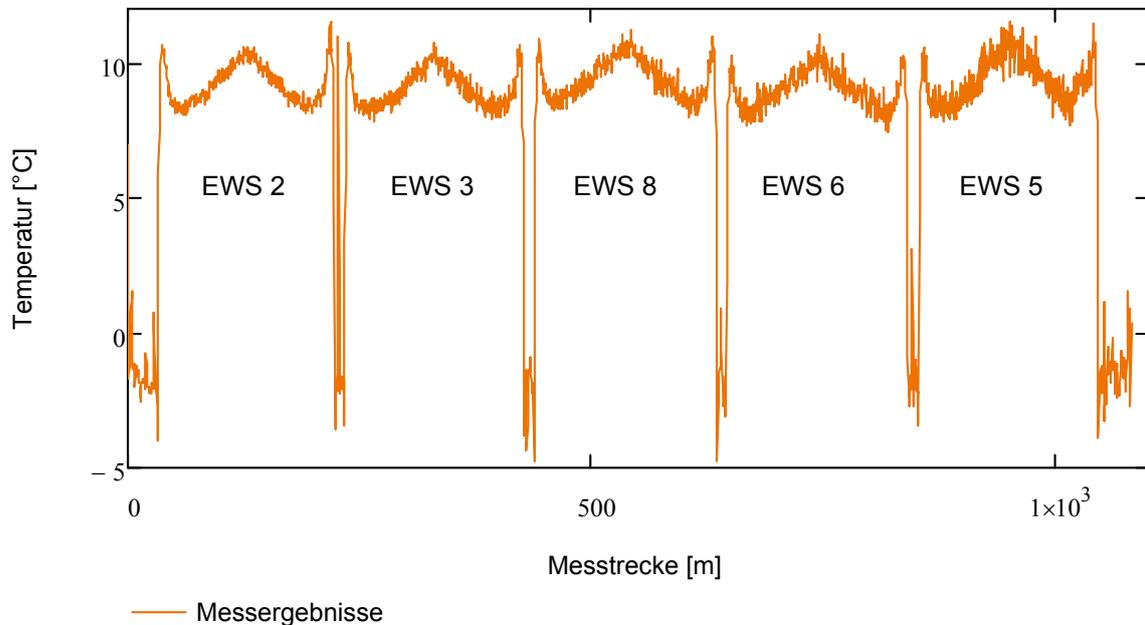


Abb. 5-3: Messung über die gesamte DTS-Kabellänge

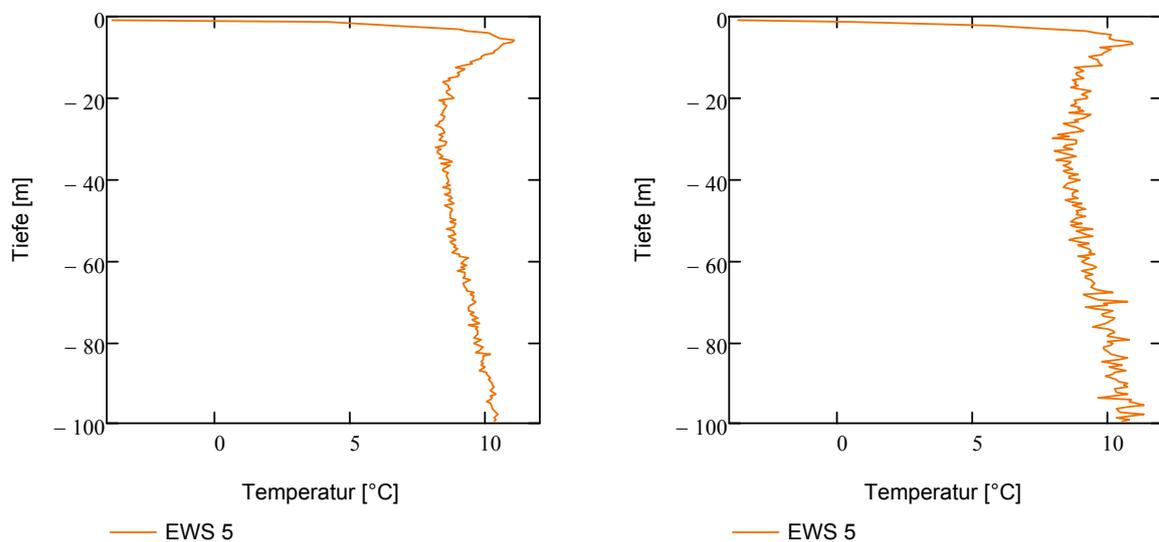


Abb. 5-4: Messwerte EWS 2 und EWS 5

### 5.2.1 Fehlerbetrachtung und Plausibilitätskontrolle der DTS-Messungen

Die von EWS 2 zu EWS 5 deutlich steigende Streuung der Messwerte lässt sich auch statistisch zeigen (Abb. 5-5) und belegt die Notwendigkeit einer Fehlerbetrachtung der DTS-Messwerte.

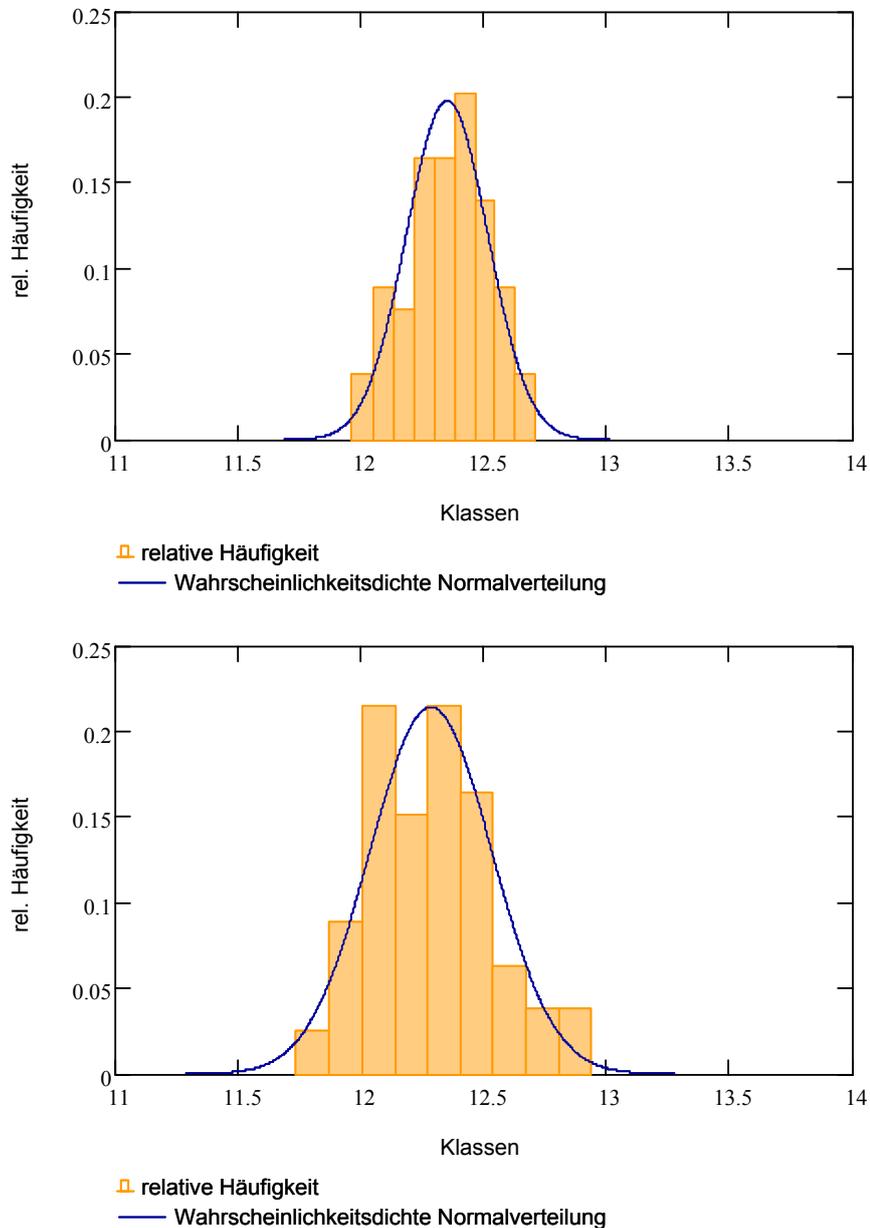


Abb. 5-5: Klassenbezogene relative Messwertshäufigkeit am Sondenfuß (oben EWS 2, unten EWS 5)

Bezogen auf die Messergebnisse in 99 m Tiefe, also dem Fuß der Erdwärmesonden, steigen die Werte für die Standardabweichung  $\sigma_T$  von 0,163 bei EWS 2 auf 0,258 bei EWS 5 (Tab. 5-3). Es wird zudem deutlich, dass gerade zwischen den beiden Erdwärmesonden 6 und 5 die

Streuung besonders stark zunimmt. Der Grund hierfür ist möglicherweise in einer schlechter ausgeführten Spleißverbindung des Messkabels zwischen diesen beiden Bohrungen zu vermuten. Die Messunsicherheit  $\Delta T$  bei einem Vertrauensniveau von 99% schwankt, abgesehen von der Messstrecke in der Erdwärmesonde 5, um 0,05 K und liegt damit noch unter dem Wert von  $\sim 0,1 K$ , den die Fa. PicoQuant für eine zwanzigminütige Messperiode für das DTS-Gerät vorgibt und kann bei Berücksichtigung der Messperiode vernachlässigt werden.

Tab. 5-3: Fehlerrechnung für die Messergebnisse mit dem DTS-Kabel

Erdwärmesonde	Tiefe unter GOK	$\bar{T}$	$\sigma_T$	$\Delta T$ bei 68%	$\Delta T$ bei 95%	$\Delta T$ bei 99%
EWS 2	1 m	-4,242	1,271	0,141	0,281	0,373
EWS 2	10 m	12,432	0,196	0,022	0,043	0,057
EWS 2	20 m	10,787	0,191	0,021	0,042	0,056
EWS 2	30 m	10,552	0,172	0,019	0,038	0,050
EWS 2	40 m	10,756	0,174	0,019	0,039	0,051
EWS 2	50 m	11,059	0,182	0,020	0,040	0,053
EWS 2	60 m	11,277	0,167	0,019	0,037	0,049
EWS 2	70 m	11,542	0,170	0,019	0,038	0,050
EWS 2	80 m	11,824	0,177	0,020	0,039	0,052
EWS 2	90 m	12,228	0,152	0,017	0,034	0,045
EWS 2	99 m	12,358	0,163	0,018	0,036	0,048
EWS 3	99 m	12,360	0,186	0,021	0,041	0,055
EWS 8	99 m	12,401	0,189	0,021	0,042	0,055
EWS 6	99 m	12,240	0,202	0,022	0,044	0,059
EWS 5	99 m	12,288	0,258	0,029	0,057	0,076

In Tabelle 5-3 ist darüber hinaus die überdurchschnittlich kräftig ausgeprägte Streuung der Messwerte in einem Meter Tiefe auffällig. Sie ist darin begründet, dass das Messkabel hier, praktisch ungeschützt im nicht verfüllten Graben liegend, dem witterungsbedingten Tages-temperaturgang unterlag und eine entsprechende Drift mit der Zeit zeigt (Abb. 5-6). In Abb. 5-7 sind vor- und rücklauforientierte Ergebnisse der DTS-Messung an EWS 2 in einer Tiefe von 64 m unter Gelände – und damit exakt im gleichen Tiefenniveau mit dem dort montierten PT100-Fühler – während des Anlagenbetriebs dargestellt. Die PT100-Messdaten wurden – da hier im fünfminütigen Rhythmus gemessen wurde – der Übersichtlichkeit halber mit dem Verfahren der gleitenden Mittelwerte geglättet. Die Abbildung zeigt, dass mit dem DTS-System auch bei Mittelwertbildung über einen fünfminütigen Messzeitraum der Temperaturverlauf grundsätzlich noch recht gut abgebildet werden kann.

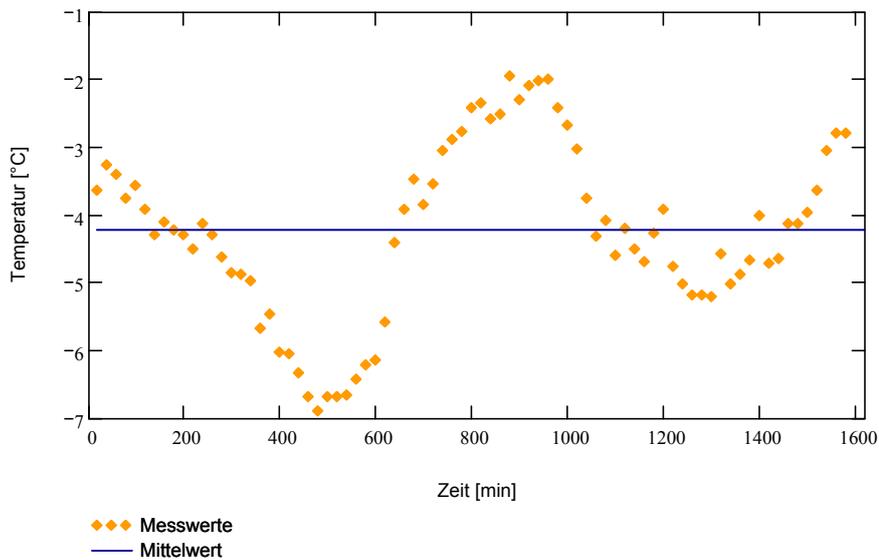


Abb. 5-6: Zeitlicher Gang der Messwerte EWS 2 (1 m Tiefe, freiliegend)

Wird die Differenz aus den Messwerten für die DTS- und PT100-Messung auf dem Rücklauf (RL DTS – RL PT100) gebildet, zeigt sich jedoch auch, dass das DTS-System bezogen auf die Messgenauigkeit bei kurzen Messintervallen, wie erwartet, nicht mit den PT100-Fühlern – in Abb. 5-7 als gleitendes Mittel (25 Perioden) dargestellt – konkurrieren kann. Zugleich zeigt sich aus der Differenz der DTS-Messergebnisse für Vorlauf und Rücklauf in 64 m Tiefe (RL DTS – VL DTS) ein relativer Temperaturunterschied  $\Delta T$  von 1,8 (Ø) bzw. 3,3 K (max.).

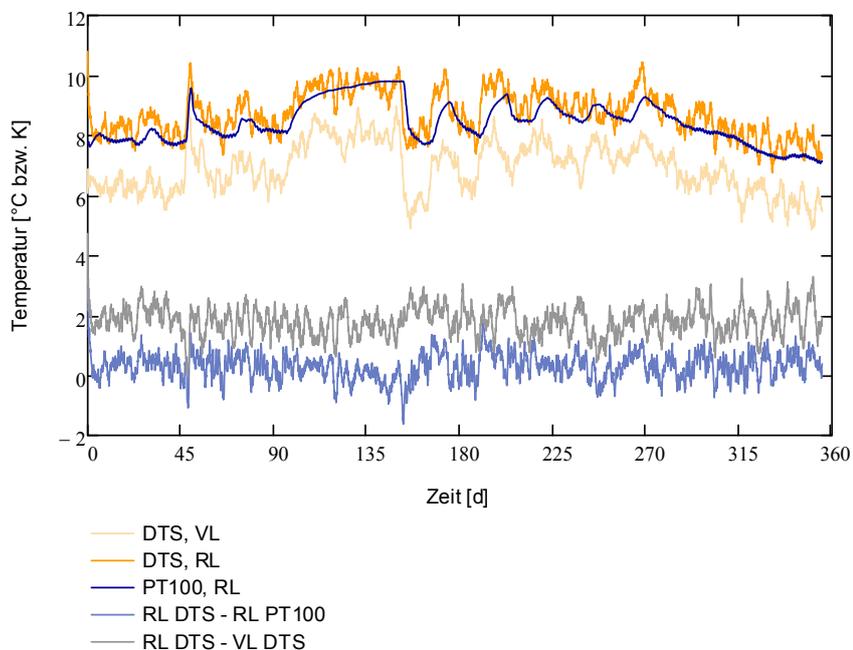


Abb. 5-7: Abgleich PT100- und DTS-Messungen

### 5.2.2 Ungestörte Temperatur, geotherm. Gradient und terrestr. Wärmestromdichte

Bei der Ermittlung des geothermischen Gradienten und der terrestrischen Wärmestromdichte wurden, um den Tagesgang und die jahreszeitbedingten Temperaturschwankungen auszuschließen, nur Messwerte ab einer Tiefe von 30 m unter Gelände berücksichtigt. In Abb. 5-8 sind links die Messergebnisse in den fünf mit dem DTS-Kabel ausgestatteten Erdwärmesonden und rechts die Ergebnisse der jeweils zugehörigen linearen Regressionen dargestellt.

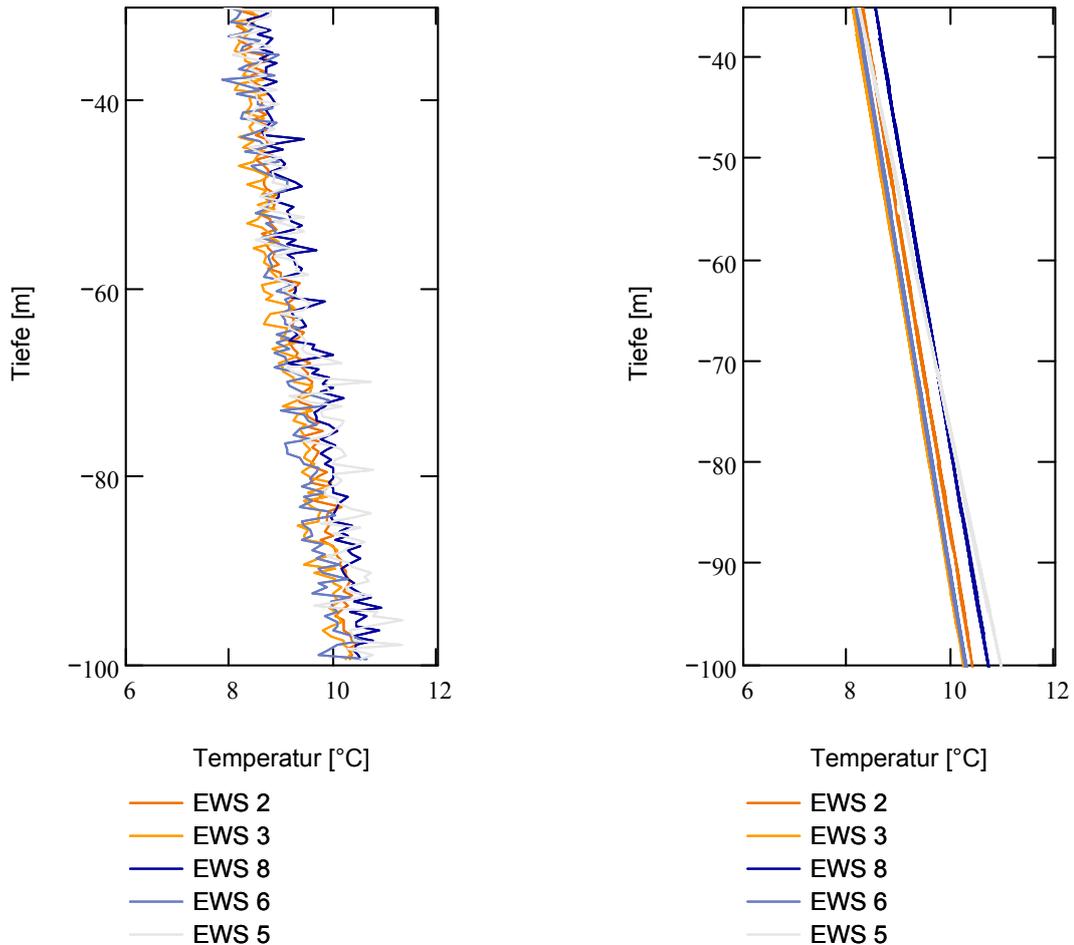


Abb. 5-8: Temperaturentwicklung mit der Tiefe (links Messwerte DTS, rechts lineare Regression, Messung vom 23.12.04)

Während die Regressionengeraden für die Erdwärmesondenbohrungen 2, 3, 8 und 6 nahezu identische Steigungen aufweisen, weicht EWS 5 hiervon deutlich ab und deutet so einen höheren geothermischen Gradienten an (Tab. 5-4). Da bereits bei der oben beschriebenen Fehlerrechnung die DTS-Ergebnisse für EWS 5 auffällige Abweichungen zeigte, bleibt sie daher bei der Ermittlung des geothermischen Gradienten  $G$  und der mittleren ungestörten Tempera-

## 5. Messergebnisse und Parameterbestimmungen

tur  $T_0$  bezogen auf die halbe Tiefe der Erdwärmesondenbohrungen bei 49,5 m sowie der terrestrische Wärmestromdichte  $q_{geo}$  unberücksichtigt (Tab. 5-4 und 5-5).

Tab. 5-4: Kennzahlen des ungestörten Untergrunds

Erdwärmesonde	Geothermischer Gradient (K/100 m)	Korrelationskoeffizient []	Mittl. ungestörte Temperatur $T_0 = T_{(z=49,5\text{ m})}$ [°C] <sup>1)</sup>	Terrestrische Wärmestromdichte $q_{geo}$ [W/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>
EWS 2	3,26	-0,977	9,11	0,075
EWS 3	3,28	-0,952	9,12	0,075
EWS 8	3,35	-0,957	9,16	0,077
EWS 6	3,24	-0,917	9,10	0,074
<i>EWS 5</i>	<i>4,21</i>	<i>-0,924</i>	<i>9,58</i>	<i>0,097</i>

<sup>1)</sup> gem. Gl. 3.01

Befreit um die Messwerte der EWS 5 ergibt sich der mittlere geothermische Gradient zu 3,3 K/100 m, die terrestrische Wärmestromdichte zu 0,075 W/m<sup>2</sup> und die mittlere ungestörte Untergrundtemperatur  $T_0$  bezogen auf die halbe Tiefe der Erdwärmesonden zu 9,1 °C. Dieser Wert deckt sich mit den Mittelwerten der DTS-Messung, die wenige Tage nach Einbau der Erdwärmesonden im Dezember 2003 aufgenommen worden sind und gegenüber dem berechneten Wert nach Gl. 3.01 auch den Bereich zwischen 1 und 30 m Tiefe berücksichtigen ( $T_0 = \overline{T_{(z)}}$  in Tab. 5-5). Bezogen auf die halbe Sondenlänge bei 49,5 m ergab sich das Mittel der Messwerte aus vier der fünf mit DTS-Kabeln ausgerüsteten Bohrungen dagegen zu 8,7 °C. In Tab. 5-5 sind die Messwerte zusammengestellt, Messungen an der EWS 5 sind bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

Tab. 5-5: Messergebnisse ungestörte Untergrundtemperaturen  $T_0$

Erdwärmesonde	$T_{(z=49,5\text{ m})}$ [°C]	$T_0 = \overline{T_{(z)}}$ [°C]
EWS 2	8,7	9,1
EWS 3	8,5	8,8
EWS 8	8,9	9,3
EWS 6	8,7	8,9
<i>EWS 5</i>	<i>9,0</i>	<i>9,3</i>
Mittelwert	8,7	9,0

### 5.2.3 Temperaturprofile und Inversionsberechnung

In Abbildung 5-9 ist das tiefenaufgelöste DTS-Messergebnis für eine Erdwärmesonde im Betrieb gezeigt. Vernachlässigt man die oberen, saisonal und vom lokalen Grundwasserleiter beeinflussten 20 m des Profils wird deutlich, dass sich die Temperaturwerte auf dem Rücklauf der Erdwärmesonde, also auf dem Weg aus der Tiefe zurück in Richtung Erdoberfläche, von einem Maximum von 10,6 °C bei 99 m auf einen Wert deutlich kleiner 10 °C zurück entwickeln. Dieses Verhalten entspricht den Modellvorstellungen, wie sie etwa bei AL-KHOURY ET AL. (2004) publiziert sind und findet seine Begründung einerseits in der thermischen Interaktion der einzelnen Erdwärmerohre untereinander, andererseits in der zur Oberfläche hin abnehmenden Untergrundtemperatur. Der Temperaturverlust beträgt in etwa 0,7 K und verringert die Leistung der Erdwärmesonde gegenüber einem verlustfreien Temperaturverlauf auf dem Rücklauf erheblich.

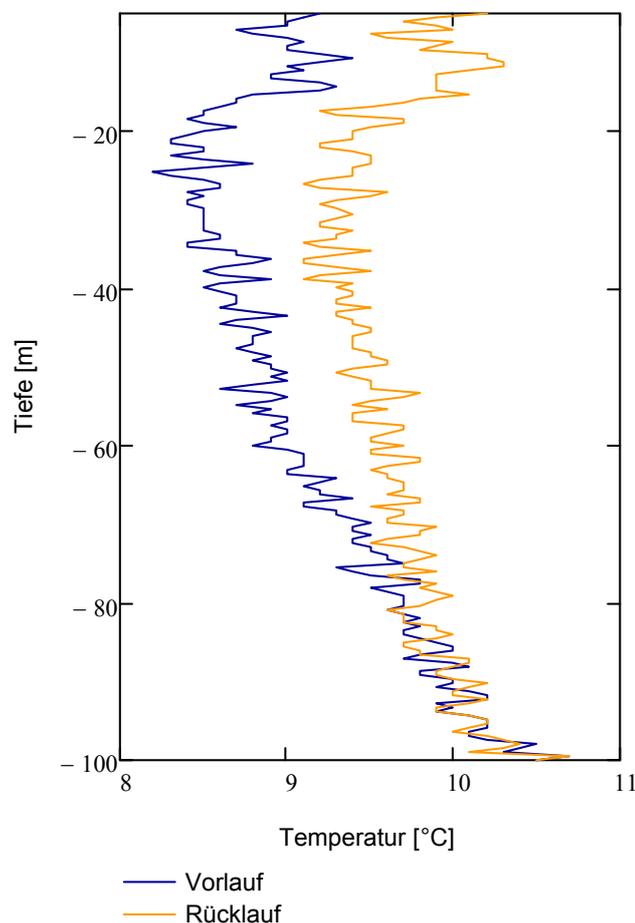


Abb. 5-9: DTS-Messung Vorlauf-/Rücklauftemperatur einer Einzel-EWS im Betrieb

Mit den Ergebnissen der DTS-Messung vom 23.12.2004 kann nicht nur ein ungestörtes Temperaturprofil bis in 100 m Tiefe aufgestellt werden. Zusätzlich eignet sich dieser Datensatz

zusammen mit dem in Kap. 3 beschriebenen Verfahren nach KASUDA (1965) zur Untersuchung des Einflusses des Erdwärmesondenbetriebs auf die Temperaturentwicklung.

Ein zentrales Problem bei dem Kasuda-Verfahren ist die ausreichend genaue Ermittlung lokaler Standortklimadaten. Abhilfe bietet ein Best-Fit-Verfahren, hier ein  $\chi^2$ -Test, der auf Gl. 3.03 angewendet wird. Im vorliegenden Fall wurde für die Temperaturleitfähigkeit  $a$  der Wert aus Tab. 5-2 eingesetzt, für  $t$ , dem Datum entsprechend, ein Wert von 353. Das Fitting ergab einen Wert von  $22,1 K$  für die Amplitude der Oberflächentemperatur  $\Delta T_{sur}$ . Im Vergleich mit den Werten der Wetterstation Bad Schussenried von  $22,55 K$  für 2004 ist dieser Wert plausibel. Die mittlere Jahreslufttemperatur wurde zu  $8,6^\circ C$  bestimmt. Auch dieser Wert liegt sehr nahe am Messwert der Wetterstation Bad Schussenried ( $8,58^\circ C$  für 2004). Das Fit-Ergebnis für  $\Delta t$  liegt bei 18 Tagen. LOOSE (2006) schlägt für diesen Phasenversatz als Mittelwert für Deutschland einen höheren Wert (30 Tage) vor. Graphisch ist das Ergebnis des Fittings in Abb. 5-10 (linke Teilabbildung) dargestellt. Mit den Parametern aus der Best-Fit-Untersuchung können Prognosen für den saisonal bedingten Temperaturgang am Standort Herbrachhofen entwickelt werden. Gemessene Abweichungen von den prognostizierten Profilen sind dann im Wesentlichen dem Anlagenbetrieb geschuldet. In der rechten Teilabbildung von Abb. 5-10 sind die DTS-Messwerte für den 15.08.2005 gegen die Prognose nach dem Kasuda-Verfahren graphisch aufbereitet. Da der Untergrund zu diesem Zeitpunkt bereits von der Erdwärmesondenanlage, wenn auch nur in recht bescheidenem Umfang, thermisch beansprucht worden war, erklären sich die vergleichsweise niedrigeren Messwerte bis in eine Tiefe von etwa  $8 m$ . Im tieferen Bereich bis  $15,5 m$  ist der Kiesaquifer zwischengeschaltet. Der Kurvenverlauf kann hier so interpretiert werden, dass der Einfluss des Grundwasserstroms auf die Untergrundtemperaturen zu diesem Zeitpunkt offensichtlich ausreicht, um die Temperaturen im Vergleich mit dem oberflächennäheren Abschnitt des Profils auf einem höheren Niveau zu halten.

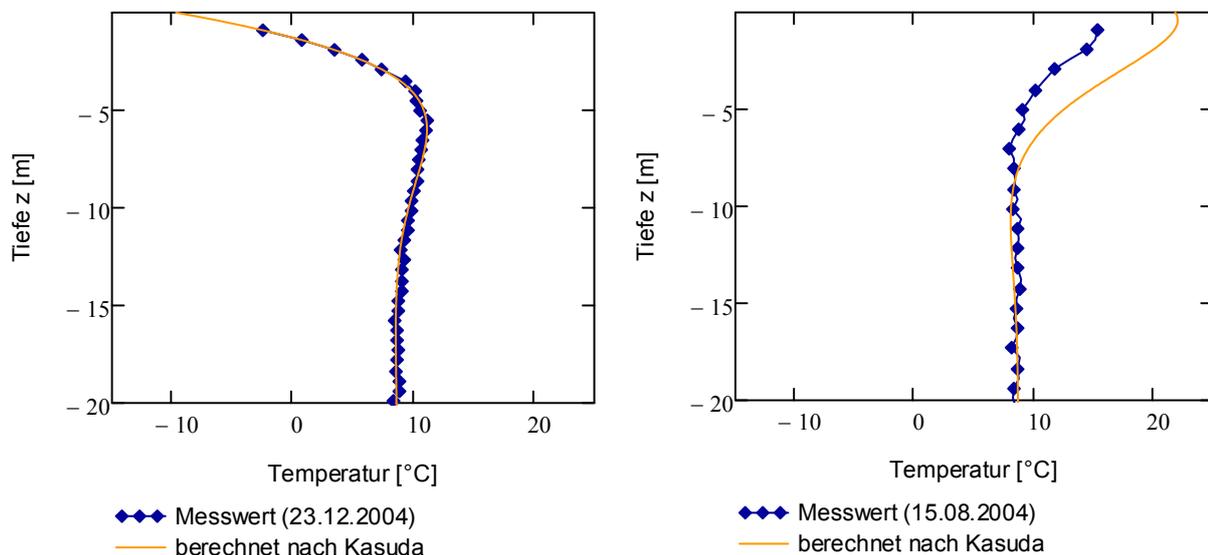


Abb. 5-10: Temperaturprofile und Berechnungsergebnissen nach KASUDA (1965)

Mit dem Kasuda-Verfahren kann über die Profilbetrachtung hinaus die Temperaturentwicklung für das Jahr 2004 in verschiedenen Tiefen am Standort Herbrachhofen weiter detailliert werden. Die entsprechenden Temperaturgänge sind in Abb. 5-11, beginnend mit dem 23.12.2004 (Tag 1) und endend mit dem 29.11.2006 (Tag 614), graphisch aufbereitet. Es zeigt sich, dass bereits in einer Tiefe von 11 m die jahreszeitbedingte Temperaturänderung nur sehr gering ausgeprägt ist, bei 16 m unter Gelände praktisch vernachlässigt werden kann.

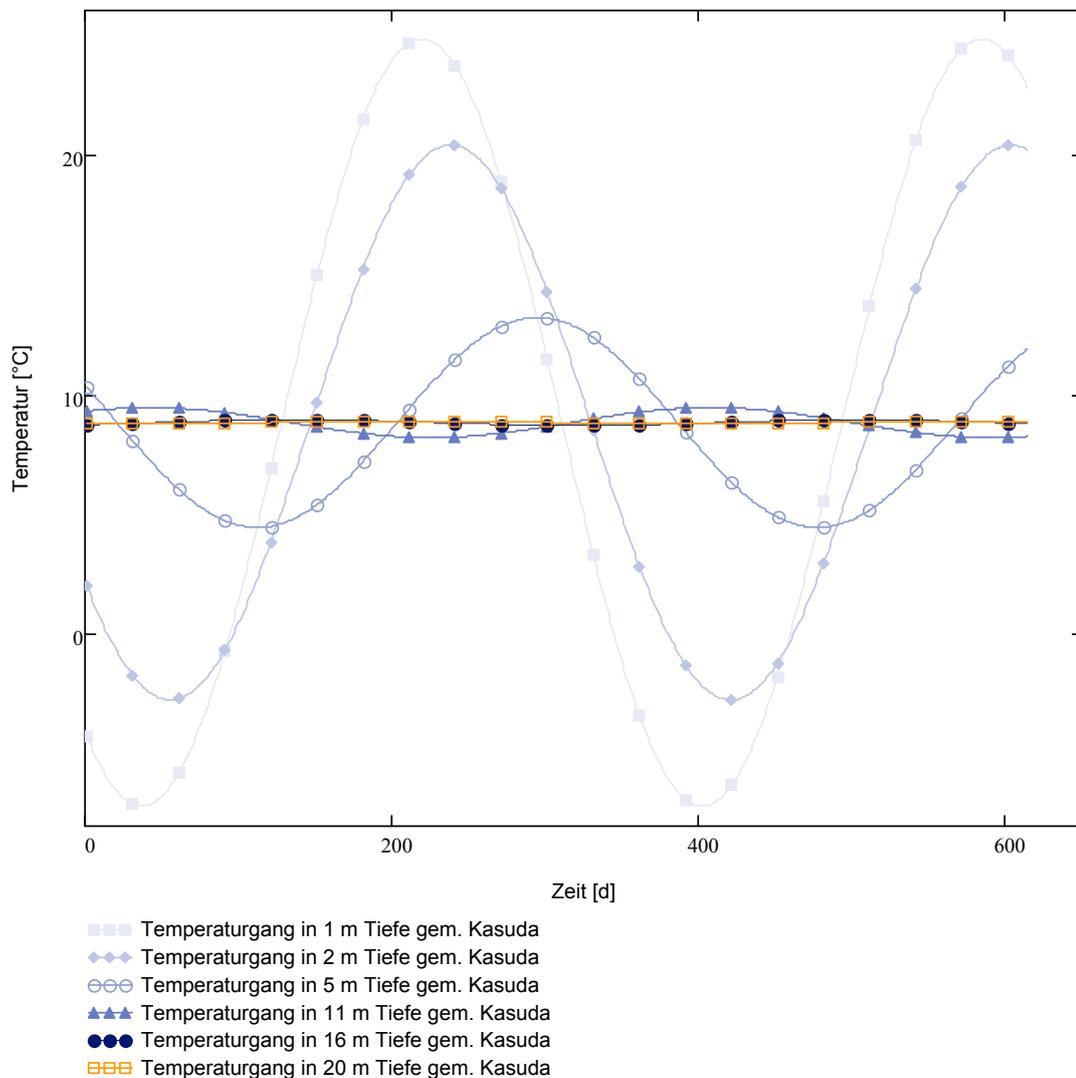


Abb. 5-11: Temperaturgang am Standort Herbrachhofen in Abhängigkeit von der Jahreszeit

#### 5.2.4 Grundwassereinfluss auf die Temperaturentwicklung

Im direkten Abstrom und knapp 5 m Entfernung zur EWS7 wurde eine Messbohrung abgeteuft, die nicht mit einer Doppel-U-Sonde ausgerüstet ist. Vielmehr wurde die Bohrung nach der Kernaufnahme mit PT100-Sensoren ausgestattet und anschließend mit einem Baustoff hohlraumfrei nach dem Contractor-Verfahren verschlossen. Die Einbautiefe der Messfühler und ihre Position zum Kiessand-Grundwasserleiter kann Tab. 5-6 entnommen werden.

Tab. 5-6: PT100-Sensoren in der Messbohrung mit Lage zum Grundwasserleiter

Tiefe unter Gelände	Lage zum Kiessandgrundwasserleiter
11 m	unterhalb des Grundwasserspiegels
16 m	0,5 m unterhalb der Sohlschicht
64 m	~ 36 m vertikale Distanz zur Sohlschicht

In Abb. 5-12 ist die von den PT100-Sensoren in der Kernbohrung aufgezeichnete Temperaturentwicklung dargestellt. Der erste Tag auf der Zeitachse entspricht dem 23. Dezember 2003, an dem die DTS-Einheit die Messungen aufgenommen hat, der letzte Messtag (Tag 614) dem 29. August 2005 und damit dem Ende der DTS-Aufzeichnungen. Zwischen dem 23. März 2004 und dem letzten Messtag konnte mit den PT100-Sensoren ein nahezu lückenloser Temperaturgang aufgezeichnet werden (Abb. 5-12). Gut erkennbar ist ein Temperaturrückgang um 1,6 K resp. 3 K an den Messpunkten in 16 m bzw. 64 m Tiefe bis in den Sommer 2005. Dieser Temperaturrückgang in einer Entfernung von 5 m zum Erdwärmesondenfeld ist unerwartet hoch und spricht für eine übermäßige thermische Belastung des Untergrunds während der Heizperiode. Die Temperaturen in 11 m Tiefe (grundwassererfüllter Abschnitt) zeigen diesen Trend dagegen nur undeutlich und schwanken zwischen 9,2 und 10,4 °C.

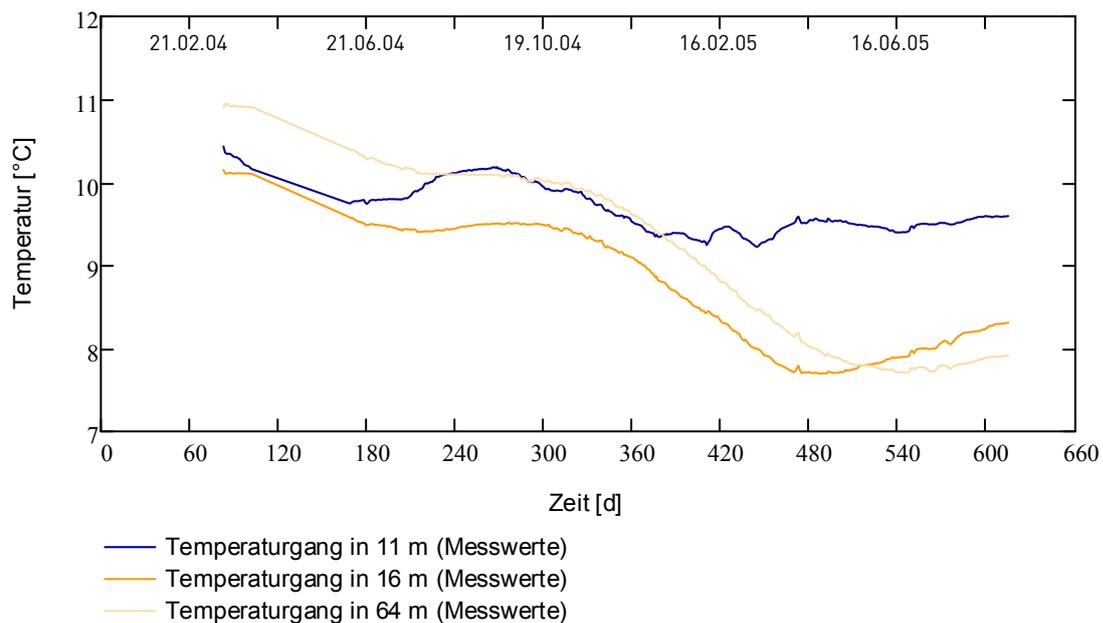


Abb. 5-12: Temperaturgang in der Messbohrung (Messtag 103 bis 167 interpoliert)

Ab etwa Oktober 2004 nehmen die Temperaturen an allen Messpunkten zunächst kontinuierlich ab. In 16 m Tiefe erreichen die Temperaturen Mitte April 2005 ihren Tiefpunkt, in 64 m Tiefe etwa zwei Monate später. Die Temperaturen im Bereich des Grundwasserleiters bleiben dagegen ab etwa Ende Dezember 2004 nahezu konstant. In 64 m Tiefe, und damit weitab vom

Einfluss des lokalen Grundwasserleiters, fallen die Temperaturen über die Heizperiode 2004/05 am stärksten ab und zeigen erst wieder ab Mitte Juni 2005 (ca. 540. Messtag) einen leicht ansteigenden Trend. Eine nachhaltige thermische Erholung des Untergrunds ist hier aus den Messwerten nur schwach zu erkennen. Im Bereich des Grundwasserleiters bei 11 m ist aus den Messdaten für den Sommer 2005 scheinbar ebenfalls kaum eine Erholung zu erkennen, während in 16 m Tiefe ein vergleichsweise kräftiger Temperaturanstieg zu dokumentieren ist.

Um den Einfluss des Erdwärmesondenfelds auf die Temperaturentwicklung im Bereich der in Mess-/Kernbohrung – und damit in Abstromrichtung in ca. 5 m Entfernung – in den drei genannten Tiefen direkt miteinander vergleichen zu können, sind zunächst die beiden Messreihen in 11 und 16 m Tiefe um den saisonalen Temperaturgang zu befreien. Hierzu kann das ebenfalls das Verfahren nach KASUDA (1965) herangezogen werden. Anschließend ist von den Werten der drei Messreihen noch die jeweilige ungestörte Temperatur abzuziehen. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in Abb. 5-13 gezeigt. Es wird deutlich, dass die Amplitude der vom Erdwärmesondenfeld induzierten Temperaturänderungen mit der Tiefe zunehmend geringer ausfällt. Zudem deutet sich ein Phasenversatz an. Gleichzeitig zeigt sich vor allem aber, dass sich die Temperaturbeeinflussung im Bereich des Grundwasserleiters in einem relativ engen Band bewegt ( $\pm 1\text{ K}$ ) und sich der Untergrund am Messpunkt im August 2005 von der vorangegangenen Heizperiode vollständig erholt hat. In der vom Grundwasserleiter unbeeinflussten Tiefe von 64 m hat sich der Untergrund dagegen zum selben Zeitpunkt bereits um etwa 3 K abgekühlt und zeigt nur eine mäßige Tendenz sich zu erholen. Knapp unter der Sohlfläche des Grundwasserleiters in 16 m Tiefe ist eine etwas stärkere Temperaturerholung zu dokumentieren, allerdings fehlen auch hier Ende August 2005 noch 1,6 K gegenüber der ungestörten Temperatur in diesem Niveau vor Inbetriebnahme der Erdwärmesondenanlage.

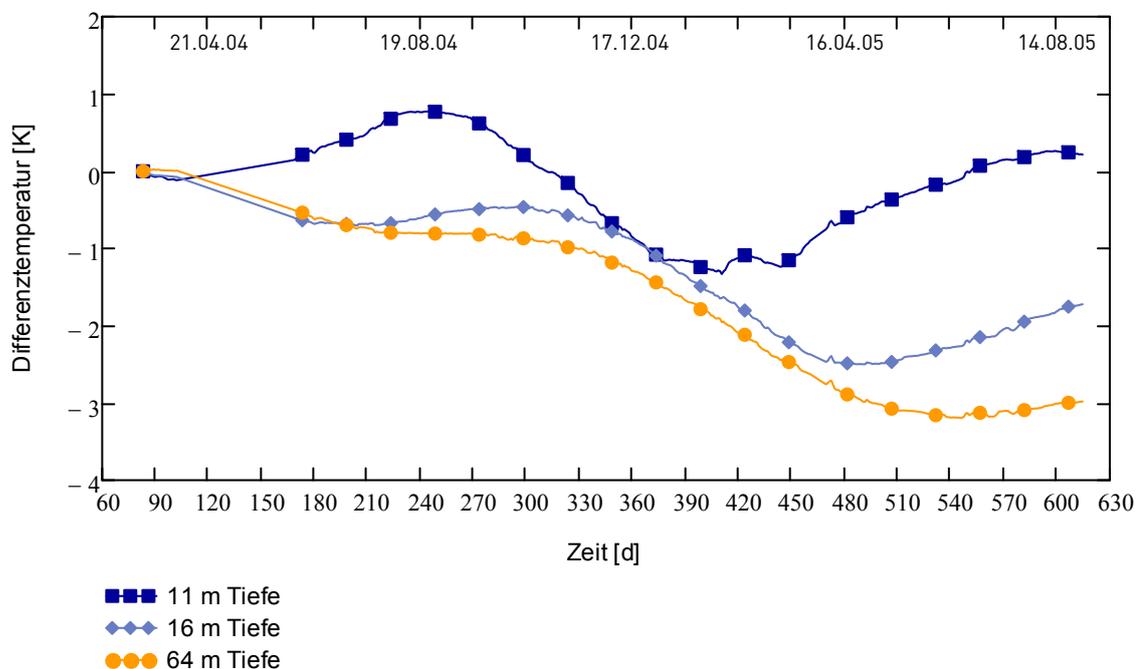


Abb. 5-13: Differenztemperaturen PT100-Sensoren in der Kernbohrung

Auch anhand der DTS-Messungen lässt sich der Einfluss des quartären Grundwasserleiters auf die Temperaturentwicklung im Untergrund dokumentieren. Hierzu können über definierte Tiefenintervalle die Temperaturmittelwerte gebildet und einander gegenübergestellt werden. In Abb. 5-14 sind die mittleren Temperaturen für die beiden grundwasserfreien Tiefenintervalle von 0 – 11 m bzw. von 16 – 99 m und für das Tiefenintervall von 11 – 16 m, in dem sich der Aquifer befindet, für das erste Halbjahr der Messkampagne gegen die Zeit abgetragen.

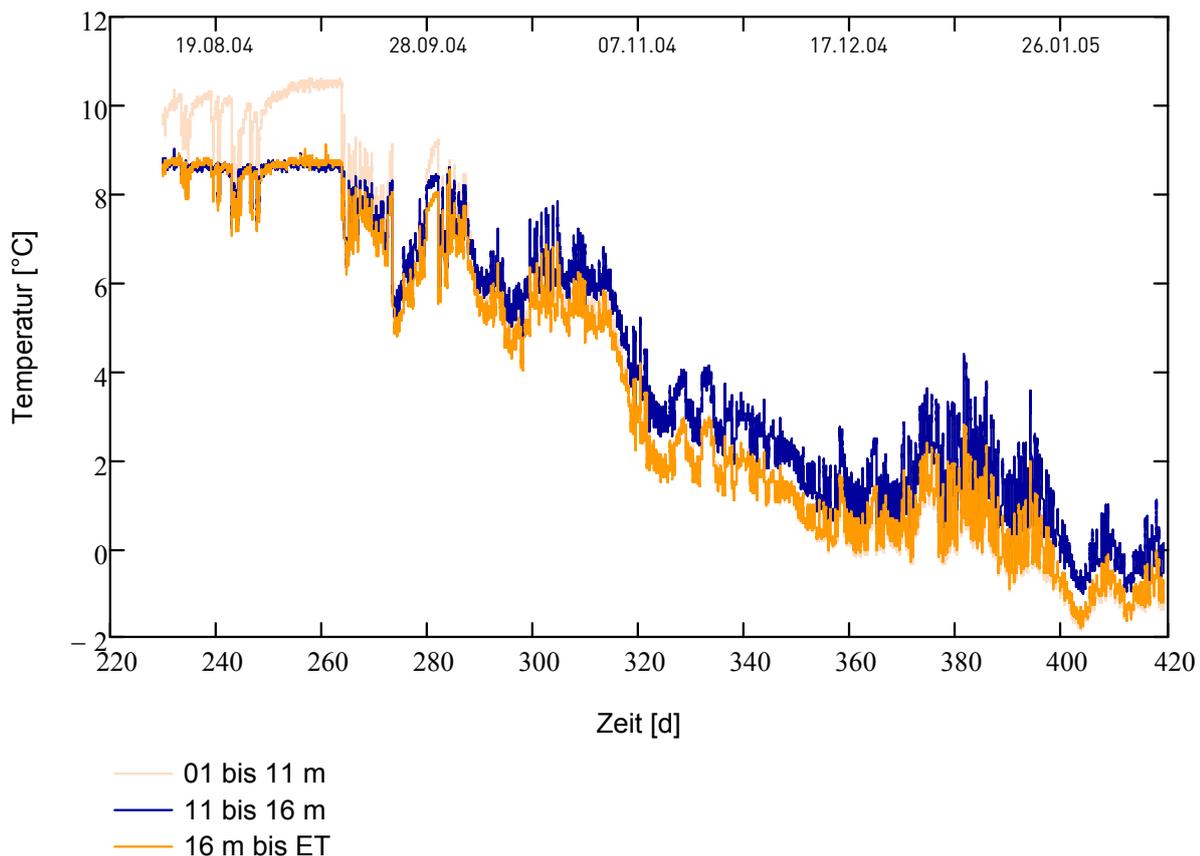


Abb. 5-14: Mittlere Temperaturen in definierten Tiefenintervallen (EWS 2)

Während die sand- und orangefarbenen Kurven für die grundwasserfreien Tiefenintervalle zu Beginn des Anlagenbetriebs in Herbrachhofen noch ca. 1,5 K auseinanderliegen, nähern sie sich schon während der Herbstmonate einander an. Bereits kurz nach Beginn der Heizperiode im Oktober des Jahres zeigt sich dann, dass die Temperaturen im grundwassererfüllten Tiefenintervall im Trend weniger stark sinken und in den Monaten Januar/Februar 2005 das Folgejahres etwa 0,5 – 1,0 K höher liegen als die der grundwasserfreien Tiefenbereiche.

### 5.2.5 Identifikation des Aquifers aus Messwerten

DTS-Systeme werden in der Geotechnik unter anderem zur Detektion von Dammleckagen verwendet, in der jüngeren Vergangenheit mit dem Heizdrahtverfahren auch zur vertikalen

Abgrenzung von Grundwasserleitern gegenüber grundwasserfreien Gesteinseinheiten eingesetzt (AUFLEGER 2000, AUFLEGER ET AL. 2005, PERZLMAIER 2007). Wie das Temperaturprofil in Abb. 5-10 zeigt, ist aus einer Messung unter temperaturtechnisch ungestörten Verhältnissen am Standort des Testfelds keine sichere Aussage über Top und Basis des quartären Aquifers zu machen. Erst die nachhaltige Störung des ursprünglichen Temperaturverhältnisses erlaubt hier eine gesicherte Identifikation des Grundwasserleiters.

In Abb. 5-15 ist der Gang der über die Tiefe gemittelten Temperaturen der EWS 2 während des Betriebs für einen 24-stündigen Zyklus (1:00 Uhr des 04.01.2005 bis 1:00 Uhr des 05.01.2005) aus PT100-Messwerten dargestellt.

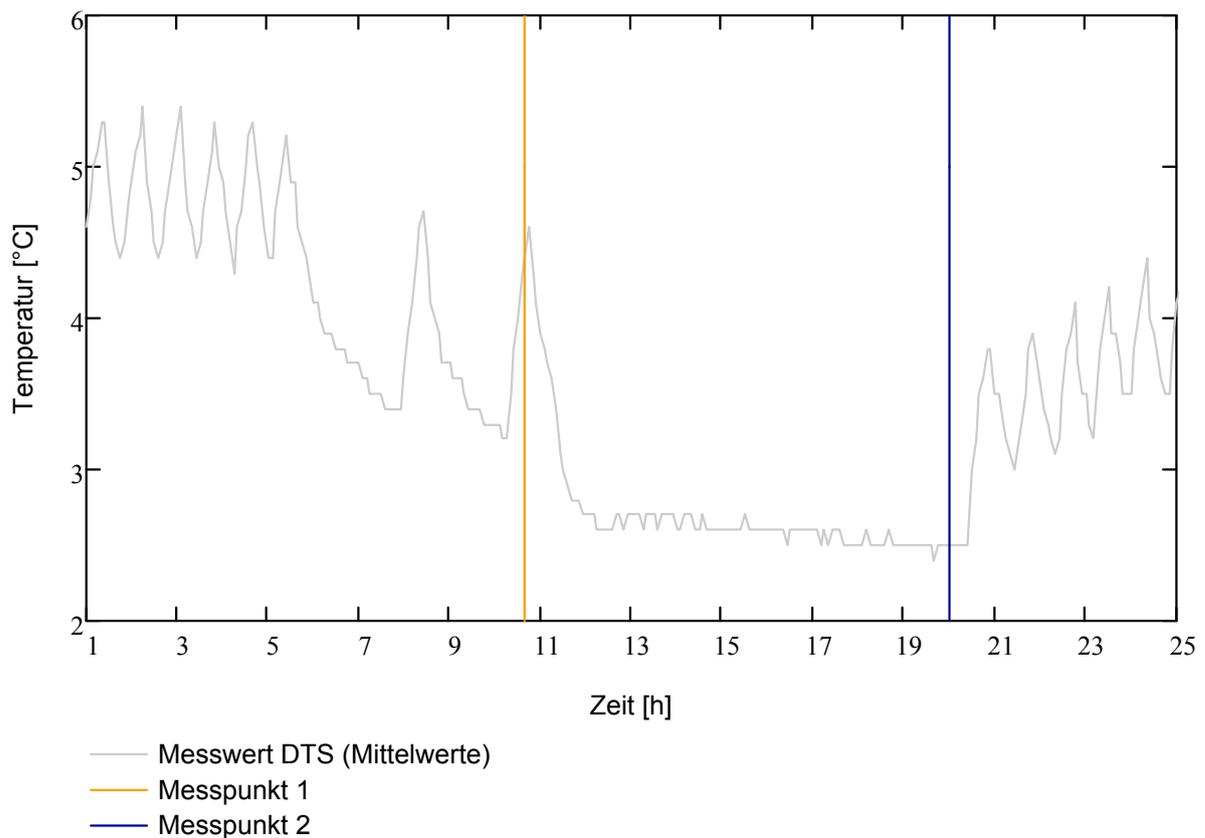


Abb. 5-15: Mittelwerte Temperaturmessung in EWS 2 im Betrieb bzw. im Stillstand

Um den Grundwasserspiegel und die Basis des lokalen Kiessandaquifers anhand von Temperaturprofilen zu identifizieren wurden zwei Szenarien untersucht:

- › Messzeitpunkt 1: Ende Stillstandszeit der Wärmepumpe (WP-Stillstand)
- › Messzeitpunkt 2: Ende Betriebsphase der Wärmepumpe (WP-Betrieb)

In Abb. 5-16 (linke Seite) ist je ein Temperaturprofil für die beiden Messzeitpunkte dargestellt. Zwar zeigt sich im Bereich des durch die beiden blauen Linien abgegrenzten Aquifers ein Temperaturpeak bei Stillstand und bei Betrieb der Wärmepumpe, jedoch finden sich zur

Tiefe hin weitere, wenn auch weniger deutlich ausgeprägte Spitzen. Auch eine Darstellung der Messwerte in Form von Temperaturgradienten  $\Delta T = (dT)/(dz)$  führt nicht zur verbesserten Abgrenzung grundwasserfüllter Schichtkörper (Abb. 5-16, rechte Seite). Deutlich besser erkennbar werden Top und Basis des Kiessandaquifers, wenn die Differenz zwischen dem ungestörten Temperaturprofil nach KASUDA (1965) und den Messwerten gebildet wird (Abb. 5-17). Besonders deutlich wird der wassererfüllte Anteil des Kieskörpers, und hier vor allem die Basis, zum Ende der Wiederanstiegsphase abgebildet.

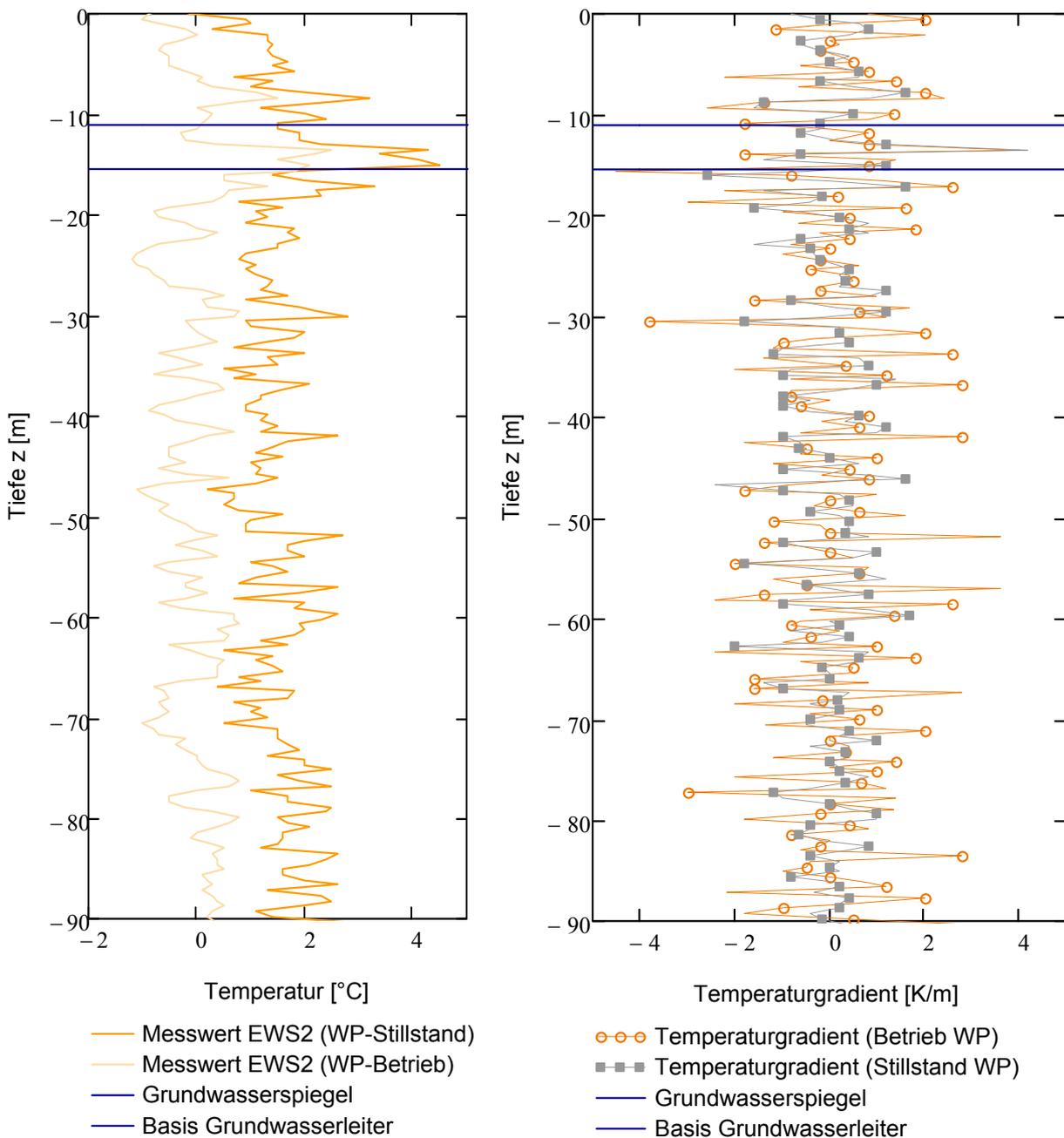


Abb. 5-16: Temperaturprofile und -gradienten an EWS 2 während Stillstand bzw. Betrieb

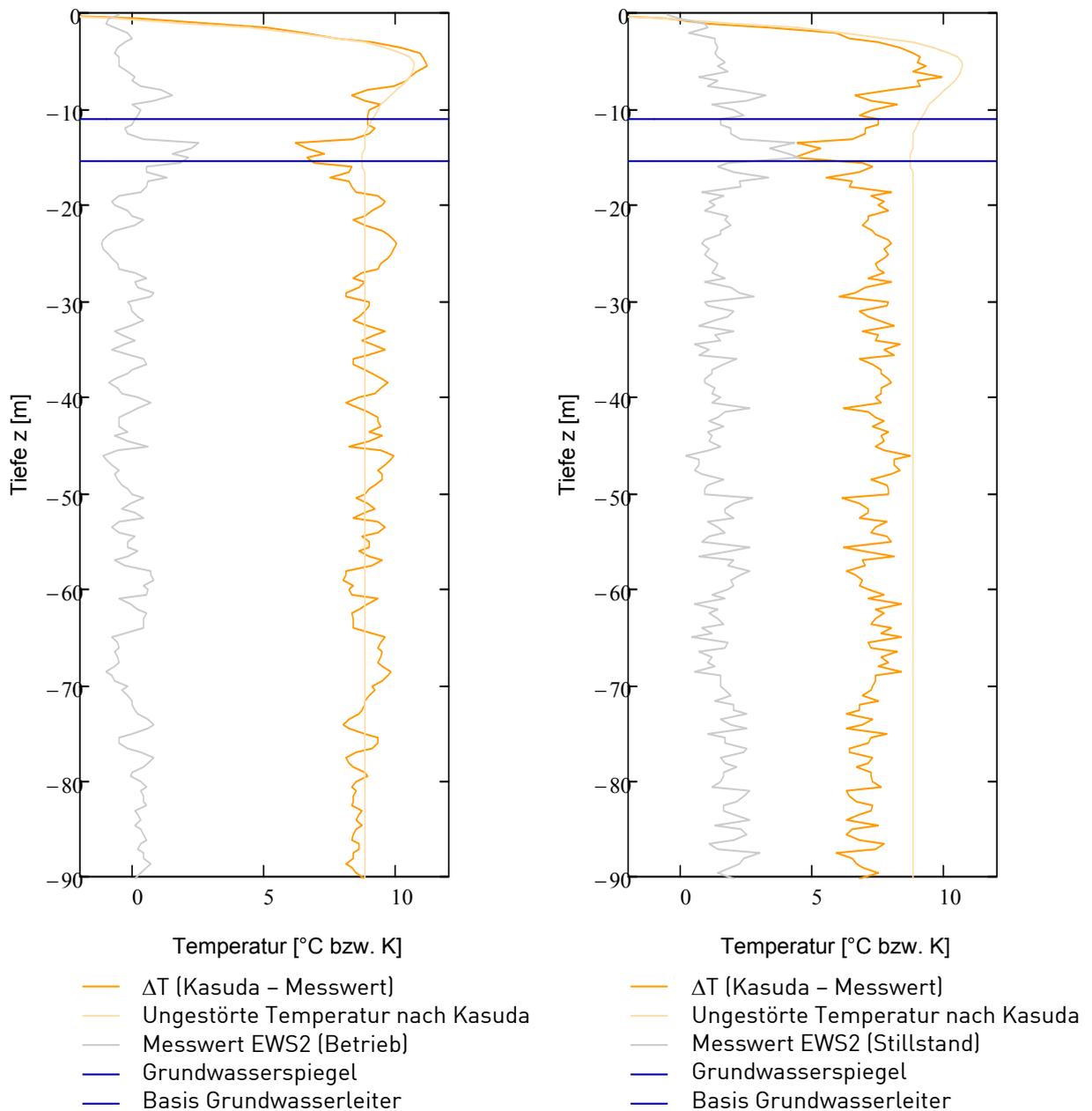


Abb. 5-17: Prognostizierte Temperaturprofile nach KASUDA (1965) vs. Messwerte EWS2

Gleichzeitig lässt sich mit Abb. 5-17 zeigen, dass der von HUNN (2004) bei der geologischen Aufnahme der Erdwärmesondenbohrungen kartierte, geringmächtige zweite Aquifer im Tiefenintervall zwischen 64 und 65,5 m unter Geländeoberkante zumindest keinen Einfluss auf die Temperaturprofile nimmt. Das Bohrmeisterprotokoll zur Kernbohrung verzeichnet im gleichen Tiefenintervall zwar ebenfalls eine konglomeratische Lage geringer Verfestigung, enthielt jedoch keinen Hinweis auf Grundwasserzutritt.

### 5.3 Ermittlung des Lastprofils

Bei allen in Kapitel 3 vorgestellten Rechenmethoden für Erdwärmesonden stellt die pro Zeiteinheit dem Untergrund entnommene Energie ein zentrales Element dar. Nachteilig war in diesem Zusammenhang der Verzicht auf Wärmemengenzähler, die in Herbrachhofen aufgrund des engen Projektbudgets nicht installiert wurden. Jedoch wurden die Laufzeiten der Wärmepumpe getrennt nach Verdichtern und die Stromaufnahme über nahezu anderthalb Jahre in etwa wöchentlichem Turnus in einem Betriebstagebuch verzeichnet. Zusammen mit den wärmepumpenspezifischen Diagrammen der Abb. 4-6 in Kap. 4, in denen die Heizleistung  $Q_H$ , die Leistungsaufnahme  $P_H$  und der COP gegen die Soletemperatur bei Vorlauftemperaturen von  $35^\circ\text{C}$  bzw.  $50^\circ\text{C}$  aufgetragen sind, lässt sich zeitschrittbezogenes Heiz-/Kühllastprofil entwickeln. Im Detail wurden zunächst zur Ermittlung der Stromaufnahme der Wärmepumpe die im Betriebstagebuch dokumentierten Werte um den Verbrauch während der Stand-By-Phasen und um die elektrische Aufnahme der Soleumwälzpumpen reduziert. Die in Herbrachhofen verbaute Wärmepumpe verfügt über zwei Verdichter, die bei mäßiger Energieanforderung abwechselnd laufen. Bei hohen Lasten dagegen wird dem ersten Verdichter der zweite im weiteren Verlauf zugeschaltet. Ob ein oder beide Verdichter liefern, kann anhand der Temperaturmessungen mit den PT100-Fühlern ermittelt werden (Abb. 5-18).

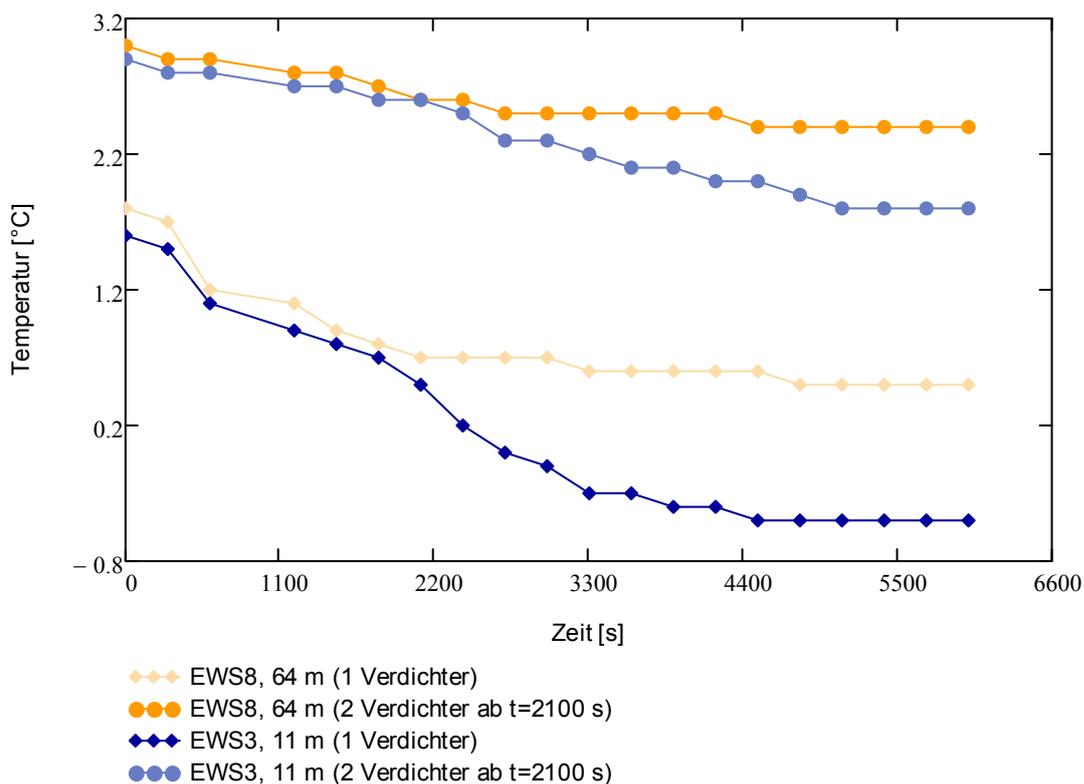


Abb. 5-18: Ein- bzw. Zwei-Verdichter-Betrieb

Die Anzahl der jeweils im Betrieb befindlichen Verdichter sind wesentlich bei der Ermittlung der Stromaufnahme der in Herbrachhofen eingesetzten Wärmepumpe, da der Unterschied in der Stromaufnahme je nach Vorlauftemperatur über 10 kW beträgt. Um diesem Umstand bei der Ermittlung der zeitschrittbezogenen Stromaufnahme  $P_H$  der Wärmepumpe gerecht zu

werden, konnte auf die Temperaturmessungen an den Erdwärmesonden zurückgegriffen werden, da der Betrieb von zwei Verdichtern zur gleichen Zeit sich mit vergleichsweise höherem  $\Delta T$  auf die Soletemperatur auswirkt. Beispielhaft ist dieses in Abb. 5-18 für den 05. Februar 2004 für zwei unterschiedliche Zeiträume (4:00 bis 5:45 bzw. 7:00 bis 8:45 Uhr) gezeigt: Während im ersten Zeitintervall nur ein Verdichter arbeitete, schaltete sich im zweiten Intervall ab ca.  $t = 2.100 \text{ s}$  der zweite Verdichter zu. Besonders deutlich zeigt sich dies bei in geringer Tiefe und auf dem Vorlaufast montierten PT-100-Sensoren (EWS 3 in Abb. 5-18). Durch Abgleich der gemessenen Temperaturen über die gesamte Zeitdauer der Geländemesungen ließ sich so der Ein-Verdichter-Betrieb vom Zwei-Verdichter-Betrieb trennen. Mit diesem Datensatz und unter Berücksichtigung der Soletemperaturen auf dem Rücklaufast der Erdwärmesonden konnte der mittlere  $COP$  für den jeweiligen, dem Betriebstagebuch entnommenen Betrachtungszeitraum unter Zuhilfenahme der Diagramme in Abb. 4-6 bestimmt werden. Das Produkt aus  $COP$  und der Stromaufnahme  $P_H$  ergibt dann die Heizarbeit  $Q_H$  der Wärmepumpe und über die Differenz aus  $Q_H$  und  $P_H$  kann schließlich die Kälteleistung  $Q_0$  je Zeitschritt bestimmt werden. Bei der Bestimmung der Kühlarbeit, die ohne Einsatz der Wärmepumpe direkt aus dem Untergrund bereitgestellt wurde, konnte auf Untersuchungsergebnisse von MÖLLMANN & VERMEER (2006) zurückgegriffen werden (Abb. 5-19).

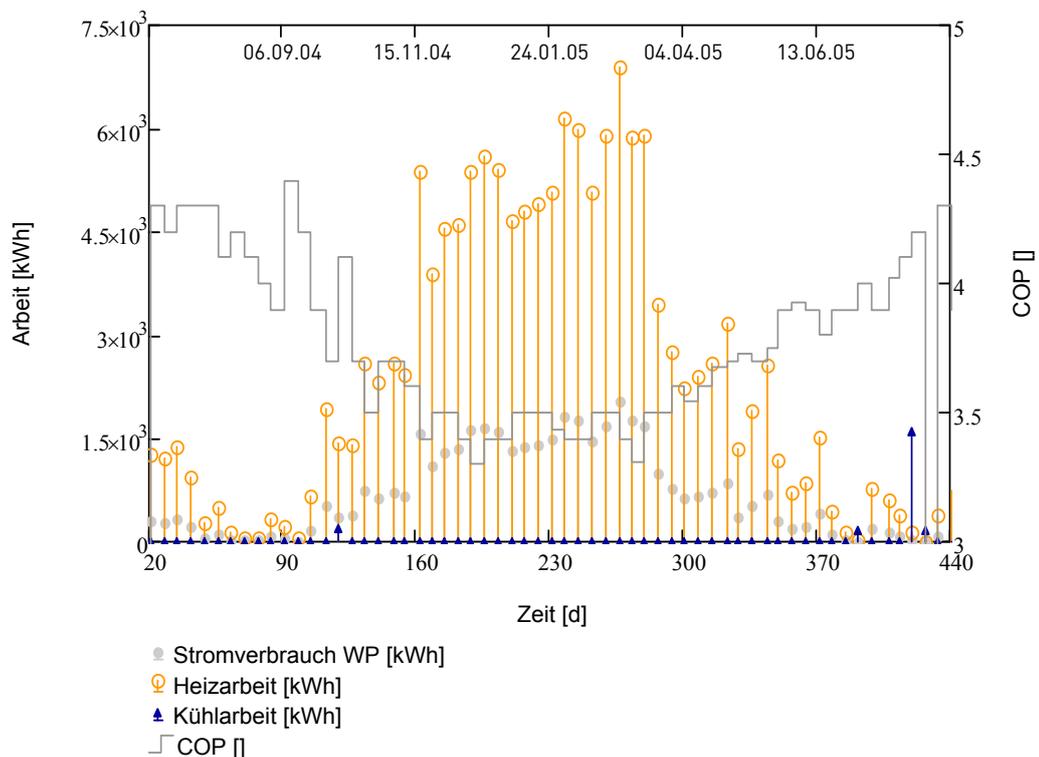


Abb. 5-19: Heiz-/Kühllastdaten, Stromaufnahme und  $COP$

Die in Abb. 5-19 und Abb. 5-20 vorgestellten Ergebnisse sind auf Zeitschritte bezogen, die dem Betriebstagebuch der Herbrachhofener Anlage entnommen wurden. Im Mittel umfasst jeder dieser 63 Intervalle eine Woche. Mit der Wärmepumpe wurde über den gesamten Zeitraum etwa  $42,9 \text{ MWh}$  Strom verbraucht und damit  $152,7 \text{ MWh}$  Wärme bzw.  $2,2 \text{ MWh}$  Kälte

bereitgestellt. Bei einem über die Zeit gemittelten  $COP$  von 3,4 [] steuerte der Untergrund 106,2 MWh Wärme bei. Für den Zeitraum August 2004 bis August 2005 ergibt sich die Jahresarbeitszahl  $\beta$  bei Berücksichtigung der Stromaufnahme der Soleumwälzpumpen von 3.450 kWh zu 3,3 []. Mit der aus dem Untergrund entzogenen Energie kann für die 63, im Betriebstagebuch aufgeführten Zeitintervalle spezifische Entzugsleistung  $\dot{q}_l$  [W/m] durch Division der Gesamtentzugsleistung durch die Gesamtlänge der Erdwärmesonden  $L_{EWS}$  [m] bestimmt werden (Abb. 5-20). Aus diesem Datensatz kann ein monatsbezogenes Lastprofil interpoliert werden, das den Abgleich mit dem Lastprofil der Planungsphase gestattet (Abb. 5-21).

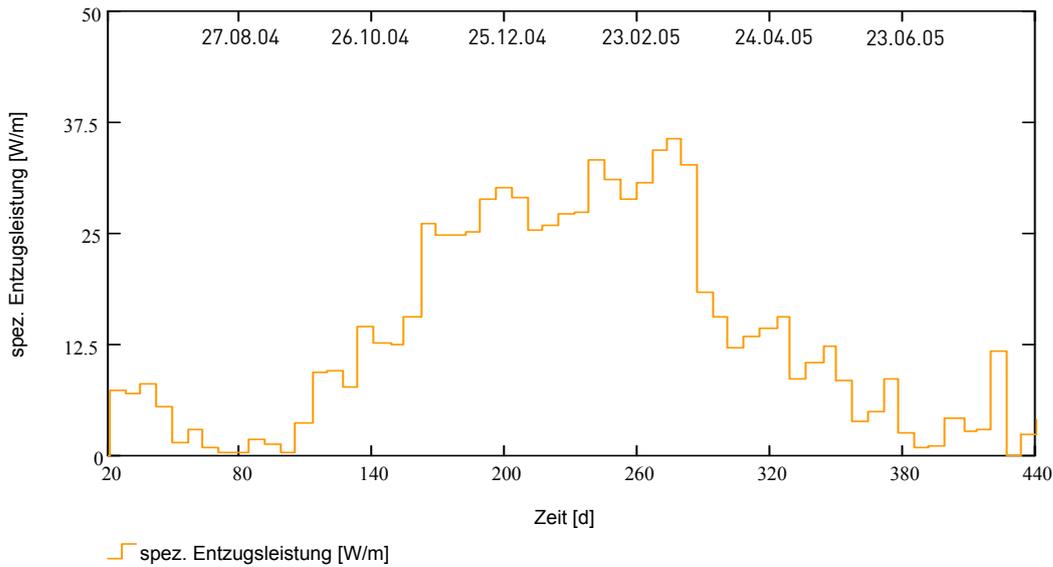


Abb. 5-20: Mittlere spezifische Entzugsleistung Erdwärmesonden je Zeitschritt

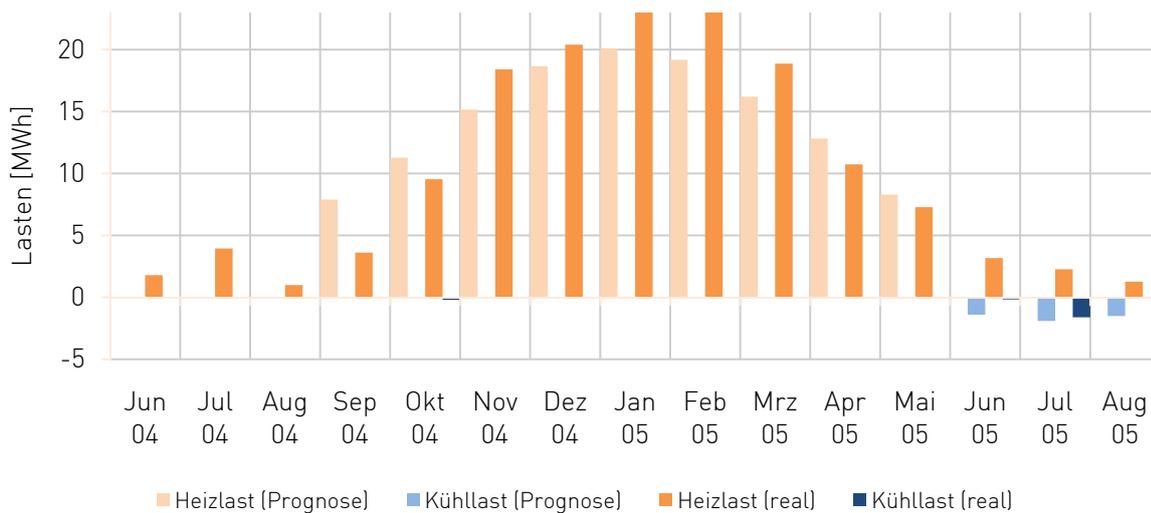


Abb. 5-21: Abgleich Lastprofile (Prognose und Realität)

#### 5.4 Temperaturprofile für Modellrechnungen

Wie in Kapitel 5.2.2 gezeigt, weist die Berechnung der mittleren ungestörten Untergrundtemperatur nach Gl. 3.01 und die Mittelwertbildung aus den Ergebnissen der DTS-Messung bezogen auf die halbe Erdwärmesondentiefe eine sehr gute Übereinstimmung auf. Unter der Annahme, dass die Messergebnisse mit dem Lichtwellenleiterkabel aufgrund der unmittelbaren Befestigung auf den Erdwärmesondenrohren der Soletemperatur  $T_{fl}$  bei hinreichend großen Zeiträumen nahezu entspricht, kann die mittlere Soletemperatur ebenfalls aus den DTS-Daten als Mittelwert über die gesamte Kabellänge bestimmt werden (Abb. 5-22). Sind die mittlere spezifische Entzugsleistung  $\dot{q}_l$  und der mittlere thermische Bohrlochwiderstand  $R_b$  für definierte Zeitschritte bekannt, lässt sich mit der mittleren Soletemperatur über diese Zeitschritte auch die mittlere Bohrlochwandtemperatur  $T_b$  und die Temperatur im umgebenden Untergrund für diesen Zeitschritt bestimmen.

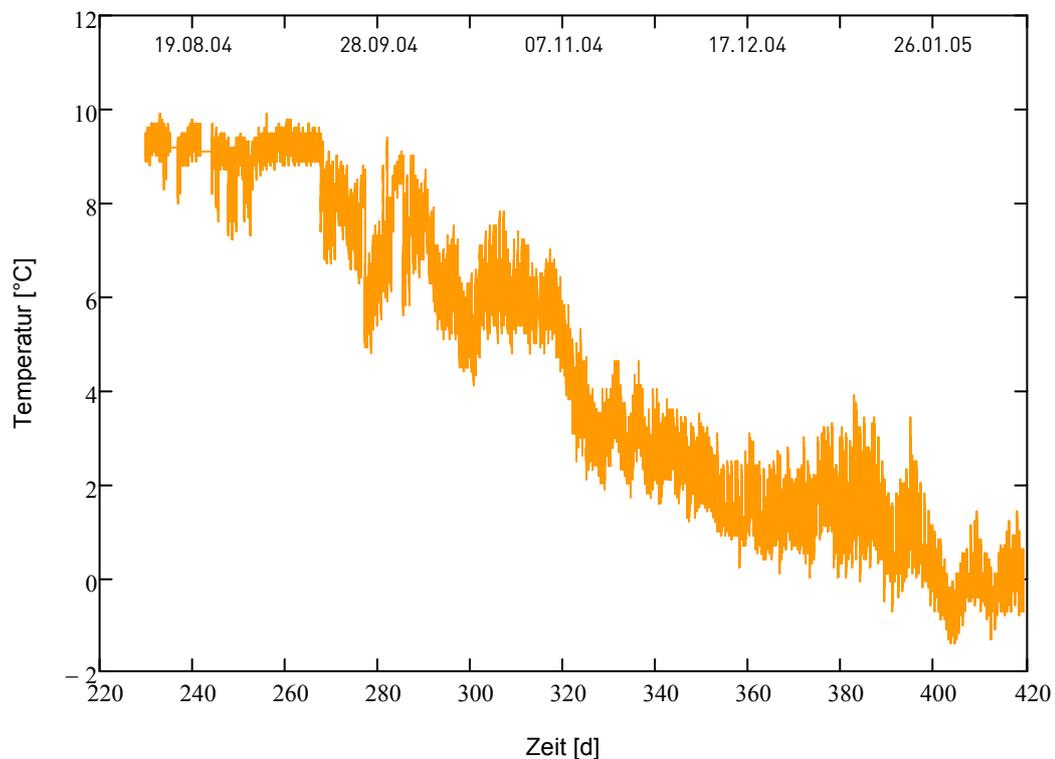


Abb. 5-22: Mittlere Temperaturen aus DTS-Messungen

Beim Testfeld in Herbrachhofen sind nahezu vollständige DTS-Messdaten für das erste Betriebshalbjahr der Anlage erhoben worden, mit den PT100-Sensoren wurde insgesamt sogar ein Messzeitraum von etwa 460 Tagen lückenlos erfasst. Diese Datensätze sind, bezogen auf die oben beschriebenen Zeitschritte, für verschiedene Tiefen bzw. Tiefenintervalle in Abb. 5-23 einander gegenübergestellt. Auch wenn, wie erwartet, im Trend gewisse Ähnlichkeiten zwischen den zeitschrittgemittelten Werten der PT100-Sensoren und denen der DTS-Messung zu erkennen sind, zeigt sich in den Werten selbst ein sehr deutlicher Unterschied. Die PT100-Daten sind demnach wegen ihrer Montage auf Vor- oder Rücklauf der Erdwärmesonde nicht

geeignet, um zur Validierung von Rechenwerten herangezogen zu werden. Sie gestatten aber, wenn auch mit einiger Unsicherheit, den Vergleich von Trends.

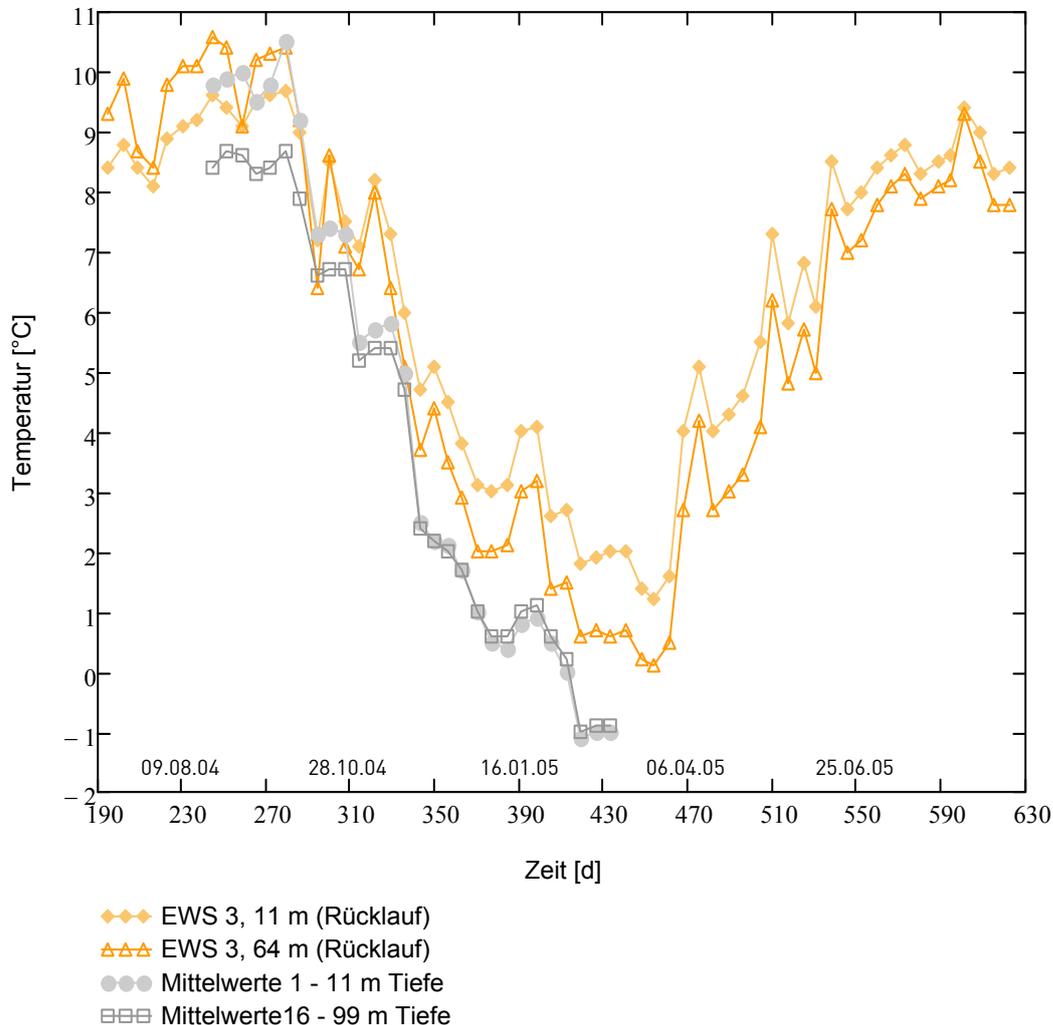


Abb. 5-23: Mittlere Temperaturen aus DTS- und PT100-Messungen

Mit den DTS-Daten kann die Temperaturentwicklung in definierten Tiefenintervallen gerade auch im Hinblick auf den Einfluss des quartären Aquifers auf die Anlagenperformance weiter untersucht werden. Für das Testfeld in Herbrachhofen bietet sich hier eine Dreiteilung des Untergrunds in die Bereiche

- Oberflächennah bis zum Grundwasserspiegel (1 – 11 m Tiefe)
- Wassererfüllter Bereich des Grundwasserleiters (11 – 16 m Tiefe)
- Basis Grundwasserleiter bis Endteufe (16 – 99 m Tiefe)

an. Entsprechende Temperatur-/Zeit-Profile sind in Abb. 5-24 dargestellt. Analog zu vorstehenden Betrachtungen in diesem Kapitel zeigt sich, dass das oberflächennächste Tiefeninter-

vall – auf dem höchsten Temperaturniveau startend – bereits nach etwa 150 Betriebstagen ähnliche Temperaturen aufweist, wie der Bereich von 16 – 99 m Tiefe. Parallel hierzu sinken die Temperaturen im grundwassererfüllten Tiefenbereich, wie zuvor bereits gezeigt, deutlich geringer und liegen zum Ende der Aufzeichnungen im Mittel etwa 0,8 K höher als die Mitteltemperaturen der beiden anderen Bereiche.

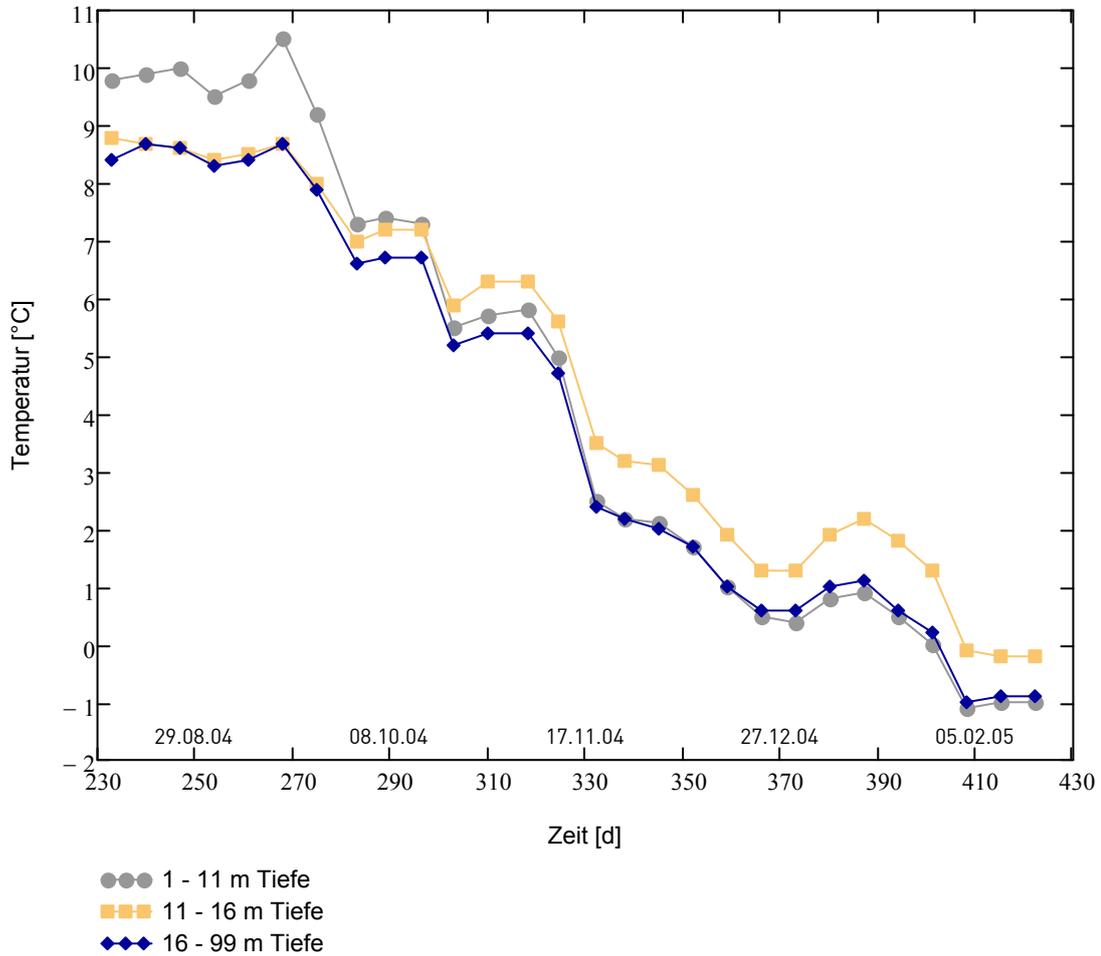


Abb. 5-24: Mittlere Temperaturen in verschiedenen Tiefenintervallen aus DTS-Messungen

### 6 MODELLRECHNUNGEN

Standortbezogene Validierungen an Messwerten, zumindest aber ein Abgleich mit Ergebnissen numerischer Verfahren, wurden in der Vergangenheit für Kelvins Linienquellentheorie, aber auch für das Zylinderquellenverfahren und den Earth Energy Designer (EED) verschiedentlich durchgeführt (MARAINI 2000, SIGNORELLI & KOHL 2002, PAHUD ET AL. 2002, DENG 2004, YOUNG 2004 etc.).

Für ein Rechenverfahren, das auf der Theorie der Beweglichen Linienquelle (Moving Line Source) basiert, ist in der Literatur bisher lediglich über eine Validierung im kleinmaßstäbigen Laborversuch berichtet worden (KATSURA 2006). Gerade aber die Option, den Einfluss, den der Grundwasserstrom auf die Performance einer Erdwärmesondenanlage mit einem vergleichsweise einfachen analytischen Ansatz zu bestimmen, ist unter ökologischen wie ökonomischen Aspekten durchaus von Relevanz.

Der im Zuge der Untersuchungen am Teststandort Herbrachhofen zusammengestellte Datensatz gestattet nicht die Prüfung der in der Planungspraxis üblichen Langfristprognosen über 25 Jahre. Gerade aber zu Beginn der Nutzung einer Erdwärmesondenanlage ist der thermische Einfluss auf den Untergrund besonders ausgeprägt und für diesen Zeitraum liegt ein ausreichend qualifizierter Datensatz vor, dessen Besonderheit die DTS-Messungen sind.

Im Folgenden sollen zunächst die Verfahren nach der Kelvinschen Linienquellentheorie, der Zylinderquellenmethode und die Ergebnisse des Earth Energy Designers (EED) den Daten aus Herbrachhofen für den Messzeitraum 2004/2005 gegenübergestellt werden. Für die Berechnungen mit EED wurde auf die Testversion des Programms in der Version 2.0 zurückgegriffen, für alle anderen Verfahren wurden geeignete Arbeitsblätter mit einem CAS-Programm (MATHCAD<sup>®</sup>, Version 14) erstellt.

Auch für die Berechnungen nach der Theorie der Beweglichen Linienquellen wurde ein entsprechendes Arbeitsblatt aufgestellt. Hierzu wurde der bei DIAO ET AL. (2004) beschriebene Ansatz zur Berechnung von  $\Delta T$  im Zuge dieser Arbeit um das von SUTTON ET AL. (2003) beschriebene, ebenfalls auf der Theorie der Beweglichen Linienquellen basierende Verfahren zur Bestimmung des thermischen Bohrlochwiderstands  $R_b$  erweitert. In dieser Kombination lässt sich die Theorie der Beweglichen Linienquelle voll umfänglich auf den Wärmetransport bei Erdwärmesonden unter Berücksichtigung eines Grundwasserstroms anwenden. Die Berechnungsergebnisse und ihr Abgleich mit den Messdaten des Testfelds Herbrachhofen bilden den zweiten Teil dieses Kapitels.

Wie Kap. 5 bereits gezeigt, ist am Teststandort Herbrachhofen der Einfluss des Grundwasserstroms auf die Temperaturentwicklung an den Erdwärmesonden deutlich messbar. Der dritte Teil dieses Kapitels widmet sich daher dem Einfluss des Grundwasserstroms auf die Anlagenperformance in Herbrachhofen und die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Testanlage, aber auch ökologischen Aspekten.

#### 6.1 Modellparameter

Daten mit konkretem Bezug zu geothermischen Eigenschaften des Untergrunds wie die terrestrische Wärmestromdichte, die ungestörte Untergrundtemperatur etc. konnten auf der Grundlage von eigenen Messungen bestimmt werden. Die spezifische Gesteinswärmekapazität musste anhand von Datenbankwerten abgeschätzt werden, ihr Einfluss auf die Rechner-

gebnisse ist aber ohnehin eher gering. Zur Gesteinswärmeleitfähigkeit bleibt anzumerken, dass hier, obwohl Messwerte nach HUNN (2004) vorlagen, den Mittelwerten einer schweizerischen Studie der Vorzug gegeben wurde (LEU ET AL. 2006). Auf die entsprechende Diskussion der Messwerte in Kap. 5 wird verwiesen.

Für alle relevanten Parameter zu den verbauten Erdwärmesonden (Abmessungen, Wärmeleitfähigkeit etc.) und zum eingesetzten Arbeitsmittel konnte auf Herstellerangaben zurückgegriffen werden, die in sehr guter Qualität allgemein zugänglich sind. Datensätze mit konkretem Bezug zu den Bohrarbeiten und zur Konfiguration des Erdwärmesondenfelds (Abstände der EWS zueinander, Bohrtiefen und –durchmesser etc.) wurden während und unmittelbar nach dem Bau der unterirdischen Anlagenteile mit hoher Detailgetreue aufgenommen.

Daten zu den Eigenschaften der eingesetzten Hinterfüllmaterialien wurden von einem zweiten Forschungsprojekt am Standort in Herbrachhofen detailliert und in sehr guter Qualität beige-steuert (HUNN 2004). Gleiches gilt für die lokale Geologie und Hydrogeologie, für die zum einen auf zwei Diplomarbeiten, zum anderen auf eine Hydrogeologische Karte zurückgegriffen werden konnte (HERRMANN 2003, RÜSGEN 2003, KUPSCH ET AL. 1989). Diese Daten konnten anhand der Ergebnisse der Bohrarbeiten und mit zwei, auf dem Testgelände befindlichen Brunnen abgesichert bzw. ergänzt werden.

Die Temperaturentwicklung im Untergrund kann bis Februar 2005 anhand von mehreren Millionen Einzeldaten aus den DTS-Messungen beschrieben werden. Zeitlich parallel hierzu und auch für die Folgemonate kann zudem auf Messungen mit PT100-Sensoren zurückgegriffen werden. Im Vergleich mit den PT100-Systemen weisen die DTS-Messungen einen wesentlichen Vorteil auf: Mit Ihnen ist es möglich, für definierte Zeiträume die mittleren Temperaturen über die gesamte Lauflänge und gleichzeitig auch über definierte Tiefenintervallen zu bestimmen.

Auch wenn im Testfeld nur fünf der acht Erdwärmesonden mit Lichtwellenleiterkabeln ausgerüstet sind, soll der Mittelwert dieser mit Vor- und Rücklaufleitungen knapp 1.000 m langen Messstrecke im Folgenden als mittlere Fluidtemperatur über das gesamte Erdwärmesondenfeld angesehen werden. Diese Vereinfachung kommt dem Earth Energy Designer entgegen, der – anders als die in den CAS-Arbeitsblättern implementierten Linien- und Zylinderquellenverfahren – lediglich mittlere Fluidtemperaturen über alle Erdwärmesonden einer Anlage berechnen kann.

Das Heiz-/Kühllastprofil für die Testanlage konnte aus den im Betriebstagebuch zusammengestellten Angaben in Kombination mit einer detaillierten und arbeitsintensiven Analyse der Temperaturmessdaten für insgesamt 63, jeweils ca. einwöchige Zeitschritte entwickelt werden. Dieser Datensatz kann per se nicht die gleiche Qualität wie Messungen mit Wärmemengenzählern aufweisen, ist aber für die in diesem Kapitel vorgenommenen Berechnungen als hinreichend genau einzuschätzen.

Jedem der 63 Zeitschritte des Lastprofils wurden mittlere Temperaturen zugewiesen. Für den Zeitraum, der mit vollständigen DTS-Messungen abgedeckt ist, wurde hierzu das arithmetische Mittel dieser Werte über den Zeitschritt und bezogen auf das jeweils betrachtete Tiefenintervall gebildet. Auch aus den PT100-Messungen wurden zeitschrittbezogen Mittelwerte gebildet. Zwar können sie als Punktmessungen auf dem Vorlauf bzw. Rücklauf der Erdwärmesonden nicht zum konkreten Abgleich mit Modellergebnissen herangezogen werden, sie

geben aber, wie in Kap. 5 gezeigt, den Trend der Temperaturentwicklung an einer Erdwärmesonde bzw. des ganzen Feldes wieder.

### 6.2 Earth Energy Designer, Kelvinsche Linienquelle und Zylinderquelle

Der Earth Energy Designer (EED) stellt ein gerade in Europa häufig genutztes und bewährtes Softwaretool zur Auslegung von Erdwärmesondenfeldern dar. Vorteile des Programms sind die einfachen Eingaberoutinen, die hohe Rechengeschwindigkeit und die Robustheit. Limitierend wirken sich dagegen schablonenartige Vorgaben zur Konfiguration eines Erdwärmefeldes aus. So existiert in der EED-Datenbank beispielsweise keine „g-function“ für die geometrische Anordnung der Erdwärmesonden im Testfeld Herbrachhofen. Für die Berechnungen wurde daher auf die Funktion 235 zurückgegriffen, die für zwei parallele Sondenreihen mit jeweils vier Einzelsonden entwickelt wurde.

In EED ist das Heiz-/Kühllastprofil monatsbezogen für den Zeitraum eines Jahres einzugeben. Dieser Datensatz wird bei den Berechnungen über den gewählten Prognosezeitraum sich jährlich wiederholend angewendet. Dies führt dazu, dass die mittleren Fluidtemperaturen nur monats-scharf berechnet werden können. Auch ist es mit EED nicht möglich, die Temperaturentwicklung einer einzelnen Erdwärmesonde in einem Feld zu bestimmen. Vielmehr beziehen sich die Berechnungsergebnisse auf die mittlere Fluidtemperatur über alle Erdwärmesonden.

In Abb. 6-1 ist das Simulationsergebnis des Earth Energy Designers (EED) über den Zeitraum Juni 2004 bis September 2006 den mittleren Temperaturen aus den DTS-Messungen (Feld-Mittel) bzw. dem aus den PT100-Sensoren in 64 m Tiefe gemittelten Datensatz gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Prognose für einen Grundlastfall („Base Load“, die Temperaturentwicklung zunächst recht gut abbildet, um dann ab Januar 2005 um bis zu 3 K von den Messwerten abzuweichen.

Mit EED können neben dem Grundlastfall zusätzlich auch Heizlastspitzen („Peak Heat Load“) bzw. Kühllastspitzen („Peak Cool Load“) berücksichtigt werden. Bei Berücksichtigung von Kühllastspitzen, kommt es im Spätsommer 2004 ( $\sim 1,2 \cdot 10^7$  s) zu einer gegenüber den Messwerten um etwa 1 K zu hohen Prognose. Diese Abweichung ist dem Lastprofil geschuldet: um Kühlversuche im Spätsommer des Folgejahres zu berücksichtigen, mussten hier entsprechende Werte für die betroffenen Monate eingepflegt werden. Die im Jahresrhythmus wiederholte Anwendung des Lastprofils bedingt, dass für den Spätsommer 2004 Kühllasten berücksichtigt sind, die in der Realität nicht anfielen. Im Sommer 2005 ( $\sim 3,7 \cdot 10^7$  s) dagegen – hier wurden Kühlversuche mit der Anlage gefahren – folgt die Prognose dem von den PT100-Sensoren vorgezeichneten Trend und weist einen entsprechenden Peak auf.

Werden bei der Simulation Heizlastspitzen berücksichtigt, liegen die Rechenergebnisse bereits ab Oktober 2004 um bis zu 5 K unter den Messwerten. Dies entspricht den Erwartungen, da die versorgten Gebäude aufgrund ihres Alters vergleichsweise dicke Mauerstärken und dementsprechend auch hohe thermische Speichermassen aufweisen und das Laufzeitprofil der Wärmepumpe so ausgelegt wurde, dass die Flächenheizsysteme auch in vollem Umfang genutzt werden können. Heizlastspitzen waren demnach also auch nicht zu erwarten.

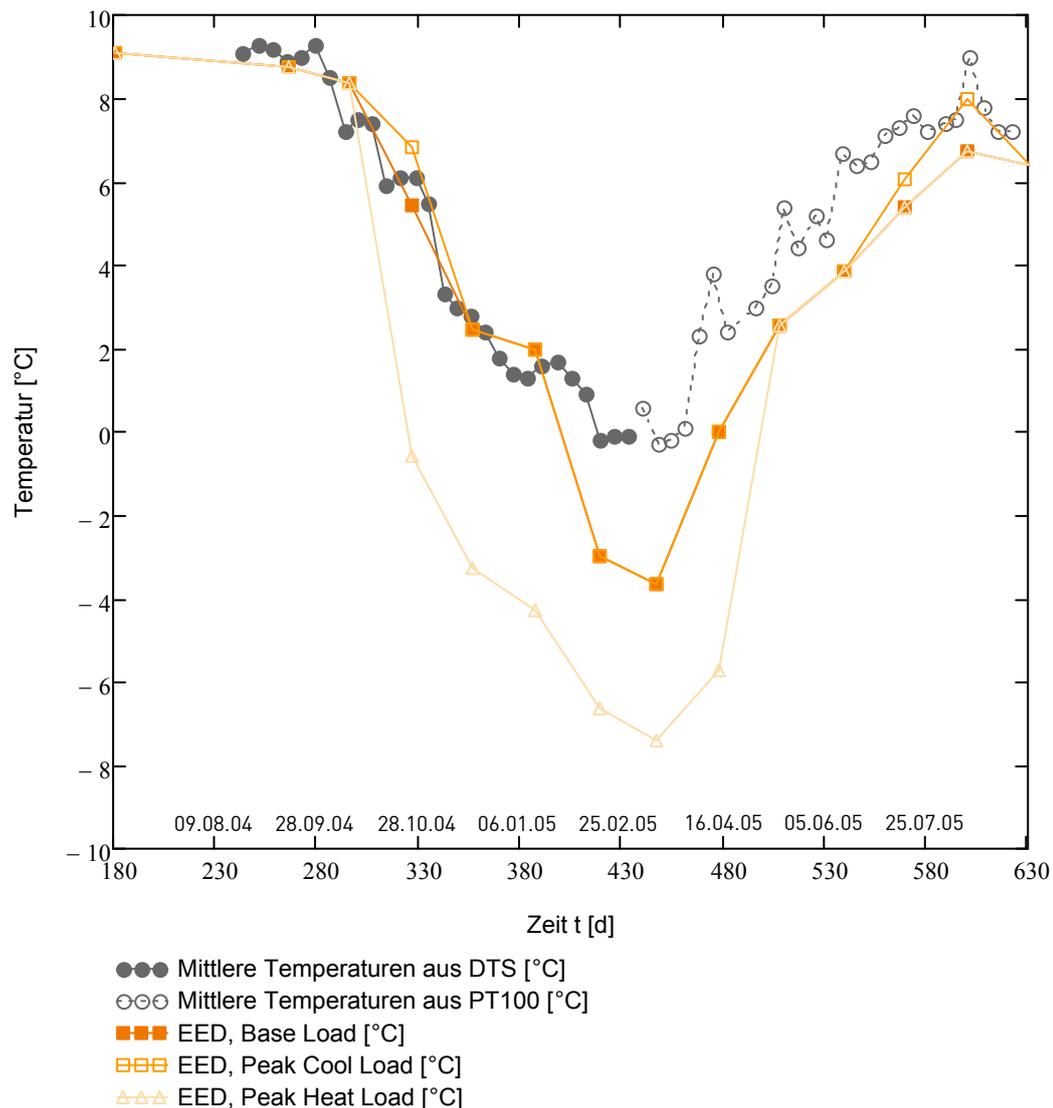


Abb. 6-1: Ergebnisse der EED-Simulation vs. Temperaturmessungen

Aus dem EED-Outputfile können neben Temperaturdaten mit einem geeigneten Texteditor auch Werte für die thermischen Widerstände ausgelesen werden (MARAINI 2000). Sie werden von der Software nach Multipole-Verfahren berechnet (BENNET ET AL. 1987, SANNER & HELLSTRÖM 2000, YOUNG 2004).

In Tabelle 6-1 sind die Werte für den thermischen Bohrlochwiderstand  $R_b$  der hier vorgestellten Berechnungen für jede einzelne Erdwärmesonde zusammen mit der Wärmeleitfähigkeit des jeweils verwendeten Hinterfüllbaustoffs aufgeführt. Der thermische Bohrlochwiderstand der EWS 4 entspricht den Erwartungen an eine fachgerecht, jedoch mit herkömmlichem Baustoffe (Schwenk Dämmer) verfüllte Erdwärmesondenbohrung. Die anderen Werte sind, vor allem Dank der hohen Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Hinterfüllmaterials, durchgehend als sehr gut zu bezeichnen.

## 6. Modellrechnungen

Tab. 6-1: Therm. Bohrlochwiderstände aus EED und Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllmaterial

Erdwärmesonde	$R_b$ [ $m \cdot K/W$ ]	$\lambda$ [ $W/(m \cdot K)$ ]
EWS 1, EWS 2, EWS 5	0,0688	3,4
EWS 3, EWS 8	0,0765	2,7
EWS 4	0,1436	1,1
EWS 6	0,0834	2,5
EWS 7	0,0986	1,9

Die mit EED gewonnenen Daten für den thermischen Bohrlochwiderstand können für weitere Vergleichsrechnungen genutzt werden. Der Vergleich der Temperaturprognose gemäß der Kelvinschen Linienquellengleichung mit und ohne thermischen Bohrlochwiderstand ist für EWS 2 in Abb. 6-2 gezeigt.

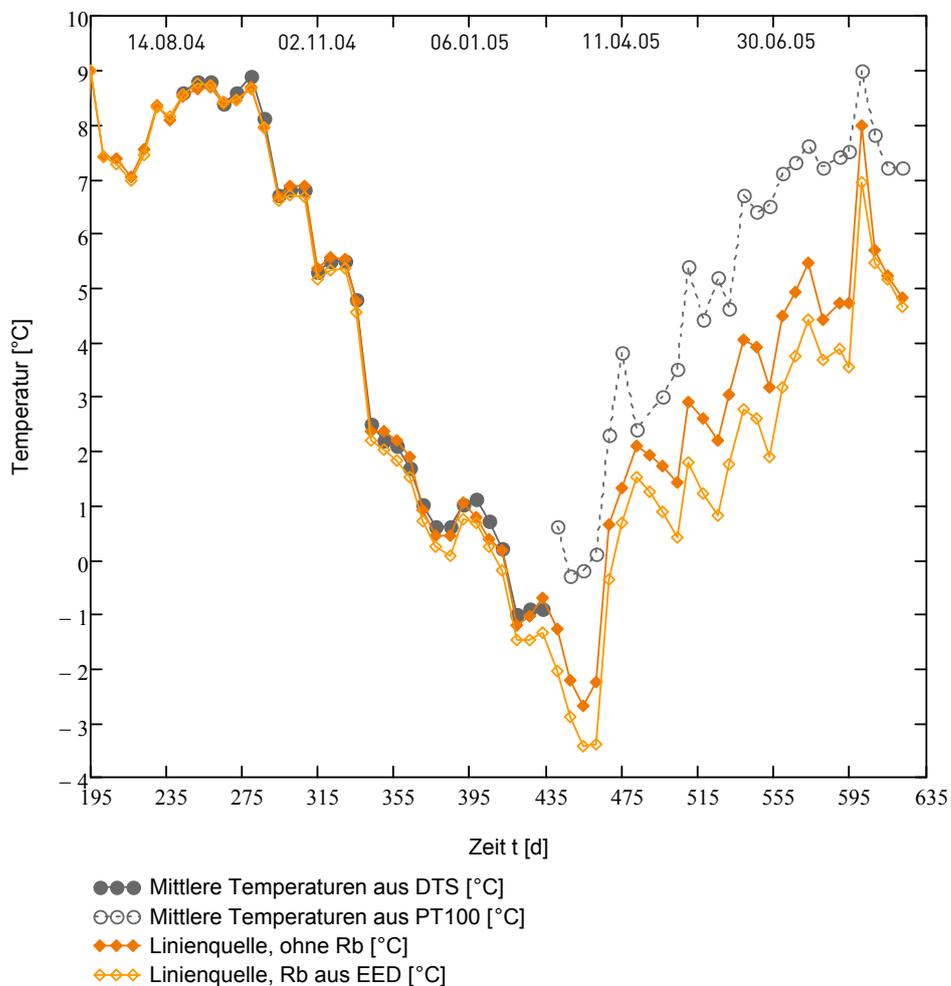


Abb. 6-2: Temperaturprognosen nach der Kelvinschen Linienquelle für EWS 2

In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Temperaturprognose nach der Kelvinschen Linienquellentheorie ohne Berücksichtigung des thermischen Bohrlochwiderstands  $R_b$  zwar grundsätzlich eine recht gute Übereinstimmung mit den Messwerten zeigt. Um das Rechenmodell jedoch zu komplettieren, ist die Einbindung des thermischen Bohrlochwiderstands unerlässlich und somit unterschätzt Kelvins Linienquelle die Messwerte um ca.  $0,4\text{ K}$  im Februar 2005.

Bei der Zylinderquellengleichung nach YOUNG (2004) gem. Gl. 3.66 werden die Messwerte zu Beginn des betrachteten Zeitraums im Trend ebenfalls recht gut abgebildet, jedoch bildet sich im weiteren Verlauf zunehmend deutlicher eine Differenz zwischen Messung und Prognose heraus (Abb. 6-3).

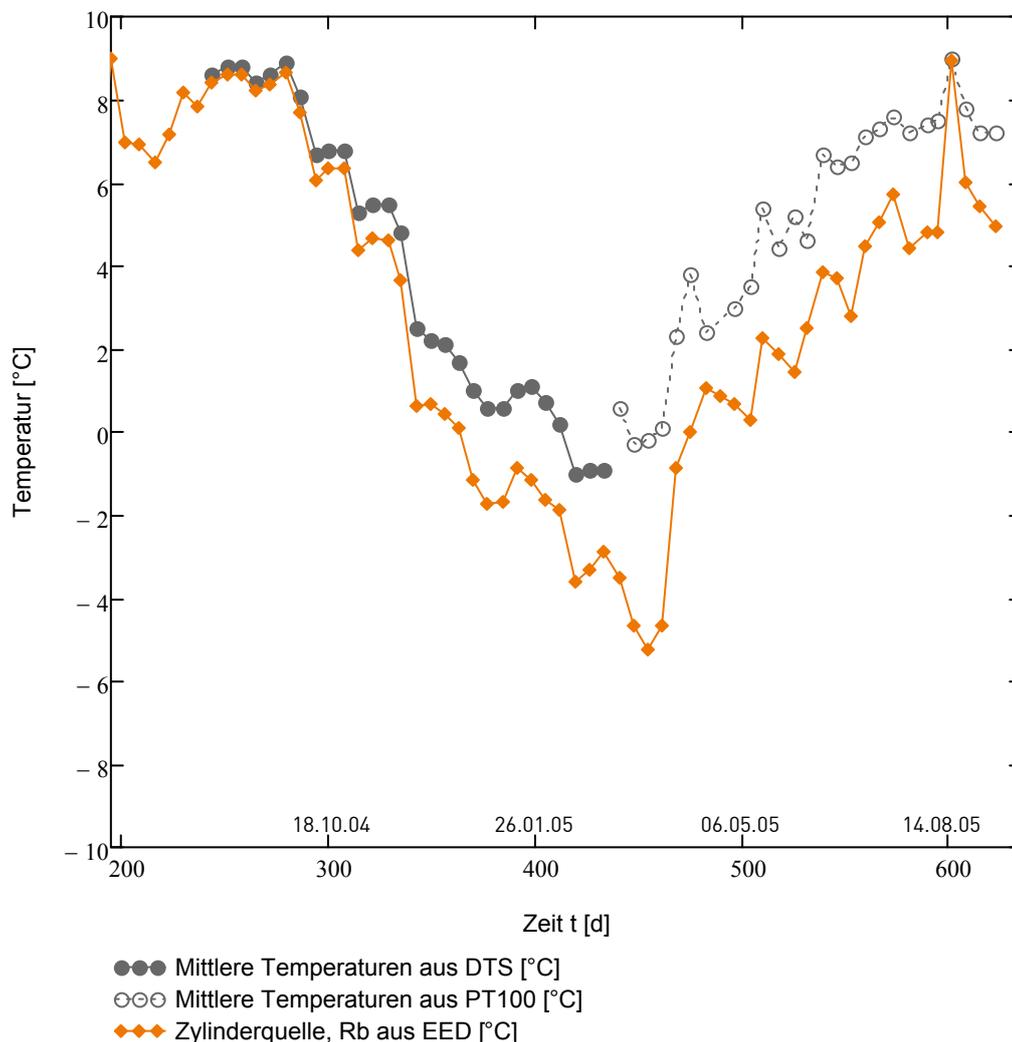


Abb. 6-3: Zylinderquellengleichung nach YOUNG (2004)

Dieses Verhalten ist, wie Abb. 6-4, in der lediglich der Messzeitraum mit DTS-Daten berücksichtigt wurde, zeigt, auch bei dem Simulationsergebnis mit Kelvins Linienquellengleichung,

wenn auch deutlich weniger ausgeprägt, zu beobachten. Die stärkere Abweichung von den Messwerten bei der Zylinderquellenlösung gegenüber Kelvins Linienquellengleichung entspricht grundsätzlich dem Modellansatz nach YOUNG (2004), in dem die thermischen Speicherkapazitäten  $S_1$  und  $S_2$  berücksichtigt werden.

Auch die bei beiden Verfahren unterhalb der gemessenen Temperaturen liegenden Simulationsergebnisse folgen den Erwartungen: Wie in Kap. 5 gezeigt, ist die Temperaturabsenkung durch den Betrieb der Erdwärmesondenanlage im Winter 2004/2005 im Bereich des quartären Kiessandaquifers weit geringer als in den grundwasserfreien Gesteinseinheiten. Prognoserechnungen mit Verfahren, die lediglich den konduktiven Wärmetransport abbilden, können die realen Verhältnisse am Standort in Herbrachhofen daher per se nicht exakt abbilden. Hierfür spricht auch das Berechnungsergebnis der EED-Simulation. Es zeigten sich im Vergleich mit den Mittelwerten der DTS-/PT100-Messungen für Ende Februar 2004 ( $\sim 2,4 \cdot 10^7 s$ ) ebenfalls zu niedrige Werte.

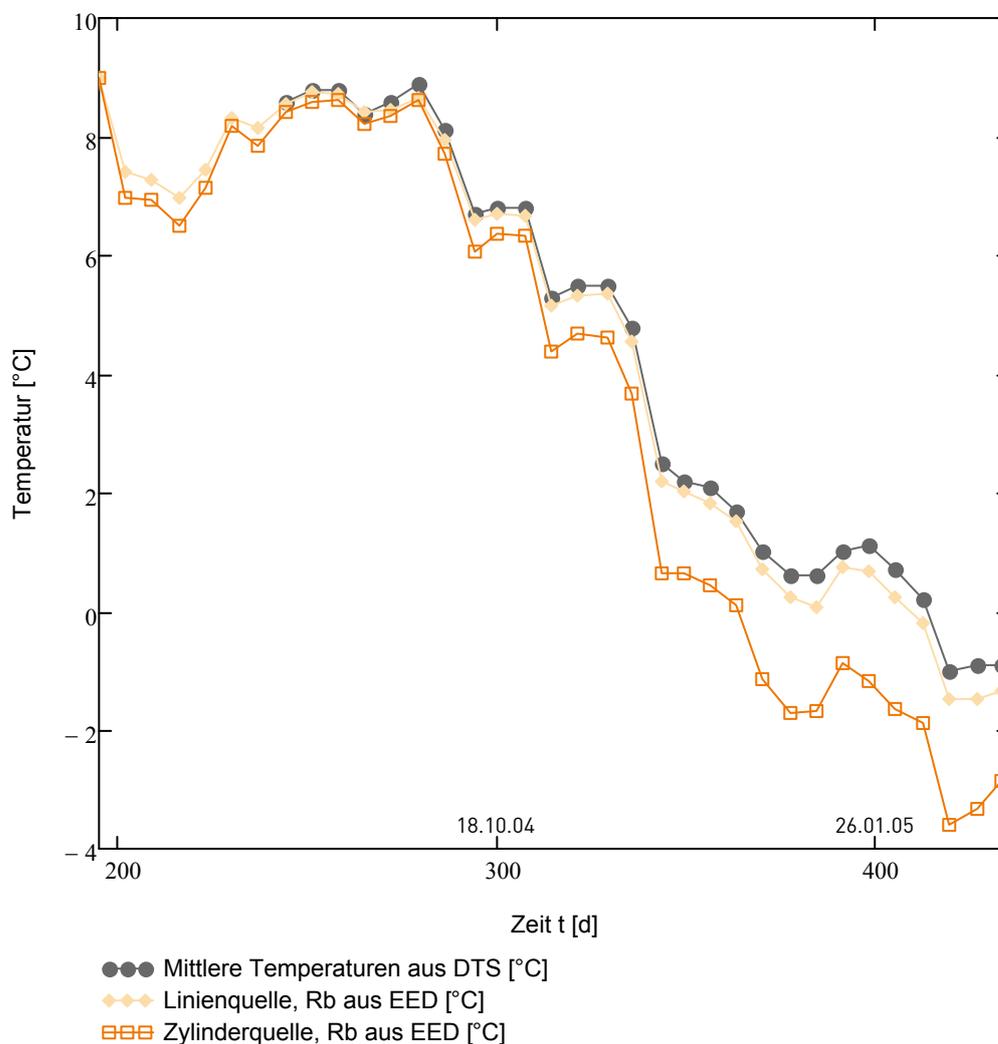


Abb. 6-4: Kelvinsche Linienquelle und Zylinderquelle vs. Temperaturmessungen

### 6.3 Bewegliche Linienquellen (Moving Line Sources)

Im vorhergehenden Abschnitt wurde gezeigt, dass sowohl mit Kelvins Linienquellen ansatz als auch mit dem Zylinderquellenverfahren die Messwerte unterschätzt werden. Es erscheint plausibel, dass zumindest ein Teilbetrag dieser Abweichung aus dem Einfluss des Grundwassers resultiert. Dies soll in diesem Unterkapitel mit dem Verfahren der Beweglichen Linienquelle weiter untersucht werden.

Zum Abgleich der Simulationsergebnisse nach der Theorie der Beweglichen Linienquellen mit den Messwerten soll der mit den Erdwärmesondenbohrungen in Herbrachhofen aufgeschlossene Untergrund in die drei Teilbereiche  $z_1$ ,  $z_2$  und  $z_3$  gegliedert werden. Die oberste Einheit bilden die quartären Lockergesteine bis zum Grundwasserspiegel, die mittlere der wassererfüllte Bereich des Kiessandaquifers und die untere die Gesteinseinheiten der Molasse. Der oberste Abschnitt bis in eine Tiefe von  $z_0 = 1\text{ m}$  unter Gelände ist weder mit Erdwärmesonden noch mit Messausrüstung bestückt und soll daher im Weiteren unberücksichtigt bleiben (Abb. 6-5).

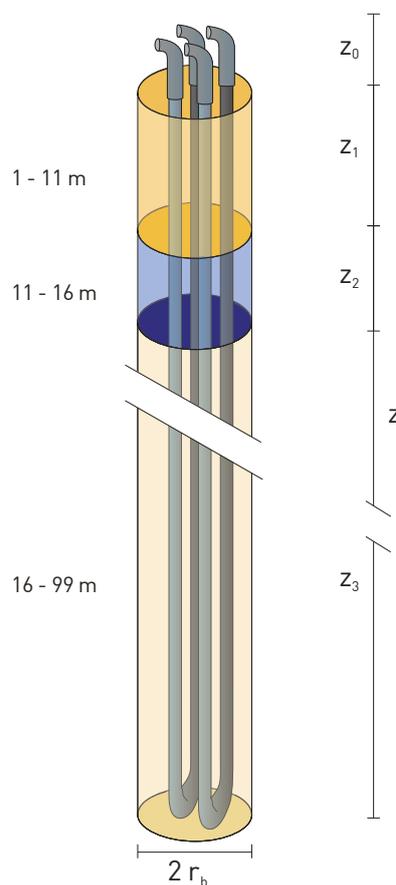


Abb. 6-5: Geothermische Einheiten am Standort Herbrachhofen

Für jeden dieser Teilbereiche konnten, wie in den Kap. 4 und 5 beschrieben, die relevanten Modellparameter separat erhoben werden. Bezogen auf die Entwicklung der mittleren Tempe-

raturen jeder Einheit, aber auch für die weiter unten beschriebene Ermittlung intervallbezogener Lastprofile setzt dies allerdings voraus, dass die einzelnen Tiefenintervalle als thermisch voneinander entkoppelt angesehen werden.

In Kapitel 3 sind die Randbedingungen aufgeführt, unter denen die Theorie der Beweglichen Linienquellen auf Erdwärmesonden angewendet werden kann. Eine der dort genannten Voraussetzungen ist das Einbinden der Erdwärmesondenbohrung über die gesamte Tiefe in einen Grundwasserleiter. Dies ist am Standort in Herbrachhofen nicht gegeben und wird auch andernorts eher eine Ausnahme darstellen. Unter Vernachlässigung des vertikalen Wärmetransports im Untergrund kann aber der Tiefenabschnitt mit dem wassererfüllten Bereich des Kiesandaquifers isoliert betrachtet werden. Trotz der eher geringen Mächtigkeit des Grundwasserleiters bleibt bei dieser Vorgehensweise eine weitere Randbedingung, die allen in dieser Arbeit diskutierten analytischen bzw. semi-numerischen Verfahren gemein ist, unberührt, nämlich das die Länge der Erdwärmesonde zumindest quasi-unendlich sein bzw. das Verhältnis von Quellenradius zur Quellenlänge hinreichend kleine Werte aufweisen muss. LOOSE (2006) nennt hierfür Mindestwerte, die vom Verhältnis des Bohrlochradius und der Mächtigkeit des Aquifers ( $3 \cdot 10^{-4}$  []) am Standort Herbrachhofen um etwa zwei Größenordnungen sicher unterschritten werden.

Der Einsatz eines CAS-Programms gestattet es, jeder einzelnen Erdwärmesonde eines Feldes die nötigen Gleichungen zuzuweisen. Auf diese Weise wird es möglich, eine individuelle Prognose der Entwicklung der mittleren Fluidtemperatur für jede der betrachteten Erdwärmesonden separat unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung zu entwickeln. Dies stellt, zusammen mit der Befreiung von Vorgaben zur Verteilung der Erdwärmesonden in einem Feld, gegenüber den heute in der Praxis eingesetzten Softwarelösungen eine deutliche Verbesserung dar.

Der Zeitbedarf zur Lösung aller notwendigen Gleichungen ist für ein CAS-Programm in Kombination mit einem Computer heute üblicher Leistungsstärke keine besondere Herausforderung: Die benötigte Rechenzeit beträgt für das Testfeld in Herbrachhofen beim verwendeten – und nicht zeitoptimierten – Arbeitsblatt lediglich wenige Sekunden.

Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse der Modellrechnungen wurden nach folgendem Schema ermittelt: Zunächst wurde für jeden einzelnen Zeitschritt des Lastprofils und über die Mächtigkeit der drei Einheiten die mittlere Temperatur aus den DTS-Messungen für jede mit einem DTS-Kabel versehene Erdwärmesonde bestimmt. Die ungestörten Temperaturen  $T_0$  für die drei Tiefenintervalle wurden aus der DTS-Messung vom Dezember 2004 berechnet.

In einem zweiten Schritt wurde dann den einzelnen Modellparametern – wo notwendig jeweils auf den einzelnen Tiefenabschnitt bezogen – Werte berechnet bzw. zugewiesen.

Für das grundwassererfüllte Tiefenintervall wurde anschließend der thermische Bohrlochwiderstand mit dem Ansatz von SUTTON ET AL. (2003) ermittelt. Für die beiden grundwasserfreien Abschnitte wurde dagegen der Wert für  $R_b$  aus der EED-Simulation verwendet.

Den letzten Schritt bildet dann die Simulation der Temperaturentwicklung. Exemplarisch ist dieses Vorgehen im nachstehenden Ablaufdiagramm für die Berechnung mit dem Verfahren der Beweglichen Linienquelle dargestellt (Abb. 6-7). Die Eingabeparameter lassen sich hier von links nach rechts in die vier Parametergruppen Untergrund, Hinterfüllmaterialien, Geometrie und Hydraulik unterteilen.

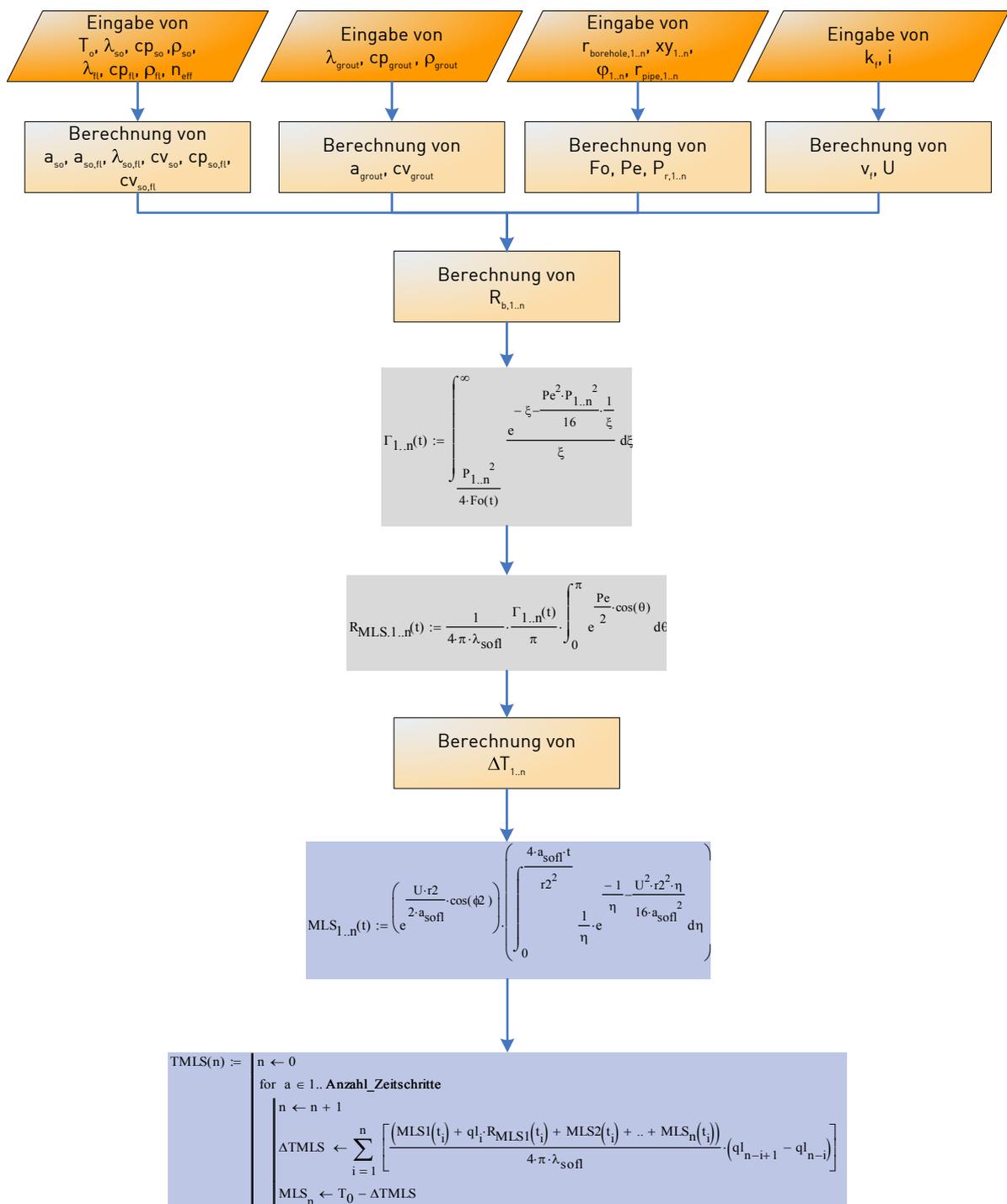


Abb. 6-6: Schematisiertes Ablaufdiagramm

Wie in Kap. 5 gezeigt wurde, ist die Temperaturentwicklung und damit auch die spezifische Entzugsleistung  $\dot{q}_l$  in den drei hier berücksichtigten Tiefenintervallen verschieden. Dementsprechend ist auch das Lastprofil tiefenintervallbezogen – für die grundwasserfreien Intervalle

mit Kelvins Linienquelle und  $R_b$  aus der EED-Simulation, für den Bereich mit Grundwasser mit der Bewegliche-Linienquellen-Gleichung und  $R_b$  nach dem Verfahren von SUTTON ET AL. (2003) – mit  $\dot{q}_{l,i}$  als Fitparameter anhand der DTS-Messungen zu modifizieren. Damit wird dem Ansatz gefolgt, dass die spezifische Entzugsleistung  $\dot{q}_{l,ges} \cdot z$  über die gesamte Erdwärmesondentiefe dem Mittel der spezifischen Entzugsleistungen  $\dot{q}_{l,i}$  der drei Teileinheiten multipliziert mit dem jeweiligen Tiefenanteil entspricht (Gl. 6.01).

$$\dot{q}_{l,ges} \cdot z = \frac{\dot{q}_{l,1} \cdot z_1 + \dot{q}_{l,2} \cdot z_2 + \dots + \dot{q}_{l,n} \cdot z_n}{z_1 + z_2 + \dots + z_n} \quad (6.01)$$

Das hier beschriebene Vorgehen kann auch für den Vergleich der Bestimmung des thermischen Bohrlochwiderstands  $R_b$  nach SUTTON ET AL. (2003) und den mit EED berechneten Werten herangezogen werden. Hierzu wurde zunächst für das grundwasserfreie Tiefenintervall zwischen 16 – 99 m der EWS 2 ein Lastprofilfit mit  $\dot{q}_l$  als Fitparameter mit Kelvins Linienquellengleichung und  $R_b$  aus EED vorgenommen. Anschließend wurde das so erzeugte Lastprofil auf die Bewegliche-Linienquellen-Gleichung (Gl. 3.54) in Kombination mit dem Sutton-Verfahren angewendet. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  wurde dabei so klein gewählt, dass die Quellengeschwindigkeit  $U \approx 0$  wird (Abb. 6-7).

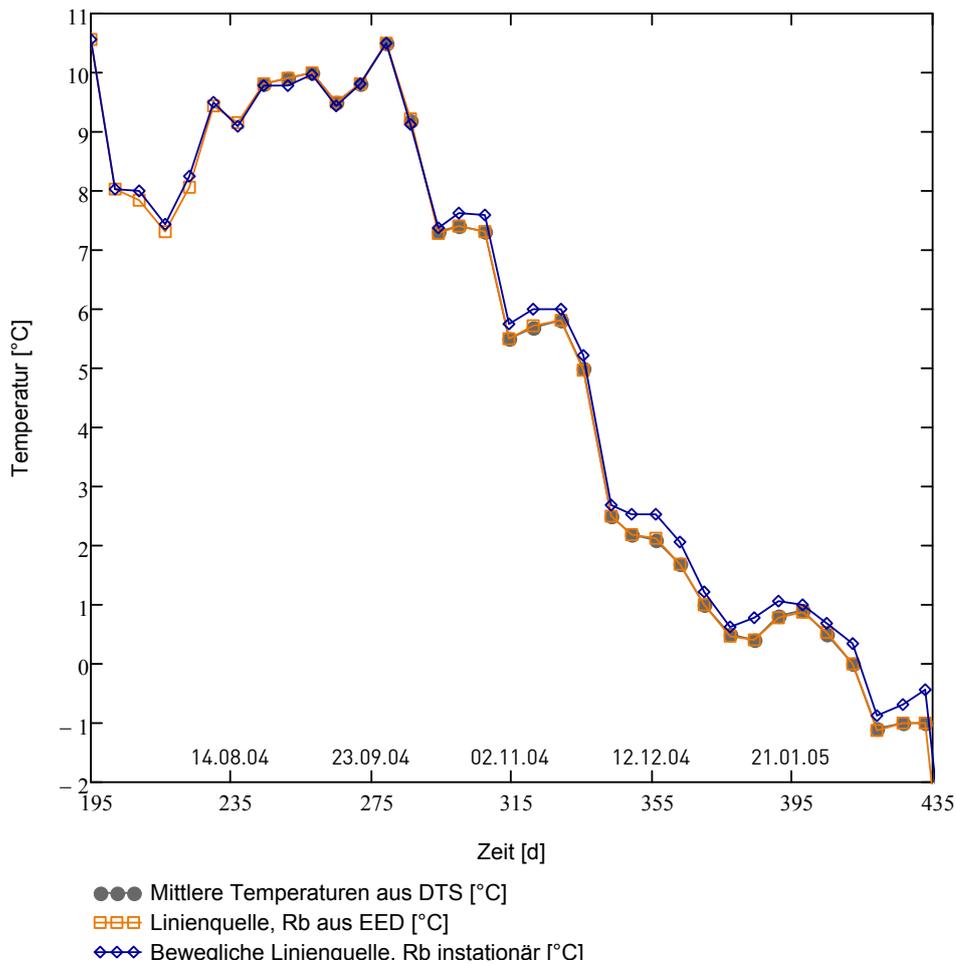


Abb. 6-7: Berechnete vs. gemessene Temperaturen ( $R_b$  nach SUTTON ET AL. bzw. EED)

Im Vergleich liegt die Temperaturkurve für das Verfahren nach SUTTON ET AL. (2003) mit bis zu  $0,2\text{ K}$  über der Kurve, die mit dem thermischen Bohrlochwiderstand aus EED berechnet wurde. Dies bedeutet, dass die Werte für  $R_b$  nach Sutttons Verfahren etwas größer ausfallen, da  $\dot{q}_l$  im Heizfall konventionsgemäß mit einem negativen Vorzeichen versehen ist. Dies lässt sich auch unter Annahme eines variierenden Durchlässigkeitsbeiwerts zeigen. Die in Kap. 4 beschriebenen hydrogeologischen Untersuchungen am Standort Herbrachhofen ergaben einen mittleren Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  von  $1,3 \cdot 10^{-2}\text{ m/s}$  und einen Wert von  $0,002$  für den hydraulischen Gradienten  $i$  (KUPSCH ET AL. 1989). Mit einer volumetrischen Wärmekapazität  $cv_{so,fl}$  von  $1,6 \cdot 10^6\text{ J/(m}^3 \cdot \text{K)}$  für den wassererfüllten Untergrund sowie der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität für Wasser bei  $9\text{ }^\circ\text{C}$  ergibt sich gemäß Gl. 3.50 die Quellengeschwindigkeit  $U$  zu  $1,6 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$ . Für Abb. 6-8 wurden verschiedene Durchlässigkeitsbeiwerte bei ansonsten ungeänderten, dem Standort in Herbrachhofen entsprechenden Parametern in Gl. 3.58 eingesetzt und dem mit EED berechneten Wert für den thermischen Bohrlochwiderstand gegenübergestellt. Mit  $\varphi = 0$  wird dabei die Situation im Abstrom zu einer Erdwärmesonde betrachtet.

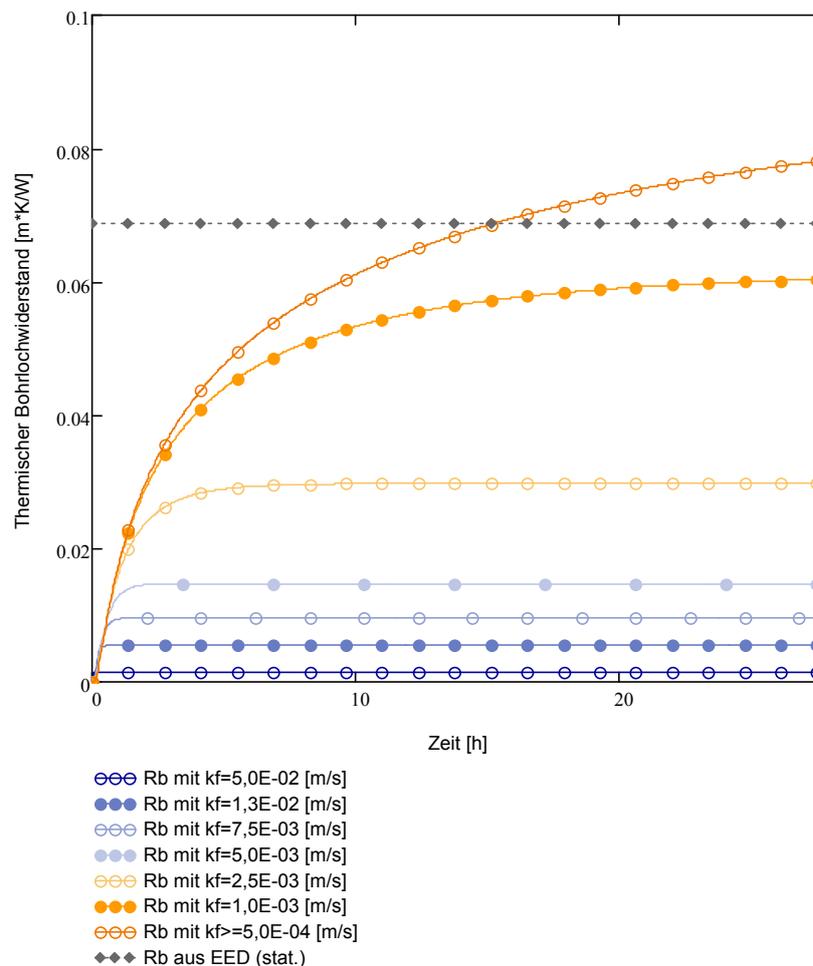


Abb. 6-8: Thermischer Bohrlochwiderstand  $R_b$  in Abhängigkeit vom  $k_f$ -Wert

Der Erwartung entsprechend liegt der nach SUTTON ET AL. (2003) berechnete  $R_b$ -Wert für die EWS 2 im Testfeld dem hohen Durchlässigkeitsbeiwert am Standort entsprechend deutlich unter dem Wert, der mit EED berechnet wurde. Gleichzeitig zeigt sich, dass bei kleineren Durchlässigkeitsbeiwerten – etwa ab  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  – der thermische Bohrlochwiderstand  $R_b$  über dem mit EED ermittelten Wert liegt. Ab einem  $k_f$ -Wert von  $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  verändert sich das Ergebnis für  $R_b$  praktisch nicht mehr und beträgt im thermischen Gleichgewichtszustand schließlich  $0,091 \text{ [m} \cdot \text{K/W]}$ .

Den Erwartungen entsprechend zeigt das Verfahren nach SUTTON ET AL. (2003) mit zunehmend größeren Winkeln  $\varphi$  – also beim Wechsel vom Abstrom in den Zustrom einer Erdwärmesonde – ständig kleiner werdende Werte (Abb. 6-9).

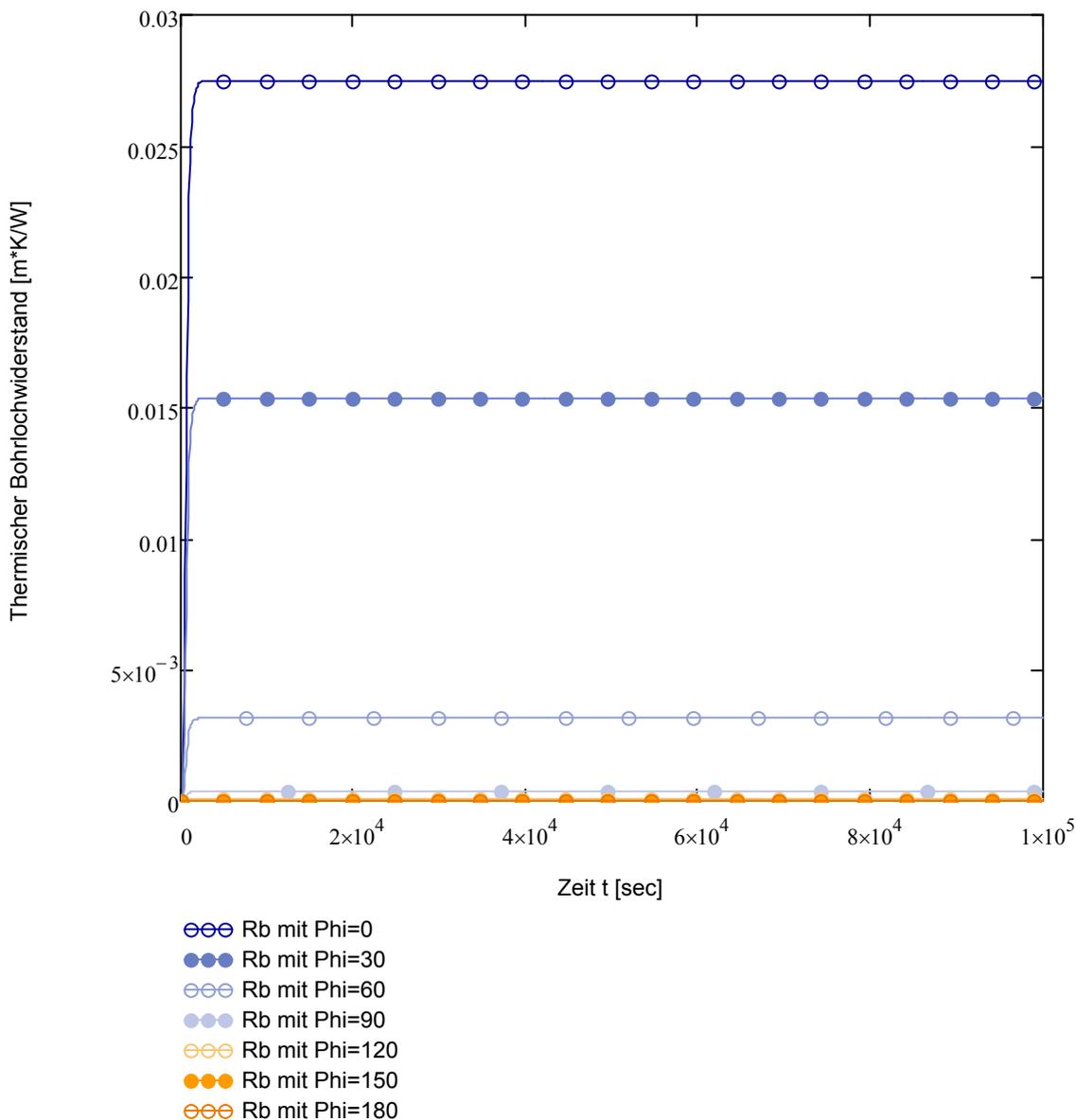


Abb. 6-9: Thermischer Bohrlochwiderstand  $R_b$  in Abhängigkeit von der Fließrichtung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die nach SUTTON ET AL. (2003) berechneten Werte für den thermischen Bohrlochwiderstand bei sehr kleiner Quellengeschwindigkeit  $U$  recht ähnliche Werte wie das EED-Ergebnis nach dem Multipole-Verfahren aufweisen. Plausibel sind auch die mit steigender Quellengeschwindigkeit zunehmend größeren Werte für  $R_b$ . Bei großen Quellengeschwindigkeiten nehmen die Ergebnisse nach SUTTON ET AL. (2003) dagegen grundsätzlich Werte an, die unter dem mit EED ermittelten  $R_b$  liegen. Dies entspricht den Erwartungen und das Verfahren von SUTTON ET AL. besitzt somit bei entsprechender Quellengeschwindigkeit  $U$  gegenüber dem Multipole-Verfahren Vorteile. Bei sehr geringen Durchlässigkeitsbeiwerten bzw. bei grundwasserfreien Gesteinseinheiten kann dagegen dem Multipole-Verfahren der Vorzug gegeben werden. Bei der weiter unten beschriebenen Ermittlung des Grundwassereinflusses auf die thermische Leistung einer Erdwärmesonde wurde diesem Ansatz gefolgt und für die grundwasserfreien Tiefenintervalle der thermische Bohrlochwiderstand aus der EED-Simulation angesetzt, im grundwassererfüllten Bereich dagegen mit  $R_b$  aus dem Verfahren nach SUTTON ET AL. (2003) gerechnet.

### 6.3.1 Messwerte vs. Kernbohrung

Wie in Kap. 4 bereits beschrieben, wurde im Abstrom und in 5 m Distanz zum Erdwärmesondenfeld eine Kernbohrung abgeteuft und mit Messequipment, aber nicht mit einer Erdwärmesonde, ausgerüstet. Hier wurden über den gesamten Feldversuch hinweg Temperaturmessungen in Tiefen von 11 m, 16 m und 64 m mit PT100-Sensoren durchgeführt. Die Messergebnisse selbst wurden bereits in Kap. 5 vorgestellt und werden nachfolgend mit Modellergebnissen verglichen.

Für das Tiefenintervall zwischen 16 und 99 m ( $z_3$ ) kann mit der Linienquellentheorie und Superposition der einzelnen Erdwärmesonden des Herbrachhofener Feldes für einen Zeitraum von 441 Tagen gegen die Messwerte des entsprechenden PT100-Fühlers in der Kernbohrung gerechnet werden. Da die Quellengeschwindigkeit  $U$  hier vernachlässigbar gering ist, ist es unerheblich, ob mit Kelvins Linienquellen-Gleichung oder nach der Theorie der Beweglichen Linienquellen gerechnet wird. Aufgrund der sehr geringen Unterschiede zwischen dem in Kap. 5 vorgestellten Lastprofil und dem über das oben erläuterte Fit-Verfahren für dieses Tiefenintervall ermittelten Lastprofil, spielt es eine untergeordnete Rolle, welcher der beiden Datensätze hier berücksichtigt wird: Zwischen ihnen ergibt sich nach der Berechnung eine maximale Temperaturdifferenz von 0,041 K. Notwendig ist dagegen, da mit den Linienquellennlösungen die mittlere Temperatur über die Tiefe  $z$  bestimmt wird, eine Korrektur der PT100-Messwerte. Sie wurden in 64 m unter Geländeoberkante aufgezeichnet und müssen auf eine Tiefe von  $z_1 + z_2 + (z_3/2) = 57,5$  m angepasst werden. Für diese Korrektur kann der in Kap. 5 ermittelte geothermische Gradient von 0,033 K/m zusammen mit der Differenztiefe (6,5 m) herangezogen werden.

Wie Abb. 6-10 zeigt, wird mit diesem Vorgehen die Temperaturentwicklung in der Kernbohrung recht gut nachvollzogen und die Differenz zwischen korrigiertem Messwert und Modellergebnis liegt bei  $< 0,3$  K. Es zeigt sich aber auch, dass das Modell die Temperaturentwicklung zunächst unterschätzt, um dann ab etwa  $t = 2 \cdot 10^7$  s einen etwas zu kräftigen Temperaturabfall vorherzusagen.

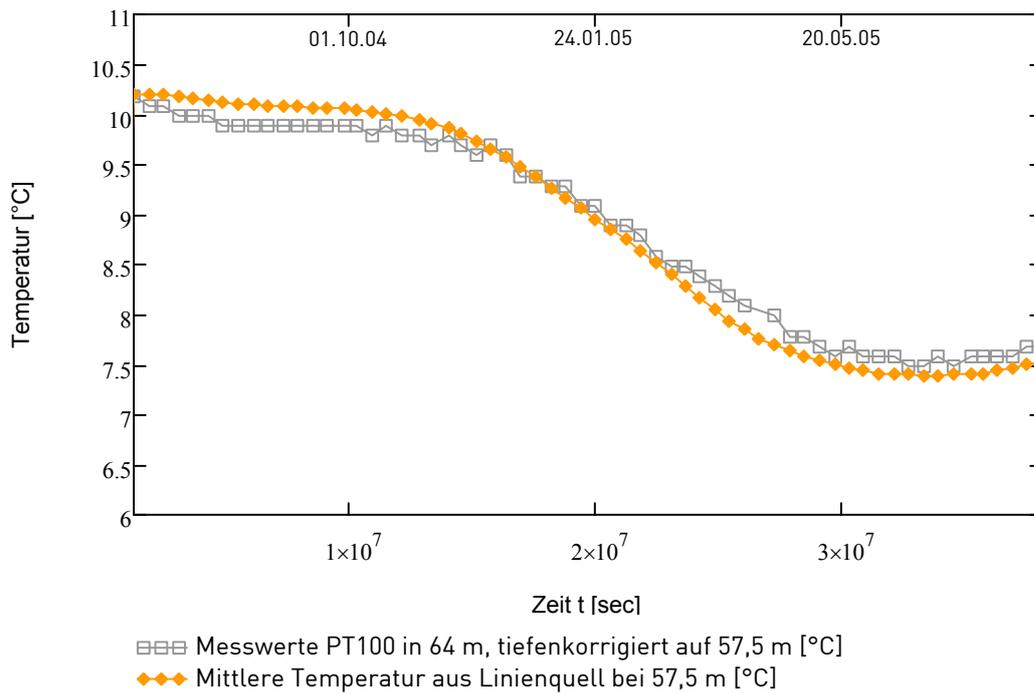


Abb. 6-10: Messwerte vs. Modellrechnung für 57,5 m Tiefe (Kernbohrung)

In Abb. 6-11 ist der jahreszeitlich bedingte Temperaturgang für den Teststandort in Herbrachhofen gegen die Messwerte des PT100-Sensors in 11 m Tiefe abgetragen.

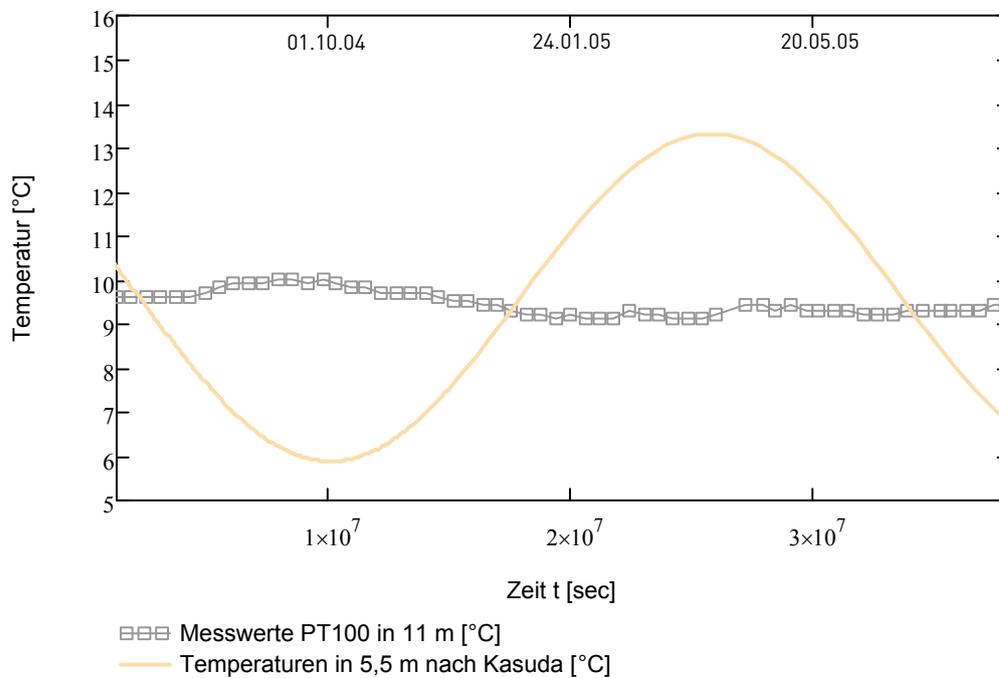


Abb. 6-11: Messwerte Kernbohrung und Temperaturganglinie nach KASUDA (1965)

Anders als beim Intervall zwischen 16 und 99 m Tiefe ist ein Abgleich von Modellergebnissen mit den Messwerten hier grundsätzlich nicht sinnvoll möglich, da sich eine Temperaturkorrektur der Messwerte auf 5,5 m Tiefe zum einen wegen der Lage des Sensors im Grundwasserbereich, zum anderen wegen des Einflusses der jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen verbietet. Wegen seiner Lage im Bereich des Grundwasserkörpers eignen sich die Messwerte dieses Temperaturfühlers aber für einen Vergleich mit Simulationsergebnissen nach der Kelvinschen und der Beweglichen Linienquelle für das grundwassererfüllte Tiefenintervall zwischen 11 und 16 m Tiefe (Abb. 6-12). Erwartungsgemäß zeigt das Ergebnis nach der Kelvinschen Linienquelle eine deutliche Unterschätzung der Messwerte um bis zu  $\sim 3,5$  K. Mit der Methode der Beweglichen Linienquelle (Moving Line Source) lässt sich die Temperaturentwicklung dagegen besser abbilden. Die Differenzen zwischen Messwerten und Rechenergebnissen lassen sich möglicherweise – hierauf deutet der Bereich zwischen  $1 \cdot 10^7$  s und  $2 \cdot 10^7$  s hin – auf den Einfluss des jahreszeitlichen Temperaturgangs zurückführen, der in dieser Tiefe  $\pm 0,4$  K beträgt.

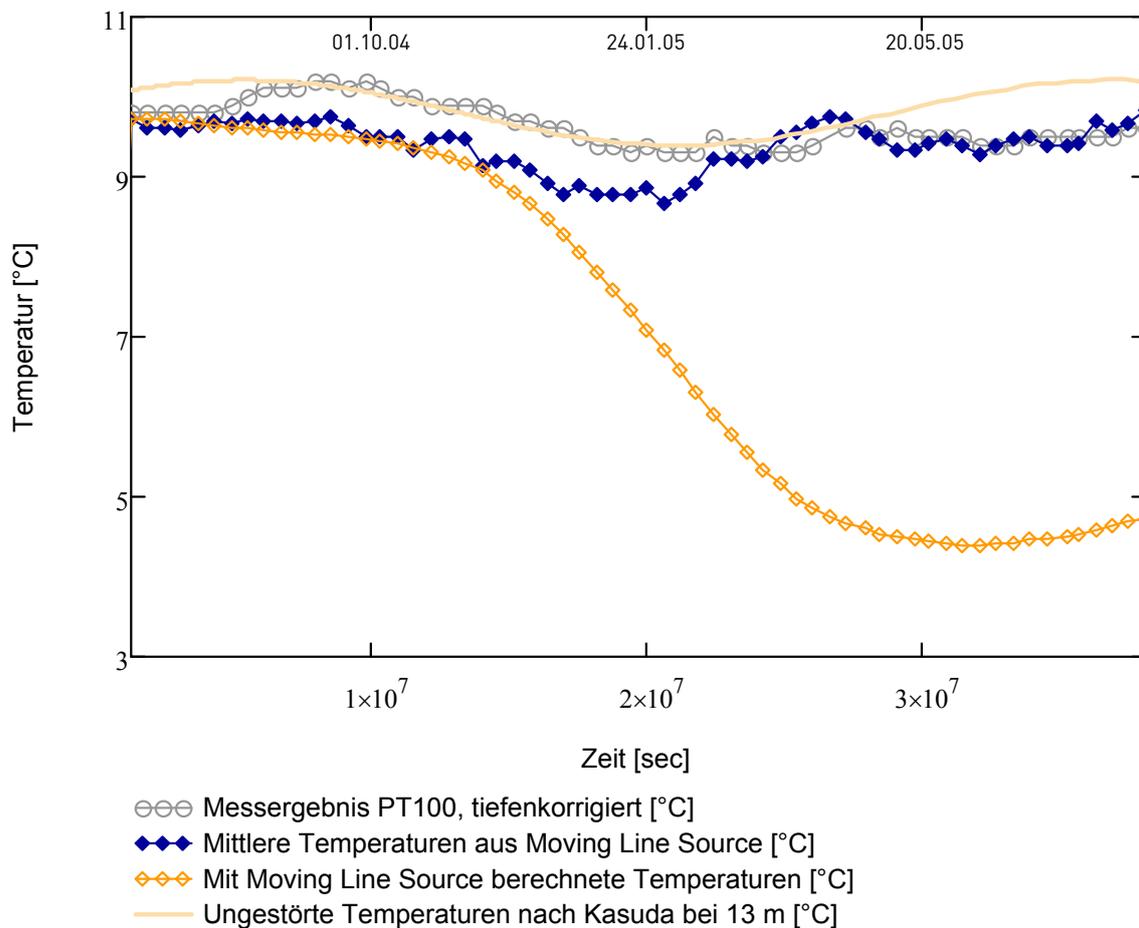


Abb. 6-12: Mess- und Modellwerte für den Bereich des Grundwasserleiters

### 6.3.2 Messwerte vs. EWS 6

Analog zum Vorgehen bei der Kernbohrung kann ein Abgleich von Messwerten und Simulationsergebnissen für die Erdwärmesondenbohrungen mit DTS-Ausstattung vorgenommen werden. Dies soll beispielhaft an der EWS 6 vorgestellt werden (Abb. 6-13). Für die Berechnung der Temperaturentwicklung wurde das Teillastprofil verwendet, das wie oben beschrieben durch ein Fitverfahren an der EWS 2 für das grundwassererfüllte Tiefenintervall zwischen 11 und 16 m Tiefe entwickelt wurde. Mit diesem wurde gegen die mittleren Temperaturen aus der DTS-Messung an der EWS 6 und gegen den Temperaturtrend, den der PT100-Sensor an derselben Erdwärmesonde – die Messwerte wurden auch hier über den geothermischen Gradienten von 11 m auf 13 m unter Gelände korrigiert – zeigt, unter Berücksichtigung der Zeitschritte aus dem Lastprofil gerechnet.

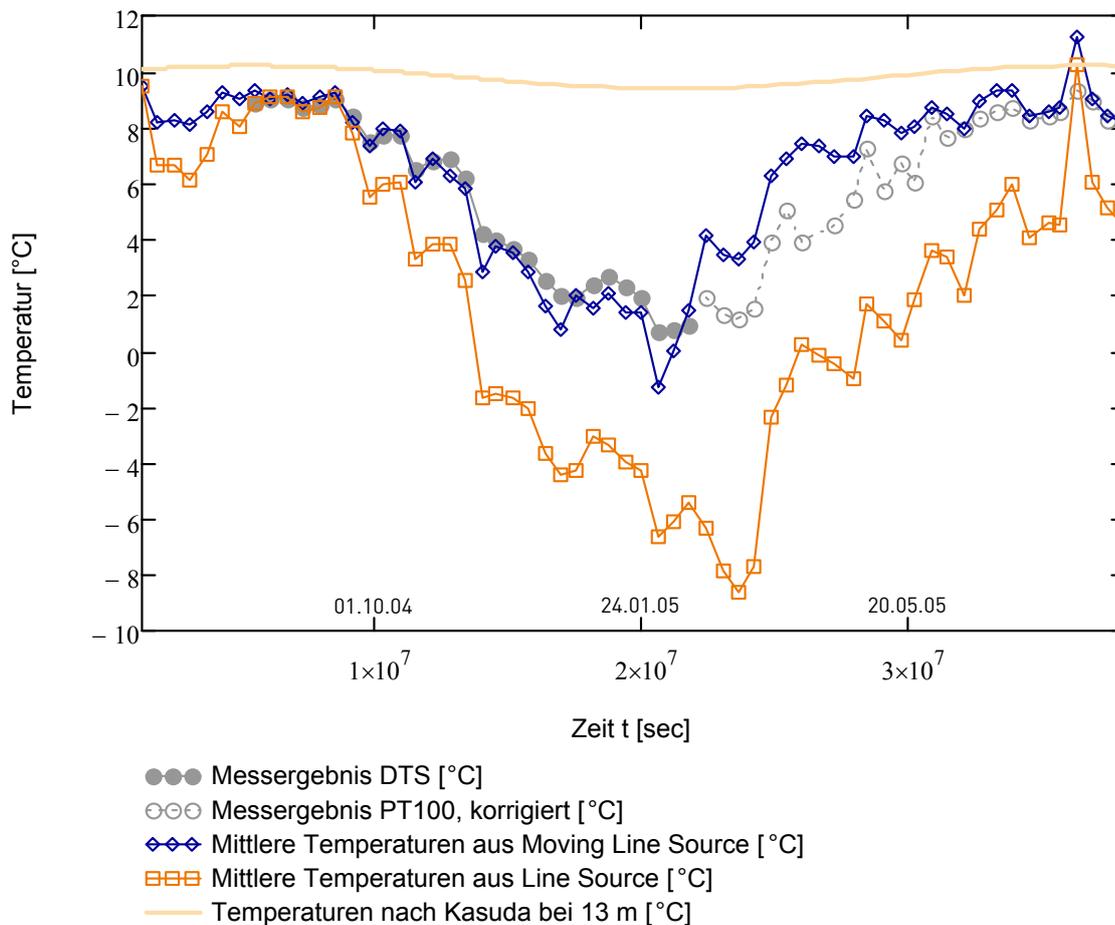


Abb. 6-13: Messwerte und Modellrechnung im Grundwasserbereich bei EWS 6

Im Vergleich mit den Messwerten und Berechnungsergebnissen für die Kernbohrung in Abb. 6-12 fällt zunächst auf, dass die Messwerte bei der EWS 6 sehr deutlich hinter der Temperaturenganglinie nach KASUDA (1965) zurückbleiben und auch während des Sommers 2005 keine vollständige thermische Regenerierung des Untergrunds unmittelbar an EWS 6 stattfindet.

Wie bereits bei der Kernbohrung wurde auch hier sowohl mit Kelvins als auch mit der Beweglichen Linienquelle gerechnet. Die Prognose des Temperaturverlaufs nach Kelvins Linienquelle zeigt hier nur im ersten Viertel des betrachteten Zeitraums eine Übereinstimmung mit der Messung. Im weiteren Verlauf weichen Messwerte und Simulationsergebnis um bis  $\sim 10\text{ K}$  voneinander ab. Deutlich besser stimmen dagegen Messung und Prognose nach der Beweglichen Linienquelle überein. Zwar zeigen sich auch hier Abweichungen (Abb. 6-14), diese sind aber im Vergleich mit dem Ergebnis nach Kelvins Linienquelle weitaus geringer.

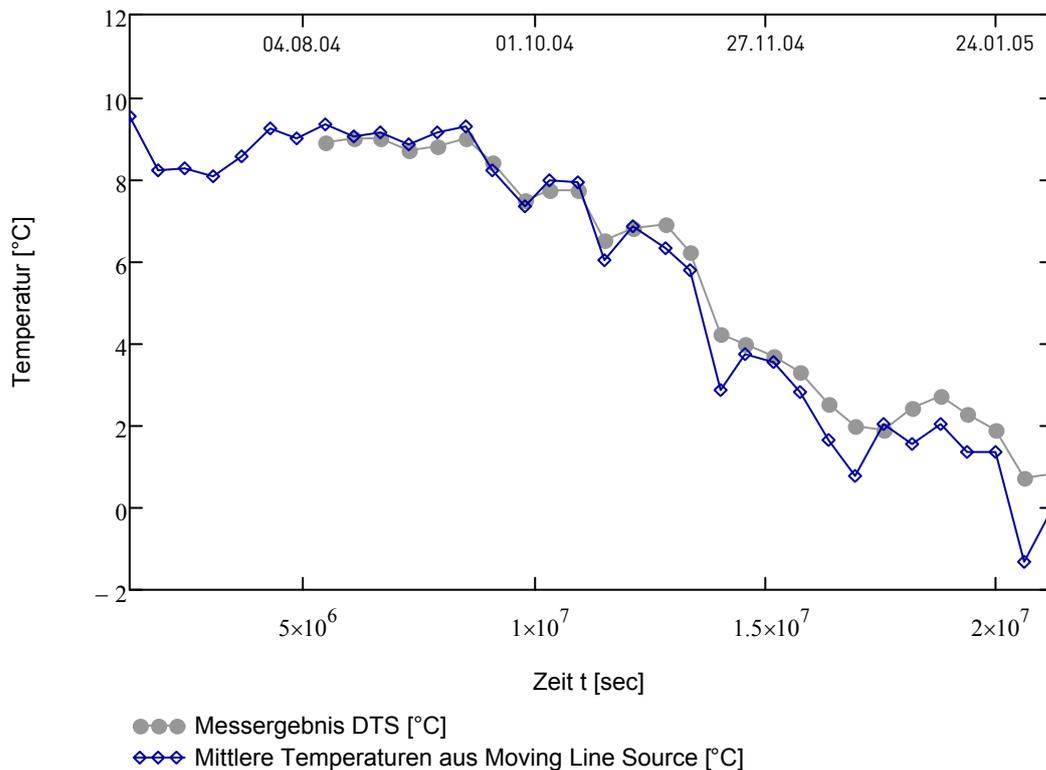


Abb. 6-14: Mittl. Temperaturen (DTS) und Prognose nach der Beweglichen Linienquelle

### 6.3.3 Kernbohrung, virtuelle Messpunkte und EWS 7

Mit der Einführung virtueller Messpunkte kann die Temperaturentwicklung mit der Zeit auf einer Profilstrecke – hier zwischen Kernbohrung und EWS 7 – näher untersucht werden. Dazu wurden zunächst in Meterabständen und parallel zur Grundwasserfließrichtung von EWS 7 aus in Richtung auf die Kernbohrung, wie in Abb. 6-15 dargestellt, für das Tiefenintervall von 16 m bis 99 m und von 11 m bis 16 m die Temperaturentwicklung zu definierten Zeitpunkten bestimmt. Für das tiefe Intervall wurde dabei Kelvins Linienquellengleichung angewendet, für den Grundwasserbereich dagegen mit der Beweglichen Linienquelle gerechnet.

In Abb. 6-16 ist das Ergebnis dieser Berechnungen für den tiefen, grundwasserfreien Bereich dargestellt. Während es bei den Temperaturangaben an der EWS7 (Feldmittelwert aus DTS) und an der Kernbohrung um Messwerte (PT100) handelt, sind die Werte dazwischen berechnet. Ausgehend von EWS 7 zeigt sich, wie mit der Zeit die Temperaturen in zunehmender Distanz von der Erdwärmesonde absinken.

## 6. Modellrechnungen

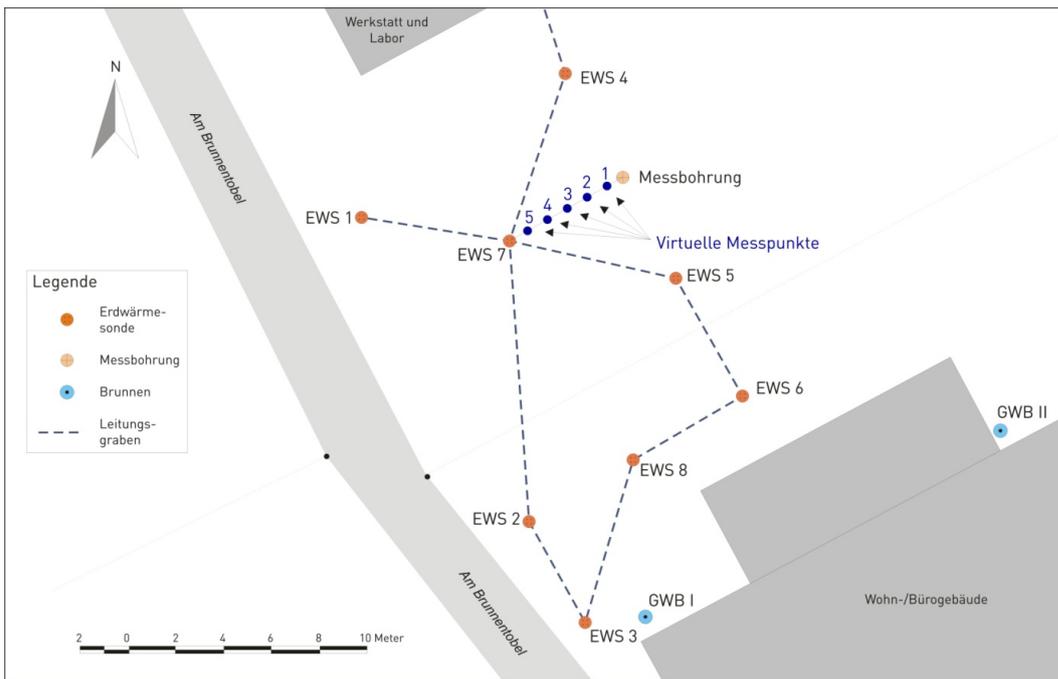


Abb. 6-15: Lage der virtuellen Messpunkte

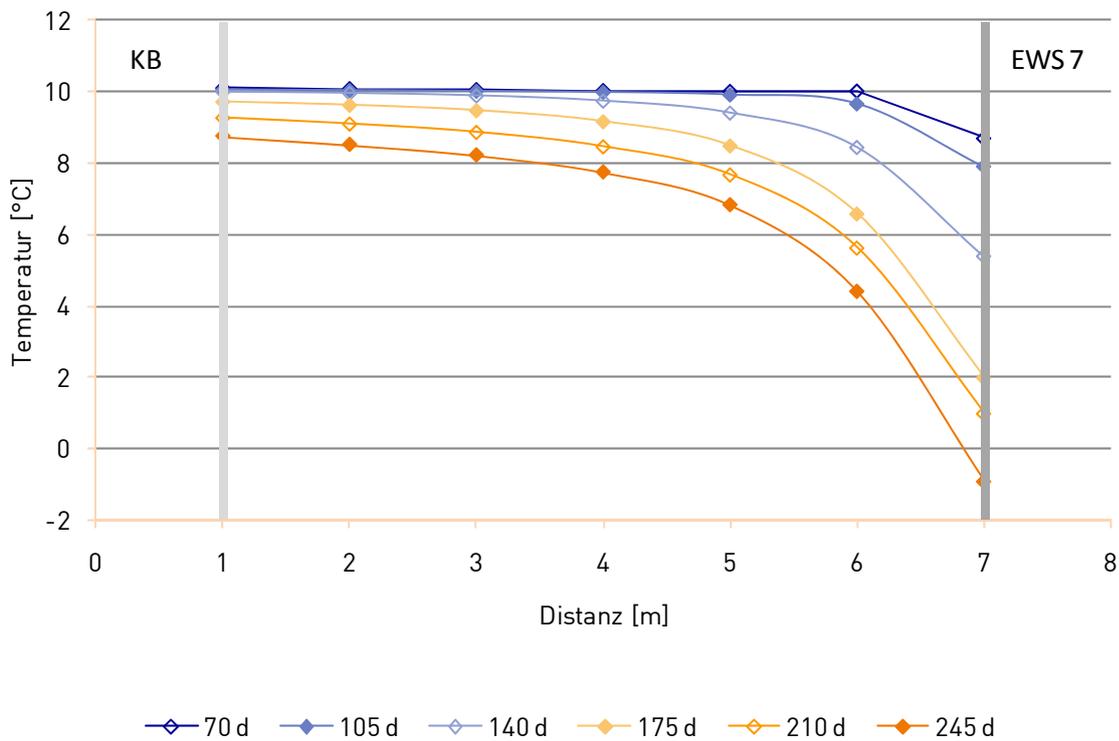


Abb. 6-16: Temperaturen zwischen Messbohrung (KB) und EWS7 (16 m bis 99 m)

Während nach 70 Tagen diese Temperaturabsenkung nicht weiter als einen Meter im Abstrom von EWS 7 auftritt, ist sie dem Simulationsergebnis zur Folge nur 35 Tage (105 d) später bereits bis in eine Distanz zwischen 4 und 5 m zu erkennen. Nach weniger als 175 Tagen ist sie dann schließlich in der Kernbohrung messbar.

Im Bereich des Grundwasserleiters sinken die Temperaturen im Vergleich dazu unmittelbar an der EWS 7 insgesamt geringer. Zudem ist der sich entwickelnde „Temperaturtrichter“ um EWS 7 bis in eine Distanz von ca. einem Meter von der Erdwärmesondenbohrung steiler (Abb. 6-17).

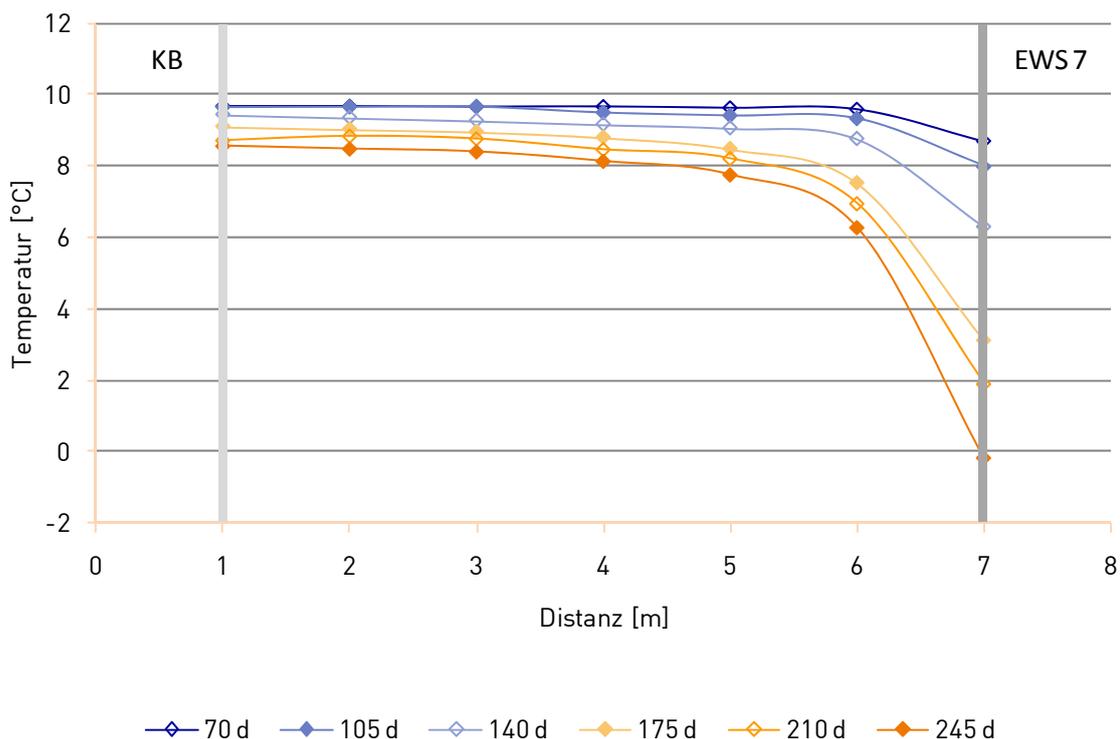


Abb. 6-17: Temperaturen zwischen Messbohrung und EWS7 (Intervall von 11 m bis 16 m)

### 6.3.4 Bestimmung der Entzugsleistung ohne und mit Grundwassereinfluss

Die oben beschriebenen tiefenintervallbezogenen Teillastprofile können auch zur Bestimmung der jeweiligen Entzugsleistung der Einheiten von 1 bis 11 m bzw. von 11 bis 16 m und von 16 bis 99 m herangezogen werden. Sie sind in Abb. 6-18 zeitschrittbezogen zusammen mit dem in Kap. 5 beschriebenen Gesamtlastprofil aufgetragen. Über die gesamte Erdwärmesondentiefe betrachtet wurde demnach der weit überwiegende Teil der mit der Herbrachhofener Anlage dem Untergrund entzogenen thermischen Energie aus den Gesteinen der Molasse bereitgestellt, während die Anteile für das oberflächennächste und das darunter liegende Tiefenintervall weit weniger bedeutend sind. Außerdem ist eine recht gute Übereinstimmung zwi-

schen der Summe der Teilleistung je Tiefenintervall und den Daten des Originallastprofils, die die gesamte Erdwärmesonde berücksichtigen, zu erkennen. Dies bestätigt, dass die Dreiteilung des Untergrunds in thermisch voneinander entkoppelte Tiefenintervalle im Rahmen der in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen bei Akzeptanz einer Abweichungen von  $0,4 \text{ W/m}$  gemittelt über den Untersuchungszeitraum statthaft ist. Ebenfalls über den Betrachtungszeitraum gemittelt zeigt sich, dass am Standort in Herbrachhofen 84 % der Energie den Gesteinseinheiten der Oberen Süßwassermolasse entzogen wurden, während dem grundwasserfreien und dem grundwassererfüllten quartären Einheiten jeweils 8 % entstammen.

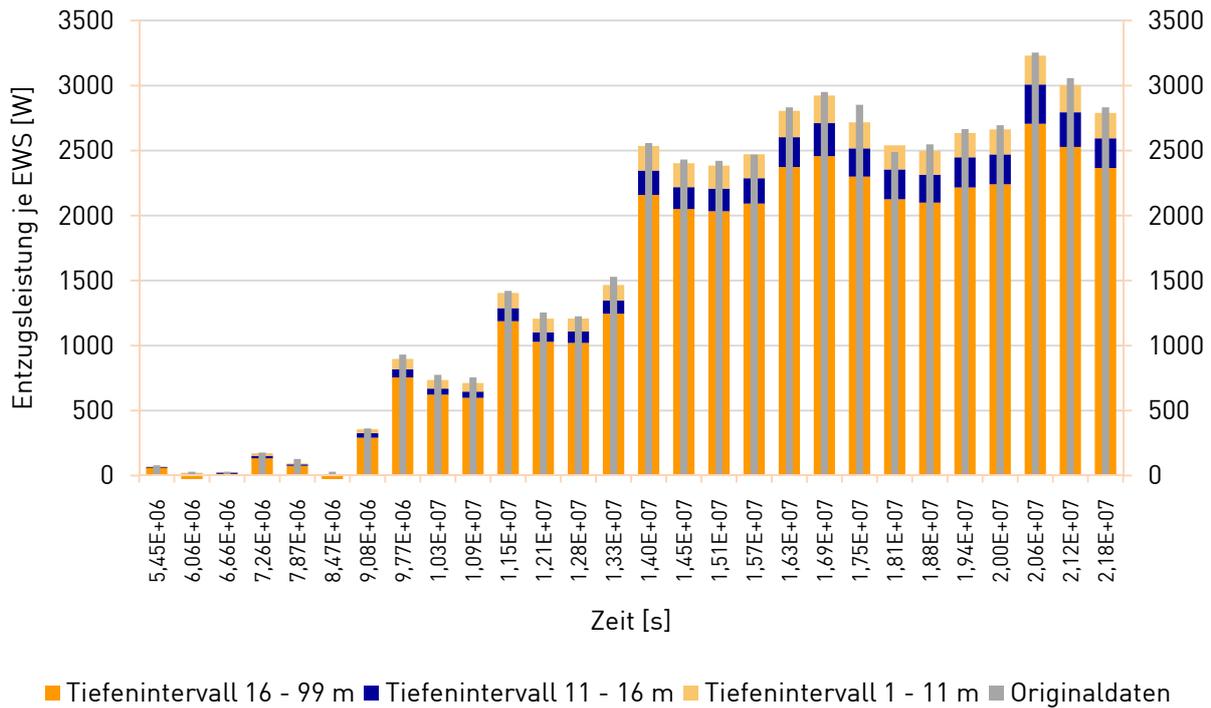


Abb. 6-18: Tiefenintervallbezogene Entzugsleistungen und Originaldaten

In Anbetracht des eher geringen Anteils des quartären Grundwasserleiters am mit den Erdwärmesondenbohrungen aufgeschlossenen Untergrund zeigt sich hier allerdings auch, dass der Energietransport mit dem Grundwasser einen sehr konkreten Energiebetrag zur Versorgung der Testanlage beigesteuert hat. Dieser Beitrag lässt sich in konkreten Zahlen ausdrücken, wenn die Leistungsanteile in die spezifischen Entzugsleistungen, also auf einen Meter Erdwärmesonde aufgeschlüsselt und gegen die Zeit abgetragen werden (Abb. 6-19). Es kann gezeigt werden, dass gerade zu Zeiten erhöhter Lasten die spezifische Entzugsleistung im Bereich des quartären Grundwasserleiters größer ist als die der beiden anderen Einheiten zusammen und Spitzenwerte von etwa  $60 \text{ W/m}$  erreicht. Im selben Zeitraum liegt der Wert für das Intervall von 16 bis 99 m lediglich bei knapp über  $30 \text{ W/m}$  und der für das oberflächennächste Intervall bei etwa  $20 \text{ W/m}$ .

Über den gesamten Betrachtungszeitraum liegt die mittlere spezifische Entzugsleistung für das trockene quartäre Gestein bei  $10,5 \text{ W/m}$  und für die Molasseeinheiten bei  $12,5 \text{ W/m}$ . Für den Bereich des Grundwasserleiters beläuft sich der Mittelwert auf  $17,0 \text{ W/m}$ .

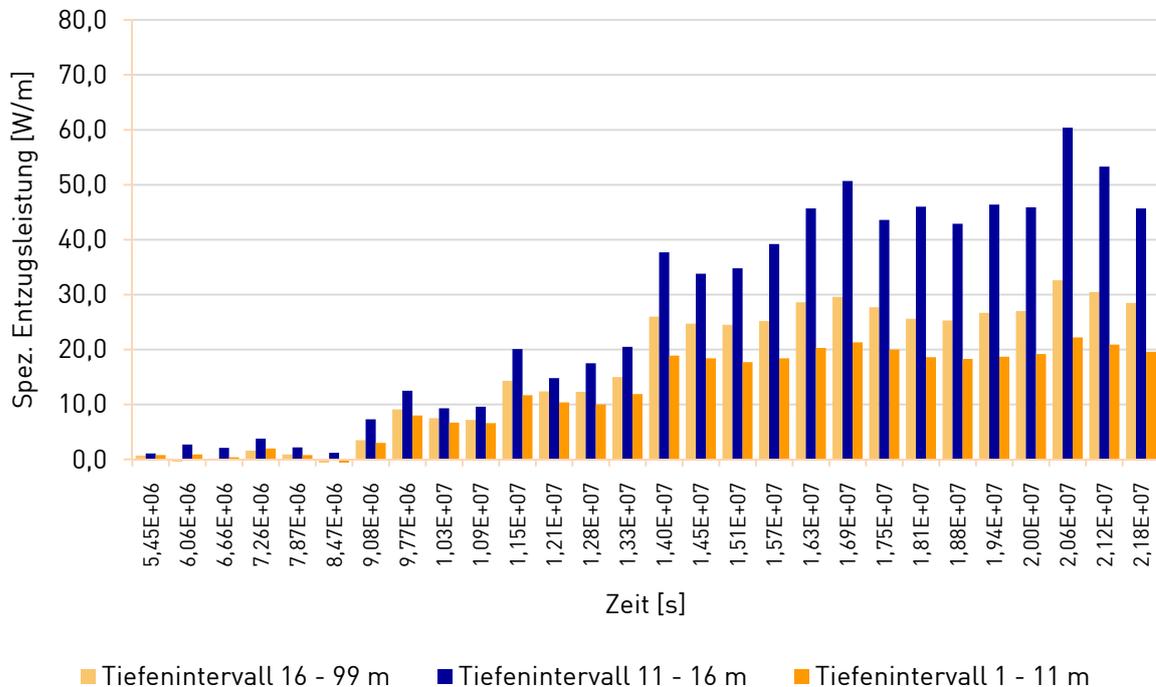


Abb. 6-19: Tiefenintervallbezogene spezifischen Entzugsleistungen [ $\text{W/m}$ ]

#### 6.4 Ökologisch-ökonomische Betrachtungen

Auf der Grundlage der in Kap. 6.2 und 6.3 ermittelten Werte lässt sich nicht nur der Leistungsanteil des quartären Kiessandaquifers beziffern. Zusammen mit den in Kap. 2 vorgestellten überschlägigen Rechnungen zu Invest und Betriebskosten einer Erdwärmesondenanlage sind diese Zahlen auch geeignet, um die monetären Auswirkungen und den Einfluss auf die  $\text{CO}_2$ -Emissionen zu quantifizieren.

Für das Invest untergrundseitig soll dem Mittelwert nach CAMPILLO (2006) gefolgt und Bruttokosten von  $80 \text{ €/m}$  für die Bohrungen inkl. Ausbau, aller Anschlüsse und Nebenarbeiten angesetzt werden. Bei 778 Bohrm Metern ergeben sich hier Gesamtkosten von ca. 62.000 €. Der Preis für die Wärmepumpe betrug etwa 56.000 €, auf die zusätzlich noch etwa 10 % Anschlusskosten aufzuschlagen sind. Das gesamte Invest beläuft sich somit auf 124.000 €.

Als Verbrauchspreis wird ein wärmepumpenspezifischer Mischtarif  $K_s$  – Hochtarif  $15,12 \text{ ct/kWh}$  und Niedertarif  $11,02 \text{ ct/kWh}$  – von  $13 \text{ ct/kWh}$  angesetzt (nach ENBW 2007B). Im Zeitraum August 2004 bis August 2005 wurden laut Betriebstagebuch für die

Wärmepumpenanlage etwa 44.700 kWh Strom eingesetzt, von denen etwa 3.500 kWh auf die Soleumwälzpumpe entfielen. Dies entspricht Jahresstromkosten  $K_S$  von 5.850 €. Im gleichen Zeitraum wurden nach BEUTINGER (2005) 20.000 l Heizöl mit einem Bezugspreis von 50 ct/l eingespart. Damit verbleibt nach Abzug der Heizölkosten eine Einsparung von 4.200 € für den betrachteten Zeitraum. Die Wärmegestehungskosten, also die Summe aus Invest und Betriebskosten berechnet nach der Annuitätenmethode in der VDI 2067 (2000), betragen 11,8 ct/kWh (brutto) und liegen im Bereich moderner Gasbrennwertkessel, Ölheizungssysteme oder Pelletheizungen (LANGNISS ET AL. 2006, SCHULZE 2009).

Wie mit Gl. 2.03 bereits vorgestellt, lässt sich aus der Jahresheizarbeit  $E_A$ , dem Produkt aus Heizleistung  $Q_H$  und Jahresbetriebsstunden, und der Jahresarbeitszahl  $\beta$  die CO<sub>2</sub>-Einsparung einer Wärmepumpenanlage gegenüber der CO<sub>2</sub>-Emission des deutschen Heizwärmemixes bestimmen. Für das Referenzjahr August 2004 bis August 2005 wurde von der Herbrachhofener Erdwärmesondenanlage 146 MWh Heizwärme bei einer Jahresarbeitszahl  $\beta$  von 3,3 [] bereitgestellt. Damit sparte die Anlage für das Referenzjahr im Vergleich zum deutschen Heizwärmemix ~6.900 kg CO<sub>2</sub> ein. Hätte die gleiche Menge Wärmeenergie über den am Standort befindlichen Heizölkessel bereitgestellt werden müssen, ergäbe sich mit einem CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für Heizöl gem. UBA (2008) von 0,074 tCO<sub>2</sub>/GJ eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von etwa 12.300 kg CO<sub>2</sub> per anno.

Unter der Annahme, dass der quartäre Kiessand am Standort Herbrachhofen keinerlei Grundwasser enthielte, hätten bei gleicher Anlagenkonfiguration und Jahresarbeitszahl etwa 6,6 MWh Heizwärme weniger bereitgestellt werden können bzw. die Jahresarbeitszahl betrüge noch 3,1 []. Dies würde sich auf die Wärmegestehungskosten mit einer Erhöhung von knapp 0,5 ct/kWh auswirken. Gleichzeitig würde gegenüber dem deutschen Heizwärmemix etwa 1.500 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr weniger eingespart, gegenüber der Heizöl-Bestandsanlage 1.750 kg CO<sub>2</sub>.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG RELEVANTER ERGEBNISSE, AUSBLICK

### 7.1 Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchungen in Leutkirch-Herbrazhofen hatten das Design und den Aufbau eines Monitoringsystems zum Ziel, mit dem der Einfluss eines Grundwasserleiters auf die Temperaturentwicklung im Untergrund bei Erdwärmesondenanlagen gemessen werden kann. Zusätzlich sollte anhand der Datensätze und mit einem geeigneten analytischen Ansatz der Grundwassereinfluss auf die Performance einer Erdwärmesondenanlage quantifiziert werden.

#### 7.1.1 Monitoringsystem

Fünf der insgesamt acht Erdwärmesonden am Standort Herbrazhofen wurden auf Vorlauf und Rücklauf mit Lichtwellenleiterkabeln zur Temperaturmessung ausgestattet (Distributed Temperature Sensing, kurz: DTS). Zusätzlich wurden in definierten Tiefen und ebenfalls auf Vorlauf und Rücklauf der Sondenrohre PT100-Sensoren montiert.

Mit dem DTS-System konnten erfolgreich tiefenorientierte Temperaturprofile – sowohl über die jeweilige Erdwärmesonde insgesamt, aber auch getrennt nach Vorlauf und Rücklauf – gewonnen werden. Aus diesen Daten konnten verschiedene geothermische Parameter bestimmt werden, die für die Auslegung von Erdwärmesondenanlagen relevant sind. Zudem ließen sich zeit- und tiefenintervallbezogen Mittelwerte ableiten, die zur Validierung von Modellrechnungen herangezogen werden konnten.

Das DTS-System lief während der Untersuchungen, abgesehen von Handhabungsfehlern, praktisch störungsfrei. Ebenfalls nahezu ohne Ausfälle arbeiteten die PT100-Sensoren. Lediglich an einzelnen nicht tagwasserdichten Schächten an den Sondenkopfab schlüssen gelangte Wasser in das Anschlusskabel und sorgte so vereinzelt für Fehlmessungen.

Mit den PT100-Sensoren war im Vergleich zum DTS-System eine bessere Messgenauigkeit bei kurzen Messintervallen gegeben. Um eine Genauigkeit von etwa  $0,1\text{ K}$  zu gewährleisten, benötigte das in Leutkirch-Herbrazhofen verwendete DTS-System Messzeitintervalle von ca. 20 Minuten. Mit den PT100-Sensoren kann dagegen bei gleicher Temporaturauflösung im Minutentakt oder gar darunter gemessen werden. Diesem Umstand kommt bei Erdwärmesondenanlagen durchaus einige Bedeutung zu: Laufzeitintervalle der eingesetzten Wärmepumpe am Standort in Herbrazhofen zwischen 30 und 60 Minuten sind keine Seltenheit. Um hier die Temperaturentwicklung mit ausreichender zeitlicher Auflösung aufzuzeichnen, empfiehlt sich der Einsatz der PT100-Sensoren. Erst die Kombination der beiden Messtechniken gestattet jedoch die Zusammenstellung eines für die oben genannten Fragestellungen ausreichend qualifizierten Datensatzes.

#### 7.1.2 Temperaturmessergebnisse

Die thermische Interaktion zwischen dem lokalen Grundwasser und der Erdwärmesondenanlage konnte mit dem DTS-System und den PT100-Sensoren sowohl an den Sonden selbst als auch in der ca. 5 m in Abstromrichtung von dem Sondenfeld entfernt abgeteufte Kernbohrung gemessen werden. In beiden Fällen manifestiert sich der Grundwassereinfluss in einer

deutlich geringeren Temperaturabsenkung im Bereich des Aquifers während der Heizperiode und in einer weit kürzeren und auch kräftigeren Erholungsphase im Anschluss daran.

Der Grundwassereinfluss zeigt sich nicht nur in der Betrachtung der Temperaturentwicklung mit der Zeit. Vielmehr konnte der Kiesaquifer am Standort Herbrachhofen auch mit Hilfe von Temperaturprofilen, die mit dem DTS-System aufgenommen wurden, identifiziert werden. Zusätzlich konnten aus den DTS-Messergebnissen der geothermische Gradient, die terrestrische Wärmestromdichte und die ungestörte Temperatur in Abhängigkeit von der Tiefe für den Standort Herbrachhofen bestimmt werden.

Mit dem DTS-System eröffnet sich die Option, die Vorlauf-/Rücklauftemperatur einer einzelnen Erdwärmesonde zu messen. Es konnte gezeigt werden, dass das Sondenfluid einen Teil der Energie, die es auf dem Weg zum Sondentiefsten aufgenommen hat, auf dem Sondenrücklauf hin zur Erdoberfläche an das umgebende Gestein wieder abgibt. Dieser Verlust kann, bezogen auf die Temperaturdifferenz am Ein- und Auslass einer Erdwärmesonde, zu entsprechenden Zeiten 30 % betragen und nimmt damit einen deutlichen Einfluss auf die Anlagenperformance.

### 7.1.3 Modellergebnisse

Für die Modellrechnungen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein analytisches Berechnungsverfahren auf der Grundlage der Theorie der Beweglichen Linienquellen verwendet. Vereinfacht entsprechen bewegliche Linienquellen einer Kelvinschen Linienquelle, die sich mit einer virtuellen Quellengeschwindigkeit bewegt. Diese Quellengeschwindigkeit kann standortbezogen aus den thermo-hydraulischen Parametern von Grundwasserleitern berechnet werden.

Die Geologie am Standort Herbrachhofen baut sich vom Hangenden zum Liegenden vereinfacht aus ca. 16 m mächtigen quartären Lockersedimenten auf, die von mächtigen Einheiten der Oberen Süßwassermolasse unterlagert werden. Die quartären Gesteine weisen zwischen 11 und 16 m einen leistungsstarken Grundwasserleiter auf. Dementsprechend wurde für die Modellrechnungen eine Dreiteilung des Untergrunds in die drei Bereiche

- › 0 bis 11 m: Lockersedimente ohne Grundwasserführung
- › 11 bis 16 m: Lockersedimente mit Grundwasserführung
- › 16 bis 99 m: Molassegesteine ohne Grundwasserführung

vorgenommen. Für diese drei Einheiten wurde unter Vernachlässigung des vertikalen Energietransports vorausgesetzt, dass sie untereinander thermisch entkoppelt sind.

Mit diesem Ansatz lässt sich die Temperaturentwicklung im Untergrund beim Betrieb eines Erdwärmesondenfelds bis an die Bohrlochwand bestimmen. Für die Auslegung von Erdwärmesonden ist jedoch die Temperatur des Arbeitsmittels am Ein- und Auslass der Erdwärmesondenrohre wesentlich. Zu deren Bestimmung war das Modell noch um ein Berechnungsverfahren für den thermischen Bohrlochwiderstand zu erweitern, welches den Einfluss eines Grundwasserleiters abbilden kann. Hierzu wurde auf eine Methodik zurückgegriffen, die ebenfalls auf der Theorie der Beweglichen Linienquellen basiert.

Anhand der DTS-Messungen wurden für die drei thermisch entkoppelten Einheiten mit einem Fitverfahren die zugehörigen einheitsspezifischen Entzugsleistungen der Erdwärmesonden

bestimmt. In den grundwasserfreien Abschnitten wurde mit der Kelvinschen Linienquelle, im Bereich des Grundwasserleiters mit dem beschriebenen Modell auf der Grundlage der Beweglichen Linienquellen gerechnet. Es kann gezeigt werden, dass der Einsatz der Beweglichen-Linienquellen-Theorie sowohl in einigen Metern Entfernung als auch unmittelbar an den Erdwärmesonden selbst im Vergleich zu anderen Verfahren erheblich verbesserte Temperaturprognosen gestattet.

Die Theorie der Beweglichen Linienquellen wurde in Herbrachhofen erstmalig auf ein Feldexperiment angewendet und Messdaten gegenübergestellt. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass es mit diesem Ansatz deutlich besser als mit den in der Planungspraxis üblichen Verfahren gelingt, den Einfluss des lokalen Grundwasserleiters auf die Performance der Herbrachhofener Erdwärmesondenanlage zu beschreiben. Das Berechnungsergebnis kann für die Anlage in Herbrachhofen in Zahlen ausgedrückt werden: Der Grundwassereinfluss steuert trotz der vergleichsweise geringen Aquifermächtigkeit zusätzlich etwa 6,6 *MWh/a* Heizwärme bei. Dies entspricht einer Einsparung von etwa 810 € Jahresheizkosten und einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission um 4,7 %.

## 7.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen für den Standort Herbrachhofen den Einfluss von Grundwasser auf die Performance einer Erdwärmesondenanlage, aber vor allem auch das Potential der Theorie der Beweglichen Wärmequellen bei der Auslegung von Erdwärmesondenfeldern unter Berücksichtigung des Energietransports mit dem Grundwasser. Gerade gegenüber den heute praxistypischen Softwarelösungen, die auf ESKILSONS (1987) Arbeit basieren, weist der Einsatz des Linien- und auch Zylinderquellenverfahren grundsätzliche Vorteile auf: Mit ihnen ist es möglich, bei der Dimensionierung jeder einzelnen Erdwärmesondenbohrung eines Feldes spezifische Parameter hinsichtlich Position oder Ausbau zuzuweisen. Damit werden dem Fachplaner Möglichkeiten eröffnet, die sonst nur mit heute noch vergleichsweise aufwendigen, auf numerischen Verfahren basierenden Softwaretools zu leisten sind.

In der Literatur finden sich nur sehr wenige Arbeiten, die sich mit dem Einsatz Beweglicher Linienquellen bei Erdwärmesondenanlagen auseinandersetzen. Hier sind vor allem DIAO ET AL. (2003, 2004) und SUTTON ET AL. (2003) für den theoretischen Hintergrund sowie KATSURA (2006) für Laboruntersuchungen zu nennen. Forschungsarbeiten zur Entwicklung eines weiter verbesserten Softwaretools zur Dimensionierung von Erdwärmesonden ist somit noch erheblicher Raum gegeben. Vier Detailfragen sollen hier hervorgehoben werden:

Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Verfahren kombiniert die Ergebnisse der theoretischen Arbeiten von DIAO ET AL. (2003, 2004) und SUTTON ET AL. (2003). Um es weiterzuentwickeln, wäre die Einführung eines die Dispersion berücksichtigenden Terms in das Gleichungssystem wünschenswert. MOLINA-GIRALDO ET AL. (2010) haben hier bereits wichtige Vorarbeiten geleistet.

Ein zweiter Schwerpunkt kann auf die thermische Interaktion zwischen Grundwasser führenden und nicht führenden Schichten gelegt werden. Gerade im Hinblick auf die für Deutschland typische Situation, dass die im Mittel 100 m tiefen Erdwärmesondenbohrungen zwar häufig Grundwasserleiter aufschließen, aber nur sehr selten in diese vollständig einbinden, kommt diesem Aspekt besondere Bedeutung zu.

Grundsätzlich weisen Zylinderquellenlösungen mit der Option, thermische Speicherkapazitäten zu berücksichtigen, gegenüber Linienquellen einen Vorteil auf. Auch wenn es mathematisch ohne Zweifel sehr aufwendig ist, wäre der Einsatz Beweglicher Zylinderquellen für die Auslegung von Erdwärmesonden eine weitere Verbesserung. Erste theoretische Ansätze hierzu sind von CARSLAW & JAEGER (1947) vorgestellt worden.

Ein weiteres wichtiges Arbeitsfeld bieten die horizontalen Anbindeleitungen von den Erdwärmesonden zum Gebäude. Ihre Gesamtlänge liegt in Herbrachhofen bei ca. 150 m. Wie verschiedene Praxisbeispiele zeigen, kann sie bei sehr großen Erdwärmesondenfeldern jedoch durchaus 50 bis 80 % der vertikalen Sondenlänge betragen. Die Bestimmung ihres thermischen Einflusses auf die Temperatur des Arbeitsmittels stellt in Anbetracht der zu berücksichtigenden saisonal bedingten Temperatureffekte eine nicht unterschätzende Aufgabe dar.

Neue modelltechnische Ansätze sind in Geländeversuchen zu prüfen. Es bietet sich an, auf der Grundlage der im Zuge dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen an einem geeigneten Standort ein weiter verbessertes Testfeld anzulegen. Auch hier gibt es – vom Einsatz verbesserter DTS-Messeinheiten und Wärmemengenzähler bis hin zum Einfluss des Phasenwechsels von Wasser/Eis im Hinblick auf die Nutzung als Latentwärmespeicher – noch weite Forschungsfelder.

**8 LITERATURVERZEICHNIS**

- AL-KHOURY, R., LEYENS, D. & KÖLBEL, T. (2004): Efficient 3d finite element analysis for geothermal heating and cooling systems. Int. Workshop on New and Classical Applications of Heat Flow Studies, Aachen (Germany).
- ALPHA-INNO TEC GMBH (2002): Planungshandbuch Wärmepumpen. Kasendorf.
- AUFLEGER, M., PERZLMAIER, S., DORNSTÄDTER, J., SCHEWE, L. (2005): A leakage detection system for concrete faced rockfill dams. Proc. of symposium on concrete faced rockfill dams, Yichang, China, pp. 255-264.
- AUFLEGER, M. (2000): Verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Heft 89.
- BEUTINGER, P. (2005): Modellierung von Erdwärmetauschern mit der Methode der Finiten Elemente: Abschlussbericht. Baugrundinstitut Dr.-Ing. G. Ulrich, Unveröffentlichter Bericht, 25 S., Leutkirch.
- BENNET, J., CLAEISSON, J. & HELLSTRÖM, G. (1987): Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a composite cylinder. Notes on Heat Transfer 3-1987, pp. 42, University of Lund, Department of Building Technology and Mathematical Physics, Lund (Sweden).
- BERNIER, M. (2001): Ground coupled heat pump system simulation. ASHRAE Transactions, 107(1), Atlanta (USA).
- BRANDT, W. (2001): Faseroptische Messung in einer Erdwärmesonde birgt Überraschung. Geothermische Energie, 32/33, Geeste.
- BRANDSTETTER, B. (1979): Berechnung der Grundwasserströmung im Bereich der Leutkircher Heide unter Verwendung eines Finite-Elemente-Programms für horizontal ebene und stationäre Strömungen. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- BREHM, D.R. (1989): Entwicklung, Validierung und Anwendung eines dreidimensionalen, strömungsgekoppelten finite Differenzen Wärmetransportmodells. Giessener Geologische Schriften, 43, 120 S., Gießen.
- BWP (2009): Absatzstatistik Wärmepumpen in Deutschland. Bundesverband Wärmepumpe e.V., Berlin/München.
- CAMPILLO, G. (2007): Evaluation of the EnBW subsidy program for ground source heat pump systems with statistical tools and geographic information system. Master

- thesis, EnBW Energie Baden Württemberg AG, University of Tübingen, pp. 71, Karlsruhe/Tübingen.
- CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.C. (1947): Conduction of heat in solids. Clarendon Press, pp. 386, Oxford University Press, 2<sup>nd</sup> edition (1959), pp. 520, Oxford (UK).
- CHAUDRY, M. & ZUBAIR, S. (1994): Generalized incomplete gamma functions with applications. *Journ. Comput. and Appl. Math.*, 55, pp. 99-124.
- CLAESSON, J. & HELLSTRÖM, G. (2000): Analytical studies of the influence of regional groundwater flow on the performance of borehole heat exchangers. The 8<sup>th</sup> International conference on thermal energy storage, Terrastock 2000, pp. 105-115, Stuttgart.
- CLAESSON, J. & ESKILSON, P. (1987): Conductive heat extraction by a deep borehole, analytical studies. Tech. Report, University of Lund (Sweden).
- CLAUSER, C. (2006): Geothermal Energy, In: K. Heinloth (Ed), Landolt-Börnstein, Group VIII "Advanced Materials and Technologies", Vol. 3 "Energy Technologies", Subvol. C "Renewable Energies", pp. 480–595, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin.
- CLAUSER, C. (ED) (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in hot Aquifers using SHEMAT/Processing Shemat. Springer Verlag, Heidelberg-Berlin.
- COTÉ, J. & KONRAD, J.-M. (2005): Thermal conductivity of base-course materials. *Can. Geotech. Journal*, 42, pp. 61-78.
- CUI, P., FANG, Z. H. & YANG, H. (2006): Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined boreholes. *Applied Thermal Engineering*, 26, pp. 1169-1175, Elsevier, Amsterdam (Netherlands).
- DENG, Z. (2004): Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems. Ph.D. thesis, pp. 326, Oklahoma State University, Stillwater, (USA).
- DIAO, N.R., LI, Q.Y., FANG, Z.H. (2004): Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *Int. Journal of Thermal Sciences*, 43, pp. 1203-1211, Elsevier, Amsterdam (Netherlands).
- DIAO, N., LI, Q. & FANG, Z. (2003): An analytical solution of the temperature response in geothermal heat exchangers with groundwater advection. *Journal Shandong Inst. Archit. Engng.*, 18/3, pp. 1-5, available only in Chinese letters, Shandong (China).
- DIETRICH, J. & PUFAHL, C. (2007): Verfüllbaustoffe für Geothermiebohrungen - Möglichkeiten, Anforderungen und Grenzen (Teil 1). In: *bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, 5/07: 38-41, Bonn.

- DIETRICH, J., PUFAHL, C. UND ZORN, R. (2007): Verfüllbaustoffe für Geothermiebohrungen - Möglichkeiten, Anforderungen und Grenzen (Teil 2). In: bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 7+8/07: 32-37, Bonn.
- DIETZEL, F. & WAGNER, W. (1998): Technische Wärmelehre. Vogel Verlag, 7. Auflage, 176 S., Würzburg.
- DIN EN 60751 (2009): Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Widerstände (IEC 60751:2008). Beuth Verlag, Berlin.
- EISBACHER, GERHARD (1996): Einführung in die Tektonik. Enke Verlag, 2. Auflage, 374 S., Stuttgart.
- EISEN, HARALD (2003): Hydraulikschema Wärmepumpenanlage Herbrachhofen. Unveröffentlichte Planskizze, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Karlsruhe.
- ENBW ENERGIE BADEN-WÜRTTEMBERG AG (2007a): Verschiedene Varianten der Erdwärmennutzung, <http://www.enbw.com>, Karlsruhe.
- ENBW ENERGIE BADEN-WÜRTTEMBERG AG (2007b): EnBW Wärmeplus – Das ideale Stromprodukt für Wärmepumpenheizungen, 2 S., Karlsruhe.
- ERBAS, K. (2001): Eine universelle Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus Aufheizkurven konstant geheizter Zylinderquellen. Dissertation, Universität Berlin, 165 S., Berlin.
- EISBACHER, G. (1996): Einführung in die Tektonik. Spektrum Akademischer Verlag, 2. Auflage, S. 374, Heidelberg.
- ESKILSON, P. (1987): Thermal analysis of heat extraction boreholes. PhD thesis, University of Lund, pp. 264, Lund (Sweden).
- ESKILSON, P. & CLAESSON, J. (1988A): PC design model for heat extraction boreholes. Proc. 3<sup>rd</sup> WS on SAHPGCS, CIT $\eta$  1990:3, pp. 99-102, Göteborg (Sweden).
- ESKILSON, P. & CLAESSON, J. (1988B): Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. Numerical Heat Transfer, Vol.13, pp. 149-165.
- EUGSTER, W.J. & LALOUI, L. (2001): Geothermische Response Tests. Proceedings Workshop Oktober 2001 Lausanne, Geothermische Vereinigung e.V., 132 S., Geeste.
- EUGSTER, W.J., SEIFERT, P.K., HOPKIRK, R.J. & RYBACH, L. (1992): Einfluss von Klima und Standort auf das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden-Heizanlagen. Tagungsband 2. Geothermische Fachtagung Erding, Geothermische Vereinigung, S. 335-344, Bonn/Neubrandenburg.

- FUJII, H., RYUICHI, I., FUJII, J. & UCHIDA, Y. (2005): Optimizing the design of large-scale ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport modeling. *Geothermics*, 34, pp. 347-364, Elsevier.
- GEHLIN, S. (1998): Thermal response test – in situ measurements of thermal properties of hard rock. Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, pp. 73, Lulea (Sweden).
- GEYER, O. & GWINNER, M. P. (1991): *Geologie von Baden-Württemberg. – Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung*, 4. Auflage, 428 S., Stuttgart.
- GU, Y. & O'NEAL, D. (1998): Development of an equivalent diameter expression for vertical U-tubes used in ground coupled heat pumps. *ASHRAE transactions* 104(2): pp. 347-355, Atlanta (USA).
- GUERNSEY, E.N., BETZ, P.L. & SKAN, N.H. (1949): Earth as a heat source and storage medium for the heat pump. *ASHRAE Transactions*, 55, pp. 321-344, Atlanta (USA).
- GUSTAFSON, A.-M. (2006): Thermal response test – Numerical simulations and analyses. Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, pp. 141, Lulea (Sweden).
- HAIDER KHAN, M. (2000): Modeling, simulation and optimization of ground source heat pump systems. M.S. thesis, pp. 218, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma (USA).
- HELLSTRÖM, G. & SANNER, B. (2000): EED – Earth Energy Designer User Manual Version 2.0. , pp. 43, <http://www.buildingphysics.com>, Lund (Sweden).
- HELLSTRÖM, G. (1998): Thermal performance of borehole heat exchangers. Proc. 2<sup>nd</sup> Stockton International Geothermal Conference, pp. 11, Stockton (USA).
- HELLSTRÖM, G. (1991): Ground heat storage: Thermal analysis of duct storage systems. University of Lund, Department of Mathematical Physics, pp. 262, Lund (Sweden).
- HERRLING, B. (1982): Artificial groundwater recharge in Quaternary gravel aquifers in the foreland of the Alps. *Proceedings Exeter Symposium*, IAHS Publ. No. 136, pp. 10, Exeter (UK).
- HERRMANN, V. J. (2003): *Geologische Kartierung im Raum Unterzeil*. Universität Karlsruhe, unveröffentlichte Diplomarbeit, Teil II, 52 S., Karlsruhe.
- HILLEL, D. (1982): *Introduction to soil physics*. Academic Press, pp. 392, San Diego (USA).

- HÖLTING, B. (2009): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Spektrum Akademischer Verlag, 7. Neubearb. u. erw. Aufl., 383 S., Heidelberg.
- HUBER, A. & PAHUD, D. (1999a): Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW), Bundesamt für Energie (BFE), 102 S., Bern (Schweiz).
- HUBER, A. & PAHUD, D. (1999b): Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie?. Forschungsprogramm Geothermie, Bundesamt für Energie (BFE), 18 S., Bern (Schweiz).
- HUBER, A.; SCHULER, O. (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 9658807/1.
- HUNN, M. (2004): Das Testfeld in Herbrachhofen und Untersuchungen neuer Hinterfüllmassen für untiefe Erdwärmesonden im Technikumsversuch. Universität Karlsruhe, unveröffentlichte Diplomarbeit, Teil I, 225 S., Karlsruhe.
- HURTIG, E., GROSSWIG, S. & KASCH, M., (1997): Faseroptische Temperaturmessungen: neue Möglichkeiten zur Erfassung und Überwachung des Temperaturfeldes an Erdwärmesonden. Geothermische Energie, 5, Nr. 18: 31-34.
- INGERSOLL, L.R. & PLASS, H.J. (1948): Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. In: Heating, Piping & Air Conditioning, 07/48, pp. 119-122, Cleveland (USA).
- INGERSOLL, L.R., ZOBEL, O.J. & INGERSOLL, A.C. (1955): Heat conduction with engineering, geological, and other applications. Thames and Hudson, 3<sup>rd</sup> edition, pp. 325, London (UK).
- JOHANSEN, O. (1975): Thermal conductivity of soils. Ph.D. thesis, University of Trondheim, Trondheim (Norway).
- KÄLIN, B., HOPKIRK, R.-J. (1991): Quantitative Empfehlungen über den minimalen Grenzabstand einer Erdwärmesondenanlage. Polydynamics, Switzerland.
- KALTSCHMITT, M., WITT, J. (2005): Weltweite Nutzung erneuerbarer Energien. In: BWK – Das Energie-Fachmagazin, 12/2005, Düsseldorf.
- KALTSCHMITT, M., HUENGES, E., WOLFF, H. (1999): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 265 S., Stuttgart.
- KASUDA, T. & ARCHENBACH, P.R. (1965): Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States. ASHRAE Transactions, 71(1), Atlanta.

- KATSURA, T., NAGANO, K., TAKEDA, S., & SHIMAKURA, K. (2006): Heat transfer experiment in the ground with ground water advection. Proc. 3<sup>rd</sup> Stockton International Geothermal Conference, pp. 7, Stockton (USA).
- KAVANAUGH, S.P. (1985): Simulation and experimental verification of vertical ground coupled heat pump systems. Ph.D. dissertation, Oklahoma State University, pp. 192, Stillwater, Oklahoma (USA).
- KAVANAUGH, S.P. & RAFFERTY, K. (1997): Ground-source heat pumps – design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning (ASHRAE), Atlanta, Georgia (USA).
- KELVIN, SIR W. THOMAS (1882): Mathematical and physical papers (II). University Press Cambridge (UK), pp. 41, republished by Adamant Media Corporation (2001), Boston (USA).
- KOENIGSDORFF, R., SEDLAK, M., KÖHLER, A. (2006): Planerschulung oberflächennahe Geothermie: Auslegung von Erdwärmesonden und Sondenfeldern mit dem Handrechenverfahren GEO-HAND<sup>light</sup>, 48 S., Biberach.
- KOHL, T. (1992): Modellsimulation gekoppelter Vorgänge beim Wärmeentzug aus heißem Tiefengestein. Dissertation, ETH Zürich, 149 S., Zürich.
- KOHL, T., HOPKIRK, R.J., EVANS, K.F. & RYBACH, L. (1993): FRACTure - A new tool to simulate coupled processes in geosciences, In: K. Morgan, E. Oñate, J. Periaux, J. Peraire, O.C. Zienkiewicz (Eds), Finite Elements in Fluids, Pineridge Press, 949-958, Barcelona (Spain).
- KÖLBEL, T., KÖNIG, R., MÜNCH, W., LEUCHT, M., CAMPILLO, G. (2008): Marktanalyse Erdwärme. In: bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Geothermie, 8 S., Bonn.
- KÖLBEL, T., WALKER-HERTKORN, S., FECHNER, W., ZORN, R. (2007): Anmerkungen zur Dokumentation von Erdwärmesonden. In: bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 3/07: 24-29, Bonn bbr 3/2007, Bonn.
- KÖLBEL, T., KESSLER, A., GÖTTLICHER, G., BENZ, J. & KÖNIG, R. (2006): Perspektiven der Geothermie aus der Sicht eines Energieversorgers. VGB Powertech, 10/06, 35-41, Essen.
- KÖLBEL, T. & LEYENS, D. (2004): Die untiefe Geothermie: Neue Entwicklungen bei Planung und Bau von Erdwärmesondenanlagen. Tagungsband 4. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, S. 359-367, Esslingen.

- KÖLBEL, T. (2003A): Modellierung von Erdwärmetauschern mit der Methode der Finiten Elemente: 1. Zwischenbericht. Baugrundinstitut Dr.-Ing. G. Ulrich, Unveröffentlichter Bericht, 22 S., Lahr/Leutkirch.
- KÖLBEL, T. (2003B): Oberflächennahe Geothermie: Anlage Herbrachhofen. Baugrundinstitut Dr.-Ing. G. Ulrich, Unveröffentlichter Vortrag, 11 S., Lahr/Leutkirch.
- KÖLBEL, T. (2001): Oberflächennahe Geothermie – Potentiale, Historie, Technik. Baugrundinstitut Dr.-Ing. G. Ulrich, unveröffentlichtes Gutachten, 14 S., Lahr/Leutkirch.
- KRUSE, H. (2004): Wärmerohr – Entwicklung einer CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonde nach dem Prinzip des Wärmerohrs. KL Luft und Kältetechnik, Vol. 40(2): 54-61.
- KUPSCH, F., STRAYLE, G. & WERNER, J. (1989): Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg (Oberschwaben): Leutkircher Heide und Aitrachtal. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, 10 Karten/Beilagen, Erläuterung: 101 S., Freiburg im Breisgau.
- LAMARCHE, L., BEAUCHAMP, B. (2007a): New Solutions for the short-time analysis of geothermal vertical boreholes. Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 50, pp. 1408-1419, Elsevier.
- LAMARCHE, L., BEAUCHAMP, B. (2007b): A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. Energy and Buildings, 39, pp. 188-198, Elsevier.
- LANGNISS, O., BÖHNISCH, H., BUSCHMANN, A., HARTMANN, H., REISINGER, K., HÖLDRICH, A., TUROWSKI, P., PAUSCHINGER, T. (2006): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien (Marktanreizprogramm) im Zeitraum Januar 2004 bis Dezember 2005. BMU-Forschungsvorhaben, 215 S., Stuttgart/Straubing.
- LEYENS, D., KÖLBEL, T. & ZORN, R. (2004): Innovative Anlagenkomponenten zur wirtschaftlichen und technischen Systemoptimierung – Thermisch verbesserte Hinterfüllmaterialien. In: Tagungsband Jahrestagung Geothermische Vereinigung 2004, 275-283, Geeste/Landau.
- LEU, W., MÉGEL, T. & SCHÄRLI, U. (2006): Geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0 – 500 m). Schweizer Bundesamt für Energie, Schlussbericht 101'296, 80 S., Bern (Schweiz).
- LIEBEL, V. (2007): In-situ-Vergleich verschiedener Erdwärmesonden. In: Oberflächennahe Geothermie – Erdgekoppelte Wärmepumpen und unterirdische Energiespeicher. OTTI Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V., 123-133, Freising.

- LIU, X. & HELLSTRÖM, G. (2006): Enhancements of an integrated simulation tool for ground-source heat pump system design and energy analysis. Proc. 3<sup>rd</sup> Stockton International Geothermal Conference, pp. 8, Stockton (USA).
- LOOSE, P. (2006): Erdwärmenutzung – Versorgungstechnische Planung und Berechnung. C.F. Müller Verlag, Hüthig Verlag, 104 S., Heidelberg.
- MERKER, G.P, EIGLMEIER, C. (1999): Fluid- und Wärmetransport, Wärmeübertragung. B.G. Teubner Verlag, 208 S., Stuttgart/Leipzig.
- MARAINI, S. (2000): Vergleich von Software zur Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen. Dipl.-Arbeit, ETH Zürich, 143 S., Zürich (Schweiz).
- MOGENSEN, P. (1983): Fluid to duct wall heat transfer in duct systems heat storages. In: Proc. of the Int. Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, 6-8/83, pp. 652-657, Stockholm (Sweden).
- MOLINA-GIRALDO, N. BAYER, P. & BLUM, P. (2010): Analytical modeling of the influence of mechanical dispersion on temperature plumes from ground source heat pump systems. International Journal of Heat and Mass Transfer (to be submitted).
- MÖLLMANN, A. & VERMEER, P.A. (2006): Abschlussbericht „Modellierung von Erdwärmesonden mit der Finite-Elemente-Methode“. Universität Stuttgart, Inst. f. Geotechnik, unveröff. Forschungsbericht, 87 S., Stuttgart.
- OCHSNER, K. (2007): Wärmepumpen in der Heizungstechnik – Praxishandbuch für Installateure und Planer. Müller (C.F.) Verlag, 4. Auflage, 211 S., Heidelberg.
- ÖKO-INSTITUT E.V. (2008): GEMIS – Globales Emissionsmodell integrierter Systeme. Version 4.42, <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm>, Öko-Institut e.V., Freiburg.
- PAHUD, D., MÉGEL, T., KOHL, T. & BRENNI, R. (2002): Langezeiteffekt von Mehrfacherdwärmesonden. Schweizerisches Bundesamt für Energie BFE, Schlussbericht, 21 S., Bern (Schweiz).
- PAHUD, D. & HELLSTRÖM, G. (1996): The new duct ground heat model for TRNSYS. Proc. Eurotherm Seminar 49, pp. 127-136, Eindhoven (Netherlands).
- PAUL, N.D. (1996): The effect of grout thermal conductivity on vertical geothermal heat exchanger design and performance. Ms thesis, South Dakota State university, Brookings (USA).
- PERZLMAIER, SEBASTIAN (2007): Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessungen in Staudämmen. Technische Universität München, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Dissertation, 191 S., München.

- RAMMING, K. (2007): Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle. Dissertation, Technische Universität Dresden, 179 S., Dresden.
- REUSS, M. (2007): Erdwärmesonden – der Wärmetransport vom Gebirge in das Wärmeträgerfluid. OTTI-Tagungsband Oberflächennahe Geothermie, S. 115-119, Freising.
- REUSS, M. (2006): Auslegung von Wärmequellenanlagen nach VDI. OTTI-Tagungsband Oberflächennahe Geothermie, S. 63-81, Freising.
- ROSENTHAL, D. (1946): The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. Trans. Am. Soc. Mech. Eng., 68, pp. 849-866.
- RÜSGEN, M. I. (2003): Geologische Kartierung im Raum Reichenhofen. Universität Karlsruhe, unveröffentlichte Diplomarbeit, Teil II, 39 S., Karlsruhe.
- SANNER, B. (2008): Erdgekoppelte Wärmepumpen in Europa und Deutschland: ein Wachstumsmarkt. In: bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie: 22-35, Bonn.
- SANNER, B. (2000): Erdwärme zum Heizen und Kühlen: Potentiale, Möglichkeiten und Techniken der Oberflächennahen Geothermie. Geothermische Vereinigung, 113 S., Geeste.
- SANNER, B. (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen – Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. IZW-Bericht 2/92, 328 S., Karlsruhe.
- SCHULZ, W. (2009): Kosten und CO<sub>2</sub>-Ausstoß senken: Energie-Effizienzvergleich dezentraler Energiesysteme. *energie*, 03/09, S. 34-37, Succidia AG, Darmstadt.
- SHONDER, J.A., BAXTER, V., THORNTON, J., HUGHES, P.J. (1999): A new comparison of vertical ground heat exchanger design methods for residential applications. Am. Soc. of heating, refrigerating, and air conditioning engineers (ASHRAE), SE-99-20-01, 1999 annual meeting, Seattle/WA (USA).
- SHONDER, J.A., HUGHES, P.J. (1998): Increasing confidence in geothermal heat pump design methods. Proc. 2<sup>nd</sup> Stockton Geothermal Conference, [www.geojournal.stockton.edu](http://www.geojournal.stockton.edu), Stockton (USA).
- SIGNORELLI, S. & KOHL, T. (2002): Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge. Schweizerisches Bundesamt für Energie, 58 S., Bern (Schweiz).

- SIGNORELLI, S. (2004): Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems. Doctoral thesis, Swiss Federal Institute of Technology, pp. 159, Zurich (Switzerland).
- SPRARGEN, W. & CLAUSSEN, G. (1946): Temperature distribution during welding - a review of the literature to January 1, 1937. *Welding Journ. Res. Sup.*, 16, pp. 4-10.
- STADLER, T., HOPKIRK, R.J. & HESS, K. (1995): Auswirkungen von Klima, Bodentyp, Standorthöhe auf die Dimensionierung von Erdwärmesonden in der Schweiz. Schweizerisches Bundesamt für Energie, Bern (Schweiz).
- STADTBAUAMT LEUTKIRCH (2007): Bebauungsplan Industriegebiet Leutkirch-Süd / Urlau. Gutachten, Stadt Leutkirch, 26 S., Leutkirch.
- STAIB, F. (2007): Jahrbuch Erneuerbare Energie. Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, 476 S., Biberstein Verlag&Agentur, Radebeul.
- STIEBEL ELTRON GMBH&CO.KG (2007): Planungshandbuch. Holzminden.
- SUTTON, M., NUTTER, D., & COUVILLION, R. (2003): TA ground resistance for vertical bore heat exchangers with groundwater flow. *Journal of Energy Resources Technology*, 125, pp. 183-188.
- THOME, J.R. (2006): Engineering Data Book. Wolverine Tube Inc., Part III(2), <http://www.wlv.com>.
- UBA (2008): Emissionsfaktoren, Heizwerte und Kohlenstoffgehalte (Stoffliste 2008-2012 nach Anhang I ZuV 2012). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2007): Elektrische Wärmepumpen – eine erneuerbare Energie?; Kurzfassung, 4 S., Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- VDEW (2006): Energie Spezial – Praxisinformation für VDEW-Mitglieder: Endenergieverbrauch in Deutschland 2004. Verband der Elektrizitätswirtschaft VDEW e. V., Berlin.
- VDI 2067, BLATT 1 (2000): Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth-Verlag, Berlin.
- VDI 4640, TEIL 1 (2000): Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth-Verlag, Berlin.
- VDI 4640, TEIL 2 (2001): Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth-Verlag, Berlin.

- VDI 4640, TEIL 3 (2001): Thermische Nutzung des Untergrunds – Unterirdische thermische Energiespeicher. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth-Verlag, Berlin.
- VDI 4640, TEIL 4 (2004): Thermische Nutzung des Untergrunds – Direkte Nutzungen. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth-Verlag, Berlin.
- WALKER-HERTKORN, S. & THOLEN, M. (2007): Arbeitshilfe Geothermie: Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 1. Auflage, 205 S., Bonn.
- WAGNER, W. (2004): Wärmeübertragung. Vogel Verlag, 6. Auflage, 258 S., Würzburg.
- WAGNER, R. & CLAUSER, C. (2005): Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity. *Journal of Geophysics and Engineering*. Nanjing Institute of Geophysical Prospecting and Institute of Physics Publishing, 2, pp. 349-356, Nanjing (China).
- WERNER, J., STRAYLE, G., & WALSER, M. (1974): Möglichkeiten der Grundwassererschließung und –anreicherung im Gebiet der Leutkircher Heide (Oberschwaben). *Das Gas- und Wasserfach*, 115(12), S.525-568, DVGW, Bonn.
- STOBER, I., & LORINSER, B. (2007): Wärme ist unter uns. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), 1. Auflage, 131 S., Stuttgart.
- WU, J. & NOFZIGER, D.L. (1999): Incorporating temperature effects on pesticide degradation into a management model. *Journal of Environmental Quality*, 28, pp. 92-100, Stanford (USA).
- YAVUZTURK, C. & SPITLER, J.D. (1999): A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers. *ASHRAE Transactions*, 105(2): 475-485, Atlanta (USA).
- YAVUZTURK, C. (1999): Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems. Ph.D. thesis, pp. 251, Oklahoma State University, Stillwater, (USA).
- YOUNG, T. R. (2004): Development, verification, and design analysis of the borehole fluid thermal mass model for approximating short term borehole thermal response. M.S. thesis, pp. 216, Oklahoma State University, Stillwater (USA).
- ZENG, H. Y., DIAO, N.R. & FANG, Z.H. (2002): A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Heat Transfer – Asian Research*, 31(7), pp. 10, Wiley Interscience, Hoboken (USA).

- ZINGERLI, A., & EHRBAR, M. (2001): Charakteristiken von Vielzellenkompressoren. Schlussbericht, 72 S., Schweizerisches Bundesamt für Energie (BfE), Bern.
- ZORN, R., KÖLBEL, T., FECHNER, W., STEGER, H. & WALKER-HERTKORN, S., TIMMERMANN, T., MIELENZ, O. (2008): Hinterfüllung von Erdwärmesonden mit Tonpellets. In: bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie: 22-35, Bonn.
- ZORN, R., KÖLBEL, T., STEGER, H. & KRUSE, H. (2007a): CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonde basierend auf dem Gravitationswärmerohrprinzip. In: bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 12/07, Bonn.
- ZORN, R., KÖLBEL, T., KRUSE, H., STEGER, H. & WALKER-HERTKORN, S. (2007b): Deep borehole heat exchanger with a CO<sub>2</sub> gravitational heat pipe principle. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Reston, Virginia (USA).
- ZUBAIR, S. & CHAUDRY, A. (1998): A unified approach to closed-form solutions of moving heat-source problems. Journal of Heat and Mass Transfer, 33, pp. 415-424.
- ZUBAIR, S. & CHAUDRY, A. (1996): Temperature solutions due to time-dependent Moving-Line-Heat-Sources. Journal of Heat and Mass Transfer, 31, pp. 185-189.