

F 2788

Martin Ziegler, Sylvia Kürten

Erdwärmenutzung mit Hilfe von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen an erdberührten Untergeschoßkonstruktionen im Grundwasser



Fraunhofer IRB Verlag

# F 2788

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8523-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung





Zeichen: Zie/Kü

Datum: 30.04.2011

# Abschlussbericht

Aktenzeichen:	SF – 10.08.18.7-09.10 / II 2 – F20-09-1-041							
Forschungsthema:	"Erdwärmenutzung mit Hilfe von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen an erdberührten Untergeschoß- konstruktionen im Grundwasser"							
Kurztitel:	"Geothermisch wirksame Abdichtungselemente"							
Forschende Stelle:	Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen Mies-van-der-Rohe-Straße 1 52074 Aachen							
Projektleiter:	UnivProf. DrIng. Martin Ziegler							
Projektbearbeiter:	DiplIng. Sylvia Kürten							

Mitfinanzierende Stelle: NAUE GmbH & Co. KG Gewerbestr. 2 32339 Espelkamp-Fiestel

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

(Aktenkennzeichen: SF - 10.08.18.7-09.10 / II 2 - F20-09-1-041)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

#### Vorwort

Dem vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) zur Beratung der forschenden Stelle eingesetzten Beratergremium gehören

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhold Rauh vom Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bau-Projektmanagement der Universität Siegen,

Herr Dipl.-Ing. Volko Kuschan vom Gaswärme-Institut e.V. Essen,

Herr Dr. Claus Heske und Herr Dr. Thomas Franke von der CDM Consult GmbH Bochum bzw. Leipzig,

Frau Dipl.-Ing. Vera Olischläger von der NAUE GmbH & Co. KG Kempen,

sowie

Herr Dipl.-Ing. Marcus Potrafke vom Bundesamt für Bauwesen und Raumforschung

an. Dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung und den Mitgliedern des Beratergremiums sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Ebenso gedankt sei der Firma NAUE GmbH & Co. KG, die das Vorhaben sowohl inhaltlich als auch finanziell unterstützte.



Geotechnik im Bauwesen Geotechnical Engineering Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler







# Inhaltsverzeichnis

1	Eii	inführung1					
	1.1	1 Veranlassung					
	1.2	Zie	I des Forschungsvorhabens	2			
2	Th	eore	etische Grundlagen	4			
	2.1	Wä	irmetransport im Boden	5			
	2.1.	1	Mechanismen des Wärmetransport	5			
	2.1.	2	Thermische Eigenschaften des Bodens	7			
	2.1.	3	Bodentemperatur in oberflächennahen Schichten	8			
	2.1.	4	Grundwasserströmung	10			
	2.2	Wä	irmeträgerkreislauf	11			
	2.2.	1	Wärmeübergangswiderstand	11			
	2.2.	2	Strömungszustand im Absorbersystem	12			
	2.2.	3	Leistung von geothermischen Anlagen	14			
3	Th	erm	o-Aktive Bauteile – Stand der Technik	15			
	3.1	Allç	gemeines	15			
	3.2	En	ergiepfähle	16			
	3.3	Eb	ene Energiefundierungen	18			
	3.4	En	ergietunnel	20			
	3.5	Zus	sammenfassung der Leistungsdaten von thermo-aktiven Bauteilen	23			
4	Ge	eoth	ermisch wirksame Abdichtungselemente	24			
	4.1	Ko	nzeption von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen und deren				
		Ant	forderungen	24			
	4.2	We	esentliche Einflussparameter auf den Wärmeertrag	26			
5	La	bor	versuche	27			
	5.1	Aut	fbau des Versuchsstands	27			
	5.1.	1	Konzeption und Eigenschaften des Versuchsstand	27			
	5.1.	2	Strömung	30			
	5.1.3		Messtechnik	31			



Geotechnik im Bauwesen Geotechnical Engineering Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler



	5.2 (	Großversuch 1	33
	5.2.1	Aufbau des Wandelements und Materialparameter	33
	5.2.2	Versuchsprogramm	35
	5.2.3	Versuchsauswertung und Ergebnisübersicht	36
	5.3 (	Großversuch 2	
	5.3.1	Aufbau des Wandelements und Materialparameter	39
	5.3.2	Versuchsprogramm	41
	5.3.3	Ergebnisübersicht	42
	5.4	Versuche zur Ermittlung des Wärmeübergangwiderstand	43
	5.4.1	Wärmeübergangswiderstand bei geothermisch wirksamen Abdichtungselementen	43
	5.4.2	Versuchsprinzip, Messtechnik und Versuchsprogramm	45
	5.4.3	Auswertung und Ergebnisübersicht	46
6	Nur	nerische Simulationen	49
	6.1	Theoretische Grundlagen	49
	6.1.1	Das Finite Differenzen Programm SHEMAT	49
	6.1.2	Einschränkungen für die Simulationen der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente	50
	6.2 (	Grundmodelle und Kalibrierung	51
	6.2.1	Diskretisierung	51
	6.2.2	Materialparameter	52
	6.2.3	Anfangs- und Randbedingungen	53
	6.2.4	Verifizierung des numerischen Modells	54
	6.3 I	Parameterstudie	55
7	Wir	ksamkeit geothermisch wirksamer Abdichtungselemente	57
	7.1 I	Einflussparameter auf den Wärmeentzug	57
	7.1.1	Grundwasserströmung	57
	7.1.2	Systemdurchfluss	58
	7.1.3	Rohranordnung	61
	7.1.4	Rohrdurchmesser	64





	7.1	.5	Rohrmaterial	.65
	7.1.	.6	Rohrabstand	.66
	7.1	.7	Thermische Eigenschaften des Bodens	.68
	7.1	.8	Bodentemperatur	.70
	7.2	En	npfehlungen für die Auslegung und den Betrieb	.72
	7.3	Eir	nsatzmöglichkeiten von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen	.74
8	Ζι	ısan	nmenfassung und Ausblick	.77

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

Anhang





# Bezeichnungen und Begriffe

# Lateinische Buchstaben

а	Rohrabstand	m
Cp	spezifische Wärmekapazität des Bodens	J/(kgK)
Cv	volumetrische Wärmekapazität des Bodens	J/(m³K)
$C_{v,s}$	volumetrische Wärmekapazität des Feststoffes	J/(m³K)
$C_{v,w}$	volumetrische Wärmekapazität des Bodenwassers	J/(m³K)
$\boldsymbol{C}_{v,f}$	volumetrische Wärmekapazität des Fluids	J/(m³K)
Co	Courant-Zahl	-
D	Lagerungsdichte	-
$D_{pr}$	Verdichtungsgrad	-
d <sub>10</sub>	Äquivalenzdurchmesser der Körnung	mm
d <sub>a</sub>	äußerer Rohrdurchmesser	m
di	innerer Rohrdurchmesser	m
f <sub>ck</sub>	Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen	N/mm²
$\mathbf{f}_{ck,cube}$	Würfeldruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen	N/mm²
g	Erdbeschleunigung	m/s²
h	hydraulische Höhe (Potential)	m
i	hydraulischer Gradient	-
k	Permeabilität	m²
$\mathbf{k}_{\mathrm{f}}$	Durchlässigkeitsbeiwert	m/s
I	durchströmte Länge	m
$L_{abs}$	Länge des Absorbers	m
n	Porenanteil	-
n <sub>L</sub>	luftgefüllter Porenanteil	-
n <sub>max</sub>	maximaler Porenanteil bei lockerster Lagerung	-
n <sub>min</sub>	minimaler Porenanteil bei dichtester Lagerung	-
n <sub>Rohr</sub>	Anzahl der Rohrsysteme im Wandelement	-
n <sub>w</sub>	wassergefüllter Porenanteil	-
Nu	Nusselt-Zahl	-
Р	Entzugsleistung	W



Geotechnik im Bauwesen Geotechnical Engineering Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler



PE	Peclet-Zahl	-
q <sub>s</sub>	spezifische Entzugsleistung	W/m bzw. W/m <sup>2</sup>
q	Wärmequelle / -senke	W/m³
Q	Systemdurchfluss	l/h bzw. m³/s
<b>r</b> <sub>hyd</sub>	hydraulischer Radius	m
R <sub>b</sub>	Wärmeübergangswiderstand	Km/W
Re	Reynoldszahl	-
S	Schenkelabstand	m
Sr	Sättigungsgrad	-
Т	Temperatur	°C
$T_{Aus}$	Rücklauftemperatur im Absorbersystem	°C
Τ <sub>B</sub>	ungestörte Erdreichtemperatur	°C
T <sub>b</sub>	Temperatur an der Außenseite des Bauteils	°C
T <sub>Ein</sub>	Vorlauftemperatur im Absorbersystem	°C
T <sub>f</sub>	mittlere Temperatur des Fluids	°C
$T_{Wand}$	mittlere Temperatur an der Außenseite des Abdichtungselements	°C
v	Geschwindigkeit im Rohrsystem	m/s
Va	Grundwassergeschwindigkeit (Abstandsgeschwindigkeit)	m/d
V <sub>f</sub>	Grundwassergeschwindigkeit (Filtergeschwindigkeit)	m/d
Z	Tiefe im Boden	m

# **Griechische Buchstaben**

α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m²K)
$\beta_a$	Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe	-
$\Delta h$	Potentialunterschied	m
$\Delta t$	Zeitschrittweite	S
$\Delta x$	Zellweite	m
η	Viskosität	Pa*s
λ	Wärmeleitfähigkeit des Bodens	J/(m³K)
$\lambda_{s}$	Wärmeleitfähigkeit der Feststoffe	J/(m³K)
$\lambda_L$	Wärmeleitfähigkeit der Luft	J/(m³K)
$\lambda_{\text{Rohr}}$	Wärmeleitfähigkeit des Absorberrohrs	J/(m³K)



Geotechnik im Bauwesen Geotechnical Engineering Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler



$\lambda_w$	Wärmeleitfähigkeit des Wassers bzw. Fluids	J/(m³K)
ν	kinematische Viskosität	m²/s
ρ	Dichte des Bodens	g/cm³
$\rho_{d,Ein}$	Einbaudichte des Bodens	g/cm³
$ ho_{max}$	maximale Trockendichte bei dichtester Lagerung	g/cm³
$ ho_{min}$	minimale Trockendichte bei lockerster Lagerung	g/cm³
$\rho_{Pr}$	Proctordichte	g/cm³
ρ <sub>w</sub>	Dichte des Bodenwassers	g/cm³

# Abkürzungen

PEHD	Polyethylen hoher Dichte
PE-RT	Polyethylen (mittlerer Dichte) - raised temperature
PE-XC	Polyethylen (hoher Dichte), physikalisch vernetzt
SHEMAT	Simulator for Heat and Mass Transport





# 1 Einführung

#### 1.1 Veranlassung

Die Endlichkeit fossiler Brennstoffe erfordert die Entwicklung von neuen Technologien zur Nutzung von erneuerbaren Energien. Darüber hinaus ist durch das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz im Neubau eine anteilige Deckung des Wärmeenergiebedarfs durch erneuerbare Energien zwingend erforderlich. Die geothermische Nutzung von erdberührenden Bauteilen stellt in diesem Zusammenhang eine energetisch und wirtschaftlich gute Möglichkeit dar, dieser Forderung nachzukommen.

Die Nutzung oberflächennaher Erdwärme mittels Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren findet mittlerweile eine weite Verbreitung. Vermehrt werden in letzter Zeit auch statisch erforderliche Betonbauteile zur Wärmegewinnung genutzt. In diesen Fällen entfallen zusätzliche Bohrkosten, wie sie bei der Installation von herkömmlichen Geothermiesystemen anfallen. Hierbei bieten sich Bauteile an, die aus großen erdberührenden Flächen bestehen. Die Absorberleitungen werden dabei an der erforderlichen Bewehrung befestigt. Dadurch ist allerdings die Flexibilität in der Anordnung der Adsorberleitungen eingeschränkt. Weiterhin stellt die bautechnisch erforderliche Betonüberdeckung einen zusätzlichen Wärmeübergangswiderstand dar. Im Hinblick auf eine bessere Energieeffizienz von erdberührenden Bauteilen wäre daher eine geringere Überdeckung der Adsorberleitungen verbunden mit einer flexibleren Anordnung der Leitungen wünschenswert.

Das Vorhandensein von Grundwasser bzw. einer Grundwasserströmung erhöht den Wärmeertrag von Geothermieanlagen, da in diesen Fällen kontinuierlich Wärme an die Sonde bzw. das Absorberbauteil transportiert wird. Eine genaue Betrachtung des Einflusses einer Grundwasserströmung wird in den meisten Fällen jedoch nicht vorgenommen. Auch die Softwarepakete ermöglichen direkte Abbildung gängigen keine einer gekoppelte Grundwasserströmung. Eine Betrachtung von Wärmetransport und Grundwasserströmung, wie sie mit dem verwendeten Finite-Differenzen-Programm SHEMAT möglich ist, zeigt deutlich besser die Effizienz von Geothermieanlagen unter Grundwassereinfluss auf.

Erdberührende Bauteile im Grundwasser erfordern in der Regel eine Abdichtung, die, sofern nicht mit wu-Beton (weiße Wanne) gearbeitet wird, in den meisten Fällen als sogenannte "schwarze Wanne" ausgeführt wird. Alternativ können Kunststoffplatten aus PEHD verwendet werden, die über Stege oder Noppen im Beton verankert werden. Sie werden vorwiegend zur Auskleidung von Behältern und Rohren gegen aggressive Medien verwendet und sind somit zunächst einmal teurer als eine herkömmliche Schwarzabdichtung. Sie





lassen sich jedoch aufgrund ihrer Bauart sehr einfach mit Absorberleitungen versehen, so dass eine geothermische Aktivierung dieser Abdichtung in Analogie zu den thermo-aktiven Betonbauteilen vorliegt. Die zusätzlichen Installationskosten sind dabei gering, so dass sich die höheren Ausgangskosten für die Abdichtung wieder relativieren. Zusätzlich wird durch den nahezu direkten Kontakt zum Erdreich der Wärmeübergangswiderstand gegenüber üblichen thermo-aktiven Betonbauteilen deutlich reduziert. Durch den Einsatz im Grundwasser wird darüber hinaus das vorhandene Wärmepotenzial im Baugrund optimal ausgenutzt.

Die Auslegung von Geothermieanlagen beruht in den meisten Fällen auf der Anwendung von Erfahrungswerten. Der erzielbare Wärmeertrag variiert jedoch je nach den vorhanden Standort- und Betriebsbedingungen stark. Eine systematische Untersuchung der wesentlichen Einflussparameter mit Hilfe von Laborversuchen und numerischen Simulationen erhöht deshalb die Planungssicherheit.

# 1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens war die Nutzung von Erdwärme mit Hilfe von erdberührenden Bauteilen im Bereich des Hochbaus zu erweitern. Dazu sollten geothermisch wirksame Abdichtungselemente entwickelt und erprobt werden. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Betrachtung von großflächigen erdberührenden Bauteilen (wie z.B. Kellerwänden), welche im drückenden Grundwasser stehen und somit ohnehin einer Abdichtung bedürfen. Das mögliche Einsatzspektrum in Deutschland liegt hier Schätzungsweise bei 5 Mrd. Euro (Einzelheiten siehe Kapitel 7.3). Die Erprobung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente sollte dabei mit Hilfe von Laborversuchen und numerischen Untersuchungen unter verschiedenen Rahmenbedingungen erfolgen. Darüber hinaus sollte durch die systematische Untersuchung von Einflussparametern eine Übertragung der physikalischen Zusammenhänge auf andere Bauteile gewährleistet werden.

Der erste Teil des Forschungsvorhabens bestand darin, die bisherigen Möglichkeiten der Erdwärmenutzung aus erdberührenden Bauteilen zu erfassen und zu analysieren. Darauf aufbauend sollten Anforderungen an geothermisch wirksame Abdichtungselemente gestellt werden. Diese Elemente stellen eine neue Variante der geothermischen Nutzung von erdberührenden Bauteilen dar, welche im weiteren Projektverlauf getestet werden sollte.

In Zusammenarbeit mit der Firma NAUE GmbH & Co. KG sollte ein Prototyp der Abdichtungselemente entwickelt werden, welcher in einem eigens konzipierten Versuchstand im Labor unter verschiedenen Rahmenbedingungen getestet werden sollte. Um eine systemtische Untersuchung von Einflussparametern vornehmen zu können, lag der Schwerpunkt bei der Konzeption bei der Schaffung von klar definierten, aber im natürlichen Rahmen variablen Randbedingungen. Neben der Ermittlung von möglichen





Entzugsleistungen aus geothermisch wirksamen Abdichtungselementen lag ein weiteres Ziel der Laborversuche in der Ermittlung des Wärmeübergangswiderstands des Systems.

Mit Hilfe von numerischen Untersuchungen sollten die Ergebnisse der Laborversuche verifiziert und erweitert werden. Dazu sollte der Versuchstand durch ein geeignetes numerisches Modell abgebildet werden. Im Rahmen einer Parameterstudie sollten die wesentlichen natürlichen und bautechnischen Einflussfaktoren auf den Wärmeertrag quantifiziert werden.

Zusammenfassend sollten Empfehlungen für die Auslegung und den Betrieb von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen, sowie deren potentiellen Einsatzgebiete aufgezeigt werden.





# 2 Theoretische Grundlagen

Die Leistungsfähigkeit von geothermischen Anlagen wird von verschiedenen Mechanismen, die sich zum Teil gegenseitig beeinflussen, bestimmt. Im Allgemeinen wird bei der Beschreibung von geothermischen Anlagen für Heizzwecke zwischen Primär- und Sekundärkreislauf unterschieden, welche in der Regel durch eine Wärmepumpe gekoppelt werden (siehe Abbildung 2-1). Der Primärkreislauf wird durch die geothermische Anlage (Erdwärmesonde, thermo-aktives Bauteil, etc.) gebildet, während die Heizungsanlage durch den Sekundärkreislauf beschrieben wird. Im Rahmen des Forschungsprojekt und der Erprobung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente wurde der Schwerpunkt auf die Betrachtung des Primärkreislaufs gelegt.



Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer geothermischen Anlage [in Anlehnung an Adam & Markiewicz, 2002]

Bei der Betrachtung des Primärkreislaufs ist zwischen gegebenen Einflüssen aus dem angrenzenden Erdreich und zwischen beeinflussbaren Systemkomponenten aus dem Absorber zu unterscheiden. Für eine optimale Anlagenleistung sind die Systemeigenschaften an die natürlichen Verhältnisse (und die Anforderungen aus dem Sekundärkreislauf) anzupassen.

Das in Abbildung 2-1 dargestellte System kann auch auf die Anwendung zur Kühlung übertragen werden. Hierbei wird dem Boden im Sommer die überschüssige Energie aus dem Gebäude zugeführt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der Schwerpunkt auf die Betrachtung des Heizbetriebs gelegt, sodass im Folgenden auf die Besonderheiten für den Kühlbetrieb nicht eingegangen wird.





Im Folgenden werden die wesentlichen Zusammenhänge zur Beschreibung des Wärmetransports im Boden sowie die wesentliche Systemeinflüsse auf eine geothermische Anlage für den Primärkreislauf kurz dargestellt.

#### 2.1 Wärmetransport im Boden

Ein Boden, der nicht unter dem Einfluss von Frost steht, kann im Allgemeinen als Mehrphasensystem aus Feststoff, Wasser und Luft betrachtet werden und stellt ein heterogenes Gebilde dar. Für die Beschreibung seiner physikalischen Eigenschaften wird der Boden jedoch in seine Einzelkomponenten zerlegt und ein idealisiertes Dreiphasenmodell (bzw. Zweiphasenmodell für den gesättigten Zustand) angenommen (siehe Abbildung 2-2).



Abbildung 2-2: Phasenmodelle für Böden

Die Definition der physikalischen Eigenschaften erfolgt somit nach Komponenten getrennt. Durch geeignete Mittelwertbildungen werden daraus die physikalischen Eigenschaften für den gesamten Boden abgeleitet.

#### 2.1.1 Mechanismen des Wärmetransport

Durch das Mehrphasensystem Boden kann auf verschiedene Weise Wärme transportiert werden. Im Allgemeinen kann dabei zwischen Wärmeleitung, freier und erzwungener Konvektion sowie Wärmestrahlung unterschieden werden.

Die Wärmeleitung beschreibt einen molekularen Wärmetransport, wobei eine Energieübertragung ohne eine sichtbare Bewegung im Medium erfolgt. Wärmeleitung tritt in allen Bodenkomponenten auf. Die Konvektion (oder Wärmeübergang) findet ausschließlich in der Bodenluft oder im Bodenwasser statt. Die sogenannte freie Konvektion entsteht in Folge von temperaturabhängigen Dichteunterschieden. Die daraus resultierenden Auftriebskräfte führen zu einem Wärmetransport im Medium. Erzwungene Konvektion





entsteht dagegen durch äußere Kräfte, wie z.B. Druckgradienten, die eine Wasser- oder Luftbewegung verursachen. Die in einer Grundwasserströmung transportierte Wärme ist somit ein Beispiel für einen Wärmetransport durch erzwungene Konvektion. Die Wärmestrahlung ist von der absoluten Temperatur und der Oberfläche des Körpers abhängig.

Welcher Transportmechanismus in einem Boden. der nicht durch eine Grundwasserströmung beeinflusst wird, dominiert, ist von der Mikrogeometrie des Bodens, d.h. von der Lagerungsdichte, dem Sättigungsgrad und dem Porengefüge abhängig (siehe Abbildung 2-3). Es zeigt sich, dass die Wärmeleitung in der Regel den dominierenden Transportprozess darstellt. Wärmestrahlung und freie Konvektion tritt demnach vor allem in grobkörnigen Böden auf, da diese beiden Mechanismen an eine ausreichende Porengröße gekoppelt sind. In Ton- oder Schluffböden ist dagegen der latente Wärmestrom durch Feuchtigkeitsdiffusion oder Feuchtigkeitswanderung maßgeblich.



Abbildung 2-3: Mechanismen des Wärmetransports in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad Sr und dem Äquivalenzdurchmesser d<sub>10</sub> [nach Frivik et al., 1977]

Beim Vorhandensein einer Grundwasserströmung existiert zusätzlich zur Wärmeleitung ein Wärmetransport durch erzwungene Konvektion. Für die Beschreibung des Wärmetransports ist dann eine gekoppelte Betrachtung von reiner Wärmeleitung und Strömung erforderlich. Einflüsse aus freier Konvektion (und Strahlung) können in diesen Fällen vernachlässigt werden [Freeze & Cherry, 1979]. Die mathematische Beschreibung des gekoppelten Systems erfolgt mittels einer Differenzialgleichung (DGL) gemäß Gleichung (2-1).

$$c_{v} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x_{i}} \cdot \lambda_{i}\right) - c_{v,w} \left(\frac{\partial T}{\partial x_{i}} \cdot v_{f,i}\right) + \tilde{q}$$
(2-1)

Die Temperaturänderung im Boden, welche durch die volumetrische Wärmekapazität  $c_v$  des Bodens bestimmt wird, ist somit die Summe aus Wärmeleitung (charakterisiert durch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Bodens), Konvektion (welche durch die volumetrische





Wärmekapazität  $c_{v,w}$  und die Filtergeschwindigkeit des Grundwassers  $v_f$  bestimmt wird) und gegebenenfalls vorhandenen Wärmequellen oder –senken  $\tilde{q}$ .

Das Einsatzgebiet der hier betrachteten geothermisch wirksamen Abdichtungselemente liegt bei Untergeschoßkonstruktionen im (strömenden) Grundwasser, sodass der Wärmetransport als gekoppeltes Problem gemäß Gleichung (2-1) beschrieben werden muss, wofür eine analytische Lösung nicht mehr möglich ist. Aus diesem Grund wurden für die Ermittlung der maßgebenden Einflussfaktoren numerische Untersuchungen mit dem Programm SHEMAT durchgeführt.

#### 2.1.2 Thermische Eigenschaften des Bodens

Der Wärmetransport im Boden wird maßgeblich durch deren thermische Eigenschaften bestimmt. Dabei sind vor allem die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die Wärmekapazität c<sub>v</sub> von Bedeutung.

Die Wärmeleitfähigkeit eines Bodens wird durch die Kornzusammensetzung, die Dichte, die Temperatur und den Wassergehalt bestimmt. In der Literatur existieren eine Vielzahl von Berechnungsansätzen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Böden [Dehner, 2007]. Die hier vorgestellten Zusammenhänge, welche in SHEMAT verwendet werden, beruhen im Wesentlichen auf dem Modell von Johansen & Frivik (1980).

Die Wärmeleitfähigkeit der Kornfraktion wird vor allem durch den Quarzgehalt bestimmt, da Quarz ( $\lambda \approx 8 \text{ W/(mK)}$ ) im Vergleich zu den weiteren Bodenmineralien ( $\lambda \approx 2 \text{ W/(mK)}$ ) eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes kann daher durch ein über den Quarzgehalt gewichtetes Mittel berechnet werden.

Wasser weist mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_w \approx 0,56$  W/(mK) im Vergleich zur Porenluft ( $\lambda_L \approx 0,025$  W/(mK)) ebenfalls deutlich bessere Wärmeübertragungseigenschaften auf. Somit hat sowohl der Wassergehalt als auch der Sättigungsgrad eines Bodens einen deutlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Ein hoher Wassergehalt und/oder Sättigungsgrad führt somit zu einer hohen Wärmeleitfähigkeit des Mehrphasensystems. Aufgrund der Tatsache, dass die Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit steigender Temperatur zunimmt, ist die Wärmeleitfähigkeit von Böden auch temperaturabhängig.

Mathematisch lässt sich die Wärmeleitfähigkeit des Mehrphasensystems nach Gleichung (2-2) als über die Porenanteile n<sub>i</sub> gewichtetes geometrisches Mittel der Wärmeleitfähigkeiten der Einzelkomponenten beschreiben.

$$\lambda = \lambda_{\rm s}^{\left(1 - n_{\rm w} - n_{\rm L}\right)} \cdot \lambda_{\rm w}^{\left(n_{\rm w}\right)} \cdot \lambda_{\rm L}^{\left(n_{\rm L}\right)} \tag{2-2}$$

Für die Abbildung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente kann auf Grund des Einsatzes im Grundwasser von einer Sättigung des Bodens ausgegangen werden, sodass sich Gleichung (2-2) vereinfacht zu:





$$\lambda = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_w^n \tag{2-3}$$

Die Wärmekapazität eines Bodens beschreibt die Fähigkeit des Bodens Energie zu speichern. Sie ist im Wesentlichen vom Wassergehalt und von der Temperatur abhängig. Die mineralische Zusammensetzung ist hierbei nur von untergeordneter Bedeutung. Analog zur Wärmeleitfähigkeit vergrößert sich auch die Wärmekapazität eines Bodens mit steigendem Wassergehalt, wobei hier ein linearer Verlauf angenommen werden kann. Prinzipiell wird zwischen volumetrischer und spezifischer Wärmekapazität unterschieden, die über die Dichte des Stoffes gekoppelt sind (siehe Gleichung (2-4)).

$$c_{v} = c_{p} \cdot \rho \tag{2-4}$$

Für die Beschreibung von geothermischen Problemstellungen ist vor allem die volumetrische Wärmekapazität von Bedeutung, sodass im Folgenden bei der Nennung der Wärmekapazität die volumetrische Wärmekapazität gemeint ist.

Mathematische ergibt sich die Wärmekapazität des Mehrphasensystems als gewichtetes arithmetisches Mittel der Wärmekapazitäten der Einzelkomponenten (siehe Gleichung (2-5).

$$c_v = c_{v,s} \cdot (1-n) + c_{v,w} \cdot n_w$$
 (2-5)

Auf Grund der geringen Wärmekapazität der Luft, wird der entsprechende Summand in der Berechnung vernachlässigt.

Eine Übersicht über die Größenordnungen der Wärmeleitfähigkeiten und der Wärmekapazitäten von verschiedenen Böden, wie sie für den Einsatz von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen relevant sind, ist in Tabelle 2-1 dargestellt.

Boden	Wärmeleit λ [W/(	fähigkeit <sup>1)</sup> [mK)]	Wärmekapazität c <sub>v</sub> [MJ/(m³K)]		
	trocken	gesättigt	trocken	gesättigt	
Ton	0,2 - 0,3 (0,5)	1,1 – 1,6 (1,7)	0,3 – 0,6	2,1 – 2,3	
Schluff	0,2 - 0,3 (0,5)	1,2 – 2,5 (1,7)	0,6 – 1,0	2,1 – 2,4	
Sand	0,3 - 0,4 (0,4)	1,7 – 3,2 (2,4)	1,0 – 1,3	2,2 - 2,4	
Kies	0,3 - 0,4 (0,4)	1,8 – 3,3 (1,8)	1,2 – 1,6	2,2 – 2,4	

Tabelle 2-1: Thermische Eigenschaften verschiedener Bodenarten [Fromentin et al., 1997, VDI 4640, 2001]

<sup>1)</sup> Die Werte in Klammern geben den Richtwert der VDI4640 an

#### 2.1.3 Bodentemperatur in oberflächennahen Schichten

Die Temperatur des Bodens wird durch Einflüsse aus der Atmosphäre und Einflüssen aus dem Erdinneren bestimmt. Darüber hinaus wirken sich anthropogene Einflüsse





(Versiegelungsgrad, Bebauung, etc.) auf die Untergrundtemperatur aus. So weisen Städte in der Regel eine höhere mittlere Bodentemperatur als ländliche Gebiete auf. In oberflächennahen Schichten kann der Wärmestrom aus dem Erdinneren als vernachlässigbar klein (ca. 0,12 W/m<sup>2</sup>) angesehen werden [VDI 4640, 2001].

Die Sonneneinstrahlung als maßgebender atmosphärischer Einfluss bewirkt im Jahresmittel einen Wärmestrom von ca. 0,75 kW/m<sup>2</sup> an der Erdoberfläche [Baier, 2008]. Zusätzlich ist die Bodentemperatur tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Während die täglichen Temperaturen eine Eindringtiefe von ca. 1 m aufweisen, sind jahreszeitliche Temperaturschwankungen standortabhängig bis in Tiefen von 20 m zu verzeichnen [Markiewicz, 2004]. Bodenschichten, die auf Grund ihrer Tiefenlage nicht mehr durch diese Schwankungen beeinflusst werden, werden als neutrale Zone bezeichnet. Unterhalb der neutralen Zone steigt der Einfluss des Wärmestroms aus dem Erdinneren. Vereinfacht kann davon ausgegangen werden, dass die Temperatur ab der neutralen Zone linear mit drei Kelvin pro 100 m ansteigt [VDI 4640, 2001].

Die Gründungstiefe der hier betrachteten geothermisch wirksamen Abdichtungselemente wird in der Regel oberhalb der neutralen Zone liegen, sodass im Folgenden der Einfluss aus jahreszeitlichen Temperaturschwankungen betrachtet wird. Zur Verdeutlichung werden die Zusammenhänge beispielhaft für den Standort Aachen dargestellt. Die Ermittlung der Temperaturverteilung erfolgt dabei nach dem Ansatz von Markiewicz (2004), welcher detailliert im Anhang A dargestellt ist. Die Bodentemperaturen folgen innerhalb eines Jahres einem sinusförmigen Verlauf, dessen Amplitude von der Tiefe der Bodenschicht abhängig ist, da mit zunehmender Tiefe das zu erwärmende Bodenvolumen zunimmt. In oberflächennahen Bereichen sind die Temperaturschwankungen somit stark ausgeprägt, während tiefliegende Schichten eine Dämpfung der Temperaturamplitude erfahren (siehe Abbildung 2-4).



Abbildung 2-4: Jahreszeitlicher Verlauf der Bodentemperatur für verschiedenen Tiefen am Beispiel Aachen [nach Markiewicz, 2004]





Die Temperaturverteilung im Boden ist zusätzlich einer Phasenverschiebung unterworfen. Das bedeutet, dass die Maximaltemperatur der Luft im langjährigen Mittel z.B. in Aachen im Juli zu verzeichnen ist, in tieferen Bodenschichten die entsprechende Maximaltemperatur jedoch erst im November erreicht wird. Für den Standort Aachen kann die neutrale Zone auf ca. 12 m festgesetzt werden, wo die mittlere Temperatur ca. 10 °C beträgt (siehe Abbildung 2-5, links).





Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Effektivität von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen für Heizzwecke untersucht. Es zeigt sich, dass auf Grund der Phasenverschiebung des Temperaturverlaufs während der Heizperiode eine erhöhte Bodentemperatur (im Vergleich zur neutralen Temperatur) angesetzt werden kann (siehe Abbildung 2-5, rechts). Eine erhöhte Bodentemperatur bedeutet auch ein erhöhtes Energiepotential, sodass sich die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Untergrund somit positiv auf den Wärmeertrag von thermo-aktiven Bauteilen auswirken.

#### 2.1.4 Grundwasserströmung

Beim Vorhandensein einer Grundwasserströmung findet ein zusätzlicher Wärmetransport infolge erzwungener Konvektion statt (siehe Kapitel 2.1.1). Die Grundwassergeschwindigkeit v<sub>f</sub> (auch Filtergeschwindigkeit genannt) wird nach dem Gesetz von Darcy beschrieben (siehe Gleichung (2-6)).

$$\mathbf{v}_{\mathrm{f}} = \mathbf{k}_{\mathrm{f}} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{k}_{\mathrm{f}} \cdot \frac{\Delta \mathbf{h}}{\Delta \mathbf{l}} \tag{2-6}$$

Hierin sind  $k_f$  der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens und der Proportionalitätsfaktor i beschreibt den hydraulischen Gradienten (Druckabbau  $\Delta h$  bezogen auf die durchströmte Länge  $\Delta I$ ).





Der Durchlässigkeitsbeiwert ist von der Porenstruktur des Bodens (ausgedrückt durch die Permeabilität k) und den Eigenschaften des Bodenwassers (Dichte und Viskosität) abhängig. Der Zusammenhang ist in Gleichung (2-7) dargestellt.

$$k_{f} = k \cdot \frac{g \cdot \rho_{w}}{\eta}$$
(2-7)

Da sowohl die Dichte als auch die Viskosität des Wassers temperaturabhängig sind, ist auch der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens temperaturabhängig. In dem hier betrachteten Temperaturspektrum beim Einsatz geothermischen Anlagen ist diese Abhängigkeit jedoch vernachlässigbar.

# 2.2 Wärmeträgerkreislauf

Neben den thermischen Einflüssen aus dem Boden hat auch das Wärmetauschersystem Einfluss auf den Wärmeertrag von geothermischen Anlagen. Hierbei sind vor allem die thermischen Eigenschaften der verschiedenen Materialien (Wärmeträgerfluid, Rohrmaterial, Verfüllung, Bauteil) als auch die Strömungsbedingungen im Rohrsystem von entscheidender Bedeutung. Im Folgenden werden die wesentlichen Zusammenhänge, welche für die Beschreibung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente erforderlich sind, dargestellt.

#### 2.2.1 Wärmeübergangswiderstand

Der Einfluss der verschiedenen Materialien und deren Zusammenwirken wird bei geothermischen Anlagen durch den Wärmeübergangswiderstand  $R_b$  beschrieben. Er beschreibt die Temperaturänderung zwischen Wärmeträgerfluid ( $T_f$ ) und Boden bzw. Bauteil ( $T_b$ ) bei einer bestimmten spezifischen Entzugsleistung  $q_s$  [Gehlin, 2002]. Der Zusammenhang ist in Gleichung (2-8) dargestellt.

$$R_{b} = (T_{f} - T_{b}) / q_{s}$$
(2-8)

Mit dem Wärmeübergangswiderstand wird der komplette Wärmetransport zwischen Erdreich und Trägerfluid beschrieben. Für Erdwärmesonden beträgt der Wärmeübergangswiderstand ca. 0,2 Km/W [Gehlin, 2002]. Im Detail ergibt sich der Wärmeübergangswiderstand jedoch aus dem Zusammenwirken verschiedener Einzelmechanismen. In Abbildung 2-6 sind die entsprechenden Mechanismen für einen Energiepfahl dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Wirkungsweise und Konstruktion von Energiepfählen kann Kapitel 3.2 entnommen werden.







Abbildung 2-6: Mechanismen beim Wärmeübergang zwischen Boden und Fluid am Beispiel eines Energiepfahls [nach Brandl, 2006]

Für rotationssymmetrische Systeme kann der Wärmeübergangswiderstand mittels Thermal Response Tests und unter Anwendung der Linienquellentheorie ermittelt werden [Gehlin, 2002]. Die hier betrachteten geothermischen Abdichtungselemente sind jedoch durch einen asymmetrischen Wärmeentzug gekennzeichnet, sodass eine direkte Übertragung dieses Modells nicht möglich ist. Die vereinfachte Ermittlung des Wärmeübergangswiderstands für die Elemente im Rahmen von Laborversuchen mit den entsprechenden Annahmen wird daher in Kapitel 5.4 dargestellt.

#### 2.2.2 Strömungszustand im Absorbersystem

Durch die Strömungsbedingungen im Rohr wird maßgeblich der Wärmeübergang zwischen Wärmeträgerfluid und Rohrwandung beeinflusst (siehe Abbildung 2-6). Eine gute Wärmeübertragung zwischen Fluid und Rohr bildet somit die Grundvoraussetzung für den effektiven Betrieb von geothermischen Anlagen.

Im Allgemeinen wird bei der Rohrströmung zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden. Während innerhalb des laminaren Strömungsbereichs eine Bewegung der Flüssigkeitsteilchen parallel zur Hauptfließrichtung stattfindet, weisen im Falle einer turbulenten Strömung die Flüssigkeitsteilchen von der Hauptfließrichtung abweichende Geschwindigkeitskomponenten auf. Der Strömungszustand im Rohr wird durch die Reynoldszahl (siehe Gleichung (2-9)) beschrieben, die als dimensionslose Kenngröße Einflüsse aus Geschwindigkeit, Reibung und Rohrguerschnitt koppelt.

$$Re = \frac{v \cdot 4 \cdot r_{hyd}}{v}$$
(2-9)

Im Falle der Verwendung von kreisförmigen Absorberrohren, wie sie in den hier betrachteten Fällen verwendet werden, entspricht der hydraulische Radius r<sub>hyd</sub> dem Innenradius des Rohres.





Die kritische Reynoldszahl von 2.340 beschreibt den Übergang zwischen laminarer und turbulenter Strömung, d.h. für größere Geschwindigkeiten ist das laminare Geschwindigkeitsprofil nicht mehr stabil und bricht zusammen. Bei Reynoldszahlen größer 10.000 kann von einer vollausgebildeten turbulenten Strömung ausgegangen werden. Bei Reynoldszahlen 2.340 < Re < 10.000 befindet sich eine Strömung im sogenannten Übergangsbereich.

Der Wärmeübergang (ausgedrückt durch den Wärmeübergangskoeffizient α) zwischen Fluid und Rohrwandung wird durch die Nusselt-Zahl beschrieben (siehe Gleichung (2-10)). Die Berechnung der Nusselt-Zahl findet dabei in Abhängigkeit des vorliegenden Strömungszustands statt.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{d_i} \tag{2-10}$$

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Strömungszustandes bzw. der Strömungsgeschwindigkeit ist in Abbildung 2-7 der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  in Abhängigkeit des Volumenstroms im Rohr dargestellt. Die Ermittlung erfolgte dabei nach Pahud et al. (2002) für die in den Laborversuchen eingesetzten Rohre mit einem Außendurchmesser von d<sub>a</sub> = 16 mm. Die genaue Berechnung sowie die verwendeten Formeln können Anhang A entnommen werden.



Abbildung 2-7: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit des Strömungszustands im Rohr [nach Pahud et al., 2002]

Wie Abbildung 2-7 verdeutlicht, verbessert sich der Wärmeübergang zwischen Fluid und Rohrwandung merklich, sobald der laminare Strömungsbereich verlassen wird. Aus diesem Grund wird für geothermische Anlagen im Allgemeinen das Vorhandensein einer nichtlaminaren Strömung gefordert. Bei der Auslegung von Anlagen ist daher das Erreichen einer





möglichst hohen Fließgeschwindigkeit zu empfehlen. Hierbei ist jedoch auch der zusätzliche Energieeintrag zur Erreichung der Geschwindigkeit zu beachten.

#### 2.2.3 Leistung von geothermischen Anlagen

Die erzielbare Leistung von geothermischen Anlagen wird durch das Zusammenwirken der verschiedenen Einflussgrößen aus dem Erdreich und dem System bestimmt. Bei einer Leistungsangabe ist zwischen der maximalen Entzugsleistung, die einen momentanen Zustand beschreibt, und der langfristigen Entzugsleistung zu unterscheiden.

Die langfristige Leistung wird durch das thermische Gleichgewicht zwischen Wärmeentzug und Regeneration des Erdreichs bestimmt und wird in der Regel durch die Jahresarbeitszahl  $\beta_a$  charakterisiert. Die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe gibt das Verhältnis zwischen jährlich gelieferter Wärme zur aufgenommenen elektrischen Antriebsenergie an und liegt bei effizienten Anlagen bei  $\beta_a > 4$  [VDI 4640, 2001].

Da im Rahmen des Forschungsvorhabens der Schwerpunkt auf die Betrachtung des Primärkreislaufes gelegt wurde, erfolgt die Beurteilung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente über die temporäre Entzugsleistung. Diese lässt sich nach Gleichung (2-11) in Abhängigkeit der Systemtemperaturen und der Systemeigenschaften berechnen.

$$P = c_{v,f} \cdot (T_{Aus} - T_{Ein}) \cdot Q$$
(2-11)





# 3 Thermo-Aktive Bauteile – Stand der Technik

#### 3.1 Allgemeines

Seit Beginn der 80er Jahre werden vermehrt erdberührende Bauteile zur geothermischen Nutzung des Untergrunds herangezogen. Dabei werden an die erforderliche Bewehrung Absorberleitungen befestigt, die einen Wärmeentzug aus dem Boden ermöglichen. Die Grundlagen für diese Technik wurden ursprünglich in Österreich und der Schweiz gelegt. Eine Übertragung nach Deutschland findet in den letzten Jahren vermehrt statt. Als erste thermisch aktive Bauteile sind Gründungsplatten dokumentiert, später wurden auch Pfähle (1984) und Schlitzwände (1996) mit Absorberleitungen ausgestattet [Brandl, 2006]. Neuere Untersuchungen beschäftigen sich auch mit der Anwendung der Technik bei Tunnelbauwerken.

Die Vorteile dieser Technik liegen in der Nutzung von Synergien durch die Erweiterung von statisch erforderlichen Bauteilen um eine energetische Funktion. Zusätzliche Bohr- bzw. Baukosten entfallen und die zusätzlichen Installationskosten können als relativ gering angesehen werden [Brandl et al., 1999].

Grundsätzlich können alle erdberührenden Bauteile geothermisch genutzt werden. Tiefe Gründungselemente, wie Pfähle oder Schlitzwände, besitzen jedoch den Vorteil, dass sie Bodenbereiche erschließen, welche keiner saisonalen Temperaturschwankung unterliegen (siehe Kapitel 2.1.3).

Die Absorberrohre werden in der Regel in situ auf der Baustelle an der Bewehrung angebracht. Sie werden dabei entweder schleifen- oder spiralförmig verlegt. Gängige Rohrsysteme bestehen bevorzugt aus Polyethylen (PE) und weisen einen Durchmesser von 16 bis 32 mm bei Wandstärken zwischen 2 und 2,3 mm auf [Brandl, 2006]. Um eine Zerstörung der Leitungen zu vermeiden, werden diese während des Betoniervorgangs unter Druck gesetzt. Ein Ausfall von 2 – 3 % der Leitungen durch das Betonieren ist trotzdem als systemtypisch anzusehen [Adam et al., 2005]. Als Wärmeträgermedium wird Wasser oder ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet. Durch die Verwendung von Glykol wird der Gefrierpunkt des Fluids herabgesetzt, sodass kältere Systemtemperaturen erreicht werden können. In Wasserschutzgebieten darf i.d.R. nur reines Wasser verwendet werden [VDI 4640, 2001].

Die Auslegung von energetisch genutzten Bauteilen erfolgt stets nach statischen Aspekten. Zusätzlich benötigte Heizleistungen werden durch unabhängige Systeme abgedeckt [Fromentin & Pahud, 1997]. Weiterhin muss bei der Planung eine ausgeglichene Energiebilanz über das Jahr gewährleistet werden, wodurch vor allem der minimale Abstand der Absorberleitungen begrenzt ist.





Im Folgenden werden die Besonderheiten von Energiepfählen, Energiebodenplatten, Energieschlitzwänden und Energietunneln detaillierter betrachtet.

# 3.2 Energiepfähle

Steht oberflächennah nicht tragfähiger Untergrund an, werden Gebäude auf Pfählen gegründet. Dabei wird zwischen Ortbeton- und Fertigteilpfählen unterschieden. Prinzipiell können beide Pfahlarten als Energiepfahl ausgebildet werden. Eine schematische Darstellung eines Energiepfahls ist in Abbildung 3-1 dargestellt.



Abbildung 3-1: Schematische Darstellung eines Energiepfahls [nach von der Hude & Sauerwein, 2007]

Im Bereich der Fertigteilpfähle werden vor allem Betonrammpfähle als Energiepfähle ausgebildet. Übliche Durchmesser liegen dabei zwischen 30 und 60 cm bei einer Länge von 10 bis 30 m. Bei einer Herstellung im Werk ist das Ausfallrisiko von Absorberleitungen während des Herstellungsprozesses gering. Die maximale Pfahllänge ist dagegen auf die maximal mögliche Transportlänge begrenzt. Eine Kopplung der Elemente wird in der Regel nicht vorgenommen, da der Mehraufwand zur Erreichung einer ausreichenden Dichtigkeit während des Rammes überproportional ansteigt [SIA, 2005].

Das Anbringen der Absorberleitungen ist bei Ortbetonpfählen wesentlicher risikobehafteter, als bei Fertigteilpfählen. Aus diesem Grund werden bei Ortbetonpfählen überwiegend Bohrpfähle für eine energetische Nutzung herangezogen, die ein relativ kontrolliertes Einbringen des Bewehrungskorbs inklusive der Leitungen ermöglichen. Die gängigen geometrischen Abmessungen weisen einen Durchmesser zwischen 60 und 180 cm und eine Länge von 10 bis 60 m auf [SIA, 2005].



Geotechnik im Bauwesen Geotechnical Engineering Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler



Die Dimensionierung von Energiepfählen erfolgt aus rein statischen Aspekten. Eine Beeinträchtigung der statischen Eigenschaften des Pfahls durch seine Eigenschaft als Wärmetauscher ist dabei auszuschließen [SIA; 2005]. So ist z.B. eine Reduzierung der Tragfläche durch eine zu große Leitungsanzahl zu vermeiden. Weiterhin ist die Temperatur in der Wärmeträgerflüssigkeit so zu begrenzen, dass keine Frostbeanspruchung des Pfahls oder des Bodens vorliegen kann, welcher die vorhandene Pfahlmantelreibung schädlich reduzieren würde. Starke Temperaturschwankungen innerhalb des Pfahls führen darüber hinaus zu Zwangsbeanspruchungen.

Die Auslegung von Energiepfählen kann in Deutschland analog zu Erdwärmesonden nach VDI-Richtlinie 4640 / Blatt 2 erfolgen. Der erforderliche Erdwärmesondenabstand zur Vermeidung einer gegenseitigen Beeinflussung wird dort mit 5 m angeben. Bei der Planung von Energiepfählen ist daher ggf. nicht jeder Pfahl als Energiepfahl auszuführen. Alternativ ist bei der Auslegung eines Einzelpfahls eine Reduzierung der Leistung durch eine Beeinflussung aus der Pfahlgruppe vorzunehmen.

Energiepfähle werden in den meisten Ausführungsbeispielen sowohl zum Heizen, als auch zum Kühlen genutzt. Dies bedeutet, dass im Sommer die überschüssige Wärme aus dem Gebäude in das Erdreich eingeleitet wird. Das Erdreich fungiert in den Sommermonaten als Energiespeicher, dem in den Wintermonaten die Wärme zu Heizzwecken wieder entzogen wird.

Energiepfähle sind die am zahlreichsten eingesetzten erdberührten Betonbauteile zur geothermischen Nutzung des Untergrunds. Bei drei Großprojekten in Frankfurt (Main-Tower, IG-Metall Hochhaus und Gallileo Hochhaus) werden Energiepfähle zur Klimatisierung der Gebäude genutzt. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von kleinen Projekten, deren Dokumentation jedoch oftmals nicht umfangreich einsehbar ist. Ein Überblick über einen Teil der ausgeführten Projekte mit den vorhandenen ergänzenden Informationen kann Tabelle 3-1 entnommen werden. Die Bandbreite der dokumentierten Entzugsleistungen liegt zwischen 17 und 52 W/m<sup>2</sup>. Eine genauere Betrachtung der Daten ergab, dass die Entzugsleistung der Energiepfähle erwartungsgemäß mit steigender Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds steigt. Zusätzlich erhöht die Anzahl der U-Rohre pro Pfahl die erzielbare Wärmemenge.





Projektname	Wärmeent- zugsleis- tung [W/m²]	Pfahllänge [m]	Pfahlum- fang [m]	U-Rohre pro Pfahl [Stk.]	Schal- tung der Pfähle	Durchfluss- menge pro Pfahl [l/h]	Wärmeleit- fähigkeit des Baugrunds [W/mK]	Grundwasser stand unter GOK [m]	Grundwasser- geschwindig- keit [m/d]	Quelle
Main Tower	25,7	30,0	4,71	8	parallel	-	1,45	3 bis 6	-	Katzenbach et al., 2002; von der Hude & Wegner, 2010; von der Hude & Sauerwein, 2007
Gallileo	25,7	26 bis 30	4,71	8	parallel	-	1,45	3 bis 6	-	von der Hude & Wegner, 2010; von der Hude & Sauerwein, 2007
IG-Metall	26,4	20,0	3,77	6	seriell	-	1,45	3 bis 6	-	von der Hude & Wegner, 2010; von der Hude & Sauerwein, 2007
Dock Midfield 2003	17,5	26,8	3,77	5	seriell	860	1,80	5,00	keine	SIA, 2005; Pahud & Hubbuch, 1998
Industriegebäude Lidwil 1993	27,8	17,2	1,80	2	parallel	240	1,80	3,00	Teilweise bis zu 150 m/d	SIA, 2005; Pahud, 2002
Mehrfamilienhaus in Willerzell 1997	41,7	8,0	1,20	4	-	100	-	-	-	SIA, 2005
Schule Vers l'Église 2000	52,0	23,2	1,00	2	-	310	-	-	-	SIA, 2005
Numerische Simulation unter stationäre Bedingungen	17,0	16,0	3,77	4	seriell	-	1,80	-	-	Markiewicz, 2004
Anlage Finkernweg	46,4	10,7	1,40	4	-	-	2,20	1,6 bis 2,2	sehr gering bis keine	Pahud, 2002
PAGO AG	40,6	14,0	1,60	4	-	-	1,8 bis 2,0	1,00	sehr gering bis keine	Pahud, 2002
LT24, Hadersdorf- Weidlingau *	16,8	17,1	3,77	-	-	14000	-	-	-	Brandl, 2006; Hofinger & Kohlböck, 2005
* Bohrpfahlwand										

#### Tabelle 3-1: Ausführungsbeispiele von Energiepfählen und Leistungsdaten

#### 3.3 Ebene Energiefundierungen

Zu den ebenen Energiefundierungen zählen Energieschlitzwände oder Energiebodenplatten. Teilweise werden auch Baugrubenverbauten aus Pfahlwänden geothermisch aktiviert. Der wesentliche Unterschied zu den Energiepfählen besteht darin, dass die Energie aus dem Boden nur einseitig durch die Außenseite des Bauteils genutzt werden kann. Ein "energetischer Kurzschluss" zwischen Außen- und Innenseite (d.h. eine Beeinflussung der Absorber durch das Gebäudeinnere) ist daher zu vermeiden. Je nach Situation kann daher Gebäudefläche erforderlich eine zusätzliche Wärmedämmung an der werden [Fromentin & Pahud, 2007]. Während Energieschlitzwände grundlastfähig sind, werden Energiebodenplatten vor allem zur Spitzendeckung verwendet. Energiebodenplatten werden darüber hinaus stärker durch jahreszeitliche Temperaturschwankungen beeinflusst als tief ins Erdreich einbindende Schlitzwände.

Bei Energieschlitzwänden erfolgt die Befestigung der Absorberrohre analog zu Energiepfählen an den Bewehrungskörben vor Ort oder im Werk (siehe Abbildung 3-2, links). Zur Reduzierung des Wärmeübergangswiderstands ist eine Anordnung der Rohre auf der





Erdseite vorteilhaft. Durch die Verlegung im Werk wird wiederum das Ausfallrisiko minimiert [Hofinger & Kohlböck, 2005]. Die Absorberkreisläufe können am Schlitzwandkopf oder im Bereich der Bodenplatte gekoppelt werden, wodurch eine Übergabe an das zentrale Heizsystem ermöglicht wird.



Abbildung 3-2: Schematischer Darstellung einer Energieschlitzwand (links) und einer Energiebodenplatte (rechts)

Werden Bodenplatten geothermisch aktiviert, werden die Wärmetauscherrohre in den Schutzbeton unterhalb der Bodenplatte verlegt (siehe Abbildung 3-2, rechts). Alternativ ist auch hier eine Befestigung an der Bewehrung möglich. Die Verlegung unterhalb der Bodenplatte bietet einen größeren Schutz beim Betoniervorgang und hat sich somit in der Praxis als unkompliziert erwiesen. Allerdings ist bei dieser Verlegungsmethode eine zusätzliche Bauzeit einzuplanen, die je nach Größe der zu aktivierenden Fläche mehrere Tage betragen kann [Hofinger & Kohlböck, 2005]. Bei der Durchführung der Leitungen durch die Bodenplatte zum zentralen Verteilersystem ist stets auf einen wasserdichten Anschluss zu achten. Zur Vermeidung eines energetischen Kurzschlusses ist in den meisten Fällen eine Wärmedämmung oberhalb der Bodenplatte erforderlich.

Durch ebene Energiefundierungen wird ein relativ kleines Bodenvolumen bezogen auf die aktivierte Oberfläche zur Energiegewinnung genutzt. Es lässt sich daher zunächst vermuten, dass die Entzugsleistung von Energiefundierungen im Vergleich zu Energiepfählen geringer ausfällt [Brandl, 2006]. Dies kann jedoch durch die Betrachtung von ausgeführten Praxisbeispielen nicht bestätigt werden (siehe Tabelle 3-2). Die Bandbreite der spezifischen Entzugsleistung liegt hier zwischen 26,4 und 100 W/m<sup>2</sup>. Bei den hier dokumentierten Projekten zeigt sich ebenfalls, dass mit steigender installierter Absorberlänge die erzielbare Wärmemenge steigt. Die Einbußen durch die gegenseitige Beeinflussung von Wärmetauscherrohren scheinen somit eher gering zu sein.





	-				
Projektname	Wärmeentzugs- leistung [W/m²]	Fläche Erdwärme- absorber [m²]	Energiefun- dierung	Gesamte Absorberrohr- länge [m]	Quelle
EA-Generali- Center	100,00	6000	Schlitzwand	30000	Adam & Markiewicz, 2009; Brandl, 2006
Uniqa Tower	53,85	7800	Schlitzwand + Bodenplatte	90000	Adam & Markiewicz, 2009; Brandl, 2006
U2/1 - Schottenring	33,00	2563	Bodenplatte + Bohrpfahlwand	13000	Brandl, 2006; von der Hude & Völkner, 2004
U2/2- Taborstraße	27,10	1865/1640	Schlitzwand + Bodenplatte	27000	Brandl, 2006
U2/3 - Praterstern	19,14	7125/3744	Schlitzwand + Bodenplatte	59000	Brandl, 2006
U2/4 - Messe	26,41	2348	Bodenplatte	12000	Brandl, 2006

Tabelle 3-2: Ausführungsbeispiele von ebenen Energiefundierungen und Leistungsdaten

# 3.4 Energietunnel

Die jüngsten Entwicklungen aus Österreich legen den Schwerpunkt auf die geothermische Aktivierung von Tunnelbauwerken [Adam, 2008]. Tunnel haben im Vergleich zu den anderen oben genannten Systemen den Vorteil, dass sie in der Regel in Tiefen liegen, in denen jahreszeitliche Temperaturschwankungen zu vernachlässigen sind. Zusätzlich sind systemimmanent große Kontaktflächen mit dem Erdreich vorhanden. Zusätzlich können innere Wärmequellen (z.B. Abwärme von Fahrzeugen) genutzt werden. So können z.B. U-Bahn-Tunnel in den Wintermonaten Temperaturen von bis zu 20°C aufweisen [Adam, 2007]. Die gewonnen Energie aus den Tunneln kann dann zur Deckung des Eigenbedarfs (Beheizung von Betriebsräumen, etc.) genutzt werden.

Bei der thermischen Aktivierung von Tunnelbauwerken ist die wirtschaftliche Länge der Absorberrohre begrenzt. Je länger der ausgestattete Tunnelabschnitt, desto höher sind auch die Kosten für die Umwälzpume, die für die Zirkulation der Wärmeträgerflüssigkeit erforderlich ist. Als wirtschaftliche Länge können Tunnelabschnitte von max. 500 m angesehen werden. Sollen größere Flächen geothermisch genutzt werden, ist eine Separation der Kreisläufe vorzunehmen [Oberhauser & Adam, 2006].

Tunnel werden entweder in offener oder bergmännischer Bauweise hergestellt. Bei der offenen Bauweise kann die geothermische Aktivierung über die oben genannten Elemente Pfahl, Pfahlwand, Schlitzwand oder Bodenplatte erfolgen. Ein energetischer Kurzschluss ist hier jedoch nicht auszuschließen, sodass in den meisten Fällen, die Absorberrohre sowohl an der Erd- als auch an der Luftseite angeordnet werden.





Beim bergmännischen oder maschinellen Tunnelvortrieb findet eine kommerzielle Nutzung der Erdwärme derzeit noch nicht statt. Dafür wurden in den letzten Jahren verschiedene Forschungsarbeiten vor allem im Alpenraum durchgeführt, die sich mit der geothermischen Aktivierung von Tunneln in geschlossener Bauweise beschäftigen. Die dokumentierten und hier dargestellten Entzugsleistungen stellen somit i.d.R. lediglich Ergebnisse aus Pilotversuchen dar. Eine Verallgemeinerung ist somit nur eingeschränkt möglich.

An der TU-Wien wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Polyfelt ein sogenanntes Energievlies entwickelt, welches in einer Versuchsanlage beim Bau des Lainzer Tunnels in Wien getestet wurde [Markiewicz, 2004]. Das Energievlies stellt den ersten Einsatz eines geothermischen Systems bei der Spritzbetonbauweise dar. Beim Energievlies werden die Wärmetauscherrohre zwischen zwei Vlieslagen befestigt (siehe Abbildung 3-3). Das Vlies wird dann zwischen Innen- und Außenschale entlang des Tunnelumfangs verlegt [Markiewicz, 2008]. Das Energievlies kann somit die erforderliche Trenn- bzw. Dichtlage zwischen Innen- und Außenschale ersetzen, sodass kein zusätzlicher Arbeitsschritt für die Installation erforderlich wird. Bei der Durchführung der Leitungen durch die Innenschale wird die Wasserdichtigkeit durch Dichtungsmanschetten erzielt. Beim Einsatz des Vlieses in der Teststrecke im Lainzer Tunnel konnten Spitzenleistungen von 30 W/m<sup>2</sup> und eine Dauerleistung von 14,2 W/m<sup>2</sup> erzielt werden [Markiewicz, 2004].



Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Energievlies [nach Hofinger & Kohlböck, 2005]

Aufbauend auf dem Energievlies der TU Wien wurde an der Universität Stuttgart ein sogenannter Energieblock entwickelt [Schneider & Moormann, 2010]. Hierbei werden die Wärmetauscherrohre über Fixierschienen zwischen der Innen- und Außenschale angeordnet. Zur hydraulischen Optimierung des Systems werden die Leitungen innerhalb eines Blocks in 2 Kreisläufe unterteilt. Die Erprobung des Systems erfolgt derzeit an einem





Tunnelabschnitt des Fasanenhof-Tunnels in Stuttgart, sodass zurzeit noch keine Entzugsleistungen dokumentiert sind.

Ergänzend zum Energievlies wurde ebenfalls an der TU Wien ein sogenannter Energieanker entwickelt [Adam, 2008]. Der Vorteil der Energieanker kann darin gesehen werden, dass sie komplett vom Erdreich umgeben werden und somit die gesamte Länge zum Wärmeentzug genutzt werden kann. Eine Übertragung der Technik auf weitere Ankertypen ist denkbar. Der Energieanker wurde ebenfalls beim Bau des Lainzer Tunnels in Wien erprobt. Ein wirtschaftlicher Einsatz ist auf Grund der geringen Betriebserfahrungen derzeit jedoch noch nicht möglich [Markiewicz, 2008]. Als Anhaltwert werden für Energieanker Entzugsleistungen von 8 bis 15 W/m angeben.



Abbildung 3-4: Prinzip eines Energietübbings [Franzius & Pralle, 2009]

Für die geothermische Aktivierung von maschinell aufgefahrenen Tunneln wurde von den Firmen PSP Beratende Ingenieure in München und der Ed. Züblin AG in Stuttgart der sogenannte Energietübbing entwickelt [Franzius & Pralle, 2009]. Hierbei werden die Absorberleitungen bei der Herstellung im Werk in die Betontübbinge integriert (siehe Abbildung 3-4). Die Leitungen können dabei sowohl am äußeren Bewehrungskorb zur Nutzung der Erdwärme oder an der inneren Bewehrungslage zur Nutzung der inneren Wärmequellen befestigt werden. Eine Verbindung der Leitungen zwischen den Tübbingen wird durch Kupplungstaschen ermöglicht. Der erste Einsatz der Energietübbinge findet sich beim Neubau eines Eisenbahntunnels in Jenbach (Österreich). Als Pilotstrecke wurde ein 54 m langer Streckenabschnitt mit Energietübbingen ausgerüstet. Die gewonnene Energie soll zur Eigenversorgung des angrenzenden Bahnhofs verwendet werden. Die in Jenbach erzielten spezifischen Entzugsleistungen der Energietübbinge lagen zwischen 10 und 20 W/m<sup>2</sup>.





# 3.5 Zusammenfassung der Leistungsdaten von thermo-aktiven Bauteilen

Eine Zusammenfassung der möglichen Entzugsleistungen von thermo-aktiven Bauteilen ist in Tabelle 3-3 gegeben.

Bauteil	Spezifische Entzugsleistung
Energiepfahl	40-120 W/m
Energieschlitzwand	19 – 100 W/m²
Energiebodenplatte	15 – 30 W/m²
Energievlies	5 – 15 W/m²
Energieanker	8 – 15 W/lfm
Energietübbing	10 – 20 W/m²

Tabelle 3-3: Entzugsleistungen von thermo-aktiven Bauteilen (Zusammenfassung)

Die hier angegeben Daten basieren alle auf der Dokumentation von Ausführungsbeispielen. Eine Übertragung und Verallgemeinerung dieser Werte nur eingeschränkt möglich, da unter thermisch günstigen Verhältnissen auch höhere Leistungen möglich sind.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Entzugsleistung von thermo-aktiven Bauteilen von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird (siehe Kapitel 2), die die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschweren. Darüber hinaus ist die Betriebsweise der geothermischen Anlagen zu beachten. Beim saisonalen Betrieb, d.h. ausschließlich Heiz- oder Kühlbetrieb) ist stets auf eine ausreichende Regenerationszeit des Bodens zu achten. Vor allem die hier aufgeführten Energiepfähle werden jedoch oft im kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb betrieben, was aufgrund der höheren Betriebsstunden ebenfalls einen Einfluss auf die Leistung der Anlagen besitzt.

Die hier dokumentierten Daten dienen somit lediglich als Richtwert zur Einordnung der im Rahmen des hier dargestellten Forschungsvorhabens erreichten spezifischen Entzugsleistungen.





# 4 Geothermisch wirksame Abdichtungselemente

# 4.1 Konzeption von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen und deren Anforderungen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens stand die Entwicklung von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen im Vordergrund. Dabei wurden in Zusammenarbeit mit der Firma NAUE GmbH & Co. KG in der Praxis bewährte Abdichtungsplatten mit Absorberleitungen ausgestattet, wodurch ein Wärmeentzug möglich wird.

Derzeit werden vor allem statisch erforderliche Bauteile thermisch aktiviert und somit zur Energiegewinnung genutzt. Die hier betrachteten geothermisch wirksamen Abdichtungselemente vereinen eine bautechnische und eine energetische Funktion. Das Grundprinzip entspricht jedoch im Wesentlichen dem der in Kapitel 3 vorgestellten thermoaktiven Betonbauteilen, sodass sich aus diesen die Anforderungen an die Konstruktion und den Betrieb der Abdichtungselemente ableiten lassen.

Bei den verwendeten Abdichtungselementen handelt es sich um Betonschutzplatten der Firma NAUE (Carbofix®). die ihre ursprüngliche Anwenduna bei schwierigen Baugrundverhältnissen und / oder erhöhtem chemischen Angriff der zu schützenden Bauteile haben [Olischläger & Ledel, 2003]. Die Carbofix®-Platten bestehen aus PEHD (High Density Polyethylen) und sind durch eine Noppenstruktur gekennzeichnet, die einen optimalen Verbund von Abdichtung und Bauteil gewährleistet (siehe Abbildung 4-1, rechts). Für die thermische Aktivierung von Abdichtungselementen werden im Allgemeinen keine erhöhten Schutzanforderungen gestellt, sodass im Rahmen des Projekts eine Plattendicke von lediglich 2 mm gewählt wurde. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Betonschutzplatten können dem Anhang B entnommen werden.

Zur thermischen Aktivierung der Wände wurden Absorberrohre in die Abdichtungselemente integriert (siehe Abbildung 4-1, rechts). Der maximale Rohrdurchmesser der Leitungen ist durch die Noppenstruktur auf 25 mm begrenzt. Dies entspricht jedoch im Wesentlichen dem Rohrdurchmesser, der auch bei thermo-aktiven Betonbauteilen zur Anwendung kommt (siehe Kapitel 3.1). Die geothermisch wirksamen Abdichtungselemente weisen im Vergleich zu thermo-aktiven Betonbauteilen zwei wesentliche Vorteile auf. Aufgrund der geringen Plattendicke ist zum einem ein nahezu direkter Kontakt zum umgebenden Erdreich vorhanden. Zum anderen ist die Leitungsführung im Element als sehr flexibel anzusehen und kann daher nach rein energetischen Aspekten ausgewählt werden. Zusätzlich weisen die Absorberleitungen aufgrund der vorhandenen Noppenstruktur eine hohe Lagesicherheit auf und die Leitungen sind beim Betoniervorgang gut geschützt. Das Prinzip der geothermisch





wirksamen Abdichtungselemente sowie der Leitungsverlegung kann Abbildung 4-1 entnommen werden.



Abbildung 4-1: Prinzip der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente (links) und Prinzip der Rohrverlegung (rechts)

Bei der Installation der geothermischen Abdichtungselemente ist darauf zu achten, dass eine thermische Beeinflussung aus dem Bauwerk bzw. dem Kellerraum vermieden wird. Eine thermische Entkopplung von Abdichtungselement und Innenseite des Bauteils ist daher z.B. durch die Anordnung einer Zwischendämmschicht empfehlenswert, damit ausschließlich ein einseitiger Wärmeentzug aus dem Erdreich stattfindet.

Die dokumentierten Leistungsdaten von thermo-aktiven Bauteilen haben gezeigt, dass die erreichte Leistung mit steigender Absorberlänge ansteigt. Um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten, d.h. die Erzielung einer ausreichend hohen Strömungsgeschwindigkeit bei geringen Pumpleistungen, geringen Druck- und Reibungsverluste sowie einer ausreichenden Entlüftung, muss die ausführbare Absorberlänge begrenzt werden. Im Rahmen des Projekts wurden daher mehrere Systemkreisläufe innerhalb der Wand parallel geschaltet, um die Leistungslänge zu reduzieren.

Für die Erzielung einer hohen Effizienz der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente (einfacher konstruktiven Anforderungen ist unter Beachtung der Einbau der Absorberleitungen, Schutz der Leitungen beim Einbau, etc.) eine möglichst hohe, langfristig aufrecht erhaltbare Entzugsleistung, respektive ein geringer Wärmeübergangswiderstand anzustreben. Die Einflussparameter, die den Wärmeertrag aus geothermischen Abdichtungselementen beeinflussen und im Rahmen des Projekts untersucht wurden, werden im Folgenden aufgezeigt.




## 4.2 Wesentliche Einflussparameter auf den Wärmeertrag

In Kapitel 2 wurden verschiedene Einflussparameter auf den Wärmeertrag von geothermischen Anlagen dargestellt, die sich auf die geothermisch wirksamen Abdichtungselemente übertragen lassen. Im Wesentlichen lassen sich die Parameter in Systemeinflüsse aus dem geothermisch wirksamen Abdichtungselement und in Einflüsse aus dem Boden aufteilen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Laborversuche und numerische Untersuchungen durchgeführt, um die einzelnen Einflussparameter zu separieren und deren jeweiligen Einfluss zu quantifizieren. Während die Systemparameter vorrangig im Rahmen der Laborversuche betrachtet wurden, lag der Schwerpunkt der numerischen Untersuchungen in der Betrachtung der Einflüsse aus dem Boden, da eine Veränderung der entsprechenden Eigenschaften bei den Laborversuchen nicht möglich war.

Die Systemeinflüsse werden im Wesentlichen aus den Einflüssen aus dem Absorberrohr selbst abgeleitet. Darüber hinaus sind die hydraulischen Verhältnisse im Rohr relevant. Als wesentliche Einflussgrößen aus dem System wurden daher folgende Parameter festgelegt:

- Durchflussgeschwindigkeit Q
- Lage von Vor- und Rücklauf in der Wand (Rohranordnung)
- Rohrabstand a und Schenkelabstand s
- Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials λ<sub>Rohr</sub>
- Rohrdurchmesser d<sub>a</sub>

Mit Ausnahme des Rohrabstands respektive des Schenkelabstands, welche ausschließlich im Rahmen der numerischen Untersuchungen betrachtet wurden, wurden die übrigen Parameter im Rahmen der beiden im Labor durchgeführten Großversuche erprobt.

Die den Wärmetransport maßgeblich beeinflussenden Bodenparameter sind:

- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmekapazität cv
- Grundwassergeschwindigkeit v<sub>f</sub>
- Ungestörte Bodentemperatur T<sub>B</sub>

Aus versuchstechnischen Gründen war eine Streuung der ungestörten Bodentemperatur in den Laborversuchen unvermeidbar. Eine systematische Untersuchung des Einflusses wurde jedoch nur im Rahmen der numerischen Untersuchungen vorgenommen.

Im Folgenden werden die durchgeführten Laborversuche (siehe Kapitel 5) und die numerischen Simulationen (siehe Kapitel 6) vorgestellt. Eine zusammenfassende Beurteilung der Einflussgrößen und ihrer Bedeutung für die Auslegung und den Betrieb von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen wird im anschließenden Kapitel 7 vorgenommen.





## 5 Laborversuche

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein Versuchsstand entwickelt, in dem die möglichen Entzugsleistungen von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen unter verschiedenen Rahmenbedingungen ermittelt werden konnten. Im Rahmen des Projekts wurden 2 Großversuche, die aus jeweils ca. 45 Einzelversuchen bestanden, durchgeführt. Durch Modifikationen in der Messtechnik konnte beim zweiten Großversuch zusätzlich zur Entzugsleistung der Elemente auch der Wärmeübergangswiderstand des Systems bestimmt werden.

#### 5.1 Aufbau des Versuchsstands

#### 5.1.1 Konzeption und Eigenschaften des Versuchsstand

Der Versuchsstand wurde so konzipiert, dass sowohl die Grundwassergeschwindigkeit, als auch die Durchflussgeschwindigkeit durchs Wärmetauschersystem variabel sind. Zusätzlich war zur Kalibrierung des numerischen Modells die Schaffung von eindeutigen Randbedingungen bei Abbildung realitätsnaher Verhältnisse erforderlich.

Um die Zeitverluste durch Ein-, Aus- und Umbauarbeiten zu minimieren wurde der Versuchstand so geplant, dass in eine abgedichtete und thermisch isolierte Versuchsgrube verschiedene Wandelemente eingehängt werden konnten. Die verschiedenen Wandelemente waren dabei durch unterschiedliche Absorbersysteme gekennzeichnet. Zum Ausgleich von versuchsbedingten Streuungen wurden darüber hinaus Redundanzen geschaffen, sodass jedes getestete Teilsystem in dreifacher Ausführung in das Wandelement eingebracht wurde. Der schematische Aufbau des Versuchsstands im Schnitt sowie eine Draufsicht auf den fertigen Versuchstand ist in Abbildung 5-1 dargestellt.



Abbildung 5-1: Schematischer Schnitt durch den Versuchsstand (links) und Draufsicht (rechts)





Der Versuchsstand besaß eine lichte Grundfläche von 3,08 m auf 2,87 m, wobei die kurze Seite in Strömungsrichtung vorliegt. Die lichte Höhe der Grube betrug 2,0 m. Die geothermisch aktivierte Wand besaß eine Fläche von 4,56 m<sup>2</sup> bei einer Dicke von 0,15 m. Das Volumen des Sandkörpers betrug somit ca. 15,5 m<sup>3</sup>.

Als Versuchsboden wurde ein enggestufter Sand verwendet, dessen bodenmechanische Eigenschaften Tabelle 5-1 entnommen werden können. Die ungestörte Bodentemperatur wurde zu Versuchsbeginn in Anlehnung an die Temperatur in der neutralen Zone in Aachen auf ca. 10 °C eingestellt (siehe Abbildung 2-5). Zur Abbildung der natürlichen Verhältnisse im Grundwasser wurde eine Vollsättigung des Sandes angestrebt, sodass der Sand unter der Zugabe von Wasser lagenweise eingebaut wurde. Vorversuche zum Einbringen des Sandes haben gezeigt, dass beim Einbringen des Sandes unter Wasser nahezu die Proctordichte erreicht werden kann. Die Streuung der erreichbaren Dichte fällt bei dieser Einbaumethode äußerst gering aus.

Parameter	Einheit	Wert
Durchlässigkeitsbeiwert k <sub>f</sub>	[m/s]	9,3*10 <sup>-5</sup>
Minimaler Porenanteil n <sub>min</sub>	[-]	0,33
Trockendichte bei dichtester Lagerung $\rho_{max}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,788
Maximaler Porenanteil n <sub>max</sub>	[-]	0,46
Trockendichte bei lockerster Lagerung $\rho_{min}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,439
Proctordichte $\rho_{Pr}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,725
Ungleichförmigkeitszahl	[-]	2,2

Tabelle 5-1: Eigenschaften des Bodens (aus bodenmechanischen Standardversuchen)

Das Wandelement wurde außerhalb der Grube liegend hergestellt. Die Dicke des Wandelements wurde aufgrund der maximalen Kranlast, die zum Einhängen der Wand zur Verfügung stand, zu 0,15 m gewählt. Die Höhe der Wand betrug 1,7 m, wobei nur die oberen 1,5 m thermisch aktiviert wurden, um Einflüsse aus der Unterstömung der Wand und dem daraus resultierenden Düseneffekt zu eliminieren. Die Absorberrohre wurden zuerst an den Betonschutzplatten befestigt. Als Absorberrohre wurden verschiedene Rohrsysteme der Firma Uponor GmbH verwendet. Um die Durchbiegung der Wand beim Einhängen zu reduzieren wurde eine Bewehrungslage aus Lagermatten (Q-188) in der späteren Außenseite der Wand angeordnet. Als Beton wurde ein Transportbeton (C30/37) verwendet. Die Betoneigenschaften wurden an Probekörpern nach DIN 1045-2 am Institut für Massivbau der RWTH Aachen ermittelt. Nach Aushärtung des Betons wurde eine Dämmschicht zur Vermeidung von externen Wärmeeinträgen auf die spätere Außenseite der Wand aufgebracht. Abschließend wurde das Wandelement umlaufend abgedichtet, um einen Feuchtigkeitseintritt in die Dämmung zu verhindern. Zur Gewährleistung einer ausreichenden





Betonfestigkeit wurde die Wand erst nach einer Erhärtungszeit von mindestens 14 Tagen in die Versuchsgrube eingehängt.



Abbildung 5-2: Herstellung eines Großversuchs

Der Ablauf zur Herstellung eines Großversuches ist in Abbildung 5-2 dargestellt. In die thermisch isolierte und abgedichtete Grube wurde zuerst eine erste Sandlage unter Wasser eingebracht. Die Dicke der Sandschicht wurde durch eine strömungstechnische Auslegung des Versuchsstands zu 35 cm bestimmt (siehe Kapitel 5.1.2). Im Anschluss wurde das ausgehärtete Wandelement in die Grube eingehängt. Zur Vermeidung von äußeren Wärmeeinträgen ins System war das Wandelement ebenfalls thermisch isoliert und umlaufend abgedichtet. Zur Schaffung von eindeutigen Strömungsrandbedingungen wurde die Abdichtung der Versuchsgrube mit den Betonschutzplatten durch eine überlappende Schweißnaht wasserdicht verbunden. Die Verschweißung wurde somit mit einer verlorenen Naht ausgeführt, um die Grundabdichtung der Grube beim Wandausbau nicht zu beschädigen. Abschließend wurde die Versuchsgrube mit dem restlichem Sand verfüllt. Der Einbau erfolgte dabei lagenweise unter Wasser. Zur Vermeidung von Wärmeeinträgen aus der Umgebung, wurde der Sandkörper nach oben ebenfalls thermisch abgedichtet. Nach abgeschlossenem Einbau wurde die Messtechnik installiert und der Bodenkörper auf die Ausgangsbodentemperatur von 10 °C durch das Kühlelement eingestellt.





Inklusive der Aushärtungszeit des Betons betrug der Zeitaufwand für den Einbau eines Großversuchs trotz des modularen Aufbaus ca. 4 Wochen, sodass im Rahmen des Projekts die Anzahl der Großversuche auf zwei beschränkt wurde.

### 5.1.2 Strömung

Die Strömung im Bodenkörper wurde durch einen Wasserspiegelunterschied und damit einem Potentialunterschied ∆h zwischen Ein- und Ausstrom erzeugt (siehe Abbildung 5-1, links). Die äußeren Wasserkörper wurden durch ein mit Geotextil bespanntes Stahlgitter vom Bodenkörper getrennt, sodass ein Ausspülen von Bodenteilchen vermieden wurde. Die Wasserspiegeldifferenz wurde mit Hilfe einer Umlaufpumpe erzeugt und bewirkte aufgrund der unteren Sandlage und der seitlichen Abdichtung zwischen Wand und Grube eine zweidimensionale Unterströmung der Wand.

Da der Ausstrom eine kleinere Fläche als der Einstrom besaß, kam es unterhalb der Wand zu einem Düseneffekt und somit zu einer Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeit. Es bildete sich somit kein homogener Geschwindigkeitszustand in Fließrichtung im Bodenkörper aus. Zur strömungstechnischen Auslegung des Versuchsstands wurden daher Berechnungen mit dem Programm GGU-SS-FLOW2D bzw. GGU-Transient durchgeführt. Die sich einstellende Strömung im Bodenkörper kann Abbildung 5-3 entnommen werden.

Instationäre Berechnungen haben gezeigt, dass sich die Sickerlinie innerhalb der Versuchsgrube, als Indiz für einen stationären Strömungszustand, zeitlich nahezu direkt einstellte, sodass sich hierdurch keine Anforderungen an die Versuchsdurchführung ergaben.



Abbildung 5-3: Strömungszustand im Versuchstand





Mit Hilfe von Vergleichsrechnungen wurde die Dicke der unteren Sandschicht dimensioniert. Der einstellbare Wasserspiegelunterschied zwischen Ein- und Ausstrom war aufgrund der vorhandenen Pumpenleistung auf ca. 80 cm begrenzt. Die Schichtdicke wurde daher so gewählt, dass eine maximale, über die Höhe möglichst gleichmäßige, Geschwindigkeit von 1 m/d am Einstrom erreicht werden konnte und der Düseneffekt zu einer möglichst geringen Geschwindigkeit im Ausstrom führt. Als Ergebnis wurde eine Schichtdicke von 35 cm gewählt, wodurch die Grundwassergeschwindigkeit am Einstrom von 1 m/d mit einem Potentialunterschied von 70 cm erzeugt werden konnte. Die maximale Geschwindigkeit im Ausstrom beträgt dabei ca. 5,3 m/d (siehe Abbildung 5-4).



Abbildung 5-4: Strömungsgeschwindigkeit im Bodenkörper in Abhängigkeit der Einbaudichte

Zur Ermittlung des Einflusses der Einbaudichte des Sandes auf das Strömungsprofil im Boden wurden zusätzliche Vergleichsrechnungen mit dem minimalen und maximalen Porenanteil nach Tabelle 5-1 durchgeführt. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 5-4 dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Streuung der Einbaudichten keinen nennenswerten Einfluss auf die strömungstechnische Auslegung des Versuchstands hat.

Für die Durchführung der Versuche wurden Einstromgeschwindigkeiten von 0 m/d (keine Wasserspiegeldifferenz), 0,5 m/d (respektive  $\Delta h = 0,4m$ ) und 1 m/d (respektive  $\Delta h = 0,7m$ ) gewählt, was den gängigen Werten für eine Grundwasserströmung in der Natur entspricht.

## 5.1.3 Messtechnik

Zur Regulierung der Strömungssituationen und der Temperaturen im Bodenkörper sowie im Absorbersystem wurden zwei Systemkühler der Firma ers® Energie-& Kältetechnik GmbH





verwendet. Für die Erfassung der Temperaturen wurden Datenlogger und Sensoren der Firma B+B Thermo-Technik GmbH verwendet. Messtechnisch wurden während des Versuchs sowohl das Absorbersystem als auch die Verhältnisse im Bodenkörper erfasst.

Die maximale Pumpenleistung des Systemkühlers für das Absorbersystem betrug 550 l/h, die auf drei separate Kreisläufe aufgeteilt werden konnte. Wurden alle drei Rohrleitungen eines Rohrsystems durchströmt, ergab sich somit ein maximaler Systemdurchfluss von 183 l/h. Für die Versuche sollte die Vorlauftemperatur des Fluids konstant ca. 2,5 °C betragen. Die Temperaturregelung erfolgte dabei automatisch durch den Kühler. Aufgrund der kurzen Durchlaufzeiten im Absorbersystem mussten jedoch mit Wasser gefüllte Pufferspeicher zwischen Vor- und Rücklauf geschaltet werden, um eine konstante Vorlauftemperatur zu gewährleisten.

Die Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen im Absorbersystem zur Bestimmung der Entzugsleistungen erfolgte automatisch durch digitale Datenlogger. Die entsprechenden Temperaturen wurden dabei während der Versuchsdauer alle 30 Sekunden aufgezeichnet. Zur Erreichung eines eingeschwungenen Zustands, gleichbedeutend mit einem thermischen Gleichgewicht zwischen Wärmeeintrag und Wärmeentzug, wurde die Versuchsdauer auf ca. 6 Stunden festgelegt.

Mit dem zweiten Systemkühler wurde die ungestörte Bodentemperatur zu Versuchsbeginn auf ca. 10 °C eingestellt. Zusätzlich wurde der Potentialunterschied zwischen Ein- und Ausstrom durch den Umlaufkühler konstant gehalten, um eine konstante Grundwasserströmung zu simulieren. Zur Kontrolle des Wasserstands im Bodenkörper wurden an den Rändern der Versuchsgrube zusätzlich Pegelrohre eingebracht (siehe Abbildung 5-5).

Die Aufzeichnung der Temperaturen im Sand erfolgte manuell durch Thermometer in einer Tiefe von ca. 70 cm. Das entsprechende Messraster für beide Großversuche kann Abbildung 5-5 entnommen werden. Zur Ermittlung des Wärmeübergangwiderstands wurde die Position der Messpunkte im zweiten Großversuch leicht modifiziert (siehe Kapitel 5.4). Um eine möglichst homogene Temperaturverteilung im Bodenkörper zu Versuchsbeginn zu gewährleisten, wurde die zulässige Standardabweichung der Temperaturen auf maximal 1 °C festgelegt. Das zeitliche Messintervall wurde bei der Messung der Bodentemperaturen von anfänglich 15 Minuten auf 30 Minuten heraufgesetzt, da die Temperaturänderung im Boden über die Zeit nur gering ausfällt.







Abbildung 5-5: Anordnung der Messpunkte im Bodenkörper im ersten (links) und zweiten (rechts) Großversuch

## 5.2 Großversuch 1

#### 5.2.1 Aufbau des Wandelements und Materialparameter

Im ersten Großversuch stand die Ermittlung des Einflusses aus der Rohranordnung im Vordergrund. Dazu wurden zwei Varianten der Rohrverlegung innerhalb der Wand getestet (siehe Abbildung 5-6).



Abbildung 5-6: Varianten der Rohranordnung

Im System 1 wird die Rohrschleife senkrecht zur Wandoberfläche angeordnet, während sie beim System 2 innerhalb der Wandebene verläuft. Jedes System wurde dabei in dreifacher Ausführung abwechselnd in die Wand integriert. Der Rohrabstand wurde dabei so groß gewählt, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Rohrsysteme zu vernachlässigen war. Die gewählte Rohranordnung im ersten Großversuch ist in Abbildung 5-7 in der Draufsicht und in Abbildung 5-8 im Schnitt dargestellt.







<sup>\*</sup> es wird entweder System 1 oder System 2 durchströmt



#### Rohranordnung Versuch 1 - Schnitt für Rohrsystem 2



Rohranordnung Versuch 1 - Schnitt für Rohrsystem 1



Abbildung 5-8: Rohranordnung im ersten Großversuch (Schnitt)





Als Absorberrohr wurde im ersten Großversuch ein Mehrschichtrohrsystem auf PE-RT Basis verwendet. Der Rohraußendurchmesser betrug 16 mm bei einer Wandstärke vom 2 mm. Die Wärmeleitfähigkeit des Rohres betrug gemäß Herstellerangaben  $\lambda_{Rohr} = 0.4$  W/(mK).

Als Wärmeträgerfluid wurde aufgrund der geringen Eintrittstemperaturen von ca. 2,5 °C ein Wasser-Glykol-Gemisch mit einer Glykol-Konzentration von 20 Vol-% verwendet, um den Systemkühler vor Korrosion und Ablagerungen zu schützen.

Der für die Wand verwendete Transportbeton besaß die Festigkeitsklasse C30/37. Die Festigkeitsprüfung nach DIN 1045-2 ergab eine Würfelfestigkeit von  $f_{ck,cube} = 49,1$  N/mm<sup>2</sup> und eine Zylinderfestigkeit von  $f_{ck} = 39,6$  N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen. Die geforderte Betongüte wurde somit deutlich überschritten.

Der Sand wurde im ersten Großversuch trocken unter Zugabe von Wasser in 25 cm mächtigen Lagen eingebaut. Die erreichte Einbaudichte betrug  $\rho_{d,Ein} = 1,752$  g/cm<sup>3</sup>, was einem Verdichtungsgrad von D<sub>pr</sub> = 101,5% bzw. einer Lagerungsdichte von D = 0,897 entspricht. Der eingebaute Boden wies somit eine sehr dichte Lagerung auf.

## 5.2.2 Versuchsprogramm

Die beiden verlegten Rohrsysteme wurden unter dem Einfluss verschiedener Systemdurchflüsse und verschiedener Grundwassergeschwindigkeiten getestet. Untersucht wurden dabei Systemdurchflüsse von 100 l/h, 140 l/h und 183 l/h pro Rohr sowie Grundwassergeschwindigkeiten von 0 m/d, 0,5 m/d und 1 m/d bezogen auf den Einstrom. In Summe ergaben sich damit 18 Parameterkombinationen, die im Rahmen von Einzelversuchen getestet wurden. Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche und ihre entsprechende Bezeichnung kann Tabelle 5-2 entnommen werden.

System 1			System 2				
Name	d <sub>a</sub> [mm]	v <sub>f</sub> [m/d]	Q [l/h]	Name	d <sub>a</sub> [mm]	v <sub>f</sub> [m/d]	Q [l/h]
S0.1_0cm_100	16	0	100	S0.2_0cm_100	16	0	100
S0.1_0cm_140	16	0	140	S0.2_0cm_140	16	0	140
S0.1_0cm_183	16	0	183	S0.2_0cm_183	16	0	183
S0.1_40cm_100	16	0,5	100	S0.2_40cm_100	16	0,5	100
S0.1_40cm_140	16	0,5	140	S0.2_40cm_140	16	0,5	140
S0.1_40cm_183	16	0,5	183	S0.2_40cm_183	16	0,5	183
S0.1_70cm_100	16	1,0	100	S0.2_70cm_100	16	1,0	100
S0.1_70cm_140	16	1,0	140	S0.2_70cm_140	16	1,0	140
S0.1_70cm_183	16	1,0	183	S0.2_70cm_183	16	1,0	183

Taballa F O.	برمطان فطمنهم معالل	مانته مارسما معرفا ما	utan Varauaha in	
Tapelle 5-7	Upersignt uper	ale aurchaeiur	inen versuche in	Großversuch
		ale dalengeral		





Bei einer großen Streuweite der Messwerte sowie bei Ausfällen in der Messtechnik wurden entsprechende Wiederholungsversuche durchgeführt. In Summe wurden im Rahmen des ersten Großversuchs 44 Einzelversuche innerhalb von 4 Monaten (März bis Juni 2010) durchgeführt. Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche mit ihren Bezeichnungen ist im Anhang C dargestellt.

## 5.2.3 Versuchsauswertung und Ergebnisübersicht

Zur Auswertung der Versuche wurden sowohl die Temperaturen im Bodenkörper als auch die Temperaturen im Absorbersystem respektive die Entzugsleistungen herangezogen.

Zu Versuchsbeginn wurde eine homogene ungestörte Bodentemperatur von ca.  $T_B = 10$  °C angestrebt. Versuchstechnisch bedingt streute die mittlere Bodentemperatur zu Versuchsbeginn bei den Versuchen im ersten Großversuch zwischen 9,1 °C und 13,3 °C, was u.a. auf äußere Einflüsse zurückzuführen ist. Zur Gewährleistung einer annähernd homogenen Temperaturverteilung zu Versuchsbeginn wurde eine Standardabweichung in den gemessenen einzelnen Bodentemperaturen von 1 °C als Maximalwert festgelegt.

Durch die Zirkulation des Fluids im Absorberkreis wird dem Boden Wärme entzogen, wodurch sich eine Abkühlung des Bodens vor allem in der Nähe der Wand bzw. dem geothermisch wirksamen Abdichtungselemente einstellt (siehe Abbildung 5-9). Im Großteil der Versuche konnte darüber hinaus auch eine Absenkung der mittleren Bodentemperatur während des Versuches verzeichnet werden. Die vorhandene Strömung im Bodenkörper konnte somit den Wärmeentzug nicht komplett kompensieren.



Abbildung 5-9: Temperaturverteilung im Bodenkörper (in 70cm Tiefe) beispielhaft für S02\_0cm\_183 Die Auswertung der Temperaturen im Absorbersystem erfolgte über die spezifische Entzugsleistung. Durch die konstanten Randbedingungen (Bodentemperatur,





Vorlauftemperatur, Versuchsdauer) bei den verschiedenen Versuchen war ein Vergleich der Systeme über die momentane bzw. maximale Entzugsleistung möglich.

Die Entzugsleistung für die Teilsysteme nach Tabelle 5-2 wurde für die entsprechenden Rahmenbedingungen nach Gleichung (2-11) ermittelt. Die Gesamtentzugsleistung des Einzelversuchs ergibt sich dann aus der Summe der drei einzelnen Entzugsleistungen. Beispielhaft sind in Abbildung 5-10 die Verläufe der Vor- und Rücklauftemperaturen für eine Rohranordnung in Wandebene bei einer Grundwasserströmung von 0,5 m/d und einem Systemdurchfluss von 183 l/h (S02\_40cm\_183) sowie die daraus resultierenden Leistungen dargestellt.



Abbildung 5-10: Vor- und Rücklauftemperaturen (oben) und Entzugsleistungen (unten) beispielhaft für System S02\_40cm\_183

Als maßgebliche Bezugsgröße für den Systemvergleich wurde die Entzugsleistung im eingeschwungenen Zustand gewählt. Bei mehreren Wiederholungsversuchen wurde diese





durch den Mittelwert aus allen vergleichbaren Versuchen (ohne die Berücksichtigung von Ausreißern) gebildet (siehe Abbildung 5-11).



Abbildung 5-11: Ermittlung der maßgebenden Entzugsleistung aus Wiederholungsversuchen

Zum Vergleich der Systeme untereinander wurde die spezifische Entzugsleistung q<sub>s</sub>, die sich durch Division der absoluten Entzugsleistung durch die entsprechende Einzugsfläche des Rohrsystems bzw. der Wandfläche bei Betrachtung der Gesamtleistung ergibt, herangezogen.

Im Rahmen des ersten Großversuchs wurden spezifische Entzugsleistungen zwischen 26 W/m<sup>2</sup> und 65 W/m<sup>2</sup> erzielt. Eine Übersicht über die Versuchsergebnisse kann Abbildung 5-12 entnommen werden. Eine detaillierte Ergebnisübersicht ist in Anhang C gegeben. Es zeigt sich, dass die spezifischen Leistungen der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente mit denen anderer thermo-aktiver Bauteile vergleichbar sind (siehe auch Tabelle 3-3). Eine genaue Betrachtung der Ergebnisse sowie eine Beurteilung der Einflussparameter wird in Kapitel 7.1 unter Einbeziehung beider Großversuche sowie der numerischen Simulationen vorgenommen.









## 5.3 Großversuch 2

## 5.3.1 Aufbau des Wandelements und Materialparameter

Mit Hilfe des zweiten Wandelements wurde der Einfluss des Absorberrohres auf den Wärmeentzug untersucht. Dazu wurde sowohl ein größerer Rohrdurchmesser ( $d_a = 25$  mm) bei sonst gleichem Material (PE-RT) sowie ein Rohrmaterial mit einer geringeren Wärmeleitfähigkeit (PE-XC) und kleinerem Rohrdurchmesser (d = 17 mm) verwendet. Um einen umfangreichen Vergleich mit den Ergebnissen aus dem ersten Großversuch zu gewährleisten, wurden die Rohre wiederum in beiden Rohranordnungen (parallel und in Wandebene) verlegt. Die schematische Rohranordnung im zweiten Großversuch ist in Abbildung 5-13 dargestellt.





Rohranordnung Versuch 2 - Draufsicht



Abbildung 5-13: Anordnung der Rohre beim zweiten Großversuch (Draufsicht)

Die Rohre mit dem Durchmesser von 25 mm waren - analog zu den verwendeten Rohren im ersten Großversuch - Mehrschichtrohre auf PE-RT-Basis mit einer Wandstärke von 2,5 mm. Sie wiesen eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{Rohr} = 0,4$  W/(mK) auf. Durch den Vergleich mit den Ergebnissen aus dem ersten Großversuch konnte somit der Einfluss des Rohrdurchmessers untersucht werden. Die Rohre mit dem geringen Durchmesser (d<sub>a</sub> = 17 mm) waren Einschichtrohre aus PE-XC und besaßen ebenfalls eine Wandstärke von 2 mm. Auf Grund der geringeren Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_{Rohr} = 0,35$  W/(mK)) gegenüber den PE-RT Rohren des ersten Großversuchs konnte somit der Einfluss getestet werden.

Als Wärmeträgerfluid wurde erneut ein Wasser-Glykol-Gemisch mit einer 20 Vol-% Konzentration verwendet.

Als Beton wurde wiederum ein Transportbeton der Festigkeitsklasse C30/37 verwendet, welcher einer Festigkeitsprüfung nach DIN 1045-2 unterzogen wurde. Der Beton wies eine Würfelfestigkeit von  $f_{ck,cube} = 48,4$  N/mm<sup>2</sup> und eine Zylinderfestigkeit von  $f_{ck} = 39,1$  N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen auf. Die geforderte Betongüte wurde somit wie im ersten Großversuch deutlich überschritten und die erreichten Festigkeitswerte entsprechen im Wesentlichen denen aus dem ersten Großversuch.

Der Sand wurde im zweiten Großversuch feucht unter der Zugabe von Wasser lagenweise eingebaut. Vorversuche haben gezeigt, dass der Feuchtegehalt des Sandes beim Einbau unter Wasser keinen nennenswerten Einfluss auf die erreichte Einbaudichte besitzt. Die Einbringmethoden des Sandes im ersten und zweiten Großversuch können somit als vergleichbar angesehen werden. Dies bestätigt auch die erreichte Einbaudichte im zweiten





Großversuch, die mit einer Dichte von  $\rho_{d,Ein} = 1,743 \text{ g/cm}^3$  nur unwesentlich von der des ersten Versuchs ( $\rho_{d,Ein} = 1,752 \text{ g/cm}^3$ ) abweicht. Der Verdichtungsgrad betrug im zweiten Großversuch  $D_{pr} = 101,5\%$ , was einer Lagerungsdichte von D = 0,871 entspricht. Der eingebaute Boden wies somit ebenfalls eine sehr dichte Lagerung auf.

#### 5.3.2 Versuchsprogramm

Auch im zweiten Großversuch wurden verschiedene Systemdurchflüsse und Grundwassergeschwindigkeiten für alle vier installierten Teilsysteme getestet. Um den Umfang des Versuchsprogramm zu reduzieren, wurden als Systemdurchflüsse nur noch der maximale und der minimale Durchfluss (Q = 183 l/h bzw. Q = 100 l/h) verwendet. Als Grundwassergeschwindigkeiten wurden analog zum ersten Großversuch Geschwindigkeiten von 0 m/d, 0,5 m/d und 1 m/d gewählt.

Im Rahmen des zweiten Großversuchs wurden somit 24 Parameterkombinationen getestet, für die ein Überblick in Tabelle 5-3 gegeben wird. Eine detaillierte Übersicht über die durchgeführten Versuche kann Anhang C entnommen werden. Zur Beurteilung der Güte der Einzelversuche wurden analog zum ersten Großversuch die ungestörte Bodentemperatur sowie die sich einstellenden Entzugsleistungen für die Einzelversuche herangezogen. So wurden Versuche mit einer Standardabweichung >1 °C in der ungestörten Bodentemperatur sowie Versuche mit Technikausfall und/oder stark streuender Messergebnisse wiederholt. Durch die Erweiterung der Messtechnik (siehe Kapitel 5.4) konnte zusätzlich die mittlere Temperatur an der Außenseite der Wand ermittelt werden. Eine entsprechende Standardabweichung <1 °C wurde daher als zusätzliches Qualitätskriterium eingeführt. In Summe wurden im Rahmen des zweiten Großversuchs 42 Einzelversuche innerhalb von 4 Monaten (September bis Dezember 2010) durchgeführt.





System 1			System 2				
Name	d [mm]	v <sub>f</sub> [m/d]	Q [l/h]	Name	d [mm]	v <sub>f</sub> [m/d]	Q [l/h]
S1.1_0cm_100	17	0,0	100	S1.2_0cm_100	17	0,0	100
S1.1_0cm_183	17	0,0	183	S1.2_0cm_183	17	0,0	183
S1.1_40cm_100	17	0,5	100	S1.2_40cm_100	17	0,5	100
S1.1_40cm_183	17	0,5	183	S1.2_40cm_183	17	0,5	183
S1.1_70cm_100	17	1,0	100	S1.2_70cm_100	17	1,0	100
S1.1_70cm_183	17	1,0	183	S1.2_70cm_183	17	1,0	183
S2.1_0cm_100	25	0,0	100	S2.2_0cm_100	25	0,0	100
S2.1_0cm_183	25	0,0	183	S2.2_0cm_183	25	0,0	183
S2.1_40cm_100	25	0,5	100	S2.2_40cm_100	25	0,5	100
S2.1_40cm_183	25	0,5	183	S2.2_40cm_183	25	0,5	183
S2.1_70cm_100	25	1,0	100	S2.2_70cm_100	25	1,0	100
S2.1_70cm_183	25	1,0	183	S2.2_70cm_183	25	1,0	183

Tabelle 5-3: Übersicht über die durchgeführten Versuche im Großversuch 2

#### 5.3.3 Ergebnisübersicht

Die Auswertung der Versuche erfolgte nach Teilsystemen getrennt analog zu dem im Kapitel 5.2.3 beschriebenen Vorgehen.

Die ungestörte Bodentemperatur zu Versuchsbeginn streute im zweiten Großversuch zwischen  $T_B = 9,7$  °C und  $T_B = 12,4$  °C. Die mittlere Wandtemperatur lag entsprechend zwischen  $T_{Wand} = 9,4$  °C und  $T_{Wand} = 12,9$  °C. Die sich einstellenden Entzugsleistungen lagen zwischen 28 W/m<sup>2</sup> und 78 W/m<sup>2</sup> und bestätigen somit die guten Ergebnisse aus dem ersten Großversuch. Eine Übersicht über die erzielten Ergebnisse für die verschiedenen Rohrtypen kann Abbildung 5-14 entnommen werden. Eine detaillierte Ergebnisdarstellung ist wiederum im Anhang C dargestellt. Die Einordnung der Ergebnisse erfolgt zusammenfassend in Kapitel 7.1.

Es zeigt sich, dass im zweiten Großversuch die Streuung der Ergebnisse innerhalb eines Teilsystems größer ausfiel, als im ersten Großversuch. Die Versuche im Rahmen des zweiten Großversuchs wurden im Herbst durchgeführt (die Versuche des ersten Großversuchs im Frühjahr), sodass der Einfluss der Umwelteinflüsse während der Versuchsdurchführung (Temperatur des Leitungs- bzw. Bodenwassers, Umgebungsluft, etc.) hier stärker ausgeprägt sein dürfte.







Abbildung 5-14: Ergebnisübersicht der Versuche im Großversuch 2

## 5.4 Versuche zur Ermittlung des Wärmeübergangwiderstand

# 5.4.1 Wärmeübergangswiderstand bei geothermisch wirksamen Abdichtungselementen

Der Wärmeübergangswiderstand bei den im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten geothermisch wirksamen Abdichtungselementen setzt sich prinzipiell aus denselben Mechanismen zusammen, wie sie auch bei Energiepfählen wirken (siehe auch Abbildung 2-6). Eine Übertragung der vorhandenen, auf der Linienquellentheorie beruhenden, Berechnungsmodelle, die z.T. bei Energiepfählen und vor allem bei Erdwärmesonden angewendet werden, ist jedoch nicht möglich. Der Wärmeentzug der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente wirkt über die Fläche und ist damit nicht rotationssymmetrisch, wodurch die Linienquellentheorie keine Gültigkeit besitzt. Zusätzlich sind der Vorlauf und der Rücklauf räumlich voneinander getrennt, was die Ermittlung des





Wärmeübergangwiderstands zusätzlich erschwert. Eine schematische Darstellung der Wärmeübertragung zwischen Erdreich und Absorberflüssigkeit bei geothermisch wirksamen Abdichtungselementen für die beiden getesteten Rohranordnungen (senkrecht und parallel zur Wandebene) ist in Abbildung 5-15 dargestellt.



Abbildung 5-15: Wärmeübergang bei geothermisch wirksamen Abdichtungselementen bei senkrechter (links) und paralleler Rohranordnung (rechts)

Um die überschlägliche Bestimmung des Wärmeübergangswiderstands aus Messwerten zu ermöglichen, wurde der komplexe Wärmeübergangs auf das in Abbildung 5-16 dargestellte Prinzip vereinfacht.



Abbildung 5-16: Vereinfachter Ansatz zur Bestimmung des Wärmeübergangswiderstand aus den Laborversuchen

Der Wärmeübergangswiderstand ergibt sich danach überschlägliche aus der mittleren Absorbertemperatur T<sub>f</sub>, den mittleren Temperaturen an der Außenseite der Wand T<sub>Wand</sub>, der Entzugsleistung P und der Absorberlänge L<sub>Abs</sub> (siehe Gleichung (5-1)).

$$R_{b} = (T_{Wand} - T_{f}) \cdot L_{Abs} / P$$
(5-1)





#### 5.4.2 Versuchsprinzip, Messtechnik und Versuchsprogramm

Zur Ermittlung der Temperaturen an der Außenseite des Abdichtungselements wurden im Rahmen des zweiten Großversuchs zusätzliche Messgeber an der Abdichtung befestigt. Die Anordnung der Messgeber kann Abbildung 5-17 entnommen werden und wurde derart gewählt, dass für alle vier Teilsysteme der Wärmeübergangswiderstand ermittelt werden konnte.

Bei den Versuchen zur Ermittlung des Wärmeübergangwiderstandes wurde jeweils nur das zu testende Teilsystem durchströmt, sodass auch der Einfluss höherer Systemdurchflüsse bis zu 550 l/h getestet werden konnte. Während der Versuche wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die maßgebenden Temperaturen an der Wand kontinuierlich alle 30 Sekunden aufgezeichnet.



Abbildung 5-17: Anordnung der Temperaturmessgeber an der Wand zur Bestimmung des Wärmeübergangswiderstands

Da der Wärmeübergangswiderstand eine Kenngröße zur Beschreibung des reinen Wärmeübergangs bei geothermischen Anlagen darstellt, wurde die Versuche alle ohne Grundwasserströmung ( $v_f = 0 \text{ m/d}$ ) durchgeführt, um eine derartige Beeinträchtigung zu vermeiden. Als Systemdurchflüsse wurden 200 l/h, 300 l/h und 550 l/h gewählt. Das durchgeführte Versuchsprogramm zur Ermittlung des Wärmeübergangwiderstands ist in Tabelle 5-4 dargestellt. Es ergaben sich hier 12 zusätzliche Parameterkombinationen für die 21 Einzelversuche durchgeführt wurden (siehe auch Anhang C). Die Messdauer konnte bei den Versuchen auf ca. 3 Stunden reduziert werden, da zu diesem Zeitpunkt bereits ein konstanter Wärmeübergangswiderstand verzeichnet werden konnte.





System 1			System 2						
Name	d [mm]	Q [l/h]	Messgeber		Name	d [mm]	Q [l/h]	Messgeber	
VW1.1_200	17	200	2/70	2/150	VW1.2_200	17	200	1/70	1/150
VW1.1_300	17	300	2/70	2/150	VW1.2_300	17	300	1/70	1/150
VW1.1_550	17	550	2/70	2/150	VW1.2_550	17	550	1/70	1/150
VW2.1_200	25	200	1a/	/110	VW2.2_200	25	200	3/70	3/150
VW2.1_300	25	300	1a/110		VW2.2_300	25	300	3/70	3/150
VW2.1_550	25	550	1a/	/110	VW2.2_550	25	550	3/70	3/150

Tabelle 5-4: Übersicht über die durchgeführten Versuche zum Wärmeübergangswiderstand im Großversuch 2

Zusätzliche Ergebnisse zum Wärmeübergangswiderstand für niedrige Systemdurchflüsse konnten im Rahmen der Wärmeentzugsversuche gewonnen werden. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Messwerte der Temperaturen an der Wand durch die manuelle Erfassung der Daten nur in einem halbstündlichen Intervall vorlagen.

#### 5.4.3 Auswertung und Ergebnisübersicht

Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Temperaturen im Absorbersystem und an der Wand konnte ein zeitlicher Verlauf des Wärmeübergangswiderstands gemäß Gleichung (5-1) ermittelt werden. In Abbildung 5-18 sind beispielhaft für das System 1.1 und einem Systemdurchfluss von 550 l/h die Temperaturverläufe sowie der resultierende der Wärmeübergangswiderstand dargestellt. Es sich. zeigt dass Wärmeübergangswiderstand sich sehr zeitig auf einen konstanten Wert einstellt, was die verkürzte Messdauer rechtfertigt.









Abbildung 5-18: Verlauf der gemessenen Temperaturen und des resultierenden Wärmeübergangswiderstands (beispielhaft für Versuch VW1.1\_550)

Mit Hilfe der Temperaturmessgeber an der Wand konnte über die Bestimmung des Wärmeübergangwiderstands hinaus auch die Änderung der Temperaturverteilung an der Wand während der Wärmeentzugsversuche aufgezeichnet werden. Beispielhaft sind die entsprechenden Verteilungen für das System 2.1 bei einer Grundwassergeschwindigkeit von 1 m/d und einem Systemdurchfluss von 183 l/h in Abbildung 5-19 dargestellt. Aus versuchstechnischen Gründen stellt sich demnach eine über die Tiefe leicht inhomogene Temperaturverteilung schon zu Versuchsbeginn ein. Eine sichtbare Abkühlung der Wand über den Versuchszeitraum ist trotzdem zu verzeichnen.



Abbildung 5-19: Temperaturverteilung über die Wandhöhe zu Versuchsbeginn (links) und zu Versuchsende (rechts) beispielhaft für S2.1\_70cm\_183

Die im Rahmen der Versuche zum Wärmeübergangswiderstand ermittelten Werte lagen in Abhängigkeit des Systemdurchflusses zwischen  $R_b = 0.03$  Km/W und  $R_b = 0.19$  Km/W. Die





zugehörigen spezifischen Entzugsleistungen streuten dabei zwischen 24,3 W/m<sup>2</sup> und 485 W/m<sup>2</sup>. Werden die Wärmeentzugsversuche, die durch niedrige Durchflüsse gekennzeichnet waren, mit einbezogen, erhöht sich der maximale Wärmeübergangswiderstand auf  $R_b = 0.3$  Km/W. Eine Ergebnisübersicht ist in Abbildung 5-20 dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang C dokumentiert.



Abbildung 5-20: Ergebnisübersicht über die ermittelten Wärmeübergangswiderstände im Großversuch 2

Werden die ermittelten Werte mit den dokumentierten Wärmeübergangswiderständen von z.B. Erdwärmesonden ( $R_b \approx 0.1 - 0.2$  Km/W) verglichen, zeigt sich auch hier die gute Leistungsfähigkeit der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente.

Durch die Tatsache, dass im Rahmen der Versuche zur Ermittlung des Wärmeübergangswiderstands nur eine Rohrleitung durchströmt wurde, konnte zusätzlich der Einfluss hoher Systemdurchflüsse auf die Entzugsleistung ermittelt werden. Eine entsprechende Beurteilung erfolgt in Kapitel 7.1.2.





## 6 Numerische Simulationen

#### 6.1 Theoretische Grundlagen

Aufbauend auf den Laborversuchen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens numerische Untersuchungen mit dem Programm SHEMAT (Simulator for Heat and Mass Transport) durchgeführt, um die Aussagekraft der Laborergebnisse zu überprüfen. Zusätzlich wurde der Einfluss weiterer Parameter auf den Wärmeertrag von geothermischen Anlagen untersucht. Das verwendete numerische Modell wurde dazu an den Ergebnissen der Laborversuche kalibriert.

#### 6.1.1 Das Finite Differenzen Programm SHEMAT

Das Finite Differenzen Programm SHEMAT ermöglicht die gekoppelte Betrachtung von Wärme- und Stofftransport unter dem Einfluss einer Grundwasserströmung. Darüber hinaus ist auch die Betrachtung von chemischen Transportvorgängen möglich [Clauser, 2003]. Die numerische Abbildung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente, die ihr bevorzugtes Einsatzgebiet unter dem Einfluss einer Grundwasserströmung haben, ist mit dem Programm somit prinzipiell möglich.

Das Modellgebiet wird bei der Methode der Finiten Differenzen durch rechtwinklige Zellen diskretisiert. Die Berechnung der Unbekannten erfolgt stets in Zellmitte (Knoten). Bei der Methode der Finiten Differenzen wird die zu lösende Differentialgleichung (hier die Wärmetransportgleichung nach Gleichung (2-1)) in Differenzenquotienten überführt, die im Falle des Wärmetransports einer Energiebilanzierung für jeden Knoten entsprechen. Die Informationen zwischen den Knoten werden durch Taylorreihenentwicklungen angenähert [Kinzelbach, 1987]. Das Prinzip der Finite-Differenzen Methode ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

Das Programmsystem SHEMAT wurde am Institut für Geophysik der RWTH Aachen entwickelt und wird stetig weiterentwickelt. Die ursprüngliche Konzeption des Programms lag in der Betrachtung von Vorgängen im Tiefengestein. In Kooperation mit dem Institut für Geophysik wurde der Programmcode durch den Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen erweitert, sodass mit der derzeit vorliegenden Version auch eine Abbildung der Prozesse in oberflächennahen Bodenschichten möglich ist [Baier, 2008].







Abbildung 6-1: Prinzip der Finite-Differenzen-Methode [nach Kinzelbach, 1987]

# 6.1.2 Einschränkungen für die Simulationen der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente

Mit dem Programm SHEMAT ist eine gekoppelte Berechnung von Wärmetransport und Strömung im Boden möglich. Eine detaillierte Abbildung der Strömungssituation im Absorbersystem ist mit der derzeitigen Programmversion jedoch noch nicht möglich. Die Strömungsberechnung erfolgt im Programm nur für laminare Strömungszustände. Eine turbulente Strömung unterliegt dagegen anderen physikalischen Gesetzmäßigkeiten (siehe Kapitel 2.2.2), die somit nicht abgebildet werden können. Auch würde die vorhandene turbulente Rohrströmung eine Systemfeinheit erfordern, die mit dem übrigen Modell nicht kompatibel ist.

Vereinfacht wird in den hier durchgeführten Berechnungen daher dem System bzw. dem geothermisch wirksamen Abdichtungselement eine konstante Leistung durch eine feste Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf aufgezwungen und die Antwort des Boden bzw. des Abdichtungselement zur Auswertung herangezogen.

Handlungsübliche Berechnungstools für geothermische Anlagen bilden eine Grundwasserströmung in der Regel nicht ab oder sind nur für rotationssymmetrische Systeme programmiert. Sie eignen sich somit nicht für die Abbildung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente, sodass der Nachteil der fehlenden Abbildung der Rohrströmung in SHEMAT als akzeptabel angesehen werden kann.





### 6.2 Grundmodelle und Kalibrierung

#### 6.2.1 Diskretisierung

Für die Abbildung der Laborversuche wurde ein 3-dimensionales numerisches Modell aufgestellt, dessen Abmessungen sich aus den Abmessungen des Versuchsstands ergeben (siehe Abbildung 6-2). Dabei wurde sowohl die Rohranordnung in Wandebene als auch senkrecht zur Wandebene betrachtet.



Abbildung 6-2: Abmessungen der 3-dimensionalen numerischen Modelle

Die Erstellung eines numerischen Modells mittels der Finiten-Differenzen Methode erfordert eine ausreichend feine räumliche und zeitliche Diskretisierung. Durch eine feine Diskretisierung wird eine Konvergenz in der Lösung und damit ein ausreichend genaues sowie stabiles Ergebnis begünstigt. Zur Optimierung von Rechenzeiten ist jedoch eine möglichst grobe Diskretisierung anzustreben.

Eine ausreichende Diskretisierung wird durch die Einhaltung von Stabilitätskriterien gewährleistet. Für die hier verwendete implizite Berechnungsmethode sind dafür das Courant- sowie das Peclet-Kriterium relevant. Das Courant-Kriterium nach Gleichung (6-1) gewährleistet, dass der betrachtete Transportprozess keine Zelle überspringt und somit die Kontinuität eingehalten wird [Kinzelbach, 1987].

$$Co = \frac{v_{f} \cdot \Delta t}{\Delta x \cdot n} < 1 \tag{6-1}$$

Die Peclet-Zahl (siehe Gleichung (6-2)) beschreibt das Verhältnis zwischen konvektiven und dispersen Geschwindigkeitsanteilen und gewährleistet somit, dass die numerische Dispersion stets kleiner als die tatsächliche vorhandene physikalische Dispersion ist. Für eine stabile Lösung sollte sie stets kleiner als zwei sein [Kinzelbach, 1987].





$$Pe = \frac{v_{f} \cdot \Delta x \cdot c_{v,w}}{\lambda} < 2$$
(6-2)

Für die Abbildung des Bodenkörpers wurde unter Berücksichtigung der Stabilitätskriterien sowie der geometrischen Randbedingungen eine Zellweite von 40 mm für alle Richtungen gewählt. Die Zeitschrittweite wurde auf  $\Delta t = 60$  s festgelegt. Für die Berechnungen mit einer Grundwassergeschwindigkeit von 1 m/d wurde die Zeitschrittweite auf  $\Delta t = 30$  s reduziert, um das Courant-Kriterium zu erfüllen. Für die Abbildung der Betonwand wurde die entsprechende Zellweite in x-Richtung leicht reduziert.

Durch die Finite-Differenzen Methode sind die abbildbaren Geometrien auf rechtwinklige Körper begrenzt. Für die Diskretisierung des Absorberrohres wurde daher eine äquivalente Rohrkantenlänge von 20 mm gewählt. Da die Mantelfläche des Rohres maßgeblich den Wärmetransport bestimmt, besitzt die durch die äquivalente Kantenlänge gebildete Absorberzelle den gleichen Umfang, wie das tatsächlich vorhandene kreisförmige Rohr. Ein Ausschnitt des räumlich diskretisierten Systems kann Abbildung 6-3 entnommen werden.





#### 6.2.2 Materialparameter

In SHEMAT können verschiedene Bodenschichten und Materialien mit ihren entsprechenden physikalischen Eigenschaften durch sogenannte "property zones" abgebildet werden. Dabei wird stets von einer vollständigen Sättigung der Schichten ausgegangen. Durch den Einbau des Sandes im Versuch unter Wasser, ist diese Annahme erfüllt.





Für die Abbildung der Laborversuche wurden 5 property zones (Sand, Abdichtung, Rohr, Beton, Wärmedämmung) definiert. Da eine detaillierte Abbildung des Rohres nicht möglich war (siehe Kapitel 6.1.2), wurde für das Material "Rohr" die Eigenschaften der Absorberflüssigkeit gewählt, da diese sie dominierende Komponente im Gesamtsystem "Rohr" darstellt.

Die Definition der maßgebenden physikalischen Eigenschaften der Materialien erfolgt in SHEMAT stets für die Mineralkomponente. Die Eigenschaften des Mehrkomponentensystems Boden werden programmintern druck- und temperaturabhängig nach den in Kapitel 2 vorgestellten Zusammenhängen berechnet. Die Festlegung der Parameter erfolgte an Hand von Laborversuchen oder aus Angaben aus der Literatur, sowie unter Einbeziehung der Laborversuche. Der gewählte Parametersatz für das Grundmodell ist in Tabelle 6-1 dargestellt.

Material	Porosität	Permeabilität	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität
	n [%]	k [m²]	λ <sub>s</sub> [W/mK]	c <sub>v,s</sub> [MJ/m³K]
Sand	0,336	1,22*10 <sup>-11</sup>	3,317	1,706
Absorberflüssigkeit	1*10 <sup>-30</sup>	1*10 <sup>-30</sup>	0,587	4,217
Abdichtungselement	1*10 <sup>-30</sup>	1*10 <sup>-30</sup>	0,400	1,710
Beton	0,1	1*10 <sup>-20</sup>	2,700	2,545
Wärmedämmung	1*10 <sup>-30</sup>	1*10 <sup>-30</sup>	0,031	0,048

Tabelle 6-1: Stoffparameter für das numerische Modell

## 6.2.3 Anfangs- und Randbedingungen

Für eine eindeutige Lösung der instationären Differentialgleichung für den Wärmetransport ist die Formulierung von Anfangs- und Randbedingungen für die Temperatur sowie die hydraulische Höhe erforderlich.

Als Anfangsbedingung wurde im Modell die Bodentemperatur im Bodenkörper vorgeben. Aus versuchstechnischen Gründen lag im Boden zu Versuchsbeginn z.T. eine inhomogene Temperaturverteilung vor (siehe Kapitel 5). Für die numerischen Berechnungen wurde vereinfacht jedoch eine homogene Bodentemperatur von 11,1 °C angesetzt, was der mittleren Temperatur aus den Versuchen entspricht. Als Anfangsbedingung für die Strömung wurde dem Gesamtsystem eine hydraulische Höhe von 2,03 m zugewiesen, was der Standrohrspiegelhöhe am Einstrom entspricht.

Bei der Definition der Randbedingungen wird zwischen regulären und irregulären Randbedingungen unterschieden. Reguläre Randbedingungen beschreiben den Zustand am Systemrand und sind sowohl für die Temperatur als auch die Strömung zwingend vorzugeben. Mit Hilfe von irregulären Randbedingungen können zusätzlich Zustände im Modellgebiet definiert werden.





Die Abbildung der Grundwasserströmung erfolgte im Modell durch die Vorgabe der Ausstrom entsprechend hydraulischen Höhe am Einund der abzubildenden Grundwasserströmung durch eine Dirichlet Randbedingung. entsprechende Der Potentialunterschied wurde über die Berechnungsdauer konstant gehalten. Die anderen Systemränder wurden durch einen adiabatischen bzw. undurchlässigen Rand als Neumann Randbedingung definiert. Für die Temperatur wird an den Systemrändern eine konstante Temperatur von 11,1 °C in Form einer Dirichlet Randbedingung vorgegeben.

Zur Abbildung der Absorberrohre werden zusätzliche irreguläre Dirichlet Randbedingungen für die Temperatur festgelegt. Da eine Abbildung des Strömungszustands im Rohr und damit eine direkte Bestimmung von Vor- und Rücklauftemperaturen nicht möglich ist, wurde dem System eine Leistung durch eine konstante Temperaturdifferenz aufgeprägt. Diese Temperaturdifferenz wurde zeitlich versetzt aufgebracht. Die Vorlaustemperatur wurde an Hand der Laborversuche auf  $T_{Ein} = 2,6$  °C und die finale Rücklauftemperatur auf  $T_{Aus} = 3,7$  °C festgelegt. Die räumliche Verteilung der Temperaturdifferenz über die Absorberlänge wurde dabei gleichmäßig vorgenommen. Der sich in Folge der Temperaturdifferenz einstellende Wärmestrom aus dem Absorberrohr in den Boden wurde dann zur Kalibrierung und zur Systembeurteilung herangezogen.

## 6.2.4 Verifizierung des numerischen Modells

Zur Verifizierung des numerischen Modells wurden die Ergebnisse des ersten Großversuchs verwendet. Die Materialparameter des numerischen Modells wurden dabei im realistischen Verhältnis modifiziert. Auf die Verwendung von wirklichkeitsfernen Parametersätzen zum Curve-Fitting wurde bewusst verzichtet, um realistische Verhältnisse mit dem Modell abbilden zu können. Da eine Abbildung der Strömungssituation im Rohr nicht erfolgen kann, werden für die Verifizierung alle durchgeführten Versuche für die jeweilige Grundwassergeschwindigkeit herangezogen. Ein Vergleich der Ergebnisse aus der Simulation und den Laborversuche für beide Rohranordnungen eine für Grundwassergeschwindigkeit von 1 m/d ist in Abbildung 6-4 gegeben.

Es zeigt sich, dass das numerische Modell die Ergebnisse der Laborversuche leicht unterschätzt, wobei dieser Effekt bei einer Rohranordnung senkrecht zur Wand ausgeprägter ist. Der prinzipielle Verlauf der Entzugsleistungen stimmt jedoch gut überein. Die Abweichung in den absoluten Werten ist auf die ungenaue Abbildung des Wärmetauschersystems zurückzuführen. Das verwendete numerische Modell ist somit geeignet, grundlegende Untersuchungen zu den maßgebenden Einflussfaktoren auf den Wärmeertrag von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen durchzuführen und eine qualitative Bewertung vorzunehmen. Für eine quantitative Anlagenauslegung wird jedoch eine gekoppelte Betrachtung (inklusive des Wärmeträgerkreislaufs) erforderlich.







Abbildung 6-4: Kalibrierungsergebnisse für eine Rohranordnung senkrecht zur Wand (links) und in Wandebene (rechts)

## 6.3 Parameterstudie

Aufbauend auf dem numerischen Grundmodell wurden die verschiedenen Einflussparameter auf den Wärmeentzug gemäß Kapitel 4.2 systematisch untersucht. Dabei wurden verstärkt die Parameter betrachtet, die im Rahmen der Laborversuche nicht betrachtet werden konnten. Um eine Überlagerung von Einflüssen zu vermeiden, wurde stets nur ein Parameter variiert, während die restlichen Rahmenbedingungen auf dem Ausgangsniveau belassen wurden.

Die Bandbreite der Parameter wurde an Hand des möglichen Anwendungsspektrums (Boden- und Standortbedingungen) von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen festgelegt. Im Einzelnen wurden innerhalb der Parameterstudie folgende Einflussfaktoren (die Zahlen in Klammern geben dabei die verwendete Bandbreite an) untersucht:





- Grundwassergeschwindigkeit am Einstrom (v<sub>f</sub> = 0 5 m/d)
- Wärmeleitfähigkeit des Bodens ( $\lambda = 0.3 5$  W/(mK))
- Wärmekapazität des Bodens (c<sub>v,w</sub> = 1,5 3,4 MJ/(m<sup>3</sup>K))
- Ungestörte Erdreichtemperatur (T<sub>B</sub> = 7 17 °C)
- Rohrdurchmesser ( $d_a = 20 41 \text{ mm}$ )
- Rohrabstand (a = 0.2 1.2 m bzw. s = 0.085 0.45 m)

Die Ergebnisse der Parameterstudie entsprechen im Wesentlichen den Ergebnissen der Laborversuche bzw. den allgemeinen physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Dabei hat jedoch nicht jeder Parameter einen maßgebenden Einfluss auf den Wärmeertrag. Darüber hinaus sind bei einer Beurteilung der Parameter neben energetischen Aspekten z.T. auch konstruktive zu beachten.

Die detaillierten Ergebnisse der Parameterstudie werden nachfolgend in Zusammenhang mit den Ergebnissen der Laborversuche betrachtet und bewertet.





## 7 Wirksamkeit geothermisch wirksamer Abdichtungselemente

#### 7.1 Einflussparameter auf den Wärmeentzug

Im Rahmen der Laborversuche und der numerischen Untersuchungen wurden die verschiedenen Einflussparameter auf den Wärmeentzug von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen untersucht. Im Folgenden werden die Parameter einzeln betrachtet und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Auslegung und Planung von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen zusammenfassend bewertet. Dabei werden sowohl die Einflüsse aus dem System als auch dem umgebenden Erdreich betrachtet.

#### 7.1.1 Grundwasserströmung

Durch das Vorhandensein einer Grundwasserströmung findet ein erhöhter konvektiver Wärmetransport hin zum Absorberbauteil statt (siehe Gleichung (2-1)), welcher den Wärmeertrag der Anlage vergrößert.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen (Laborversuche und Simulationen) konnte jedoch überraschenderweise keine nennenswerte Abhängigkeit zwischen Wärmeertrag und Grundwassergeschwindigkeit festgestellt werden (siehe Abbildung 7-1).

Erklärbar wird dies, wenn das sich in der Versuchsgrube einstellende Geschwindigkeits- und Strömungsprofil näher betrachtet wird (siehe Abbildung 5-3). Dann wird deutlich, dass sich direkt vor der Wand eine Totzone in der Strömung ausbildet. Eine Erhöhung der Einstromgeschwindigkeit bewirkt somit nicht eine gleichgroße Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit an der Wand. Die sich an der Wand einstellenden Geschwindigkeiten sind insgesamt zu gering, um einen messbaren Einfluss auf den Wärmeertrag zu bewirken.

Der Einfluss der Grundwasserströmung auf den Wärmeertrag von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen konnte somit mit der vorhandenen Konfiguration nicht bestimmt werden. Bei der Betrachtung der weiteren Einflussparameter wird daher davon ausgegangen, dass bei den hier durchgeführten Versuchen aus den vorhandenen Grundwassergeschwindigkeiten keine nennenswerte Abhängigkeit einzubeziehen ist.







Abbildung 7-1: Einfluss der Grundwassergeschwindigkeit aus Laborversuchen (oben) und aus den Simulationen (unten)

Für die quantitative Bestimmung des Einflusses einer Grundwassergeschwindigkeit auf die Entzugsleistung von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen sind vielmehr weiterführende Untersuchungen erforderlich. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass die geothermisch wirksamen Abdichtungselemente auch ohne den Einfluss einer Grundwasserströmung bereits gute Entzugsleistungen erzielen können.

## 7.1.2 Systemdurchfluss

Durch den Systemdurchfluss wird maßgebend der Wärmeübergang zwischen Fluid und Rohrwand beeinflusst (siehe auch Kapitel 2.2.2). Somit hat der Systemdurchfluss sowohl einen Einfluss auf die Wärmeentzugsleistung als auch auf den Wärmeübergangswiderstand, wobei diese sich naturgemäß gegenläufig verhalten (siehe Abbildung 7-2).







Abbildung 7-2: Einfluss des Systemdurchflusses auf den Wärmeübergangswiderstand (oben) und den Wärmeentzug (unten)

Aus Abbildung 7-2 wird ersichtlich, dass der Systemdurchfluss einen deutlichen Einfluss auf die Effizienz von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen besitzt. Vor allem für hohe Systemdurchflüsse kann eine deutliche Reduzierung des Wärmeübergangswiderstands und somit eine deutliche Leistungssteigerung in Form der bezogenen Entzugsleistung festgestellt werden.

Um einen möglichst hohen Wärmeübergangskoeffizient zu erzielen, wird für geothermische Anlagen ein Strömungszustand im Rohr jenseits der laminaren Strömung empfohlen. Der Übergang wird wiederum durch die Geschwindigkeit im Rohrsystem bestimmt, sodass hier eine differenzierte Betrachtung getrennt nach Rohrdurchmessern erforderlich wird. Für die verwendeten Rohrsysteme mit einem Durchmesser von 16 bzw. 17 mm wird der laminare Strömungsbereich bei einem Systemdurchfluss von ca. 120 l/h verlassen, während der Übergang bei dem größeren Rohrdurchmesser von 25 mm erst bei 200 l/h stattfindet.





Darüber hinaus wirkt sich eine Vergrößerung des Systemdurchflusses bei einem kleineren Rohrdurchmesser aufgrund der in Relation großen Geschwindigkeitsänderung deutlicher auf den Wärmeübergang aus (siehe Abbildung 7-3).



Abbildung 7-3: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit des Systemdurchflusses und des Rohrdurchmessers

Dies bestätigt sich auch in den gemessenen Entzugsleistungen, wenn diese nach Rohrdurchmesser getrennt aufgetragen werden (siehe Abbildung 7-4).

Für den kleineren Rohrdurchmesser wirkt sich sowohl das Verlassen des laminaren Strömungsbereichs als auch die Steigerung des Systemdurchflusses deutlicher auf den Wärmeertrag aus. Dies bedeutet jedoch auch, dass natürliche Schwankungen im Systemdurchfluss während des Anlagenbetriebs bei einem größeren Rohrdurchmesser weniger Einfluss auf die Entzugsleistung besitzen, wodurch sich die Verwendung eines größeren Rohrdurchmessers empfiehlt. Darüber hinaus sollte aber stets ein Strömungszustand außerhalb des laminaren Bereichs angestrebt werden.



Geotechnik im Bauwesen Geotechnical Engineering Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler





Abbildung 7-4: Einfluss des Systemdurchflusses auf den Wärmeertrag bei kleinem (oben) bzw. großem Durchmesser (unten)

## 7.1.3 Rohranordnung

Im Rahmen der Laborversuche und der numerischen Untersuchungen wurden zwei verschiedene Varianten der Rohranordnung getestet. Das erste System war durch eine Rohranordnung senkrecht zur Wandebene und das zweite System durch eine Anordnung parallel zur Wandebene gekennzeichnet (siehe auch Abbildung 4-1). Eine Rohranordnung in Wandebene bietet konstruktive Vorteile, da die Montage der Absorberleitungen leichter ist und die verlegten Leitungen eine größere Lagesicherheit besitzen. Darüber hinaus ist dieses System durch eine größere Kontaktfläche zum Erdreich und damit einer größeren Wärmeübertragungsfläche gekennzeichnet. Durch die Tatsache, dass sowohl der Vor- als




auch der Rücklauf durch das Erdreich beeinflusst werden, erhöhen sich bei einer parallelen Rohranordnung im Vergleich zur senkrechten Rohranordnung jedoch auch die Möglichkeiten eines thermischen Kurzschlusses.

Betrachtet man die Ergebnisse der beiden Großversuche ergeben sich leicht widersprüchliche Ergebnisse (siehe Abbildung 7-5 und Abbildung 7-6). Während im ersten Großversuch die senkrechte Rohranordnung (gekennzeichnet durch die ausgefüllten Markierungen) die leicht höheren Wärmeentzugsleistungen liefert, wurden im zweiten Großversuch für die parallele Rohranordnung (unausgefüllte Markierungen) die besseren Leistungswerte ermittelt. In beiden Großversuchen liegen die ermittelten Entzugsleistungen für beide Systeme jedoch in einer ähnlichen Größenordnung.



Abbildung 7-5: Einfluss der Rohranordnung auf die Entzugsleistung im ersten Großversuch

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen bestätigen den Trend aus dem zweiten Großversuch, dass eine parallele Rohranordnung leicht erhöhte Entzugsleistungen bewirkt (siehe Abbildung 7-7). Der Leistungsunterschied zwischen den Systemen ist zudem ausgeprägter, als in den Laborversuchen. Dies kann u.a. auf die fehlende Abbildung der Systemströmung (siehe Kapitel 6.1.2) in den numerischen Simulationen zurückgeführt werden.











Abbildung 7-7: Einfluss der Rohranordnung auf die Entzugsleistung aus in den Simulationen





Zusammenfassend zeigt sich somit, dass eine Rohranordnung parallel zur Wandebene aufgrund der großen Wärmeübertragungsfläche als effizienter angesehen werden kann. Ein thermischer Kurzschluss tritt somit nicht auf. Zusätzlich bietet diese Rohranordnung konstruktive Vorteile, sodass eine Anordnung senkrecht zur Wandebene als weniger empfehlenswert angesehen wird.

Bei der Betrachtung der weiteren System- und Bodenparameter wird daher im Folgenden der Einfluss der Parameter auf den Wärmeentzug bei einer Anordnung in Wandebene betrachtet, da dieser als maßgebender Fall für die praktische Anwendung angesehen werden kann. Eine Übersicht über die entsprechenden Zusammenhänge für eine Anordnung der Rohre senkrecht zur Wand kann dem Anhang C entnommen werden.

## 7.1.4 Rohrdurchmesser

Der Einfluss des Rohrdurchmessers auf den Wärmeentzug wurde sowohl in den Laborversuchen als auch in den numerischen Simulationen untersucht. Eine Vergrößerung des Rohrdurchmessers bedeutet auch eine Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche und wirkt sich damit positiv auf den Wärmeentzug aus. Für die Konzeption von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen wird der optimale Rohrdurchmesser jedoch auch durch konstruktive Faktoren beeinflusst.

Bei den verwendeten Carbofix®-Platten lag der maximal verwendbare Durchmesser bei 25 mm, um noch einen sicheren Verbund zwischen Absorberrohr und Betonschutzplatte zu erzielen. Werden die Entzugsleistungen aus den Laborversuchen der verschiedenen Mehrschichtrohre aus PE-RT verglichen, wird deutlich, dass unabhängig von der Größe des Systemdurchflusses, die Entzugsleistung bei größerem Rohrdurchmesser größer ist (siehe Abbildung 7-8), wobei der Einfluss mit steigendem Durchfluss anzusteigen scheint.



Abbildung 7-8: Einfluss des Rohrdurchmessers auf den Wärmeentzug bei einem Systemdurchfluss von 183 l/h (links) und 100 l/h (rechts)





Zur genaueren Ermittlung der Abhängigkeit des Wärmeertrags von dem Rohrdurchmesser wurden ergänzende numerische Berechnungen mit einem Durchmesser von maximal 40 mm durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 7-9 dargestellt.



Abbildung 7-9: Einfluss des Rohrdurchmessers auf den Wärmeentzug aus den Simulationen

Es bestätigt sich die Tendenz, dass sich der Wärmeertrag von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen mit steigendem Rohrdurchmesser aufgrund der größeren Wärmeübertragungsfläche vergrößert, sodass bei der Konzeption der Elemente ein möglichst großer Durchmesser gewählt werden sollte. Ein großer Rohrdurchmesser gleicht darüber hinaus Schwankungen im Systemdurchfluss besser aus (siehe Kapitel 7.1.2).

Der maximale Rohrdurchmesser ergibt sich zum einem aus konstruktiven Anforderungen. So ist ein fester Verbund zwischen Absorberrohr und Abdichtungselement zu gewährleisten. Zum Anderen ist bei einem sehr großen Durchmesser ein hoher Systemdurchfluss bzw. eine ausreichend hohe Strömungsgeschwindigkeit zum Überwinden des laminaren Strömungsbereichs erforderlich. Dies erhöht jedoch den Fremdenergieeinsatz durch die Umwälzpumpe. Für die hier verwendeten Carbofix®-Platten erweist sich somit ein Rohrdurchmesser von 25 mm als empfehlenswert.

## 7.1.5 Rohrmaterial

Durch das Rohrmaterial und im Wesentlichen durch dessen Wärmeleitfähigkeit wird die Wärmeleitung in der Rohrwand beeinflusst. Durch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials verbessert sich der Wärmeübergang, was zu einem gesteigerten Wärmeertrag führt. In der Praxis werden in der Regel Absorberrohre auf PE-Basis verwendet, wodurch die Spannweite der realistisch möglichen Wärmeleitfähigkeiten als gering angesehen werden kann. Der Einfluss des Rohrmaterials wurde ausschließlich in den Laborversuchen untersucht. Eine Abbildung des Einflusses in den Simulationen war aufgrund des dafür erforderlichen Detailierungsgrad in der Diskretisierung nicht möglich.

Die vorhandene Produktpalette der Firma Uponor ermöglichte nicht die Verwendung von zwei verschiedenen Rohrmaterialien bei absolut gleichem Durchmesser. Daher wurden zwei





Rohrsysteme mit ähnlichem Durchmesser verwendet. Im ersten Großversuch wurden Mehrschichtrohre auf PE-RT Basis mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0.4$  W/(mK) verwendet. Im zweiten Großversuch wurde ein Einschichtrohr aus PE-XC mit einem Durchmesser von 17 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0.35$  W/(mK) in die Wand integriert. Beide Rohre wiesen eine Wandstärke von 2 mm auf.



Abbildung 7-10: Einfluss des Rohrmaterials auf den Wärmeentzug aus Laborversuchen

Ein Vergleich der Entzugsleistungen für die beiden Rohrsysteme für einen Systemdurchfluss von 183 l/h bzw. 100 l/h ist in Abbildung 7-10 dargestellt. Es zeigt sich für beide Systemdurchflüsse, dass das Einschichtrohr (PE-XC) mit der geringeren Wärmeleitfähigkeit trotzdem die höheren Entzugsleistungen liefert. Dies kann auf den leicht größeren Rohrdurchmesser des PE-XC- Rohres im Vergleich zum PE-RT zurückgeführt werden. Wie in Kapitel 7.1.4 gezeigt, steigt der Wärmeertrag mit steigendem Rohrdurchmesser und damit steigender Wärmeübertragungsfläche.

Es lässt sich somit feststellen, dass für geothermisch wirksame Abdichtungselemente der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials als gering angesehen werden kann, solange das für Absorberrohre übliche Materialspektrum betrachtet wird. Vielmehr überwiegt bei der Verwendung verschiedener Rohsysteme der Einfluss des Rohrdurchmessers.

## 7.1.6 Rohrabstand

Mit der Variation des Rohrabstands wird die gegenseitige Beeinflussung der Rohre untereinander untersucht. Im Rahmen der Laborversuche wurde der Rohrabstand der jeweiligen Systeme so groß gewählt, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Rohre ausgeschlossen werden konnte und somit eine unabhängige Auswertung der Teilsysteme erfolgen konnte. Die Betrachtung des Einflusses des Rohrabstands erfolgte daher ausschließlich in den numerischen Untersuchungen.

Bei der Rohranordnung parallel zur Wandebene wurde im Rahmen der Parameterstudie sowohl der Rohrabstand a als auch der Schenkelabstand s unabhängig voneinander variiert





(siehe Abbildung 7-11). Eine Verkleinerung des Rohrabstands bedeutet dabei auch eine Erhöhung der maximal in die Wand integrierbaren Rohrsysteme n<sub>Rohr</sub>.



Abbildung 7-11: Rohrabstand und Schenkelabstand für eine parallele Rohranordnung

In der Parameterstudie wurden Rohrabstände zwischen a = 0,25 m und a = 0,75 m und Schenkelabstände zwischen s = 0,15 m und s = 0,45 m untersucht. Die Anzahl der in der Wand vorhandenen Rohrsysteme lag darauf aufbauend zwischen  $n_{Rohr} = 3$  und  $n_{Rohr} = 5$ . Bei der Auswertung wird zwischen dem Wärmeentzug im Einzelrohr und der erzielbaren Entzugsleistung für das gesamte Wandelement unterschieden.



Abbildung 7-12: Einfluss von Rohrabstand (links) und Schenkelabstand (rechts) auf das Einzelrohr

Wird die Entzugsleistung des Einzelrohres betrachtet, wird deutlich, dass die Entzugsleistung sowohl mit steigendem Rohrabstand als auch mit steigendem Schenkelabstand steigt (siehe Abbildung 7-12), wobei der Einfluss des Schenkelabstands ausgeprägter ist. Während mit dem Rohrabstand vor allem die gegenseitige Beeinflussung der Rohrsysteme ("Wärmeklau") bestimmt wird, wird durch den Schenkelabstand der Einfluss des thermischen Kurzschlusses beschrieben. Bei kleinem Schenkelabstand ist die gegenseitige Beeinflussung von Vor- und Rücklauf ausgeprägter, sodass die Entzugsleistung sinkt.







Abbildung 7-13: Einfluss von Rohrabstand (links) und Schenkelabstand (rechts) auf das Gesamtsystem

Wird die Gesamtleistung des Abdichtungselements betrachtet, zeigt sich, dass die Gesamtleistung mit steigendem Rohrabstand fällt (siehe Abbildung 7-13, links). Dies bedeutet, dass die gegenseitige Beeinflussung der Rohrsysteme in Relation geringer ist, als der zusätzliche Wärmeertrag aus einem zusätzlichen Rohrsystem. Da der Einfluss des Schenkelabstands auf den Wärmeertrag des Einzelrohres ausgeprägter ist, lässt sich bei der Betrachtung des Gesamtsystems (siehe Abbildung 7-13, rechts) ein optimaler Schenkelabstand definieren. Bei ausreichend großem Schenkelabstand kann der Einfluss aus dem thermischen Kurzschluss vernachlässigt werden. Der zusätzliche Wärmegewinn im Einzelrohr bei einer weiteren Vergrößerung des Schenkelabstands fällt im Vergleich zum Wärmegewinn aus einem weiteren Rohrsystem zu gering aus, sodass die Gesamtleistung sinkt.

Für eine effiziente Auslegung von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen sollte somit die Anordnung von möglichst vielen Rohrsystemen innerhalb der Wand angestrebt werden, da somit eine große Wärmeübertragungsfläche geschaffen wird, die die höchste Entzugsleistung liefert. Dies entspricht auch den Ergebnissen der Literaturrecherche, die eine erhöhte Leistung bei einer großen Absorberlänge ergab (siehe Kapitel 3). Darüber hinaus ist der zu wählende Schenkelabstand an die gegebenen Verhältnisse anzupassen. Die optimale Größe des Schenkelabstands ist somit für den Einzelfall mit Hilfe von Vergleichsrechnungen festzulegen

#### 7.1.7 Thermische Eigenschaften des Bodens

Die maßgebenden thermischen Eigenschaften zur Beschreibung des Wärmetransports im Boden sind die Wärmeleitfähigkeit des Bodens sowie dessen Wärmekapazität (siehe auch Gleichung (2-1)). Im Rahmen der Laborversuche wurde ausschließlich Sand verwendet, sodass der Einfluss der Bodeneigenschaften im Rahmen der numerischen Berechnungen untersucht wurde.





Der zu untersuchende Wertebereich für die thermischen Eigenschaften wurde in Anlehnung an Tabelle 2-1 sowie VDI 4640 (2001) festgelegt. So wurden Wärmeleitfähigkeiten zwischen  $\lambda = 0.3$  W/(mK) und  $\lambda = 5.0$  W/(mK) und Wärmekapazitäten zwischen c<sub>v</sub> = 1.5 MJ/(m<sup>3</sup>K) und c<sub>v</sub> = 3.4 MJ/(m<sup>3</sup>K) festgelegt.

Die Ergebnisse der Parametervariation für die Wärmeleitfähigkeit sind in Abbildung 7-14 dargestellt.



Abbildung 7-14: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens auf die Entzugsleistung

Eine höhere Wärmeleitfähigkeit des Bodens führt auch zu einer höheren Wärmeentzugsleistung, da der Wärmetransport im Boden verbessert wird und somit ein größeres Bodenvolumen aktiviert wird. Wie aus Abbildung 7-14 deutlich wird, ist dieser Zusammenhang jedoch nicht linear, sodass ab einer Wärmeleitfähigkeit von ca.  $\lambda = 2,5$  W/(mK) keine signifikante Steigerung der Entzugsleistung mehr vorhanden ist. Das System befindet sich damit im Gleichgewicht zwischen entzogener und nachgelieferter Energie.

Auch eine Erhöhung der Wärmekapazität führt zu einer erhöhten Entzugsleistung (siehe Abbildung 7-15), wobei der Einfluss im Vergleich zum Einfluss der Wärmekapazität eher gering ausfällt.



Abbildung 7-15: Einfluss der Wärmekapazität des Bodens auf die Entzugsleistung





Die Wärmekapazität ist ein Maß für die Speicherfähigkeit eines Bodens und gibt an wieviel Energie dem Bodenkörper zugeführt werden muss, um eine Temperaturänderung von 1 K zu erzeugen. Da im Rahmen der Simulationen die Absorberrohre über Temperaturrandbedingungen abgebildet wurden und der Temperaturunterschied somit konstant war, vergrößert eine große Wärmekapazität die Entzugsleistung.

Da in dem hier betrachtetem System der Einfluss der Grundwasserströmung vernachlässigbar ist (siehe Kapitel 7.1.1), stellt die Wärmeleitung den maßgebenden Wärmetransportprozess dar. Somit ist auch der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens hier maßgebend, was ein Vergleich der Abbildung 7-14 und Abbildung 7-15 bestätigt. Im Falle einer merklichen Beaufschlagung des geothermisch wirksamen Abdichtungselements mit einer Grundwasserströmung, wird der Einfluss der Wärmekapazität jedoch zunehmen.

## 7.1.8 Bodentemperatur

Durch eine erhöhte Bodentemperatur steigt das Energiepotential des Bodens, da die nutzbare Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Absorber steigt. Die vorhandene Bodentemperatur stellt somit eine wesentliche Einflussgröße auf die Effizienz von geothermischen Anlagen dar.

Im Rahmen der Laborversuche streute die ungestörte Bodentemperatur zu Beginn aus versuchstechnischen Gründen zwischen ca. 9 °C und 13 °C. Eine systematische Untersuchung des Einflusses der Bodentemperatur erfolgte jedoch nur mit den durchgeführten numerischen Simulationen.

In Abbildung 7-16 (links) sind die spezifischen Entzugsleistungen aus den Laborversuchen in Abhängigkeit der mittleren Ausgangstemperatur im Bodenkörper dargestellt. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass mit steigender Bodentemperatur auch höhere Entzugsleistungen erzielt werden. Die minimal und maximal gemessenen Temperaturen stellen jedoch eine Ausnahme dar. Auf eine Einbeziehung dieses Aspekts bei der Interpretation der Laborergebnisse wurde daher verzichtet.

Im Rahmen der numerischen Berechnungen wurde die Bodentemperatur zwischen 7 °C und 17 °C variiert, was der möglichen Streuweite von ungestörten Erdreichtemperaturen in Deutschland entspricht. In Abbildung 7-16 (rechts) sind die simulierten spezifischen Entzugsleistungen dargestellt. Es bestätigt sich der große Einfluss der Bodentemperatur auf die Entzugsleistungen, welcher als linear angesehen werden kann. Eine Steigerung der Bodentemperatur um 1 K bedeutet bereits eine um 5 W/m<sup>2</sup> größere Entzugsleistung. Der Einfluss der thermischen Eigenschaften des Bodens fällt dagegen weitaus geringer aus größeren (siehe Abbildung 7-14 bzw. Abbildung 7-15). Aufgrund der Wärmeübertragungsfläche des Systems mit einer Rohranordnung in Wandebene ist der Einfluss hier leicht ausgeprägter als bei einer Anordnung senkrecht zur Wand.







Abbildung 7-16: Einfluss der Bodentemperatur auf den Wärmeentzug aus den Laborversuchen (oben) und den numerischen Simulationen (unten)

Die systematische Variation der Bodentemperatur verdeutlicht den großen Einfluss der ungestörten Bodentemperatur. Für eine effiziente Anlagenauslegung von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen ist daher eine möglichst genaue Kenntnis dieser Größe erforderlich. Vor allem in bebauten Gebieten wird die ungestörte Bodentemperatur oft unterschätzt, sodass eine Überdimensionierung der Anlagen stattfindet [Grimm, 2011].





## 7.2 Empfehlungen für die Auslegung und den Betrieb

Für eine effiziente Planung und Auslegung von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen ist die optimale Nutzung der System- und Standorteigenschaften erforderlich. Während die Standorteigenschaften nicht beeinflussbar sind, können die Systemeigenschaften den Gegebenheiten angepasst werden.

Bei der Betrachtung der Standortbedingungen hat sich gezeigt, dass im Verhältnis zu den thermischen Bodeneigenschaften vor allem die ungestörte Erdreichtemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Entzugsleistung besitzt. Das Einsatzgebiet von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen liegt bei Untergeschoßkonstruktionen mit großen erdberührenden Bauteilen und somit in bebauten Gebieten, sodass von einer relativen hohen Bodentemperatur ausgegangen werden kann, was die Effizienz der Elemente begünstigt.

Für eine effiziente Anlagenauslegung sollte die Bodentemperatur möglichst genau bestimmt werden. Bei Erdwärmesonden besteht die Möglichkeit während Probebohrungen, die in das spätere Sondenfeld integriert werden können, Temperaturprofile mit Temperatur-Log-Tests aufzuzeichnen. Praxisbeispiele haben gezeigt, dass die Bodentemperatur in vielen Fällen unterschätzt wird [Grimm, 2011]. Bei den hier betrachteten geothermisch wirksamen Abdichtungselementen würde die Durchführung eines Temperatur-Log-Tests zusätzliche Bohrkosten bedeuten. Eine Abschätzung der ungestörten Bodentemperatur über Klimadaten und Berechnungsmodelle (siehe Kapitel 2.1.3) erhöht jedoch die Planungssicherheit.

Ist keine Grundwasserströmung vorhanden, dominiert die Wärmeleitung im Boden den Wärmetransport. Ist jedoch strömendes Grundwasser vorhanden, dominiert der konvektive Wärmetransport und die Wärmekapazität des Bodens gewinnt an Bedeutung. Durch die genaue Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Bodens ist somit stets eine weitere Effizienzsteigerung der Anlagen zu erzielen.

Der Einfluss der Grundwasserströmung ist durch die hier durchgeführten Untersuchungen nicht eindeutig quantifizierbar. In diesem Bereich besteht somit weiterer Forschungsbedarf. Das Vorhandensein einer Grundwasserströmung erhöht den Wärmetransport bekanntermaßen. Auswirkungen auf die Entzugsleistung sind dabei jedoch voraussichtlich nur zu verzeichnen, wenn auch an der Wand selbst eine hohe Strömungsgeschwindigkeit vorherrscht. Eine Anlagenauslegung ohne die richtige Berücksichtigung einer möglichen Grundwasserströmung kann somit zu einer Fehldimensionierung der Anlage führen. Da das Einsatzgebiet der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente im Grundwasser liegt, sollte das natürliche Potential einer Grundwasserströmung nicht unberücksichtigt bleiben und durch weitere Untersuchungen weiter quantifiziert werden.

Bei den Systemparametern stellt der Durchfluss im Absorbersystem den maßgebenden Einflussfaktor auf die Entzugsleistung von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen





dar. Eine strömungsgünstige Auslegung des Systems, d.h. eine Rohrströmung außerhalb des laminaren Strömungsbereichs, ist daher zwingend erforderlich. Eine Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeit darüber hinaus erhöht zwar den Wärmeübergangskoeffizienten, bedeutet aber auch einen erhöhten Energiebedarf für die Umwälzpumpe. Je nach Rohrkonfiguration ist somit der optimale Betriebszustand im Einzelfall zu bestimmen.

Rahmen des Forschungsvorhabens stand die Ermittlung Im der optimalen Systemkonfiguration für die geothermisch wirksamen Abdichtungselemente im Vordergrund. Die Laborversuche sowie die numerischen Berechnungen haben gezeigt, dass eine große Wärmeübertragungsfläche (d.h. großer Durchmesser bei paralleler Rohranordnung) und eine große Anzahl von Absorberrohren in der Wand günstig für den Wärmeertrag sind. Der Einfluss des Rohrmaterials ist im Rahmen der üblicherweise als Absorber verwendeten Rohrsysteme dagegen vernachlässigbar. Für weitere Untersuchungen sollte daher das Rohrsystem 2.2 ( $d_a = 25 \text{ mm}$ , Rohranordnung in Wandebene) verwendet werden. Dieses System war im Mittel durch die höchste spezifische Entzugsleistung sowie den geringsten Wärmeübergangswiderstand gekennzeichnet. Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, Rohrlänge, dass durch eine erhöhte was ebenfalls eine Verarößeruna der Wärmeübertragungsfläche bedeutet, die Entzugsleistung steigt. Eine schleifenförmige Rohranordnung in der Wand könnte somit die Effizienz der Anlage steigern. Dies ist jedoch durch weiterführende Untersuchungen zu überprüfen. Durch eine große Rohrlänge vergrößern sich jedoch auch die Druckverluste im Leitungssystem und der Einfluss aus thermischem Kurzschluss steigt. Die optimale Rohranordnung in der Wand ist daher im Einzelfall für die jeweilige Wandgeometrie und die vorhandenen Standortbedingungen zu ermitteln.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelten Entzugsleistungen wurden für definierte Rahmenbedingungen (Dauer, Temperaturdifferenz, etc.) ermittelt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und damit eine Gewichtung der Einflussparameter zu ermöglichen. Der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens liegt somit in der Betrachtung des Primärkreislaufes. Bei einer Anlagenauslegung in der Praxis ist jedoch der Sekundärkreislauf, d.h. die nachfolgende Wärmepumpe sowie das Heizsystem, zu beachten. Es muss somit eine ganzheitliche Anlagenauslegung erfolgen, um eine möglichst hohe Jahresarbeitszahl der Anlage zu erzielen. Werden die geothermisch wirksamen Abdichtungselemente für den reinen Heizbetrieb genutzt, ist darüber hinaus eine ausreichende Regenerationszeit des Untergrunds zu gewährleisten.

Neben der Untergrundtemperatur bestimmt auch die Temperatur im Absorberkreislauf die spezifische Entzugsleistung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Boden, desto größer der Wärmeübergang. Für viele geothermische Anlagen wird zusätzlich ein frostfreier Betrieb gefordert. Bei Energiepfählen ist eine negative statische Beanspruchung des Bauteils auszuschließen.





Beim Einsatz in Wasserschutzgebieten ist der Einsatz von Glykol, was eine Abkühlung der Absorberflüssigkeit unter 0 °C ermöglicht, wasserrechtlich verboten, sodass auch hier die minimale Temperatur begrenzt ist. Durch die gute chemische Beständigkeit der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente kann ein Austreten von Glykol in den Untergrund ausgeschlossen werden. Zusätzlich wird das geothermische Abdichtungselement in der Regel keine statische Funktion übernehmen, sodass eine Absorbertemperatur unterhalb von 0 °C realisierbar ist. Jedoch werden nicht nur an die minimale Vorlauftemperatur energetische Anforderungen gestellt. Um eine aute Leistungszahl der angrenzenden Wärmepumpe zu erreichen, sollte die erzielte Rücklauftemperatur zusätzlich möglichst hoch sein. Eine hohe Rücklauftemperatur bedeutet eine geringe Temperaturdifferenz zum Heizkreislauf, die durch die Wärmepumpe ausgeglichen werden muss. Eine Auslegung der Temperatur im Absorberkreislauf muss daher stets durch eine gekoppelte Betrachtung von Primär- und Sekundärkreislauf erfolgen.

Für eine effiziente Auslegung von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen ist die genaue Beschreibung der Wärmeübertragungsprozesse erforderlich, um den für den Einzelfall zu erwartenden Wärmeübergangswiderstand und damit die erreichbare Entzugsleistung zu bestimmen. Hierfür ist die Entwicklung von neuen Berechnungsmodellen erforderlich, da herkömmliche Modelle den Wärmeübergang bei flächigen, nicht rotationssymmetrischen Bauteilen nicht abbilden können.

## 7.3 Einsatzmöglichkeiten von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen

Betonschutzplatten aus PE-HD, wie sie in dem Forschungsvorhaben verwendet wurden, bieten viele Einsatzmöglichkeiten. Im Wesentlichen werden sie aufgrund ihrer hohen Chemikalienbeständigkeit im Deponiebau oder zum Korrosionsschutz eingesetzt. Zum Schutz des Betonkörpers vor chemischen Angriff und zum Schutz des Grundwassers vor Kontamination werden Betonschutzplatten bei der Auskleidung von Abwasserleitungen, Rohrsystemen, Schachtbauwerken oder Silos eingesetzt [Olischläger & Ledel, 2003]. Darüber hinaus werden Entgasungs- oder Sickerwasserbauwerke auf Deponien durch Betonschutzplatten vor einem Chemikalienangriff aus dem abgelagerten Abfall geschützt [Stegner, 2009].

Betonschutzplatten sind durch die extrudierte Noppenstruktur durch eine hohe Beständigkeit und Festigkeit gekennzeichnet. Die daraus entwickelten geothermisch wirksamen Abdichtungselemente können somit in allen Bereichen eingesetzt werden, in denen eine Abdichtung des Bauwerks gegen Grundwasser erforderlich ist. Ist mit keinem chemischen Angriff zurechnen werden in der Regel einfache Abdichtungssystem (schwarze oder weiße Wanne) verwendet. Die Mehrkosten durch die Verwendung der Betonschutzplatten und die





zusätzlichen Absorberrohre amortisieren sich jedoch aufgrund des guten Energiepotentials der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente innerhalb weniger Jahre.

Das bevorzugte Anwendungsgebiet der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente liegt bei Bauwerken, die durch große erdberührende Flächen im Grundwasser gekennzeichnet sind. Hierbei ist der Einsatz bei Kellerwänden oder Tiefgaragen denkbar. Zum Schutz vor Beeinflussungen Innenräumen sollte dabei thermischen aus den stets eine Zwischenisolierung eingeplant werden. Darüber hinaus ist auch der Einsatz im Tunnel- oder Leitungsbau möglich. Hier sind naturgemäß große Wärmeübertragungsflächen vorhanden, die geothermisch genutzt werden können. Auf Grund der Flexibilität des Systems und der guten Schweißbarkeit können geometrische Zwänge ausgeschlossen werden. Bei der Anwendung im Leitungsbau, wo verstärkt mit einem chemischen Angriff zu rechnen ist, sind die Zusatzkosten durch die Integration der Absorberleitungen als gering anzusehen. Im Tunnelbau eignen sich vor allem tiefe Baugrubenwände, wie sie z.B. bei Haltestellen vorkommen, zur geothermischen Aktivierung.

Zur Abschätzung des Einsatzpotentials von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen werden die Gesamtinvestitionen im deutschen Baugewerbe im Jahr 2009 herangezogen. Eine Quantifizierung von geeigneten Baumaßnahmen erfolgt dabei über die Umsatzstruktur (siehe Abbildung 7-17).



Abbildung 7-17: Baugewerblicher Umsatz in Deutschland sowie Anwendungspotential von thermoaktiven Abdichtungselementen (nach HDB, 2011)





Als geeignete Bauprojekte werden dabei Baumaßnahmen angesehen, die eine ausreichend große erdberührende Fläche aufweisen und im Grundwasser liegen. Ihr Anteil an den Projekten wird hier auf 5 % geschätzt. Vor allem die jeweiligen Untersparten in den Bausparten Wirtschaftshoch- und tiefbau sowie öffentlicher Bau sind für die Verwendung von thermo-aktiven Abdichtungselementen von Bedeutung. Somit kommen ca. 2 % aller Baumaßnahmen als Einsatzgebiet für geothermisch wirksame Abdichtungselemente in Betracht, was einem Investitionsvolumen von ca. 5 Mrd. Euro (bei einem Gesamtinvestitionsvolumen in Deutschland von 240 Mrd. Euro in 2009) entspricht.

Konstruktiv können die geothermisch wirksamen Abdichtungselemente an die Schalung des Betonbauteils befestigt werden. Durch den guten Schutz und die hohe Lagesicherheit der Absorberleitungen durch die Noppenstruktur der Dichtungsplatte ist eine Beeinträchtigung der Leitungen beim Betonieren begrenzt. Ein zusätzlicher Schutz kann erreicht werden, wenn die Leitungen während des Betonierens unter Druck gesetzt werden. Durch die Befestigung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente an die Schalung, ist der Einsatz auf Bauweisen mit einer temporären Grundwasserabsenkung während des Baus beschränkt. Bei Bauweisen, die ohne Grundwasserabsenkung erfolgen (z.B. Schlitzwände, Unterwasserbetonsohlen, etc.) müssten alternative Installationstechniken entwickelt werden. In vielen Hochbauprojekten stellt die Grundwasserabsenkung jedoch die kostengünstigste Bauweise dar, sodass ein großes Anwendungsgebiet für geothermisch wirksame Abdichtungselemente vorhanden ist.

Die hier durchgeführten Untersuchungen wurden für den Heizfall, d.h. Wärmeentzug aus dem Untergrund, durchgeführt. Prinzipiell ist auch der Einsatz der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente für Kühlzwecke und damit ein kombinierter Heiz-/Kühlbetrieb möglich. Im Sommer wird dabei die überschüssige Wärme aus dem Gebäude im Untergrund gespeichert. In den Heizmonaten wird diese Energie wieder dem Untergrund entzogen. Ein kombinierter Heiz- und Kühlbetrieb erhöht in der Regel die Effizienz von geothermischen Anlagen, da dadurch eine nahezu vollständige Regeneration des Untergrunds gewährleistet werden kann. Im Falle der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente ist jedoch eine mögliche Grundwasserströmung zu berücksichtigen, die die in den Sommermonaten eingespeiste Energie wegtransportieren würde. Das Einsatzgebiet der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente kühlzwecke begrenzt sein.





## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Wirksamkeit von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen unter verschiedenen Rahmenbedingungen im Labor und durch numerische Berechnungen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine Erdwärmenutzung mittels geothermisch wirksamer Abdichtungselemente möglich ist. Die ermittelten spezifischen Entzugsleistungen lagen je nach Randbedingungen zwischen 25 W/m<sup>2</sup> und bis zu 400 W/m<sup>2</sup>. Der überschläglich ermittelte Wärmeübergangswiderstand lag dabei zwischen 0,03 Km/W und 0,3 Km/W. Die Ergebnisse sind somit durchaus mit dokumentierten Daten von erdberührenden Bauteilen vergleichbar und können als erfolgversprechend eingestuft werden.

Als maßgebende Einflussparameter auf den Wärmeertrag wurden die ungestörte Bodentemperatur, der Systemdurchfluss sowie die Wärmeübertragungsfläche ermittelt. Während die ungestörte Erdreichtemperatur eine systemimmanente, unbeeinflussbare Größe darstellt, sollte für den Systemdurchfluss ein Strömungszustand außerhalb des laminaren Zustands angestrebt werden. Bei der Konzeption des Absorberkreislaufs sollte ein möglichst großer Rohrdurchmesser und eine Rohrverlegung in der Wandebene angestrebt werden, was im Wesentlichen dem hier verwendeten System 2.2 entspricht. Eine Verlegung in der Wandebene bietet durch die einfache Montage zusätzlich konstruktive Vorteile. Darüber hinaus sind die Rohre durch eine hohe Lagesicherheit gekennzeichnet und durch die Noppenstruktur der Elemente während des Betoniervorgangs geschützt.

Der Einfluss einer Grundwasserströmung auf den Wärmeertrag konnte versuchstechnisch nicht genau quantifiziert werden. Hier besteht somit weiterer Forschungsbedarf. Es hat sich jedoch gezeigt, dass nur eine Steigerung der Entzugsleistung erreicht werden kann, wenn die Wand und damit das geothermisch wirksame Abdichtungselement direkt durch die Strömung beeinflusst wird. Eine Grundwasserströmung stellt ein enormes natürliches Energiepotential, welches für den Wärmeentzug jedoch genutzt werden sollte.

Für eine optimale Auslegung der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente sind somit weiterführende Untersuchungen erforderlich. Dies betrifft – neben der Quantifizierung des Einflusses der Grundwasserströmung – vor allem auch die genaue Abbildung der Wärmeübertragungsprozesse zwischen Boden und Fluid. Derzeit existiert kein Berechnungsmodell mit dem eine Auslegung von Anlagen im Grundwasser, die durch einen flächigen, nicht rotationssymmetrischen Wärmeübergang gekennzeichnet sind, erfolgen kann. Aufgrund der Komplexität des Mechanismus sind dafür numerische Ansätze erforderlich, die aufbauend auf den hier erzielten Ergebnissen zu entwickeln sind.





Die hier ermittelten Entzugsleistungen stellen die Ergebnisse von relativ kleinmaßstäblichen Versuchen unter einfachen, homogenen Randbedingungen dar. Für eine Allgemeinerung und Vertiefung der Ergebnisse sollte der Einsatz der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente im Rahmen von Pilotprojekten getestet werden.

Aachen, den 28.02.2011

(Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler)

(Dipl.-Ing. Sylvia Kürten)





#### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Schematische Darstellung einer geothermischen Anlage [in Anlehnung an Adam & Markiewicz, 2002]	4
Abbildung 2-2:	Phasenmodelle für Böden	5
Abbildung 2-3:	Mechanismen des Wärmetransports in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad Sr und dem Äquivalenzdurchmesser d <sub>10</sub> [nach Frivik et al., 1977]	6
Abbildung 2-4:	Jahreszeitlicher Verlauf der Bodentemperatur für verschiedenen Tiefen am Beispiel Aachen [nach Markiewicz, 2004]	9
Abbildung 2-5:	Tiefenprofil der Temperaturen am Beispiel Aachen (links) und Phasenverschiebung der Maximaltemperaturen innerhalb der neutralen Zone (rechts) [nach Markiewicz, 2004]	0
Abbildung 2-6:	Mechanismen beim Wärmeübergang zwischen Boden und Fluid am Beispiel eines Energiepfahls [nach Brandl, 2006]1	2
Abbildung 2-7:	Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit des Strömungszustands im Rohr [nach Pahud et al., 2002]1	3
Abbildung 3-1:	Schematische Darstellung eines Energiepfahls [nach von der Hude & Sauerwein, 2007]1	6
Abbildung 3-2:	Schematischer Darstellung einer Energieschlitzwand (links) und einer Energiebodenplatte (rechts)1	9
Abbildung 3-3:	Schematische Darstellung eines Energievlies [nach Hofinger & Kohlböck, 2005] 2	1
Abbildung 3-4:	Prinzip eines Energietübbings [Franzius & Pralle, 2009]2	2
Abbildung 4-1:	Prinzip der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente (links) und Prinzip der Rohrverlegung (rechts)	5
Abbildung 5-1:	Schematischer Schnitt durch den Versuchsstand (links) und Draufsicht (rechts) 2	7
Abbildung 5-2:	Herstellung eines Großversuchs 2	9
Abbildung 5-3:	Strömungszustand im Versuchstand 3	0
Abbildung 5-4:	Strömungsgeschwindigkeit im Bodenkörper in Abhängigkeit der Einbaudichte 3	1
Abbildung 5-5:	Anordnung der Messpunkte im Bodenkörper im ersten (links) und zweiten (rechts) Großversuch	3
Abbildung 5-6:	Varianten der Rohranordnung 3	3
Abbildung 5-7:	Rohranordnung im ersten Großversuch (Draufsicht)	4
Abbildung 5-8:	Rohranordnung im ersten Großversuch (Schnitt)	4
Abbildung 5-9:	Temperaturverteilung im Bodenkörper (in 70cm Tiefe) beispielhaft für S02_0cm_18	3 6





Abbildung 5-10:	Vor- und Rücklauftemperaturen (oben) und Entzugsleistungen (unten) beispielh	aft
	für System S02_40cm_183	37
Abbildung 5-11:	Ermittlung der maßgebenden Entzugsleistung aus Wiederholungsversuchen	38
Abbildung 5-12:	Ergebnisübersicht der Versuche im Großversuch 1	39
Abbildung 5-13:	Anordnung der Rohre beim zweiten Großversuch (Draufsicht)	40
Abbildung 5-14:	Ergebnisübersicht der Versuche im Großversuch 2	43
Abbildung 5-15:	Wärmeübergang bei geothermisch wirksamen Abdichtungselementen bei senkrechter (links) und paralleler Rohranordnung (rechts)	44
Abbildung 5-16:	Vereinfachter Ansatz zur Bestimmung des Wärmeübergangswiderstand aus der Laborversuchen	า 44
Abbildung 5-17:	Anordnung der Temperaturmessgeber an der Wand zur Bestimmung des Wärmeübergangswiderstands	45
Abbildung 5-18:	Verlauf der gemessenen Temperaturen und des resultierenden Wärmeübergangswiderstands (beispielhaft für Versuch VW1.1_550)	47
Abbildung 5-19:	Temperaturverteilung über die Wandhöhe zu Versuchsbeginn (links) und zu Versuchsende (rechts) beispielhaft für S2.1_70cm_183	47
Abbildung 5-20:	Ergebnisübersicht über die ermittelten Wärmeübergangswiderstände im Großversuch 2	48
Abbildung 6-1:	Prinzip der Finite-Differenzen-Methode [nach Kinzelbach, 1987]	50
Abbildung 6-2:	Abmessungen der 3-dimensionalen numerischen Modelle	51
Abbildung 6-3:	Diskretisierung in x-z-Ebene beispielhaft für eine Rohranordnung senkrecht zur Wand	52
Abbildung 6-4:	Kalibrierungsergebnisse für eine Rohranordnung senkrecht zur Wand (links) une Wandebene (rechts)	d in 55
Abbildung 7-1:	Einfluss der Grundwassergeschwindigkeit aus Laborversuchen (oben) und aus Simulationen (unten)	den 58
Abbildung 7-2:	Einfluss des Systemdurchflusses auf den Wärmeübergangswiderstand (oben) u den Wärmeentzug (unten)	nd 59
Abbildung 7-3:	Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit des Systemdurchflusses und des Rohrdurchmessers	60
Abbildung 7-4:	Einfluss des Systemdurchflusses auf den Wärmeertrag bei kleinem (oben) bzw. großem Durchmesser (unten)	61
Abbildung 7-5:	Einfluss der Rohranordnung auf die Entzugsleistung im ersten Großversuch	62
Abbildung 7-6:	Einfluss der Rohranordnung auf die Entzugsleistung im zweiten Großversuch	63
Abbildung 7-7:	Einfluss der Rohranordnung auf die Entzugsleistung aus in den Simulationen	63
Abbildung 7-8:	Einfluss des Rohrdurchmessers auf den Wärmeentzug bei einem Systemdurchf von 183 l/h (links) und 100 l/h (rechts)	luss 64
Abbildung 7-9:	Einfluss des Rohrdurchmessers auf den Wärmeentzug aus den Simulationen	65





Abbildung 7-10:	Einfluss des Rohrmaterials auf den Wärmeentzug aus Laborversuchen	66
Abbildung 7-11:	Rohrabstand und Schenkelabstand für eine parallele Rohranordnung	67
Abbildung 7-12:	Einfluss von Rohrabstand (links) und Schenkelabstand (rechts) auf das Einzelrohr	67
Abbildung 7-13:	Einfluss von Rohrabstand (links) und Schenkelabstand (rechts) auf das	
	Gesamtsystem	68
Abbildung 7-14:	Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens auf die Entzugsleistung	69
Abbildung 7-15:	Einfluss der Wärmekapazität des Bodens auf die Entzugsleistung	69
Abbildung 7-16:	Einfluss der Bodentemperatur auf den Wärmeentzug aus den Laborversuchen	
	(oben) und den numerischen Simulationen (unten)	71
Abbildung 7-17:	Baugewerblicher Umsatz in Deutschland sowie Anwendungspotential von thermo-	-
	aktiven Abdichtungselementen (nach HDB, 2011)	75

#### Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Thermische Eigenschaften verschiedener Bodenarten	
	[Fromentin et al., 1997, VDI 4640, 2001]	8
Tabelle 3-1:	Ausführungsbeispiele von Energiepfählen und Leistungsdaten 1	8
Tabelle 3-2:	Ausführungsbeispiele von ebenen Energiefundierungen und Leistungsdaten 2	20
Tabelle 3-3:	Entzugsleistungen von thermo-aktiven Bauteilen (Zusammenfassung)2	23
Tabelle 5-1:	Eigenschaften des Bodens (aus bodenmechanischen Standardversuchen)	28
Tabelle 5-2:	Übersicht über die durchgeführten Versuche im Großversuch 1	5
Tabelle 5-3:	Übersicht über die durchgeführten Versuche im Großversuch 2 4	2
Tabelle 5-4:	Übersicht über die durchgeführten Versuche zum Wärmeübergangswiderstand im	
	Großversuch 2	6
Tabelle 6-1:	Stoffparameter für das numerische Modell5	53





#### Literaturverzeichnis

- Adam, D. (2007): Intelligente Systeme der Erdwärmenutzung regenerative Energie aus dem Untergrund. In: Forum Zukunft Beton, Klimadesign – Energie und Gebäude; Bregenz, 2007; herausgegeben von VÖZ, Betonsuisse, BetonMarketing Süd; 14-22
- Adam, D. (2008): *Tunnels as Energy Sources: Technology and Case Histories*. Tunnel (Sonderausgabe 2008); 83-86
- Adam, D., Markiewicz, R. (2002): Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 1: Theoretische Grundlagen. ÖIAZ, Nr. 4(2002)
- Adam, D., Markiewicz, R. (2009): *Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers*. Géotechnique, Vol. 59 No.3; 229-236
- Adam, D., Markiewicz, R., Unterberger, W., Hofinger, J. (2004): Die Verwendung von Tiefgründungselementen als Erdwärmeabsorber bei der Verlängerung der Wiener U-Bahnlinie. In: Beiträge zum 19. Christian Veder Kolloquium - Tiefgründungen, Bemessung und Ausführung; M Dietzel, W. Schubert, H.F. Schweiger, S Semprich (Hrg.); herausgegeben von TU-Graz; 325 - 341
- Baier, C. (2008): Thermisch-hydraulische Simulationen zur Optimierung von Vereisungsmaßnahmen im Tunnelbau unter Einfluss einer Grundwasserströmung.
  Dissertation an der RWTH Aachen, Aachen, 2008
- Brandl, H. (2006): *Energy foundations and other thermo-active ground structures.* Géotechnique, Vol. 56 No.2; 81-122
- Brandl, H., Adam, D., Kopf, F. (1999): *Geothermische Energienutzung mittels Pfählen, Schlitzwänden und Stützbauwerken.* Pfahl-Symposium 1999, Heft Nr. 60, Braunschweig; 329-356
- Clauser, C. (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers SHEMAT and Processing SHEMAT. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003
- DIN 1045-2 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 2: Beton Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Beuth-Verlag, Berlin, August 2008
- Dehner, U. (2007): *Bestimmung der thermischen Eigenschaften von Böden als Grundlage für die Erdwärmenutzung*. Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen, Band 35, 2007
- Franzius, J.N., Pralle, N. (2010): *Geothermie im Tunnelbau Technische, wirtschaftliche und vertragliche Aspekte*. Brokerage Event "Nutzung von Geothermie im Bereich unterirdischer städtischer Infrastrukturen", Bergisch Gladbach, 2010



- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979): *Groundwater*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New York, 1997
- Frivik, P.E., Thorbergsen, E., Del Guidice, Comini, G. (1977): *Thermal Design of Pavement Structures in seasonal frost areas.* Journal of Heat Transfer, Vol. 99; 533-540
- Fromentin, A., Pahud, D. (1997): Recommandations pour la realization d'installations avec pieux échangeurs – Empfehlungen für Energiepfahlsysteme. Rapport Final No 120.104, Bundesamt für Energiewirtschaft, Lausanne
- Gehlin, S. (2002): *Thermal Response Test Method Development and Evaluation*. Doctoral Thesis, Luleâ University of Technology, Schweden, 2002
- Grimm, R. (2011): Leitfähigkeits- und Temperaturmessungen und deren Auswirkung auf die Investitionskosten. GeoTHERM expo & congress, Offenburg, 2011
- HDB (2011): Umsatzstruktur im deutschen Baugewerbe. Datenbank des Hauptverbands derDeutschenBauindustrie2011;imInternet:http://www.bauindustrie.de/file.php?article=499&file=image.jpg;Stand 04.2011
- Hofinger, H., Kohlböck, D. (2005): *Wirtschaftliche Optimierung von Tunnelthermie-Absorberanlagen.* Grundlagenuntersuchung und Planungsleitfaden, 84 Seiten
- Johansen, O., Frivik, P.E. (1980): *Thermal properties of soils and rock materials.* Proceedings of the 2nd International Symposium on Ground Freezing; NTH, Trondheim, Norwegen, 1980
- Katzenbach, R., Waberseck, T., Adam, D., Ennigkeit, A. (2002): Innovationen bei der Nutzung geothermischer Energie durch erdberührte Bauwerke, wie z.B. Pfahlgründungen mittels Energiepfählen. In: Geothermie-Symposium "Erdwärme - Energieträger der Zukunft", 2002, Bremerhaven
- Kinzelbach, W. (1987): Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. Schriftenreihe gwf Wasser-Abwasser, Band 21, R. Oldenburg Verlag, München
- Markiewicz, R. (2004): Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau. Dissertation TU Wien, Wien, 2004
- Oberhauser, A., Adam, D. (2006): *Optimierungspotenziale der Erdwärmenutzung an Verkehrsinfrastrukturprojekten*. Zement + Beton Nr. 2/06, 14-19
- Olischläger, V., Ledel, K. (2003): *Betonschutzplatten im Korrosionsschutz*. Straßen- und Tiefbau, Nr. 7/8(2003), 8-11
- Pahud, D. (2002): *Geothermal Energy and Heat Storage*. Laboratorio di Energia, Ecologia ed Economia, Schweiz, 2002





- Pahud, D., Hubbuch, M. (1998): *Response-Test für die Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen.* Bundesamt für Energie, Projektnummer 23966; Schweiz, 1998
- Pahud, D., Kohl, T., Mégel, T., Brenni, R. (2002): Langzeiteffekte von Mehrfach-Erdwärmesonden. Bundesamt für Energie, Projektnummer 39690; Schweiz, 2002
- Schneider, M., Moormann, C. (2010): GeoTU6 ein tunnelgeothermisches Forschungsprojekt. Tunnel Nr. 2(2010); 14 - 21
- SIA (2005): Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen – Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Dokumentation SIA D 0190, Zürich
- Stegner, A. (2009): *Einsatz von Beton und Betonschutzplatten im Deponiebau*. tis. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau, Nr. 10(2009); 62-65
- Von der Hude, N., Sauerwein, M. (2007): *Energiepfähle in der praktischen Anwendung*. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 76, 2007; 95-109
- Von der Hude, N., Völkner, R. (2004): Regenerative Energienutzung Erdwärmenutzung und Ausführung auf einer U-Bahn-Baustelle in Wien. bbr Vol.6 No.4; 36-41
- Von der Hude, N., Wegner, W. (2010): *Energiepfähle als Schnittstelle zwischen Spezialtiefbau und Haustechnik.* Bauportal 2; 62-67
- VDI 4640 (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Blatt 2, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag, Berlin, 2001





Anhang





## Anhang A: Berechnungsmodelle

# Berechnungsmodell für die Bodentemperatur in oberflächennahen Schichten [nach Markiewicz, 2004]

Allgemeine Bestimmungsgleichung (auf Grundlage der Fourier'schen Grundgesetzes):

 $T_B(z,t) = T_{m,Luft} + \Delta T_{Luft} \cdot \bar{\eta} \cdot e^{-z/d} \cdot \cos(\omega(t-\bar{\epsilon}) - z/d)$ 

Mit: T<sub>m.Luft</sub>: Jahresmitteltemperatur der Luft [°C]  $\Delta T_{Luft}$ : Amplitude der Lufttemperatur [°C] Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi/\overline{P}$  [1/s] ω:  $\overline{P}$ Periodendauer der Schwingung [s] Dämpfungstiefe  $d = \sqrt{\frac{2a_B}{\omega}} = \sqrt{\frac{a_B\bar{P}}{\pi}}$  [m] d  $\overline{\eta} \!=\! \tfrac{1}{\sqrt{1\!+\!2k\!+\!2k^2}}$  $\overline{\epsilon} = \arctan \frac{k}{1+k}$  $k \!=\! \frac{\lambda_B}{\alpha_B \cdot d} \!=\! \frac{\lambda_B}{\alpha_B} \sqrt{\frac{\pi}{a_B \overline{P}}}$ Wärmeübergangskoeffizient Boden – Luft [W/(m<sup>2</sup>K)]  $\alpha_{\mathsf{B}}$ 

Für  $\alpha_B \rightarrow \infty$  (d.h. kein Wärmeübergang, die Lufttemperatur entspricht der Oberflächentemperatur) vereinfacht sich die Gleichung zu:

 $T_B(z,t) = T_{m,Luft} + \Delta T_{Luft} \cdot e^{-z/d} \cdot \cos(\omega t \cdot z/d)$ 





## Wärmeübergangskoeffizient für eine Rohrströmung in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse [nach Pahud et al., 2002]

Allgemeine Bestimmungsgleichung des Wärmeübergangskoeffizienten:

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu} \cdot \lambda_{\mathrm{w}}}{\mathrm{d}_{\mathrm{i}}}$$

Berechnung der Nusseltzahl:

Laminare Strömung:

$$Nu = \frac{Nu_0}{tanh(2,43 \cdot Pr^{1/6} \cdot X^{1/6})}$$
  
mit:  $Nu_0 = \frac{3,657}{tanh(2,264 \cdot X^{1/3} + \cdot 1,7X^{2/3})} + \frac{0,0499 \cdot tanhX}{X}$   
und  $X = \frac{L}{d_1 \cdot Pr \cdot Re}$ 

Übergangszone:

Re:

Ρ

$$Nu = 0.024 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3}$$

Turbulente Strömung:

 $Nu = 0.032 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot (d_i/L)^{0.054}$ 

Mit:

Reynoldszahl Re=
$$\frac{v \cdot d_i}{v}$$

r: Prandtl-Zahl Pr=
$$\frac{v}{\lambda_{f/c_v}}$$

- d<sub>i</sub>: Rohrdurchmessern (innen)
- L: Länge der Rohrleitung
- v: kinematische Viskosität
- λ<sub>f</sub>: Wärmeleitfähigkeit des Strömungsmediums
- c<sub>v</sub>: volumetrische Wärmekapazität des Strömungsmediums





#### Anhang B: Datenblatt der Betonschutzplatte

#### Datenblatt 2206

Carbofix (AKS)

Hergestellt aus High Density Polyethylene (PEHD)

Betonschutzplatte mit Noppen

Dicke von 2,0 bis 5,0 mm

ALUE GmbH & Co. KG



Windmühlenweg 4 47906 Kempen/Tönisberg Telefon: 02845 808-0 · Telefax: 02845 808-116 E-Mail: info@naue.com · Internet: www.naue.com

Datum: 03.01.2011

Eigenschaft	Test Methode	Einheit	Wert
Dickentoleranz	ASTM D 5199	%	± 15%
Dichte	ASTM D 505 / D 792	g/cm³	0,945
Shore D	ISO 868	D	56
Schmelze – Massefließrate ( MFR )	ASTM D 1238 Cond. P 190/5	g/10 min	<1,0
Schmelze – Massefließrate ( MFR )	ASTM D 1238 Cond. E 190/2,16	g/10 min	<0,2
Rußgehalt	ASTM D 1603	%	2 - 3
Rußverteilung	ASTM D 5596	Kategorie	Cat 1 - 2
Noppenhöhe		mm	12
Noppen pro m <sup>2</sup>		Noppen / m <sup>2</sup>	1230
Streckspannung		MPA	> 15
Streckdehnung	ASTM D 6603-4	%	> 9
Reißfestigkeit	A0110 0030-4	MPA	> 25
Reißdehnung		%	600
Warmlagerung nach 1h/100°C	ASTM D 1204	%	< 2

Datei: 2206 AKS Rev. 6 de.doc

Die aufgeführten technischen Daten sind Mittelwerte über die Rollenbreite. Es handelt sich um Richtwerte, die in unseren Labors und/oder bei Prüfinstituten erzielt wurden. Das Recht auf Produktänderungen ohne Ankündigung ist vorbehalten.





## Anhang C: Ergebnisübersicht

## Anhang C.1: Ergebnisübersicht Großversuch 1

#### System 0.1



Versuch	Δh	Q <sub>Rohr</sub>	Messdauer	T <sub>Boden,Anfang</sub>	T <sub>Boden,Ende</sub>	Standardabw.	P <sub>links</sub>	P <sub>mitte</sub>	Prechts	Pgesamt	t <sub>Gleichgewicht</sub>	Bemerkung
	[m]	[l/h]	[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[h]	
V6	0,4	100	5,50	11,6	11,8	0,39	37,7	-	19,0	25,8	-	große Ausschläge am Messende
V8	0,4	100	5,00	11,5	11,8	1,65	105,6	50,9	19,1	50,9	4,00	hohe Zulauftemp. in Q <sub>1</sub>
V41	0,4	100	6,00	11	11,7	0,34	45,9	97,7	-	61,6	3,50	
V45	0,4	100	5,75	10,9	10,4	1,48	46,8	115,9	18,2	53,2	3,50	
V2	0,4	140	6,80	11,1	11,6	0,93	48,3	54,9	58,8	41,2	4,00	nur 4 Messpunkte im Boden
V3	0,4	140	7,25	11,7	11,3	0,25	-	33,9	20,1	34,4	3,50	nur 4 Messpunkte im Boden;
				-								große Ausreißer und Zulauftemp. in Q <sub>1;</sub>
V4	0,4	140	5,50	10,7	10,2	2,43	64,8	58,7	32,3	48,3	2,00	
V5	0,4	140	4,00	11,4	11,3	0,97	46,6	52,0	26,9	36,9	3,00	Temp.messung nur in 30cm Tiefe;
	-,		,	,		- , -	-,-	- ,-			-,	$Q_1 = Q_3$
V7	0,4	140	4,50	11,8	11,7	2,11	66,4	64,4	35,7	51,6	2,50	
V28	0,4	140	6,00	10,7	11	1,23	68,8	53,1	33,4	48,3	2,75	
V12	0,4	183,3	5,25	11,5	11,7	0,32	61,1	56,8	32,8	47,0	1,50	
V42	0,4	183,3	6,00	11,1	10,5	1,16	76,6	59,9	34,1	52,5	1,50	
V10	0,0	100	5,75	11,2	11,0	1,05	36,5	99,4	18,5	46,0	5,00	großes $\Delta T$ in $Q_2$
V25	0,0	100	6,25	11,3	10,8	0,69	52,6	69,9	20,4	42,8	6,00	
V30	0,0	100	5,75	10,9	10,7	1,39	64,1	86,3	21,1	42,6	5,00	
V9	0,0	140	5,00	12,1	11,7	2,04	58,7	60,8	34,2	48,0	3,50	Kühlung (Zulauf) zu stark;
V26	0,0	140	5,50	10,8	10,9	0,54	63,3	48,2	29,7	43,7	3,50	
V11	0,0	183,3	3,25	11,1	11,0	0,34	65,6	58,5	33,4	48,9	-	Auswertung für t=1,5-2,5h
V27	0	183,3	5	11,1	10,9	1,18	80,0	60,0	39,1	39,3	3,20	
V14	0,7	100	7,20	12,5	12,8	0,19	-	37,9	19,1	30,3	3,50	Extreme Ausreißer am Schluss
V43	0,7	100	5,75	11,7	11,3	1,83	60,4	136,3	22,5	64,4	3,50	
V13	0,7	140	5,20	12,9	12,9	0,54	67,2	56,5	29,5	46,9	2,00	
V15	0,7	183,3	3,75	12,5	12,9	1,69	86,7	75,2	41,5	61,8	2,50	
V29	0,7	183,3	5,75	10,8	10,6	0,99	73,5	57,2	33,5	50,7	1,00	
V44	0,7	183,3	5,25	11,4	10,7	2,04	81,3	67,7	42,3	59,7	3,50	





System 0.2



Versuch	∆h [m]	Q <sub>Rohr</sub> [I/min]	Messdauer [h]	T <sub>Boden,Anfang</sub>	T <sub>Boden, Ende</sub>	Standardabw. [°C]	P <sub>links</sub> [W/m²]	P <sub>mitte</sub> [W/m²]	P <sub>rechts</sub> [W/m²]	P <sub>gesamt</sub> [W/m²]	t <sub>Gleichgewicht</sub> [h]	Bemerkung
V17	0	100	6,25	13,1	12,9	0,38	48,6	44,1	30,9	41,8	-	Q₁ am Ende = 0; Auswertung für t=0,75-2,25
V31	0	100	7,50	10,2	9,7	1,22	34,7	27,8	19,2	27,9	3,50	starke Streuung der Messwerte
V16	0	140	4,80	13,3	12,7	0,45	59,6	49,9	51,8	54,4	3,00	starke Ausreißer in Q <sub>3</sub>
V36	0	140	7,75	10,2	10,1	0,44	36,0	34,2	27,4	32,8	3,00	
V21	0	183,3	5,50	10,2	9,8	0,49	52,9	50,1	29,2	44,6	3,50	
V32	0	183,3	21,25	10,0	9,2	1,04	32,8	37,9	41,5	37,0	2,50	
V19	0,4	100	5,50	9,3	9,3	1,24	39,7	33,4	26,7	33,8	-	$Q_1$ am Ende = 0; Stand.abw. $Q_1 + Q_3$ zu groß; Auswertung für t=1,5-4
V34	0,4	100	6,50	9,1	8,8	1,05	37,2	30,9	26,5	32,0	-	starke Streuung der Messwerte; Auswertung für t=1,75-5
V18	0,4	140	4,75	11,2	11,0	2,86	55,4	54,6	-	55,0	3,75	Q₃ fehlt
V35	0,4	140	6,00	10,0	10,6	1,23	42,6	40,3	26,4	36,8	4,00	
V20	0,4	183,3	5,20	9,7	10,1	0,48	43,4	44,6	35,8	41,3	3,50	Standardabweichung in Q <sub>3</sub> zu groß
V37	0,4	183,3	5,50	10,7	8,7	1,72	37,0	50,8	46,0	43,7	2,50	
V23	0,7	100	5,75	11,5	10,7	0,84	35,4	32,7	46,4	38,1	3,50	
V38	0,7	100	7,00	9,7	9,6	1,89	36,8	31,2	18,9	29,6	2,50	
V22	0,7	140	7,00	9,9	10,2	0,76	40,3	32,7	28,2	34,3	3,50	Standardabweichung in $Q_3$ zu groß
V39	0,7	140	5,75	9,9	9,8	1,40	31,2	31,0	21,6	28,1	2,50	
V24	0,7	183,3	6,25	11,0	10,7	1,16	67,8	67,6	44,7	60,5	-	sehr hohe Ausreißer;Stand.abw. in Q3 zu groß; Auswertung für t=0,5-2,0
V33	0,7	183,3	7,00	9,2	9,0	0,47	32,8	32,2	33,7	32,9	1,50	





## Anhang C.2: Ergebnisübersicht Großversuch 2

System 1.1



Versuch	Δh	d	<b>Q</b> <sub>Rohr</sub>	Messdauer	T <sub>Boden,Anfang</sub>	T <sub>Boden,Ende</sub>	Standardabw.	T <sub>Wand,Anfang</sub>	Standardabw.	Plinks	P <sub>mitte</sub>	Prechts	Pgesamt	t <sub>Gleichgewicht</sub>	Bemerkung
	[m]	[mm]	[l/h]	[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[h]	
V36	0,0	17	100	6,50	10,1	9,4	0,84	9,7	1,29	26,8	30,8	26,8	28,0	2,00	
V22	0,0	17	183,3	6,00	11,2	10,6	1,13	11,2	1,29	46,4	64,3	52,9	53,9	3,00	Temp. Im Boden nur bis 4,5h
V39	0,0	17	183,3	7,75	10,3	9,4	0,54	10,0	0,94	17,1	52,4	-	32,7	-	rechter Logger liefert Temp. um 20°C
V37	0,4	17	100	7,00	9,8	9,3	0,66	9,4	1,02	158,6	30,6	27,3	77,5	2,00	linker Logger sehr gr. deltaT
V1	0,4	17	183,3	5,25	10,8	10,2	3,1	12,1	1,16	35,7	51,4	47,8	44,3	2,50	
V2	0,4	17	183,3	5,00	10,3	9,6	1,47	10,5	0,97	41,0	60,9	49,8	49,8	3,00	
V23	0,4	17	183,3	5,00	10,7	10,4	1,16	11,1	0,92	47,8	65,4	59,2	56,8	2,50	
V38	0,7	17	100	6,25	9,9	9,5	0,97	9,8	1,21	42,7	31,1	28,0	34,4	3,50	
V21	0,7	17	183,3	6,00	11,6	11,1	0,67	11,2	1,19	46,3	71,2	54,0	56,2	2,50	
V40	0,7	17	183,3	6,50	10,5	10,2	0,66	10,0	1,19	39,8	43,7	-	41,5	4,00	

## System 2.1

Versuch	Δh	d	<b>Q</b> <sub>Rohr</sub>	Messdauer	T <sub>Boden,Anfang</sub>	T <sub>Boden, Ende</sub>	Standardabw.	T <sub>Wand,Anfang</sub>	Standardabw.	P <sub>links</sub>	P <sub>mitte</sub>	Prechts	Pgesamt	t <sub>Gleichgewicht</sub>	Bemerkung
	[m]	[mm]	[l/h]	[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[h]	
V16	0,0	25	100	8,00	12,4	12,4	0,49	11,9	0,73	92,6	86,7	31,6	74,8	2,50	
V15	0,0	25	183,3	4,50	12,4	12,3	0,36	12,1	0,66	72,0	62,2	41,7	54,2	2,00	
V18	0,4	25	100	6,00	12,4	12,2	0,99	12,5	0,62	53,1	57,5	22,6	39,3	1,50	
V17	0,4	25	183,3	5,50	12,3	12,2	0,31	12,0	0,54	-	-	36,3	36,3	3,50	linker+mittlerer Temp. Logger deltaT<0
V24	0,4	25	183,3	5,00	11,6	11,3	1,46	12,1	0,69	64,1	89,3	28,9	54,2	1,50	
V20	0,7	25	100	5,75	12,1	12	0,38	11,9	0,54	65,6	55,2	-	59,5	-	Auswertung für t=1,0-4,0; Technikausfall während des Versuchs
V26	0,7	25	100	7,75	11,6	11,0	0,66	11,5	0,59	93,9	54,6	22,4	47,0	3,50	
V19	0,7	25	183,3	5,25	12,5	12,2	1,35	12,8	0,62	62,5	92,7	37,3	59,0	3,50	
V25	0,7	25	183,3	5,00	11,6	11,5	1,41	12,0	0,69	73,2	94,6	27,5	57,0	2,50	
V42	0,7	25	183,3	7,50	10,6	9,9	0,89	10,4	0,86	141,6	40,2	34,0	58,5	-	Auswertung für t=4,0-6,5





## System 1.2



Versuch	∆h [m]	d [mm]	Q <sub>Rohr</sub>	Messdauer [h]	T <sub>Boden,Anfang</sub>	T <sub>Boden,Ende</sub>	Standardabw.	T <sub>Wand,Anfang</sub>	Standardabw.	P <sub>links</sub> [W/m²]	P <sub>mitte</sub> [W/m²]	P <sub>rechts</sub> [W/m²]	P <sub>gesamt</sub> [W/m²]	t <sub>Gleichgewicht</sub>	Bemerkung
	[]	[]	[.,]	[···]	[ •]	[ •]	[ •]	[ •]	[ •]	[,]	[,]	[,]	[,]	[]	
V34	0,0	17	100	4,50	11,1	10,6	1,24	11,2	0,89	95,6	86,7	31,6	74,8	1,50	
V5	0,0	17	183,3	6,00	10,6	9,9	1,03	9,9	0,76	35,3	57,0	56,1	47,2	3,00	
V33	0,4	17	100	7,50	10,8	10,6	0,79	10,6	0,79	83,9	83,2	31,9	70,0	3,50	Bodentemp. nur bis t=6h
V3	0,4	17	183,3	5,50	10,6	10	2,28	11,6	0,86	45,0	66,7	68,4	57,6	3,50	
V32	0,4	17	183,3	6,00	11,7	11,0	0,74	11,1	0,96	34,9	56,7	60,4	48,1	3,25	
V35	0,7	17	100	7,00	10,1	9,9	0,64	9,6	0,79	33,4	-	40,7	36,1	-	mittlerer Temp. Logger liefert Temperaturen um die 20°, große Standardabweichungen
V4	0,7	17	183,3	6,00	11	10,2	0,89	10,6	0,86	36,4	52,4	56,8	46,4	5,00	kein wirkliches Gleichgewicht

## System 2.2



Versuch	Δh	d	<b>Q</b> <sub>Rohr</sub>	Messdauer	T <sub>Boden, Anfang</sub>	T <sub>Boden, Ende</sub>	Standardabw.	T <sub>Wand,Anfang</sub>	Standardabw.	Plinks	P <sub>mitte</sub>	Prechts	Pgesamt	t <sub>Gleichgewicht</sub>	Bemerkung
	[m]	[mm]	[l/min]	[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[h]	
V9	0,0	25	100	7,50	11,7	11,2	0,83	11,2	0,53	73,1	29,6	27,6	41,5	3,00	
V30	0,0	25	100	8,00	10,5	9,8	0,81	10,3	0,63	59,8	30,9	26,6	37,6	6,00	Bodentemp. nur bis t=6h
V6	0,0	25	183,3	3,75	10,7	10,3	1,55	10,9	0,75	66,1	-	43,5	63,9	1,50	mittlerer Temp. Logger liefert Temperaturen um die 20°
V8	0,0	25	183,3	7,25	11,7	11,0	0,48	11,2	0,30	73,4	-	59,1	65,0	2,50	mittlerer Temp. Logger ist ausgefallen
V27	0,0	25	183,3	7,00	10,8	10,2	0,70	10,7	0,52	50,1	49,4	43,8	47,3	3,50	
V12	0,4	25	100	6,75	11,7	11,2	0,79	11,4	0,71	68,6	44,9	21,2	42,0	3,50	
V31	0,4	25	100	7,25	10,3	9,8	0,63	9,9	0,49	55,1	32,2	23,8	35,2	4,50	
V7	0,4	25	183,3	6,00	11,4	11	0,15	11,2	0,40	63,5	-	55,8	59,0	1,50	mittlerer Temp. Logger liefert Temperaturen um die 20°
V10	0,4	25	183,3	6,00	11,8	10,8	1,10	12,0	0,44	80,7	58,2	61,4	66,1	3,00	
V11	0,4	25	183,3	4,75	11,6	11,2	2,16	12,9	0,31	92,2	70,1	74,5	78,4	2,50	
V28	0,4	25	183,3	7,00	10,7	10,5	0,62	10,4	0,63	62,8	49,2	49,1	53,1	-	Auswertung für t=2,5-5h; Bodentemp. nur bis 5,5h
V41	0,7	25	100	6,75	9,7	8,9	1,98	11,0	0,58	60,9	38,3	65,4	56,1	5,00	
V14	0,7	25	100	7,00	11,0	10,7	0,75	11,0	0,58	68,9	29,5	28,3	40,5	4,00	
V13	0,7	25	183,3	5,75	10,4	10,7	1,59	10,8	0,63	75,5	56,0	57,3	62,2	2,50	TBoden,Anfang < TBoden,Ende
V29	0,7	25	183,3	5,00	10,4	10,7	2,20	11,8	0,48	90,4	52,8	37,9	57,6	2,50	Tmitte=Trechts?





## Anhang C.3: Ergebnisübersicht Wärmeübergangswiderstand

System 1.1 und System 2.1

System 1.2 und System 2.2





System 1.1					
Versuch	Q [l/h]	d [mm]	R <sub>ges,Mittel</sub> [Km/W]	P [W]	P [W/m²]
VW5	550	17	0,04686	186,6	138,2
VW5-2	550	17	0,05091	157,7	116,8
VW17	300	17	0,08868	100,4	74,4
VW17-2	300	17	0,03805	250,4	185,5
VW18	200	17	0,09280	92,8	68,8
VW18-2	200	17	0,13608	66,7	49,4
Standard	183,3	17	0,11634	192,0	42,1
Standard	100	17	0,19743	124,5	27,3
System 2.1					
VW6	550	25	0,03562	191,5	85,1
VW7	300	25	0,10993	106,8	47,5
VW16	200	25	0,19591	54,7	24,3
VW16-2	200	25	0,03083	272,2	121,0
Standard	183,3	25	0,13809	237,5	52,1
Standard	100	25	0,20695	175,0	38,4

System 1.2					
Versuch	Q	d	R <sub>ges,Mittel</sub>	Ρ	Р
	[l/h]	[mm]	[Km/W]	[W]	[W/m²]
VW8	550	17	0,01870	582,4	485,3
VW15	550	17	0,04591	239,4	199,5
VW9	300	17	0,02847	374,6	312,1
VW9-2	300	17	0,03017	332,7	277,2
VW9-3	300	17	0,04318	197,2	164,3
VW10	200	17	0,06652	153,3	127,7
VW10-2	200	17	0,06827	158,8	132,3
Standard	183,3	17	0,14649	216,0	47,4
Standard	100	17	0,29104	335,8	73,6
System 2.2					
VW11	550	25	0,02483	400,0	300,7
VW14	300	25	0,04152	242,4	182,3
VW14-2	300	25	0,03987	240,6	180,9
VW13	200	25	0,06592	167,9	126,2
Standard	183,3	25	0,12778	285,1	62,5
Standard	100	25	0,11938	185,0	40,6





## Anhang C.4: Parametervergleich für eine Rohranordnung senkrecht zur Wand



#### Grundwasserströmung





## Rohrdurchmesser







## Rohrmaterial









## Rohrabstand

