

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen
Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen

In Zusammenarbeit mit
Uretek Deutschland GmbH

**Untersuchung der Möglichkeit der Ertragssteigerung von thermo-aktiven
flächigen Bauteilen durch Steuerung der Grundwasserströmung mittels
neuartiger Injektionskörper**

Abschlussbericht,
gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
unter dem Aktenzeichen 30717

von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler, David Koppmann, M.Sc.
& Dr.-Ing. Sylvia Kürten

Aachen, Mai 2015

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	30717	Referat	24/0	Fördersumme	83.567€
----	--------------	---------	-------------	-------------	----------------

Antragstitel **Untersuchung der Möglichkeit der Ertragssteigerung von thermo-aktiven flächigen Bauteilen durch Steuerung der Grundwasserströmung mittels neuartiger Injektionskörper**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
16 Monate	20.12.2012		

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen	Tel	0241-8025247
	Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen (GiB)	Fax	0241-8022384
	Mies-van-der-Rohe-Str. 1	Projektleitung	
	52074 Aachen	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler	
		Bearbeiter	
		Dr.-Ing. Sylvia Kürten: D. Koppmann, M.Sc.; André Bähren	

Kooperationspartner URETEK Deutschland GmbH

Weseler Str. 110
45478 Mülheim an der Ruhr

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Die Erdwärmenutzung mithilfe von erdberührenden Bauteilen stellt eine zukunftssträchtige und bereits erprobte Möglichkeit zur Deckung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden dar. Durch die thermische Aktivierung von ohnehin abzudichtenden Bauteilen direkt im Bereich der Abdichtung kann die Wirtschaftlichkeit gegenüber nur über den Beton aktivierten Systemen deutlich gesteigert werden. In diesem Zusammenhang stellen flächige Bauteile im strömenden Grundwasser ein großes energetisches Potential dar, da sie über große erdberührende Flächen verfügen und durch die Grundwasserströmung ein zusätzliches Energiepotential vorhanden ist.

Bei der Planung und Auslegung von thermo-aktiven Bauteilen im Grundwasser wird der infolge der Strömung zusätzliche Wärmetransport zum Bauteil hin i.d.R. gar nicht oder lediglich durch pauschale Ansätze berücksichtigt. Eine konkrete Nutzung des natürlichen Energiepotentials einer Grundwasserströmung findet somit derzeit nicht statt. Durch eine gezielte Steuerung des Grundwassers mittels einer Funnel- und Gate-Konstruktion (FuG-Konstruktion) kann die Grundwasserfließgeschwindigkeit am Bauteil erhöht werden, was zu einer Steigerung der Effizienz der Anlage führt.

Im Rahmen des Projekts sollte daher durch eine gezielte Steuerung des Grundwassers eine Ertragssteigerung für thermo-aktive flächige Bauteile erreicht werden. Die dazu erforderliche FuG-Konstruktion sollte aus Injektionskörpern aus Polyurethan bestehen. Die Wirksamkeit des Systems sollte mit Hilfe von Feld- und/oder Laborversuchen sowie mit numerischen Untersuchungen überprüft werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im ersten Arbeitsschwerpunkt wurden die umweltrelevanten Aspekte des Projekts untersucht. Dazu zählen neben der Ermittlung der Umweltverträglichkeit des nicht ausgehärteten Injektionsguts auch Untersuchungen zur Ausbreitung von Temperaturfahnen im Untergrund und zur Vermeidung von schädlichen Aufstauwirkungen am Bauteil. Im zweiten Arbeitsschwerpunkt erfolgte die technische Anpassung der Injektionskörper an die besonderen Anforderungen für den Einsatz für eine Grundwassersteuerung.

Im dritten Arbeitsschwerpunkt wurde das Optimierungspotential für den Wärmeertrag durch eine FuG-Konstruktion aus Injektionskörpern ermittelt. Abschließend erfolgte der Transfer der Ergebnisse in die Praxis durch Ableitung von Handlungsempfehlungen.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des Projekts wurde die Möglichkeit einer gezielten Steuerung des Grundwassers zur lokalen Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und damit zur Ertragsteigerung flächiger thermo-aktiver Bauteile untersucht. Zur Grundwassersteuerung wurden dabei Injektionskörper der Uretex Deutschland GmbH eingesetzt.

Um nachteilige Auswirkungen einer FuG-Konstruktion auf das Grundwasser und das Bauteil auszuschließen wurde die Umweltverträglichkeit des nicht ausgehärteten Injektionsguts, der Einfluss von Aufstauwirkungen sowie die Ausbreitung von Temperaturfahnen untersucht. Dabei konnte die Umweltverträglichkeit des Injektionsguts nachgewiesen und die aus der Erhöhung der Grundwasserfließgeschwindigkeit resultierenden zusätzlichen Belastungen auf die Wand bzw. die resultierenden Setzungen als vernachlässigbar gering eingestuft werden. Eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit führt im Lastfall einer konstanten Entzugsleistung zu steigenden Vor- und Rücklauftemperaturen, wodurch die Ausbreitung der Temperaturfahne generell reduziert werden kann. In Abhängigkeit der Geometrie der FuG-Konstruktion kann jedoch eine Verlängerung der Temperaturfahne auftreten, weshalb immer eine integrierte Betrachtung in Verbindung mit der geplanten FuG-Konstruktion erforderlich ist.

In Injektionsversuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Injektionskörper eine für eine Grundwassersteuerung ausreichend geringe Durchlässigkeit aufweisen. Eine lagegenaue und oberflächennahe Installation sowie die Begrenzung der horizontalen Ausbreitung des Injektionsmaterials konnten in den Versuchen jedoch nicht erzielt werden. Die Ausbildung und Orientierung des Injektionskörpers im Allgemeinen hängt maßgeblich von den vorliegenden Untergrundeigenschaften ab und ist daher grundsätzlich starken Schwankungen unterworfen. Auf Basis der durchgeführten Versuche kann daher noch keine abschließende Bewertung erfolgen. Dazu wäre die Durchführung weiterer umfangreicher Versuchsreihen notwendig. Weiterer Forschungsbedarf besteht auch in der detaillierten Untersuchung möglicher Hilfsmaßnahmen und bei der Weiterentwicklung des Injektionsverfahrens zur Verbesserung des Injektionserfolgs.

Im Labor durchgeführte Wärmeentzugsversuche zeigten, dass eine gezielte Grundwassersteuerung durch den Einsatz einer FuG-Konstruktion möglich ist. Die Größe des Versuchstandes war jedoch nicht ausreichend, um Randeinflüsse unter Einfluss der FuG-Konstruktion vollständig auszuschließen. Darüber hinaus wurden während der Versuchsauswertung Messungenauigkeiten festgestellt, die auf eine mögliche Beschädigung der Messtechnik beim Einbau zurückgeführt werden konnten. Eine Steigerung des Wärmeentzugs konnte in den Laborversuchen daher leider nicht abschließend bestätigt werden.

In numerischen Simulationen konnten Erkenntnisse zur optimalen Geometrie einer FuG-Konstruktion gewonnen werden. Dabei stellte sich eine zur Strömung senkrechte Ausrichtung der Konstruktion als besonders effektiv heraus. In weiteren Simulationen unter Verwendung des im Parallelprojekt (AZ 29646) entwickelten Berechnungsansatzes konnte anschließend eine signifikante Steigerung der Entzugsleistung durch eine aktive Grundwassersteuerung nachgewiesen werden. Eine Parameterstudie ergab, dass die Konstruktion dabei immer systemangepasst und in Abhängigkeit der hydrologischen und thermischen Untergrundeigenschaften anzulegen ist. Für eine abschließende Verifizierung der Ergebnisse der numerischen Simulationen wäre eine Anwendung der Konstruktion und eine messtechnische Überwachung innerhalb eines Pilotprojekts oder die Durchführung weiterer Laborversuche in einem optimierten Versuchstand erforderlich.

Es wurden alle Arbeitspakete innerhalb des geplanten Kostenplans bearbeitet. Durch die Möglichkeit einer aktiven Grundwassersteuerung und der damit verbundenen Effizienzsteigerung flächiger thermo-aktiver Bauteile wurde zudem ein neues Anwendungsfeld der FuG-Technologie erschlossen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt sowie die erzielten Ergebnisse wurden auf verschiedene Weise der Öffentlichkeit präsentiert. So wurde das Projekt auf dem „Geothermiekongress“ 2014 in Essen sowie auf dem „1st Workshop of Numerical Geothermal Simulation“ 2015 in München in Fachvorträgen vorgestellt. Die Ergebnisse wurden weiterhin in einem Zeitschriftenartikeln (bbr - Fachmagazin für Leitungsbau, Brunnenbau und Geothermie) publiziert. Weitere Veröffentlichungen in Fachzeitschriften sind darüber hinaus geplant.

Fazit

Im Rahmen des Projekts wurde die Möglichkeit einer Effizienzsteigerung flächiger thermo-aktiver Bauteile durch eine Grundwassersteuerung mittels neuartiger Injektionskörper untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass mit einer FuG-Konstruktion eine lokale Erhöhung der Grundwasserfließgeschwindigkeit und dadurch eine signifikante Steigerung der Entzugsleistung realisiert werden kann. In einer Parameterstudie konnten darüber hinaus maßgebende Einflussfaktoren der Konstruktion auf die möglichen Steigerungen identifiziert und Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet werden. Die Projektergebnisse bilden somit die Grundlage für einen effizienten Einsatz der Konstruktion an flächigen thermo-aktiven Bauteilen. Zur Verifizierung der Projektergebnisse ist die Durchführung weiterer Wärmeentzugsversuche im Labor oder im Feld erforderlich. Zusätzlich besteht Forschungsbedarf in der weiteren Untersuchung und Optimierung bzw. Weiterentwicklung des Injektionsverfahrens.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Umweltverträglichkeit des nicht ausgehärteten Injektionsguts	4
2.1	Grundsätze zur ökotoxikologischen Bewertung von Injektionen	4
2.2	Ergebnisse der inversen Säulenversuche	4
2.2.1	Bewertung der allgemeinen Parameter	5
2.2.2	Bewertung der stofflichen Parameter	6
2.2.3	Bewertung der biologischen Parameter	6
2.3	Ergebnisse der numerischen Simulationen	7
2.4	Bewertung der Umweltverträglichkeit des Injektionsguts	10
3	Aufstaueffekte bei umströmten Bauteilen	10
3.1	Theoretische Grundlagen	10
3.1.1	Auswirkungen von Aufstau und Sunk	10
3.1.2	Ermittlung des maximalen Aufstaus	11
3.2	Ergebnisse der Parameterstudie	13
3.2.1	Einflussfaktoren auf die Aufstauhöhe	13
3.2.2	Bewertung der Vergrößerung der Aufstauhöhe infolge einer gezielten Grundwassersteuerung	15
4	Ausbreitung von Temperaturfahnen im Untergrund	16
4.1	Allgemeines	16
4.2	Wärmetransport im Boden und die Bedeutung thermischer Dispersion	17
4.3	Untersuchungen zur Ausbreitung von Temperaturfahnen	19
4.3.1	Numerische Umsetzung thermischer Dispersion	19
4.3.2	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen	21
4.4	Bewertung im Hinblick auf eine gezielte Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit	24
5	Untersuchungen zur Funnelgeometrie	24
5.1	Allgemeines	24
5.2	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen	25
5.3	Zusammenfassende Bewertung im Hinblick auf eine gezielte Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit	28
6	Injektionskörper	28
6.1	Allgemeines	28

6.1	Injektionsversuche im Labor	30
6.2	Injektionsversuche im Feld	31
6.3	Ergebnisübersicht und -bewertung	34
7	Wärmeentzugsversuche an thermo-aktiven Abdichtungselementen	36
7.1	Allgemeines	36
7.2	Versuchsaufbau und Messtechnik	37
7.3	Versuchsprogramm	38
7.4	Ergebniszusammenfassung	40
8	Numerische Untersuchungen zur möglichen Steigerung der Entzugsleistung	42
8.1	Grundlagen der numerischen Untersuchungen	42
8.2	Grundlagen der Parameterstudie	43
8.3	Ergebnisse der Parameterstudie	44
8.3.1	Einfluss der Öffnungsweite und der Kanallänge	44
8.3.2	Einfluss der Funnellänge	47
8.3.3	Einfluss der Wärmeleitfähigkeit	47
8.3.4	Einfluss der Durchlässigkeit	48
8.3.5	Einfluss der Funneltiefe	49
8.4	Ableitung von Handlungsempfehlungen	50
9	Ökologische und Ökonomische Bilanzierung des Verfahrens	51
10	Fazit	53

Literaturverzeichnis

Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Konzentrationsverlauf für Eluate von inversen Säulenversuchen (nach der Ergebnissen des HyG).....	5
Abbildung 2-2:	Modell zur Berechnung der Ausbreitung der TOC-Konzentration.....	7
Abbildung 2-3:	Entwicklung der maximalen TOC-Konzentrationen über die Zeit.....	9
Abbildung 2-4:	Ausbreitung der TOC-Konzentrationen über die Zeit (für $c_0 = 118\text{mMol/l}$).....	9
Abbildung 3-1:	System zur Betrachtung von Aufstauwirkungen (links: Schnitt; rechts: Draufsicht).....	11
Abbildung 3-2:	Aufstauhöhe aus Um- und Unterströmung infolge der Fließgeschwindigkeit.....	13
Abbildung 3-3:	Aufstauhöhe aus Unterströmung infolge des Restfließquerschnitts (links) und der Bauteilbreite (rechts).....	14
Abbildung 3-4:	Absolute Aufstauhöhe in Abhängigkeit des Restfließquerschnitts (links) und der Bauteillänge (rechts).....	14
Abbildung 3-5:	Absolute Aufstauhöhe in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie, des Restfließquerschnitts und der Fließgeschwindigkeit.....	15
Abbildung 3-6:	Belastung auf ein Bauteil infolge einer erhöhten Grundwassergeschwindigkeit.....	16
Abbildung 4-1:	Schema der numerischen Umsetzung thermischer Dispersion.....	20
Abbildung 4-2:	Temperaturfahnen in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit links: longitudinale Ausbreitung; rechts: transversale Ausbreitung.....	22
Abbildung 4-3:	erforderliche Quelltemperatur in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit.....	23
Abbildung 5-1:	Funnel-and-Gate-Technologie.....	25
Abbildung 5-2:	mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gate links: infolge der Funnelneigung α ($v_f = 0,5 \text{ m/d}$); rechts: infolge der Funnellänge $L1$ ($\alpha = 90^\circ$).....	26
Abbildung 5-3:	mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gate ($v_f = 0,5 \text{ m/d}$, $\alpha = 90^\circ$); links: infolge der Öffnungsweite w ; rechts: infolge der Kanallänge $L2$	26
Abbildung 5-4:	mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gate infolge der Kanallänge $L2$ in Abhängigkeit der Durchlässigkeit der Funnel ($v_f = 0,5 \text{ m/d}$, $\alpha = 90^\circ$).....	28
Abbildung 6-1:	Ausgehärtetes Expansionsharz Resin 0975 links: freigeschäumt; rechts: unter Druck in der Injektionslanze ausgehärtet.....	30
Abbildung 6-2:	Vorbereitung des Laborversuchs (links) und freigelegter Injektionskörper (rechts).....	31
Abbildung 6-3:	Geplante Injektionskörper der ersten Versuchsreihe im Feld links: Grundriss; rechts: Schnitt.....	32
Abbildung 6-4:	Freigelegter Injektionskörper der ersten Versuchsreihe.....	33
Abbildung 6-5:	Geplante Injektionskörper der zweiten Versuchsreihe im Feld links: Grundriss; rechts: Schnitt.....	33
Abbildung 6-6:	Probe des Injektionskörpers der zweiten Versuchsreihe.....	34
Abbildung 7-1:	Schematischer Aufbau des Versuchsstands [Kü2014].....	36
Abbildung 7-2:	Rohranordnung im Laborversuch [Kü2014].....	37

Abbildung 7-3: Plot der interpolierten Pegelstände der Laborversuche links: $\Delta h = 0,23$ m; rechts: $\Delta h = 0,56$ m.....	40
Abbildung 7-4: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit in der ersten Versuchsreihe	41
Abbildung 7-5: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit in der zweiten Versuchsreihe.....	41
Abbildung 8-1: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Öffnungsweite w und der Kanallänge $L2$ ($v_f = 0,5$ m/d).....	44
Abbildung 8-2: mittlere Bodentemperatur am Bauteilrand ($w = 0,4$ m) links: inner- und außerhalb des Kanals; rechts: über die Bauteillänge gemittelt	45
Abbildung 8-3: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Öffnungsweite w und der Kanallänge $L2$ ($v_f = 0,25$ m/d)	46
Abbildung 8-4: mittlere Fließgeschwindigkeit (links) und Bodentemperatur (rechts) am Bauteilrand in Abhängigkeit der Kanallänge $L2$ für $v_{f,0} = 0,25$ m/d und $v_{f,0} = 0,50$ m/d ($w = 0,40$ m).....	46
Abbildung 8-5: Steigerung der Entzugsleistung (links) und mittlere Bodentemperatur am Bauteilrand innerhalb und außerhalb des Kanals (rechts) in Abhängigkeit der Funnellänge $L1$ ($v_f = 0,50$ m/d)	47
Abbildung 8-6: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ_F am Beispiel verschiedener Kanallängen $L2$ ($v_f = 0,50$ m/d).....	48
Abbildung 8-7: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Durchlässigkeit $k_{f,F}$ am Beispiel verschiedener Kanallängen $L2$ ($w = 0,40$ m; $v_f = 0,50$ m/d).....	49
Abbildung 8-8: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Funneltiefe T_F am Beispiel verschiedener Kanallängen $L2$ ($w = 0,40$ m; $v_f = 0,50$ m/d).....	49
Abbildung 8-9: mittlere Fließgeschwindigkeit am Bauteilrand in Abhängigkeit der Kanallänge $L2$ für $T_F = 4$ m und $T_F = 5$ m ($w = 0,40$ m)	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6-1: Durchlässigkeiten und Dichten der Injektionskörper und des Bodens	35
Tabelle 7-1: Mittlere Potentialdifferenzen und Strömungsgeschwindigkeiten im Großversuch	38
Tabelle 8-1: Parameter des Referenzmodells und deren Variation in der Parameterstudie	43

Bezeichnungen und Begriffe

Lateinische Buchstaben

a	Restfließquerschnitt	m
B	Bauteilbreite	m
c_i	TOC-Konzentration im inversen Säulenversuch	mg/l
c_0	TOC-Konzentration im Vergleichswasser	mg/l
c_v	volumetrische Wärmekapazität	J/(m ³ K)
d	Grundwasserflurabstand	m
d_a	Außendurchmesser	mm
d_B	Dicke der Bodenschicht	m
d_i	Innendurchmesser	mm
D_m	Dispersionskoeffizient (in x, y oder z-Richtung)	m ² /s
e_{ah}	aktive Erddruckordinate	kN/m ²
E_c	Gesamtfreisetzung (inverser Säulenversuch)	mg/kg
E_d	Bemessungswert des Erddrucks	kN/m
E_s	Steifemodul	kN/m ²
G_L	Hemmung im Leuchtbakterientest	-
G_D	Hemmung im Daphnientest	-
G_A	Hemmung im Algentest	-
H	Mächtigkeit des Grundwasserspiegels	m
h	Aufstauhöhe / Sunkhöhe aus Durchleitung	m
h_{max}	maximale Aufstauhöhe / Sunkhöhe	m
h_{um}	Aufstauhöhe / Sunkhöhe aus reiner Umströmung	m
h_{unter}	Aufstauhöhe / Sunkhöhe aus reiner Unterströmung	m
i	hydraulischer Gradient	-
K_0	Beiwert des Erdruhedrucks	-
k_{agh}	aktiver Erddruckbeiwert	-
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert (isotrop)	m/s
$k_{f,h}$	Durchlässigkeitsbeiwert (horizontal)	m/s
$k_{f,v}$	Durchlässigkeitsbeiwert (vertikal)	m/s
L	Bauteillänge	m
L1	Funnellänge	m

L2	Kanallänge	m
L _P	Rorhlänge	m
m	Masse des Injektionsguts	kg
n	Porenanteil	-
p _w	Wasserdruckordinate	kN/m ²
P	Entzugsleistung	W
R _{min}	minimaler Biegeradius	m
Q	Quellterm	W/m ³
s	Setzung	m
t	Abstand zwischen Grundwasserspiegel und UK Bauteil	m
t	Zeit	s
T	Temperatur	°C
V _i	Probenvolumen (Eluat)	l
v _a	Grundwassergeschwindigkeit (Abstandsgeschwindigkeit)	m/d
v _f	Grundwassergeschwindigkeit (Filtergeschwindigkeit)	m/d
v _L	longitudinale Hauptströmungsrichtung	m/s
w	Öffnungsweite des Gates	m
x, y, z	Richtungen im dreidimensionalen Raum	m

Griechische Buchstaben

α	Funnelneigung	°
α _L	longitudinale Dispersivität (längs)	m
α _T	transversale Dispersivität (quer)	m
Δσ	Spannungsdifferenz	kN/m ²
γ	Wichte des Bodens	kN/m ³
γ'	Wichte des Bodens unter Auftrieb	kN/m ³
γ*	effektive Wichte des Bodens	kN/m ³
γ _G	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten	-
γ _{G,E0}	Teilsicherheitsbeiwert für Erdruhedruck	-
Δh	Aufstaudifferenz / Sunkdifferenz	m
λ _B	Wärmeleitfähigkeit des Bodens	W/(mK)
λ _F	Wärmeleitfähigkeit des Funnels	W/(mK)
λ _S	Wärmeleitfähigkeit des Kornfraktion des Bodens	W/(mK)

λ_w	Wärmeleitfähigkeit des Porenwassers	W/(mK)
ρ_w	Dichte des Wassers	kg/m ³
φ	Reibungswinkel	°

Häufige Indizes

B	Boden
F	Funnel
L	longitudinal
T	transversal
W	(Poren)Wasser

Abkürzungen

BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DGL	Differentialgleichung
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
EnEV	Energieeinsparverordnung
FuG	Funnel und Gate
GiB	Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH
GOK	Geländeoberkante
HyG	Hygiene-Institut des Ruhrgebiets
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
PE	Polyethylen
PUR	Polyurethan
SHEMAT	Simulator for Heat and Mass Transport
ThSB	Theoretischer Sauerstoffbedarf
TOC	Total Organic Carbon / gesamter organischer Kohlenstoff
TRT	Thermal Response Tests
Uretek	URETEK Deutschland GmbH

Zusammenfassung

Der Einsatz von thermo-aktiven Bauteilen im Grundwasser ist eine wirtschaftliche Methode zur anteiligen Deckung des Heiz- und Kühlbedarfs von Gebäuden. Das große Energiepotential einer Grundwasserströmung wird derzeit jedoch noch nicht gezielt genutzt. Durch den Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Uretek Deutschland GmbH daher die Möglichkeit einer gezielten Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit am Bauteil zur Effizienzsteigerung geothermischer Anlagen untersucht. Dazu wurde der Einsatz einer Funnel-and-Gate-Konstruktion (FuG-Konstruktion) aus Injektionskörpern zur gezielten Steuerung der Grundwasserströmung geprüft.

Die Installation einer FuG-Konstruktion setzt voraus, dass diese keine nachteilige Auswirkung auf die Grundwasser- und Bodenbeschaffenheit sowie auf das thermo-aktive Bauteil hat. In diesem Zusammenhang wurden im Projekt in inversen Säulenversuchen die Unbedenklichkeit des Injektionsguts nachgewiesen und negative Auswirkungen infolge von Aufstauwirkungen ausgeschlossen. In numerischen Simulationen wurde darüber hinaus die Ausbreitung von Temperaturfahnen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Ausbreitung bei Vorgabe einer konstanten Entzugsleistung in Folge steigender Fließgeschwindigkeit abnimmt. Durch die Installation einer FuG-Konstruktion kann es trotz erhöhter Fließgeschwindigkeiten jedoch zu einer Verlängerung der Temperaturfahnen kommen, was bei der Dimensionierung und Anlagenauslegung zu berücksichtigen ist.

Zur Untersuchung der Injektionskörper wurden Labor- und Feldversuche durchgeführt. Dabei wurde eine für die Grundwassersteuerung ausreichend geringe Durchlässigkeit der Injektionskörper nachgewiesen. Die Möglichkeit der gezielten Grundwassersteuerung durch eine FuG-Konstruktion wurde zudem in Laborversuchen bestätigt. Für den Einsatz im Bereich geothermischer Anlagen wurden darüber hinaus Untersuchungen zur optimalen Geometrie der Konstruktion durchgeführt. Dabei wurde gezeigt, dass die maximalen Geschwindigkeiten durch eine zur Strömung senkrechte Ausrichtung der Funnel erzielt werden.

In weiteren numerischen Untersuchungen wurde die durch die Installation einer FuG-Konstruktion mögliche Steigerung der Entzugsleistung thermo-aktiver Bauteile überprüft und die Wirksamkeit der Konstruktion bestätigt. Im Rahmen einer Parameterstudie wurden zudem maßgebliche Einflussfaktoren auf die Leistungssteigerungen ermittelt. Als Ergebnis wurden Handlungsempfehlungen für die Dimensionierung einer Konstruktion abgeleitet.

Zwar wurde im Projekt eine generelle Eignung der Injektionskörper zur Grundwassersteuerung nachgewiesen jedoch besteht weiterer Forschungsbedarf in der Weiterentwicklung des Verfahrens zur lagegenauen Erstellung vertikaler Injektionsschlitze.

Das Projekt „Untersuchung der Möglichkeit der Ertragssteigerung von thermo-aktiven flächigen Bauteilen durch Steuerung der Grundwasserströmung mittels neuartiger Injektionskörper“ wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem AZ: 30717 gefördert. Allen Beteiligten sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

1 Einleitung

Die Erdwärmenutzung mit Hilfe von erdberührenden Bauteilen stellt eine zukunftssträchtige und bereits erprobte Möglichkeit zur Deckung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden dar. Bei den sogenannten thermo-aktiven Bauteilen werden Absorberrohre in ohnehin erforderliche Bauteile integriert, wodurch ein Wärmeentzug aus dem Untergrund ermöglicht wird. In einem Bauteil werden somit mehrere Funktionen vereint und die Investitionskosten im Vergleich zu konventionellen Systemen der oberflächennahen Geothermie können reduziert werden. Ausführungsbeispiele sind z.B. für sogenannte „Energiepfähle“, „Energieschlitzwände“ oder „Energietunnel“ dokumentiert (z.B. [Br2006]). Neue Ideen beschäftigen sich mit der thermischen Aktivierung von Spundwänden im Wasser- oder Tiefbau [Pu2013]. Am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH (GiB) wurden in diesem Zusammenhang thermo-aktive Abdichtungselemente entwickelt [Zie2011]. Da die thermische Aktivierung des Bauteils direkt im Bereich der Abdichtung erfolgt und somit ein nahezu direkter Kontakt zum Erdreich erreicht wird, kann die Wirtschaftlichkeit gegenüber nur über den Beton aktivierten Systemen deutlich gesteigert werden. In einem von der DBU geförderten Parallelprojekt (AZ 29646) wurde ein Berechnungsansatz für die Beschreibung des Wärmeübergangs bei einem flächigen Bauteil am Beispiel dieser thermo-aktiven Abdichtungselemente entwickelt und in das Finite-Differenzen-Programm SHEMAT-Suite (Simulator for Heat and Mass Transport) ([Cl2003], [Ra2006]) implementiert.

Durch eine vorhandene Grundwasserströmung im anstehenden Erdreich ist darüber hinaus ein zusätzliches Energiepotential vorhanden. Dieses steigt mit größer werdender Grundwasserfließgeschwindigkeit, da der konvektive Wärmetransport in Relation zur Wärmeleitung an Bedeutung gewinnt. Bei der Planung und Auslegung von thermo-aktiven Bauteilen im Grundwasser wird der zusätzliche konvektive Wärmetransport zum Bauteil in der Regel gar nicht oder lediglich durch pauschale Ansätze berücksichtigt, was zu einer ineffizienten Anlagenauslegung führen kann. Eine zusätzliche Erhöhung der Fließgeschwindigkeit kann durch eine gezielte Steuerung des Grundwassers erreicht werden. Dadurch kann entweder die Entzugsleistung des thermo-aktiven Bauteils oder bei konstanter Leistung die Effizienz der geothermischen Anlage gesteigert werden.

Ziel des durchgeführten Forschungsprojekts war es daher mit Hilfe einer Funnel-und-Gate-Konstruktion (FuG-Konstruktion) aus Injektionskörpern der Firma URETEK Deutschland GmbH (Uretek) die Strömungsgeschwindigkeit am Bauteil lokal zu erhöhen.

Bei der Auslegung einer geothermischen Anlage ist zu gewährleisten, dass durch den Wärmeentzug keine nachteilige Auswirkung auf das Umfeld entsteht. Durch die vorgesehene FuG-Konstruktion erfolgt ein Eingriff in den Untergrund, welcher ebenfalls für das Umfeld verträglich sein muss. Deshalb muss zusätzlich gewährleistet werden, dass durch die Injektionen keine Schadstoffe in den Untergrund eingetragen werden, die die Grundwasser-beschaffenheit langfristig beeinträchtigen.

Weiterhin dürfen durch die Änderung der Strömung des Grundwassers keine negativen Auswirkungen auf das Bauteil oder das Umfeld auftreten.

Zur Erreichung der Projektziele wurden im Wesentlichen drei Arbeitspakete bearbeitet. Im ersten Arbeitsschwerpunkt wurden die umweltrelevanten Aspekte des Projekts untersucht. In diesem Zusammenhang wurden neben dem Nachweis der Umweltverträglichkeit des noch nicht ausgehärteten Injektionsmaterials Untersuchungen zur Vermeidung von schädlichen Aufstauwirkungen am Bauteil und zur Ausbreitung von Temperaturfahnen im Untergrund durchgeführt. Das zweite Arbeitspaket war durch die technische Anpassung der Injektionskörper an die besonderen Anforderungen für den Einsatz zur Grundwassersteuerung gekennzeichnet. Dazu wurden mit der Firma Uretex Injektionsversuche im Labor und im Feld durchgeführt. Im dritten Arbeitsschwerpunkt wurde anschließend das Optimierungspotential für den Wärmeertrag durch eine FuG-Konstruktion aus Injektionskörpern ermittelt. In numerischen Simulationen mit SHEMAT-Suite wurde dafür zunächst eine optimale Geometrie der FuG-Konstruktion ermittelt, um eine möglichst hohe Effizienz des Systems zu erreichen. Die Wirksamkeit eines solchen Systems wurde in Wärmeentzugsversuche an thermo-aktiven Abdichtungselementen unter Einfluss einer FuG-Konstruktion im Labor untersucht. Darüber hinaus wurden umfangreiche numerische Simulationen unter Anwendung des im Parallelprojekt (AZ 29646) entwickelten Berechnungsansatzes durchgeführt. In Rahmen einer Parameterstudie wurden anschließend verschiedene Einflussgrößen der Konstruktion und deren Auswirkung auf die erzielbare Entzugsleistung untersucht. Abschließend erfolgte der Transfer der Ergebnisse in die Praxis durch die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Der vorliegende Abschlussbericht fasst die wesentlichen Ergebnisse des Projekts „Untersuchung der Möglichkeit der Ertragssteigerung von thermo-aktiven flächigen Bauteilen durch Steuerung der Grundwasserströmung mittels neuartiger Injektionskörper“ (AZ 30717) zusammen. Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits in

- Koppmann, D.; Ziegler, M.; Kürten, S.; Mottaghy, D.: Auslegung und Berechnung von thermo-aktiven Bauteilen bei vorhandener Grundwasserströmung. Bbr 65, Heft 12 (2014), S. 64-69.

veröffentlicht bzw. in den Vorträgen

- Kürten, S.; Mottaghy, D.; Koppmann, D.; Ziegler, M.: Auslegung und Berechnung von thermo-aktiven Bauteilen unter dem Einfluss einer Grundwasserströmung. Der Geothermiekongress, Essen, 2014.
- Koppmann, D.; Ziegler, M.; Kürten, S.; Mottaghy, D.: Numerical Simulation of plane energy geostructures under the influence of groundwater flow. 1st Workshop of Numerical Geothermal Simulation. München, 2015.

auf Fachkongressen präsentiert.

2 Umweltverträglichkeit des nicht ausgehärteten Injektionsguts

2.1 Grundsätze zur ökotoxikologischen Bewertung von Injektionen

Die im Projekt betrachtete FuG-Konstruktion soll aus Injektionskörpern der Firma Uretek hergestellt werden. Diese bestehen aus einem Zweikomponenten-Polyurethan(PUR)-System (Expansionsharz). Da die Konstruktion planmäßig im Grundwasser eingesetzt werden sollen, ist zu gewährleisten, dass durch die Injektionskörper keine Beeinträchtigung für den Boden oder das Grundwasser entsteht.

Die Bewertung von Injektionen (Stoffe, die nach dem Einbau ihr Gefüge verändern) erfolgt in Deutschland nach dem Merkblatt des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ [DI2011]. Danach muss sowohl für das nicht ausgehärtete als auch für das ausgehärtete Produkt die Unbedenklichkeit nachgewiesen werden. Die Unbedenklichkeit des ausgehärteten Produkts wurde durch das Hygiene-Institut des Ruhrgebiets (HyG) bereits im Jahr 2006 nachgewiesen [Hy2006]. Der entsprechende Nachweis für das nicht ausgehärtete Produkt war Bestandteil des Forschungsvorhabens.

Zur Bewertung von nicht ausgehärtetem Injektionsgut wird die Durchführung von inversen Säulenversuchen empfohlen [DI2011]. Bei diesen Versuchen werden die Injektionen in einen mit Sand gefüllten Zylinder eingebracht, welcher von unten nach oben durchströmt wird. In bestimmten Zeitintervallen wird das Eluat hinsichtlich seiner äußeren Beschaffenheit, seiner stofflichen und seiner biologischen Eigenschaften untersucht. Durch das realitätsnahe Einbringen (und Abbinden) des Injektionsguts können die Ergebnisse der inversen Säulenversuche (Schadstoffeintrag) gut in die Praxis übertragen werden.

Nach [DI2011] ist beim Einsatz von Injektionen im Grundwasser zu gewährleisten, dass die Geringfügigkeitsschwellen der relevanten Stoffe im Kontaktbereich zwischen Bauprodukt und Grundwasser eingehalten werden. Das Auftreten sehr hoher Konzentrationen im Kontaktbereich ist für diese Fälle charakteristisch, nimmt aber mit der Zeit und zunehmender Entfernung stark ab. Zum Zeitpunkt des Einbaus kann die Geringfügigkeitsschwelle in der Grenzschicht daher stark überschritten sein. Diese dünne Schicht sowie der kurze Belastungszeitraum sind für eine rechtliche Bewertung aber nicht relevant, sodass eine zeitliche und räumliche Mittelung der Schadstoffe im Boden vorgenommen werden kann [DI2011]. Für Schleierinjektionen werden eine räumliche Mittelung von 2 m und eine zeitliche Mittelung von 6 Monaten empfohlen [Bra2011]. Die zu Grunde gelegte Schadstofffracht ist dabei aus inversen Säulenversuchen für das jeweilige Einsatzgebiet abzuleiten.

2.2 Ergebnisse der inversen Säulenversuche

Zur Bewertung des nicht ausgehärteten Injektionsguts wurden am HyG inverse Säulenversuche durchgeführt. Die folgenden Angaben beruhen auf den Aussagen des Prüfberichts des HyG. Es

wurden Versuche an zwei Testsäulen (E und F) durchgeführt. Jede Säule (\varnothing : 28 cm, Höhe 45 cm) wurde mit Feinsand verfüllt, in welchen frisches Injektionsgut (ca. 130 ml) eingebracht wurde. Die Säulen wurden dann mit lokalem Trinkwasser beaufschlagt. In einem Zeitraum von 14 Tagen wurden zu mehreren Zeitpunkten Wasserproben entnommen, die hinsichtlich ihrer allgemeinen Parameter (s. Kapitel 2.2.1) untersucht wurden.

Die hier getesteten Polyurethane sind generell durch ein schnelles Aushärten gekennzeichnet. Die Auslaugungskurven für den Summenparameter TOC (Total Organic Carbon) zeigen den damit verbunden typischen Verlauf (s. Abbildung 2-1). Die Konzentration steigt direkt nach dem Injizieren stark an (Peak) und fällt aber schnell wieder auf das Ursprungsniveau zurück (Abklingphase). Zur Bewertung des Baustoffes werden daher die Eluate am Peak und in der Abklingphase hinsichtlich ihrer stofflichen und biologischen Parameter untersucht.

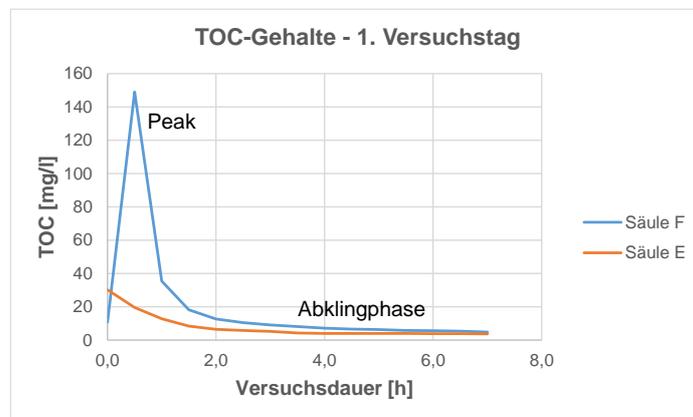


Abbildung 2-1: Konzentrationsverlauf für Eluate von inversen Säulenversuchen (nach der Ergebnissen des HyG)

2.2.1 Bewertung der allgemeinen Parameter

Zu den allgemeinen Parametern zählen der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, der Geruch, die Färbung/Trübung sowie die Neigung zur Schaumbildung [DI2011].

Eine äußere Beeinflussung der Prüfwässer (Färbung, Trübung) konnte in den Versuchen nicht festgestellt werden. Die Neigung zur Schaumbildung wurde als schwach eingestuft. Lediglich am 1. Versuchstag wurde ein organisch/fauliger Geruch wahrgenommen, der jedoch „im weiteren Versuchsverlauf deutlich abnimmt“. Die vorhandenen Auffälligkeiten verschwinden somit deutlich früher als innerhalb der durch das DIBt geforderten 28 Tage.

Der pH-Wert nahm in den ersten 6-8 Stunden der Versuche von 7,5 auf 6,6 ab. In [DI2011] wird nur ein oberer Grenzwert von 10 vorgegeben, welcher somit nicht erreicht wurde. Nach 24 Stunden war der Ausgangszustand im Versuch wiederhergestellt und die erforderliche Regenerationsphase von 28 Tagen wurde somit deutlich unterschritten. Der maximal gemessene Wert der elektrischen Leitfähigkeit lag bei 526 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und damit in derselben Größenordnung wie die des Ausgangswassers und deutlich unter dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hinsichtlich der allgemeinen Parameter bestehen demnach keine Bedenken für einen Einsatz des Injektionsguts im Grundwasser.

2.2.2 Bewertung der stofflichen Parameter

Zur Bewertung der stofflichen Parameter ist für Injektionen vor allem der Summenparameter TOC von Bedeutung. Die maximale TOC-Konzentration wurde für die Säule F nach einer Stunde zu 149 mg/l ermittelt (s. Abbildung 2-1). Für die Säule E lag die Maximalkonzentration mit 30 mg/l direkt nach der Injektion deutlich unterhalb derer der Säule F. Diese große Streuung in den Messergebnissen wurde bereits in anderen Versuchsreihen festgestellt und ist somit keine außergewöhnliche Erscheinung (z.B. [Bra2009]). Das Vergleichswasser besaß eine TOC-Konzentration von 2,8 mg/l (Blindwert). Dieser Wert wurde für beide Säulen nach 4 Tagen unterschritten. Die Abklingphase ist somit deutlich geringer als die maximal tolerierbare von 28 Tagen [DI2011].

Da das Injektionsgut aus Polyurethanen besteht, wurden die Prüfwässer zusätzlich auf aromatische Amine und Phenole hin untersucht [DI2011]. Weder in den Prüfwässern des Peaks noch in der Abklingphase wurde einer der hier getesteten 18 Amine oder Phenole nachgewiesen.

Die Bewertung der stofflichen Parameter erfolgt auf Basis der Geringfügigkeitsschwellen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) unter Berücksichtigung der entsprechenden Übertragungsfunktionen. Für den Summenparameter TOC existiert kein Geringfügigkeitsschwellenwert [LA2004]. Die ermittelten maximalen TOC-Konzentrationen fallen im Vergleich zu den in der Literatur dokumentierten Versuchsergebnissen von anderen Injektionsstoffen jedoch gering aus. Für Systeme auf Wasserglas-Basis oder Acrylate wurden z.B. Werte von über 3.000 mg/l bzw. 350 mg/l gemessen ([Sc2004], [Wa2011]). Die relativ niedrigen TOC-Konzentrationen (hier max. 150 mg/l) sind für PUR-Systeme charakteristisch [Sc2004]. Zur abschließenden Bewertung der gemessenen TOC-Konzentration für die Anwendung als Funnel wurden zusätzlich numerische Simulationen durchgeführt (s. Kapitel 2.3).

2.2.3 Bewertung der biologischen Parameter

Da der ermittelte TOC-Gehalt höher lag, als der des eluierenden Wassers (Vergleichswasser), wurden zusätzlich biologische Tests durchgeführt [DI2011]. Hierbei werden die Eluate des Peaks (Mischfraktion aus den 3 maximal belasteten Eluatfraktionen) und der Abklingphase hinsichtlich der biologischen Abbaubarkeit und der ökotoxikologischen Auswirkungen untersucht. Dazu wurden Leuchtbakterientests, Daphnientests und Algentests durchgeführt. Zusätzlich wurde die biologische Abbaubarkeit der Stoffe mit Hilfe des Test „OECD 301-F“ ermittelt, mit dem die „leichte biologische Abbaubarkeit“ eines Stoffes unter aeroben Bedingungen nachgewiesen wird.

Sowohl im Leuchtbakterientest als auch im Daphnientest lag die ermittelte Hemmung in beiden Fraktionen mit $G_L = 2$ bzw. $G_D = 1$ deutlich unter den Grenzwerten von $G_L = 8$ bzw. $G_D = 4$ in der Abklingphase ($G_D = 8$ in der Maximumphase).

Im Algentest hatte das Prüfwasser des Peaks mit einer Algentoxizität von $G_A = 24$ eine hemmende Wirkung auf das Algenwachstum (Richtwert $G_A = 8$). Diese Beeinflussung ist jedoch nur sehr kurzfristig, da bereits in der Abklingphase keine Beeinträchtigung mehr festgestellt wurde ($G_A = 1$).

Eine erhöhte Hemmwirkung auf das Algenwachstum ist kein ungewöhnliches Phänomen bei Injektionen (vgl. [Wa2011] oder [Sc2004]). Ist die Hemmwirkung nur ein kurzfristiger Effekt und ist eine gute biologische Abbaubarkeit der Stoffe gegeben, kann eine langfristige Beeinträchtigung des Grundwassers ausgeschlossen werden [Wa2011]. Die Überschreitung des Richtwerts für das Maximum stellt somit kein Ausschlusskriterium für das Injektionsgut dar. Zur abschließenden Bewertung sind die Ergebnisse mit denen der Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit in Zusammenhang zu bringen [DI2011].

Die leichte biologische Abbaubarkeit eines Stoffes gilt nach der OECD-Guideline als nachgewiesen, wenn der theoretische Sauerstoffbedarf (ThSB) innerhalb von 28 Tagen zu mindestens 60 % abgebaut wurde [OE2005]. In den durchgeführten Versuchen erfolgte die Bewertung über den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), welcher dem theoretischen Sauerstoffbedarf entspricht. Der CSB des Prüfwassers des Peaks betrug 162 mg/l. Dieser wurde nach 28 Tagen zu 60 % abgebaut (Quelle: HyG). Die leichte biologische Abbaubarkeit ist somit nachgewiesen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass das nicht ausgehärtete Injektionsgut auch auf Basis der biologischen Parameter als unbedenklich eingestuft werden kann.

2.3 Ergebnisse der numerischen Simulationen

Um die Ergebnisse der inversen Säulenversuche auf den Einsatz einer FuG-Konstruktion übertragen zu können, wurden numerische Simulationen zum Stofftransport mit dem Programm SHEMAT-Suite [CI2003] durchgeführt. Für den Stoffparameter TOC existiert keine Geringfügigkeitsschwelle [LA2004], da TOC in Böden natürlicherweise vorhanden ist. Demzufolge können keine konkreten Grenzwerte als Bewertungskriterium herangezogen oder konkrete Übertragungsfunktionen abgeleitet werden und die Bewertung der Ausbreitung der TOC-Konzentration erfolgte nur auf qualitative Weise. Auf eine räumliche und zeitliche Mittelung der Werte wurde aus diesem Grunde ebenfalls verzichtet.

Da das genaue Design der FuG-Konstruktion erst im weiteren Projektverlauf erfolgte, wurde eine fiktive Situation angesetzt (Abbildung 2-2). Als Untergrund wurde ein Sandboden mit seinen typischen Eigenschaften verwendet (vgl. Kapitel 3.2).

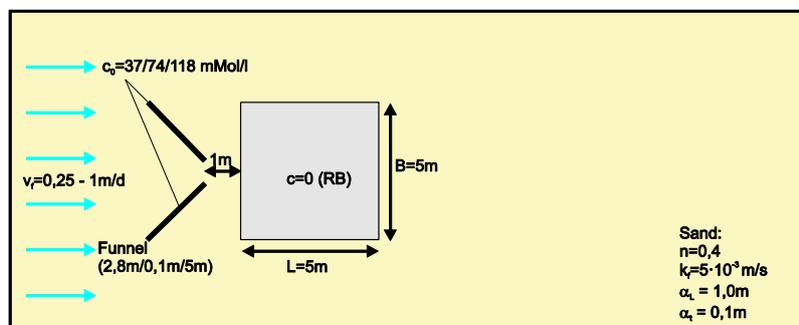


Abbildung 2-2: Modell zur Berechnung der Ausbreitung der TOC-Konzentration

Als Funnel wurde ein Körper gewählt, welcher der halben Bauwerksbreite bei einem Öffnungswinkel von 45° entspricht und in einem Abstand zum Bauwerk von einem Meter angeordnet wurde. Die

räumliche und zeitliche Diskretisierung des Modells erfolgte nach den Stabilitätskriterien. Details zur Modellbildung bei Verwendung der Finite-Differenzen-Methode können der Literatur entnommen werden (z.B. [Ki1987]).

In den inversen Säulenversuchen wurde die Auslaugung von TOC als Konzentration ermittelt. Diese hängt jedoch von den Versuchsrandbedingungen ab. Zur Übertragung dieser Konzentration auf den Schadstoffeintrag in den Boden in der praktischen Anwendung sind diese auf die injizierte Menge und das Probenvolumen zu beziehen [Bra2009]:

$$E_c = \sum (c_i - c_0) \cdot \frac{V_i}{m} \quad (2-1)$$

Hierin ist E_c [mg/kg] die Schadstofffracht, c_i [mg/l] die gemessene Konzentration im Eluat, c_0 [mg/l] die Konzentration im Vergleichswasser (hier $c_0 = 2,8$ mg/l), V_i [l] das Probenvolumen des Eluats (hier $V_i = 2$ l) und m [kg] die Masse des Injektionsguts (hier $m = 0,143$ kg, bei einer angenommenen Dichte des flüssigen Injektionsguts von 1.100 kg/m³). Für die maximale Konzentration von 150 mg/l ergibt sich dann eine Gesamtfreisetzung von 3.550 mg/kg (Säule F).

Für die numerische Simulation ist die Schadstofffracht in eine Konzentration umzurechnen. Dafür wurde die Schadstoffmenge auf das Funnelvolumen bezogen. Die Dichte der ausgehärteten Injektionskörper variiert in der Regel zwischen 50 und 160 kg/m³ (Quelle: Uretek). Für das verwendete System ergeben sich damit Konzentrationen zwischen 440 mg/l (entspricht ca. 37 mmol/l) und 1.420 mg/l (entspricht ca. 118 mmol/l). Diese wurden als Punktquelle mit einer Wirkungsdauer von zwei Stunden ins numerische Modell implementiert. Auf die Abbildung des biologischen Abbaus des Stoffes wurde verzichtet, sodass die Ergebnisse als „Worst Case Scenario“ angesehen werden können. Für das Bauteil wird eine Konzentration von Null als konstante Randbedingung vorgegeben.

Es wurden Geschwindigkeiten zwischen $0,25$ m/d und $1,0$ m/d betrachtet. Auf die Abbildung höherer Geschwindigkeiten wurde verzichtet, da der Einsatz einer FuG-Konstruktion bei Ursprungsgeschwindigkeiten weit über 1 m/d als unwahrscheinlich bzw. unwirtschaftlich angesehen werden kann. Neben der Geschwindigkeit ist auch die Dispersion für die Ausbreitung der Stofffracht verantwortlich. Diese ist in porösen Medien stark skalenabhängig. Für den simulierten „Feldmaßstab“ wurde die Längsdispersivität zu $\alpha_L = 1$ m und die Quersdispersivität zu $\alpha_T = 0,1$ m angenommen [Zi2011].

In den Simulationen zeigt sich der typische Verlauf einer Stofffracht im strömenden Grundwasser. Im Laufe der Zeit wird der Stoff in Strömungsrichtung transportiert. Durch die vorhandene Dispersion kommt es zu einer fortschreitenden Ausweitung der Stofffahne. Durch den nur sehr kurzzeitigen Eintrag des Stoffes tritt bereits nach einem halben Tag eine deutliche Verdünnung auf ($c_{max} = 5$ mmol/l bei einer Quellkonzentration von 118 mmol/l). Weiterhin zeigt sich, dass durch das Bauwerk eine Abschirmwirkung entsteht, durch welche die Ausbreitung der Stofffracht zusätzlich eingedämmt wird.

Der Verlauf der maximalen TOC-Konzentrationen über der Zeit zeigt für alle Geschwindigkeiten einen starken exponentiellen Verlauf (s. Abbildung 2-3). Für die niedrige Geschwindigkeit von 0,25 m/d ist die verbleibende Konzentration in den ersten 3-4 Tagen noch höher als bei höheren Geschwindigkeiten. Im Laufe der Zeit findet jedoch eine stärkere Verdünnung statt (s. Abbildung 2-3, links). Erwartungsgemäß verbleiben bei hohen Ausgangskonzentrationen auch höhere Konzentrationen im Boden (s. Abbildung 2-3, rechts). Prinzipiell lässt sich sagen, dass bereits nach 0,5 Tagen die Konzentration im Grundwasser auf weniger als 10 % des Ausgangswertes gefallen ist. Durch die starke Verdünnung kann der Stoffeintrag (in Verbindung mit dem biologischen Abbau) als unbedenklich eingestuft werden.

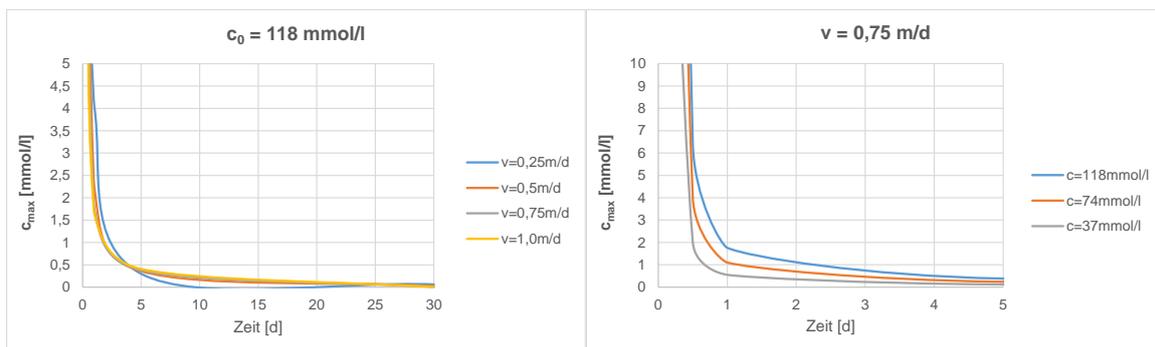


Abbildung 2-3: Entwicklung der maximalen TOC-Konzentrationen über die Zeit

In Abbildung 2-4 ist die maximale Ausbreitung der Stofffahne zu verschiedenen Zeitpunkten für die verschiedenen Geschwindigkeiten und einer Quellkonzentration von 118 mmol/l in x- und y-Richtung dargestellt. Die dargestellten Abstände beziehen sich auf die Lage des Injektionsorts als Nullpunkt. Für die anderen Konzentrationen wurden dieselben Abmessungen für die Stofffahne ermittelt, was auf die mathematische Formulierung des Stofftransports in SHEMAT-Suite zurückzuführen ist [CI2003]. Diese besagt, dass der zurückgelegte Weg eines Stoffteilchens nur von der „Transportgeschwindigkeit“ abhängt. Mit steigender Geschwindigkeit verschwindet der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Ausbreitung der Stofffahne und die Stofffahne nähert sich einem quasi stationären Zustand an.

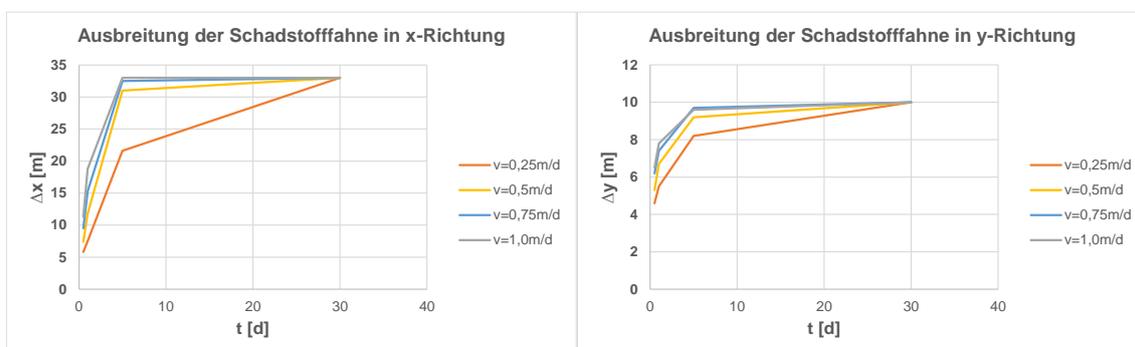


Abbildung 2-4: Ausbreitung der TOC-Konzentrationen über die Zeit (für $c_0 = 118$ mmol/l)

Werden die absoluten Maße der Stofffahne betrachtet, zeigt sich, dass durch die Injektion nur eine lokale Beeinträchtigung des Grundwassers stattfindet. Zwar sind nach 30 Tagen noch in einem

Abstand von 30 m von der Injektionsquelle erhöhte TOC-Konzentrationen (größer Null) zu verzeichnen, diese sind absolut betrachtet jedoch sehr gering. Die noch vorhandenen Werte liegen bereits deutlich unter dem natürlichen TOC-Gehalt im Boden (ca. 1 M-%) und sind somit nicht mehr relevant für eine Bewertung.

2.4 Bewertung der Umweltverträglichkeit des Injektionsguts

Prinzipiell können Polyurethane auf Grund ihrer schnellen Reaktion im Kontakt mit Wasser zu den unbedenklichen Injektionsstoffen gezählt werden [Wa2011]. Durch die durchgeführten Untersuchungen kann dies bestätigt werden. In den inversen Säulenversuchen konnte die Unbedenklichkeit des nicht ausgehärteten Injektionsguts nachgewiesen werden. Lediglich auf das Algenwachstum wurde beim Eluat des Peaks eine Hemmwirkung festgestellt. Diese ist jedoch zeitlich sehr begrenzt. Bereits wenige Stunden nach dem Injizieren wurde keine toxische Wirkung mehr festgestellt. Dieses Phänomen wurde ebenfalls bei anderen Injektionsstoffen dokumentiert und ist keine außergewöhnliche Erscheinung ([Wa2011] oder [Sc2004]). In Kombination mit der nachgewiesenen leichten biologischen Abbaubarkeit des Stoffes kann das Injektionsgut somit als unbedenklich für den Einsatz im Grundwasser eingestuft werden.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen zeigen darüber hinaus, dass die Ausbreitung der TOC-Konzentration durch das Bauwerk zusätzlich behindert wird. Es kann daher auf eine ausschließlich lokale Beeinflussung des Grundwassers geschlossen werden. Dies ist nach den Grundsätzen des DIBt tolerierbar [DI2011]. Zusätzlich konnte bereits nach kurzer Zeit eine starke Verdünnung des Stoffes festgestellt werden. Die verbleibenden TOC-Konzentrationen erreichen somit sehr schnell einen Wert, der in der Größenordnung der TOC-Konzentration in natürlichen Böden liegt.

Zusammenfassend ergibt sich, dass das Injektionsmaterial der Firma Uretek aus umweltschutztechnischer Sicht als unbedenklich eingestuft und somit für die Konstruktion einer FuG-Konstruktion verwendet werden kann.

3 Aufstaueffekte bei umströmten Bauteilen

3.1 Theoretische Grundlagen

3.1.1 Auswirkungen von Aufstau und Sunk

Wird durch ein undurchlässiges Bauteil eine Grundwasserströmung gestört bzw. umgelenkt, führt das im Anstrom zu einem Grundwasseranstieg (Aufstau) und im Abstrom zu einer Grundwasserabsenkung (Sunk). Dies ist auf den durch das Bauteil reduzierten Strömungsquerschnitt zurückzuführen. Die Reduzierung kann sowohl in horizontaler (Umströmung) als auch in vertikaler Richtung (Unterströmung) stattfinden. Liegen auf beiden Seiten des Bauteils die gleichen hydrogeologischen Bedingungen vor, sind Aufstau und Absenkung vom Betrag gleich groß, sodass in Bauteilmitte (theoretisch) die ungestörte Wasserhöhe vorliegt [Sch1995].

Aufstauereffekte können zum einen eine größere Belastung durch den größeren Wasserdruck auf das Bauteil bedeuten. Zum anderen kann es bei angrenzender Bebauung zu einer Durchfeuchtung von Kellern bzw. Wänden kommen. Durch die abstromseitige Absenkung des Grundwassers können dagegen Setzungen hervorgerufen werden. Die Ermittlung der Wasserspiegeldifferenz am Bauteil sollte daher bei der Planung einer FuG-Konstruktion berücksichtigt werden. Sollte der Aufstau bzw. die Absenkung zu groß sein, sind geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Eine Übersicht über mögliche Gegenmaßnahmen ist in [GI2009] dargestellt.

Aufstauereffekte müssen vor allem dann berücksichtigt werden, wenn oberflächennah gut durchlässige Böden (Sande oder Kiese) anstehen, die von einer undurchlässigen Schicht (Ton oder Schluff) in nicht allzu großer Tiefe unterlagert werden. Aus geometrischer Sicht sind vor allem langgestreckte senkrecht angeströmt Bauwerke (z.B. Tunnel, Kanäle) „aufstauanfällig“, da sie eine weiträumige Strömungsumlenkung hervorrufen. Binden diese Bauteile zusätzlich in eine undurchlässige Schicht ein und sperren den Fließquerschnitt somit über die Tiefe komplett ab, wird der Aufstauereffekt noch deutlich verstärkt [It2010].

3.1.2 Ermittlung des maximalen Aufstaus

Für die Bestimmung der Aufstauhöhe stehen analytische Ansätze und numerische Verfahren zur Verfügung. Eine Übersicht über existierende Ansätze ist in [It2010] bzw. [Er1999] zu finden. Die Aufstauhöhe hängt stark von den vorhandenen hydrogeologischen Bedingungen und der Geometrie des Bauteils ab, sodass eine Berechnung und Bewertung der Ergebnisse immer projektabhängig erfolgen sollte.

Zur Ermittlung des maximalen Aufstaus in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit wurde ein fiktives Bauteil mit variablen Abmessungen angesetzt, das in einen mitteldicht gelagerten Sand einbindet und von einer undurchlässigen Schicht unterlagert wird (Abbildung 3-1). Die Berechnung erfolgte mit den analytischen Ansätzen nach [Sch1981-1995], da diese für eine Bewertung der zusätzlichen Aufstauhöhe durch eine Grundwassersteuerung als hinreichend genau angesehen werden. Im Folgenden werden die für die durchgeführten Untersuchungen relevanten Gleichungen zusammengefasst. Weitere Informationen sind [Sch1981-1995] zu entnehmen. Die verwendeten Bezeichnungen sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

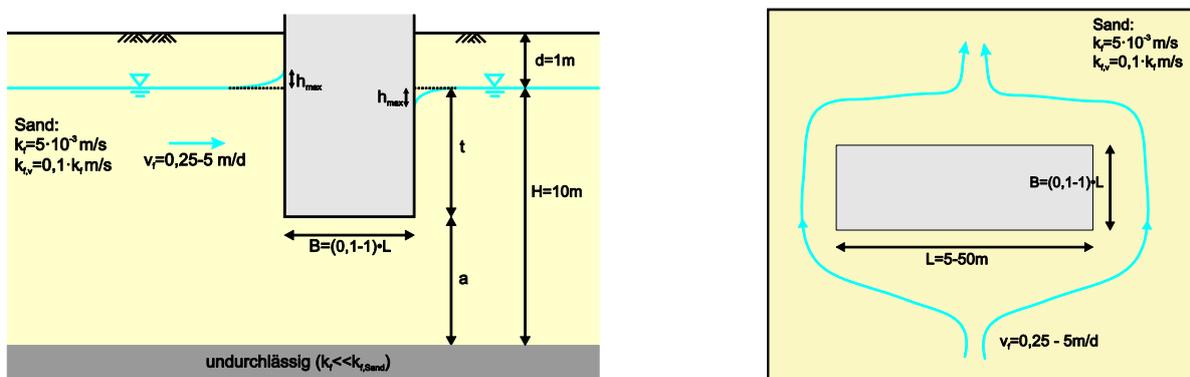


Abbildung 3-1: System zur Betrachtung von Aufstauereffekten (links: Schnitt; rechts: Draufsicht)

Nach [Sch1983a] kann die Aufstauhöhe für eine „reine Umströmung“ (d.h. das Bauteil bindet in den Grundwasserstauer ein) und eine „reine Unterströmung“ (d.h. eine horizontale Umströmung des Bauteils ist verhindert) getrennt berechnet werden. Die resultierende Aufstauhöhe aus gleichzeitiger Unter- und Umströmung kann dann über die Widerstandsanalogie (Parallelschaltung von Widerständen) abgebildet werden [Sch1983b]:

$$h_{max} = \frac{1}{\frac{1}{h_{um}} + \frac{1}{h_{unter}}} \quad (3-1)$$

Der maximale Aufstau infolge einer reinen Umströmung eines Bauteils kann vereinfacht nach Gleichung (3-2) berechnet werden [Sch1995]. Bei senkrecht angeströmten Bauteilen befindet sich dieser in der Mitte der durch die Strömung beaufschlagten Seite.

$$h_{um} = i \cdot x_0 = i \cdot \frac{L}{\sqrt{\pi}} = \frac{v_f}{k_f} \cdot \frac{L}{\sqrt{\pi}} \quad (3-2)$$

Darin beschreibt x_0 die Achse eines ellipsoiden Ersatzkörpers, der sich aus der flächengleichen Umrechnung aus einem rechteckigen Bauteils mit der Länge L [m] und der Breite B [m] ergibt. Das Grundwassergefälle i [-] für eine gegebene Grundwassergeschwindigkeit v_f [m/d] kann nach dem Gesetz von Darcy aus dem Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens k_f [m/s] ermittelt werden.

Aus Gleichung (3-2) ergibt sich somit, dass für den Aufstau in Folge einer Umströmung nur die Bauteilbreite maßgebend ist, auf der die Strömung gestört wird. Die Erstreckung des Bauteils in Strömungsrichtung ist vernachlässigbar [Sch1995].

Der maximale Aufstau infolge einer reinen Unterströmung des Bauteils berechnet sich durch Überlagerung des Aufstaus infolge Anströmung und infolge der Durchleitung unter dem Bauteil [Sch1983a]:

$$h_{unter} = \pm \left(\frac{i \cdot 2H \cdot k_f}{\pi \cdot k_{f,0}} \cdot \ln \left(\sin \left(\frac{\pi \cdot a}{2(H + h_{0,B} + h_B)} \right) \right) + h_B \right) \quad (3-3)$$

Negative Wasserspiegeldifferenzen werden dabei als Aufstau, positive als Sunk definiert. Weiterhin ist $k_{f,0}$ [m/s] der „strömungsbeeinflusste“ Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens, der kleiner ist als der ungestörte Durchlässigkeitsbeiwert k_f . Als unteren Grenzwert kann der vertikale Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,v}$ verwendet werden [Sch1983a]. Dieser kann zu $k_{f,v} = 0,5 - 0,1 \cdot k_{f,h}$ angenommen werden [Od2009]. Der Aufstau aus Durchleitung h_B [m] berechnet sich nach Gleichung (3-4) [Sch1982]:

$$h_B = i \cdot \left(\frac{H \cdot k_f}{a \cdot k_{f,B}} - 1 \right) \cdot \frac{B}{2} \quad [m] \quad (3-4)$$

Die Anhebung $h_{0,B}$ [m] wird iterativ mit folgender Gleichung bestimmt:

$$h_{0,B} = \pm \frac{i \cdot 2H \cdot k_f}{\pi \cdot k_{f,0}} \cdot \ln \left(\frac{1 + \cos \left(\frac{\pi \cdot a}{2(H + h_{0,B} + h_B)} \right)}{\sin \left(\frac{\pi \cdot a}{2(H + h_{0,B} + h_B)} \right)} \right) \quad (3-5)$$

Aus den Gleichungen (3-3) bis (3-5) wird deutlich, dass Aufstau in Folge Unterströmung neben der Fließgeschwindigkeit im Wesentlichen vom Restfließquerschnitt a [m] unter dem Bauteil und der Bauteilbreite B beeinflusst wird.

3.2 Ergebnisse der Parameterstudie

3.2.1 Einflussfaktoren auf die Aufstauhöhe

Zur Ermittlung der maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aufstauhöhe bei senkrecht angeströmten rechteckigen Bauwerken wurden zunächst die Situationen „reine Umströmung“ und „reine Unterströmung“ betrachtet, um eine Überlagerung von Effekten zu vermeiden. Die für die Parameterstudie gewählten Bauteilabmessungen sowie die hydrogeologischen Verhältnisse sind Abbildung 3-1 zu entnehmen.

Bei einer reinen Umströmung besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Aufstauhöhe und der Fließgeschwindigkeit (vgl. Gleichung (3-2)), wobei die Steigung der Geraden mit steigender Bauteillänge zunimmt (vgl. Abbildung 3-2). Für die Berechnung des Aufstaus infolge einer reinen Unterströmung ist die Anisotropie von Bedeutung. Eine kleine vertikale Durchlässigkeit führt zu einem großen Aufstau (vgl. Gleichung (3-3) bis (3-5)). Für die Berechnungen wurde daher das minimale Verhältnis von $k_{f,v} = 0,1 \cdot k_f$ angenommen. Der Aufstau wurde für verschiedene Bauteillängen und -breiten (bei gleichbleibendem B/L-Verhältnis), verschiedene Geschwindigkeiten und Restfließquerschnitte berechnet. Für ausgewählte Situationen werden die Ergebnisse in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 exemplarisch dargestellt. Die weiteren Ergebnisse zeigen dieselben Tendenzen, sodass auf ihre Darstellung verzichtet wird.

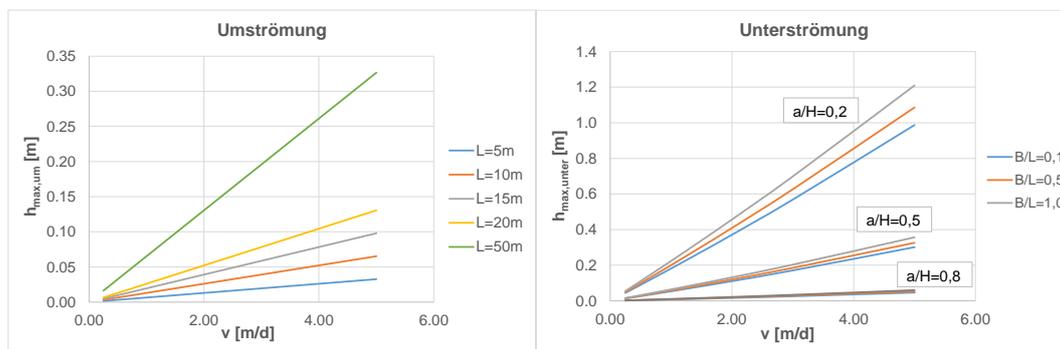


Abbildung 3-2: Aufstauhöhe aus Um- und Unterströmung infolge der Fließgeschwindigkeit

Prinzipiell steigt der Aufstau mit steigender Geschwindigkeit nahezu linear an. Der Effekt wird durch einen kleinen Restfließquerschnitt noch verstärkt. Der Einfluss des verbleibenden Restfließquerschnitts zeigt einen konvexen Verlauf, sodass vor allem kleine Restfließquerschnitte

zu einer deutlichen Vergrößerung des Aufstaus führen (vgl. Abbildung 3-3, links). Der Einfluss der Bauteilbreite ist nur für hohe Fließgeschwindigkeiten relevant (vgl. Abbildung 3-3, rechts).

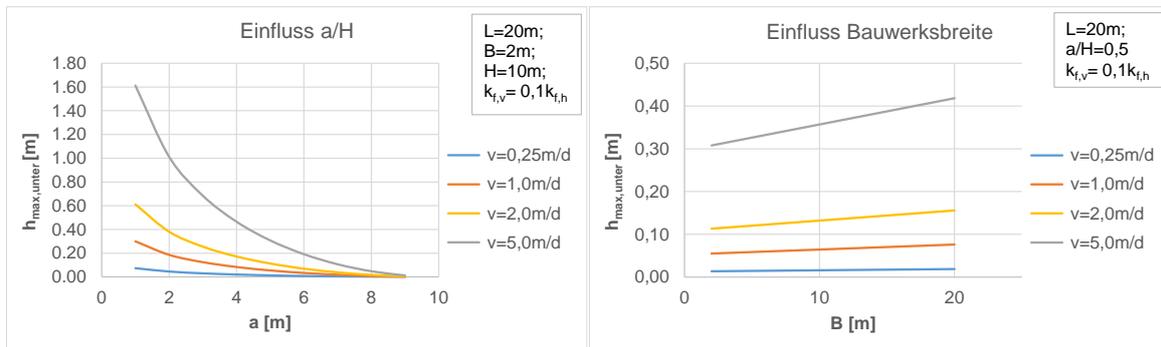


Abbildung 3-3: Aufstauhöhe aus Unterströmung infolge des Restfließquerschnitts (links) und der Bauteilbreite (rechts)

Ein Vergleich der absoluten Aufstauhöhen aus Unter- und Umströmung zeigt, dass die Werte für eine reine Unterströmung deutlich über denen für eine reine Umströmung liegen. In der Realität findet jedoch meistens eine kombinierte Um- und Unterströmung statt, die mathematisch über eine Parallelschaltung von Widerständen beschrieben werden kann (vgl. Gleichung (3-1)). Abbildung 3-4 zeigt die resultierenden Aufstauhöhen infolge einer kombinierten Um- und Unterströmung in Abhängigkeit des Restfließquerschnitts und der Bauteillänge. Ein Vergleich von Abbildung 3-3 mit Abbildung 3-4 zeigt, dass die absoluten Aufstauhöhen durch die zusätzliche Umströmung deutlich reduziert werden. Der Einfluss des Restfließquerschnitts zeigt nun einen konkaven Verlauf, was ebenfalls auf den zusätzlichen Einfluss aus der Umströmung zurückzuführen ist.

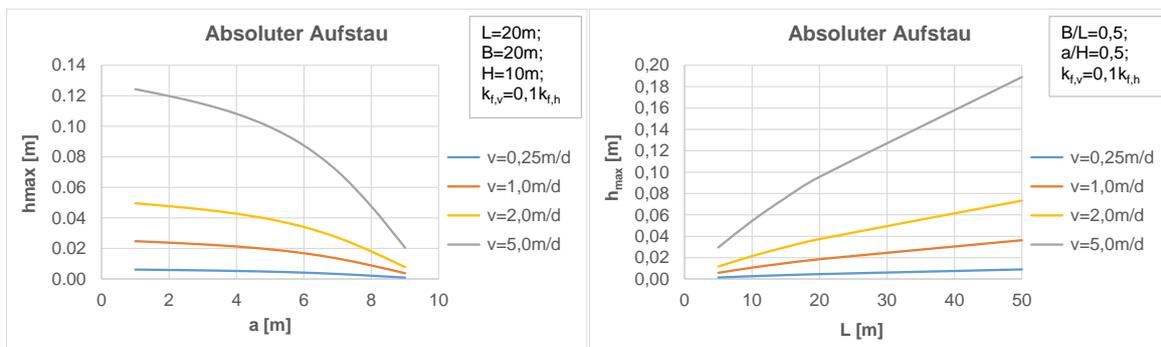


Abbildung 3-4: Absolute Aufstauhöhe in Abhängigkeit des Restfließquerschnitts (links) und der Bauteillänge (rechts)

Der Einfluss der Bauteillänge ist durch die Überlagerung von Unter- und Überströmung nicht mehr linear, sondern zeigt ebenfalls einen leicht konkaven Verlauf und die Steigerung des Aufstaus nimmt mit größerer Länge ab. Der Einfluss der Bauteilgeometrie (vgl. Abbildung 3-5) wird im Gegensatz zu einer reinen Unterströmung vor allem für große Restfließquerschnitte relevant während er für kleine Restfließquerschnitte verschwindend gering ist.

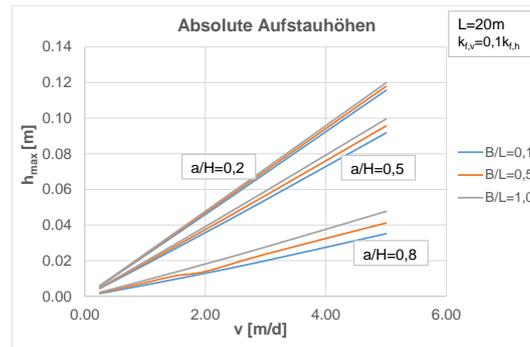


Abbildung 3-5: Absolute Aufstauhöhe in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie, des Restfließquerschnitts und der Fließgeschwindigkeit

3.2.2 Bewertung der Vergrößerung der Aufstauhöhe infolge einer gezielten Grundwassersteuerung

Ziel des Projekts ist die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit am Bauteil durch eine gezielte Grundwassersteuerung, durch die auch eine Vergrößerung der Aufstauhöhe stattfindet (vgl. Kapitel 3.2.1). Zur Bewertung der Auswirkungen der Grundwassersteuerung auf das Bauteil bzw. die Umgebung sind die absoluten Aufstauhöhen relevant. Dabei ist im Besonderen der Differenzaufstau zwischen natürlicher und der erhöhter Grundwassergeschwindigkeit zu beachten, da eine Bemessung des Bauteils ohnehin für die natürliche Grundwassergeschwindigkeit vorgenommen werden muss.

Der Fokus des Projekts liegt auf thermo-aktiven Abdichtungselementen, die ihren bevorzugten Einsatzbereich im strömenden Grundwasser haben. Als Ausgangssituation wird daher eine natürliche Grundwasserströmung von 0,25 m/d zu Grunde gelegt. Die maximal betrachtete Strömungsgeschwindigkeit liegt bei 5 m/d. Diese Geschwindigkeiten können als Extremwerte angesehen werden. Darüber hinaus wird durch die geplante FuG-Konstruktion nur eine lokale Geschwindigkeitserhöhung erreicht. Hinter der Konstruktion stellt sich wieder das natürliche Geschwindigkeitsfeld ein (s. Kapitel 5.2).

Zur Beurteilung der Auswirkungen von Aufstau und Sunk werden die maximalen Bauteilabmessungen der Parameterstudie verwendet, da diese die größte Wasserspiegeldifferenz hervorrufen. Darüber hinaus werden verschiedene Wandhöhen (bzw. Restfließquerschnitte) betrachtet, weil der resultierende Wasser- und Erddruck von der Wandhöhe abhängt. Durch den Aufstau wird der Wasserdruck auf die Wand erhöht, während sich der Erddruck reduziert, da der Boden jetzt über eine größere Höhe unter Auftrieb steht. Die für die Berechnung gewählten Untergrundparameter sowie die jeweiligen Verläufe des Erd- und Wasserdrucks in Abhängigkeit des Aufstaus sind exemplarisch in Abbildung 3-6 dargestellt. Auf der sicheren Seite liegend wurde in den Berechnungen der Erddruck angesetzt, da eine Verschiebung der Wand bei thermo-aktiven Betonbauteilen als vernachlässigbar angesehen werden kann. Einzelheiten zur Berechnung sowie eine Ergebnisübersicht sind im Anhang dargestellt.

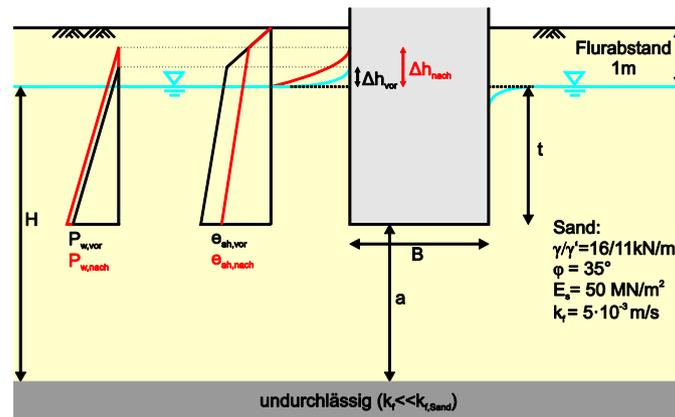


Abbildung 3-6: Belastung auf ein Bauteil infolge einer erhöhten Grundwassergeschwindigkeit

Die maximalen Setzungen durch eine Grundwassersteuerung betragen für die betrachteten Situationen maximal 0,3 mm und sind somit vernachlässigbar. Bei Berücksichtigung des Sicherheitskonzepts von EC 7-1 bzw. DIN 1054:2010 beträgt die maximale Erhöhung der Belastung auf die Wand 4 %. Dies ist ebenfalls sehr gering, zumal die Erhöhung im Punkt des maximalen Aufstaus nur lokal vorhanden ist. Über die Wand verteilt ist die Erhöhung des Aufstaus und damit der Belastung geringer, sodass durch eine Grundwassersteuerung keine negativen Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Konstruktion zu erwarten sind. Im Projektverlauf wurde daher auf die weitere Betrachtung von Aufstauereffekten verzichtet. In der praktischen Ausführung ist jedoch zu beachten, dass das Bauwerk über eine ausreichende Höhe (inklusive des zusätzlichen Aufstaus) abgedichtet sein muss, um eine Durchfeuchtung der Räume zu vermeiden.

4 Ausbreitung von Temperaturfahnen im Untergrund

4.1 Allgemeines

Die positiven Auswirkungen einer Grundwasserströmung auf Erdwärmesonden wurden in neuerer Zeit durch verschiedene (numerische) Untersuchungen gezeigt (z.B. [Ch2000], [Le2007], [Ba2011]). Demnach ist eine deutliche Leistungssteigerung möglich, wenn eine Grundwasserströmung vorliegt. Neben dem Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Anlage ist jedoch auch die Auswirkung auf die Temperaturverteilung im Untergrund zu beachten.

Durch den Einsatz oberflächennaher geothermischer Anlagen kommt es infolge des Wärmeentzugs bzw. -eintrags zu lokalen Veränderungen der Untergrundtemperatur und es entstehen sogenannte Temperaturfahnen. Bei der thermischen Nutzung des Untergrunds ist generell zu gewährleisten, dass kein negativer Einfluss auf den Untergrund und das Grundwasser erfolgt (VDI 4640-1:2010). Die entstehende Temperaturfahne darf daher nur einen räumlich begrenzten Umfang aufweisen, um eine ausreichende Regeneration des Untergrunds zu gewährleisten und eine Beeinflussung benachbarter Anlagen zu vermeiden. Die Genehmigung von geothermischen Anlagen ist in Deutschland Sache der Bundesländer, die die Einhaltung einer maximalen Ausbreitung der Temperaturfahne in der Praxis oft durch die Vorgabe von

Mindestabständen zwischen benachbarten Sonden bzw. zur Grundstücksgrenze regeln. In der Regel werden dafür pauschal 5 - 10 m veranschlagt. Einige Bundesländer, wie z.B. NRW, geben jedoch keine konkreten Mindestabstände vor [Hä2010].

In Folge einer Grundwasserströmung breitet sich die Temperaturfahne in Strömungsrichtung aus. Die Größe der Ausbreitung ist dabei von den hydrogeologischen Untergrundeigenschaften (Fließgeschwindigkeit, Fließrichtung, Bodenart, etc.) abhängig. Die Fließgeschwindigkeit als maßgebende Größe steuert die Ausbreitung der abgekühlten und gleichzeitig die Nachlieferung warmer Wassermassen. Sobald ein Gleichgewicht zwischen Wärmezug und natürlichem Wärmeausgleich besteht stellt sich ein stationärer Zustand ein und die Temperaturfahne breitet sich nicht weiter aus. Untersuchungen von [Pa2006] oder [Hä2010] zeigen, dass vor allem bei geringen Fließgeschwindigkeiten die Temperaturfahnen infolge eines Wärmetzugs mittels Erdwärmesonden deutlich größer sein können als der geforderte Mindestabstand von 5 - 10 m. Mit steigender Fließgeschwindigkeit nimmt bei gleicher Entzugsleistung die Größe der Temperaturfahne ab [Pa2006], sodass eine erhöhte Fließgeschwindigkeit aus genehmigungsrechtlicher Sicht grundsätzlich zu befürworten ist.

Untersuchungen zur Ausbreitung von Temperaturfahnen bei flächigen thermo-aktiven Bauteilen sind derzeit nicht bekannt. Daher wurde die Bedeutung der Temperaturfahnenausbreitung in Zusammenhang mit einer Grundwassersteuerung im Projekt in numerischen Simulationen untersucht.

4.2 Wärmetransport im Boden und die Bedeutung thermischer Dispersion

Natürlich gewachsener Boden kann als Mehrphasensystem aus der Kornfraktion, dem Porenwasser und der Porenluft angesehen werden. Die maßgebenden thermischen Eigenschaften zur Beschreibung des Wärmetransports im Untergrund sind die Wärmeleitfähigkeit λ_B [W/(mK)] und die Wärmekapazität $c_{v,B}$ [J/(m³K)], die als eine über den Porenraum gemittelte Größe approximiert werden können [Fa1986]. Im Untergrund dominiert in der Regel der Wärmetransport durch Wärmeleitung [Fa1986]. Wenn eine Grundwasserströmung vorhanden ist, ist zusätzlich ein Wärmetransport durch Konvektion und ggf. durch Dispersion zu beachten.

Die mathematische Beschreibung des Wärmetransports im Untergrund erfolgt im Allgemeinen über eine Differentialgleichung (DGL):

$$c_{v,B} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \cdot (\lambda_{B,i} + D_{m,i}) \right) - c_{v,w} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \cdot v_{f,i} \right) + Q \quad (4-1)$$

Darin bezeichnet D_m [m²/s] den Dispersionskoeffizienten, v_f [m/s] die Grundwassergeschwindigkeit und $c_{v,w}$ [J/(m³K)] die volumetrische Wärmekapazität des (Poren)Wassers. Der Quellterm Q [W/m³] berücksichtigt Wärmequellen oder -senken innerhalb des Bodenvolumens. Je nach Form der Wärmequelle (Punktquelle, Linienquelle, halbinendlicher Körper, etc.) existieren verschiedene semi-analytische Lösungen der Differentialgleichung (4-1). Eine genaue Lösung und ein größeres Anwendungsspektrum werden durch die Verwendung von numerischen Methoden erreicht. Im

Rahmen des Projekts wurde dafür das Programm SHEMAT [CI2003] bzw. SHEMAT-Suite [Ra2006] verwendet, welches die DGL mit Hilfe der Methode der Finite-Differenzen löst. Auf die Darstellung analytischer Lösungsansätze wird daher verzichtet.

Die Berücksichtigung thermischer Dispersion in der numerischen Berechnung geothermischer Fragestellungen ist umstritten. Die meisten Berechnungsansätze zur Lösung der Wärmetransportgleichung vernachlässigen Einflüsse durch thermische Dispersion und berücksichtigen ausschließlich die Wärmetransportmechanismen Konduktion und Konvektion. Gründe dafür sind die rechenintensive Berücksichtigung sowie zusätzlich erforderliche Feldversuche zur Bestimmung verlässlicher Werte für die Dispersivität.

Lange Zeit wurden Dispersionseffekte daher ausschließlich bei der Untersuchung des Feststofftransportes berücksichtigt. Die Dispersion beschreibt dabei die Verteilung bzw. Vermischung gleicher Inhaltsstoffe in bewegtem Porenwasser. Bei idealer Konvektion treibt eine Konzentrationsfront mit einer mittleren Abstandsgeschwindigkeit entlang gemittelter Bahnlinien über den kompletten Querschnitt einer Strömung. Unter Berücksichtigung tatsächlicher Fließwege weichen die Fließrichtungen von der Hauptachse einer Strömung ab. Ein heterogenes Geschwindigkeitsprofil kann zum einen innerhalb einer Pore aufgrund des Korngerüsts und variierenden Porengrößen (Mikroskala) entstehen. Zum anderen kann es durch unterschiedliche Bodenschichten und -eigenschaften innerhalb eines Aquifers (Makroskala) verursacht werden.

Wegen der ähnlichen Beschreibungen von Stoff- und Wärmetransport können analytische Lösungen zum Transport von Schadstoffen auch für den Wärmetransport verwendet werden (z.B. [Do1985], [Fr1979], [Wi1976]). Während sich Feststoffe jedoch einzig über den Porenraum bewegen, erfolgt der Wärmetransport zusätzlich über Wärmeleitung durch die Kornfraktion. Der Feststofftransport kann daher lediglich als Referenzgröße dienen. In Anlehnung an die Berücksichtigung thermischer Dispersion beim Feststofftransport führten [Sa1982] einen thermischen Dispersionskoeffizienten λ_D ein. Dieser ist eine physikalische Größe, die die Heterogenität des Untergrundes charakterisiert und einen Zusammenhang zwischen der Größe einer scheinbaren Wärmeleitfähigkeit und der Grundwasserströmung herstellt. Aus der Summe der Leitfähigkeit des Untergrundes und des Dispersionskoeffizienten wird eine effektive Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung (4-2) ermittelt.

$$\lambda_x = \lambda_B + \lambda_D = \lambda_B + \alpha \cdot \rho_w \cdot c_{v,w} \cdot v_f \quad (4-2)$$

Der Dispersionskoeffizient wird darin durch eine lineare Funktion der Dispersivität α [m], der Dichte des Wassers ρ_w [kg/m³] und der Grundwassergeschwindigkeit v_f [m/s] abgebildet. Andere vergleichbare Formulierungen sind in der Literatur zu finden [Fe2007].

Die Größe der Dispersion ist von der Richtung relativ zur Hauptströmungsrichtung abhängig. In einer zweidimensionalen Betrachtung, wird dies durch die Unterscheidung zwischen einem longitudinalen und einem transversalen Dispersionskoeffizienten berücksichtigt. Für das Verhältnis zwischen longitudinalem und transversalem Koeffizienten kann auch für den Wärmetransport ein Verhältnis von 1/10 angenommen werden [Sm1983]. Für die Bestimmung der Dispersivität ist wiederum die Größe des Betrachtungsraumes von Bedeutung. Studien wie von [Ge1992] zeigen, dass

geologische Strukturen großen Schwankungen unterworfen sind, was zu unterschiedlichen repräsentativen Werten für die Dispersivität führt. Je kleinskaliger die Untersuchungen zur Bestimmung der Dispersivität durchgeführt werden, desto geringer sind Standardabweichungen von angenommenen Bodeneigenschaften, da bei größeren Betrachtungsräumen die Wahrscheinlichkeit auf Heterogenität im Untergrund zu treffen zunimmt. Die verlässliche Bestimmung der Dispersivität ist somit die größte Herausforderung in der Berücksichtigung thermischer Dispersion.

Eine Bewertung des Einflusses thermischer Dispersion auf die Ausbildung von Temperaturfahnen erfolgte z.B. durch Untersuchungen von [MG2011] oder [Fe2007]. Diese zeigen, dass sich Unterschiede hinsichtlich der Berechnung der Ausbreitung von Temperaturfahnen ergeben, je nachdem ob Dispersionseffekte berücksichtigt bzw. vernachlässigt werden. Während unter transienten Bedingungen die longitudinale Dispersion für ein Vorseilen der Temperaturfront und damit für eine schnellere Ausbreitung der Temperaturfahne sorgt, ist unter stationären Bedingungen vor allem die transversale Dispersion von Bedeutung. Eine Ausbreitung in transversaler Richtung sorgt für eine stärkere Durchmischung mit wärmeren Wassermassen. Infolgedessen nimmt die Ausdehnung der Temperaturfahne im stationären Zustand in longitudinaler Richtung ab. Für eine grobe Betrachtung der Transportvorgänge im Boden ist es somit zweckentsprechend von idealtypischer Konvektion auszugehen und Dispersionseffekte zu vernachlässigen. Beim Versuch einer detailgetreuen Abbildung ist eine Berücksichtigung von Dispersionseffekten jedoch unerlässlich ([MG2011], [Fe2007]).

4.3 Untersuchungen zur Ausbreitung von Temperaturfahnen

Zur Berechnung der Ausdehnung von Temperaturfahnen können analytische und numerische Methoden angewendet werden. Die analytische Berechnung von Temperaturfahnen kann ebenfalls in Analogie zu Ansätzen zum Schadstofftransport erfolgen [Hä2010]. Zur Bestimmung der zeitlichen Ausbreitung der Temperaturfahne existieren in diesem Zusammenhang verschiedene Ansätze, die auch den Einfluss thermischer Dispersion berücksichtigen (z.B. [Do1985], [MG2011]). Diese können die realen Verhältnisse bei thermo-aktiven Bauteilen jedoch nicht hinreichend genau abbilden. Zum einen weist die Wärmequelle in den analytischen Ansätzen dasselbe Material wie der Untergrund auf und ist damit „durchströmbar“. Zum anderen wird die Quelle als Fläche ohne Bauteildicke abgebildet, weshalb der Einfluss des undurchlässigen Bauteils nicht abgebildet werden kann. Eine genaue Abschätzung der Ausbreitung von Temperaturfahnen in Folge der thermischen Nutzung des Untergrundes mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen erfordert daher die Anwendung numerischer Simulationen. Auf die analytischen Ansätze soll daher an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

4.3.1 Numerische Umsetzung thermischer Dispersion

Zur Berechnung der Ausdehnung von Temperaturfahnen wurden numerische Simulationen mit SHEMAT-Suite durchgeführt. Die thermische Dispersion wird bei der Lösung der Wärmetransportgleichung in SHEMAT jedoch vernachlässigt [Mo2012]. Um den Einfluss

thermischer Dispersion numerisch berücksichtigen zu können, wurde ein Ansatz zur Berechnung thermischer Dispersion implementiert. Dabei wurde die Berücksichtigung von Dispersionseffekten über die Berechnung einer effektiven Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung (4-2) von [Sa1982] angewendet.

In SHEMAT-Suite wird die Wärmeleitfähigkeit jeder Zelle in Abhängigkeit der Temperatur T [°C] und des Porenanteils n [-] über das geometrische Mittel zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Kornfraktion des Bodens λ_s [W/(mK)] und der des Grundwassers λ_w [W/(mK)] nach Gleichung (4-3) berechnet.

$$\lambda_B = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_w^n \quad (4-3)$$

Die Berechnung erfolgt im globalen Koordinatensystem getrennt für alle Raumrichtungen und kann in Anlehnung an Gleichung (4-2) um den Dispersionskoeffizienten erweitert werden. In einer zweidimensionalen Betrachtung kann die Wärmeleitfähigkeit dann über

$$\lambda_x = \lambda_B + \lambda_{d,x} = \lambda_B + \alpha_x \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot v_f \quad (4-4)$$

$$\lambda_y = \lambda_B + \lambda_{d,y} = \lambda_B + \alpha_y \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot v_f \quad (4-5)$$

berechnet werden. Im Gegensatz zur Umströmung einer Erdwärmesonde bei der aufgrund des geringen Durchmessers keine großen Abweichungen von einer definierten Hauptströmungsrichtung entstehen, kommt es in Folge der Umströmung eines thermo-aktiven Bauteils bzw. einer FuG-Konstruktion zu Abweichungen von einer Hauptströmungsrichtung. Die Ermittlung des strömungsabhängigen Dispersionskoeffizienten erfordert daher die Bestimmung einer longitudinalen Hauptströmungsrichtung v_L [m/s] (vgl. Abbildung 4-1) über

$$v_L = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (4-6)$$

erforderlich. Darin sind v_x [m/s] und v_y [m/s] die Vektoren der Strömung in beide Raumrichtungen.

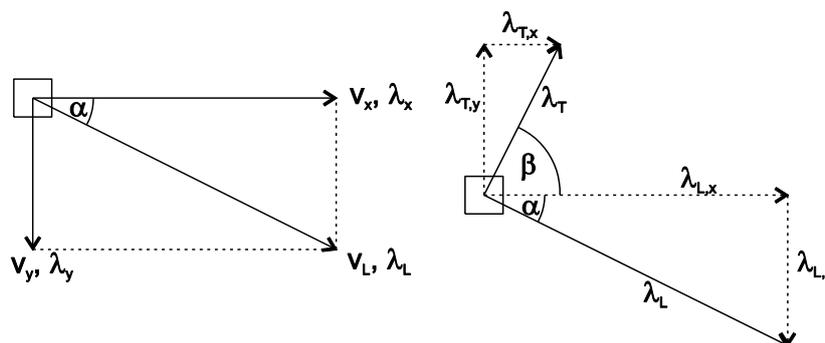


Abbildung 4-1: Schema der numerischen Umsetzung thermischer Dispersion

Das globale Koordinatensystem kann anschließend in Richtung der longitudinalen Strömungsrichtung gedreht werden. Die Berechnung der longitudinalen Wärmeleitfähigkeit λ_L und der transversalen Wärmeleitfähigkeit λ_T im lokalen Koordinatensystem erfolgt anschließend über die Gleichungen

$$\lambda_L = \lambda_B + \lambda_{d,L} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_F^n + \alpha_L \cdot \rho_F \cdot c_F \cdot v_L \quad (4-7)$$

$$\lambda_T = \lambda_B + \lambda_{d,T} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_F^n + \alpha_T \cdot \rho_F \cdot c_F \cdot v_L \quad (4-8)$$

Die nach den Gleichungen (4-7) und (4-8) ermittelten effektiven Leitfähigkeiten werden anschließend über die Gleichungen (4-9) und (4-10).

$$\lambda_x = \lambda_L \cdot \cos \alpha + \lambda_T \cdot \cos \beta \quad (4-9)$$

$$\lambda_y = \lambda_L \cdot \sin \alpha + \lambda_T \cdot \sin \beta \quad (4-10)$$

wieder auf das globale Koordinatensystem bezogen. Darin beschreiben α und β die Orientierung der longitudinalen und transversalen Vektoren, die mit den Gleichungen

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{v_x}{v_L} \quad (4-11)$$

$$\beta = 90 - \alpha \quad (4-12)$$

berechnet werden. Die beschriebene Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit erfolgt ausschließlich für durchlässige Bereiche. Für undurchlässige Bereiche wie Beton oder Sonden erfolgt weiterhin eine Berechnung über das geometrische Mittel.

4.3.2 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Für die numerischen Untersuchungen wurde ein in den Untergrund einbindendes Bauwerk mit den Abmessungen 5,0 m x 7,5 m betrachtet, welches mit Geschwindigkeiten bis 1,0 m/d umströmt wird. Als Untergrund wurde ein Sandboden angesetzt, der die in Abbildung 2-2 angegebenen Eigenschaften besitzt. An den Quer- und Längsseiten des Bauwerks wurden thermo-aktive Bauteile unterschiedlicher Breite modelliert. Da die Unterströmung des Bauteils keinen Einfluss auf die Ausbreitung der Temperaturfahnen hat, wurde ein zweidimensionales Modell verwendet. Die ungestörte Untergrundtemperatur wurde zu 10 °C gewählt. Als Grenzwert für die Ausbreitung der Temperaturfahne wurde eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 0,5$ K angesetzt. Diese liegt unterhalb der natürlichen Temperaturschwankungen im Tages- bzw. Jahresverlauf, sodass an dieser Stelle keine Beeinflussung des Untergrunds durch die Wärmequelle mehr unterstellt werden kann.

Bei flächigen Bauteilen beeinflusst die Strömungsrichtung maßgeblich die erzielbaren Entzugsleistungen und die Ausbreitung der Temperaturfahne. In Bereichen senkrechter Anströmung bildet sich infolge des Aufstaus eine „Totzone“ aus, sodass die Strömungsgeschwindigkeit an der Wand nahezu Null wird. Umgekehrt ist in Bereichen paralleler Strömung mit größeren Geschwindigkeiten zu rechnen. In diesen Bereichen wird schneller wärmeres Grundwasser nachgeliefert, weshalb in Bezug auf die Entzugsleistung eine Installation in Bereichen paralleler Anströmung zu bevorzugen ist [Kp2014]. Die Umströmung eines Bauwerks führt jedoch zu einer starken Durchmischung mit warmem Grundwasser und somit zu einer geringeren Ausbreitung der

Temperaturfahne. Daher ist für die Bewertung der Ausbreitung von Temperaturfahnen die Betrachtung einer parallelen Anströmung maßgebend.

Generell kann zwischen den Lastfällen „konstante Leistung“ und „konstante Temperatur“ unterschieden werden. Im Lastfall „konstante Leistung“ wird eine konstante Entzugsleistung vorgegeben und im Lastfall „konstante Temperatur“ eine konstante Quelltemperatur. In diesem Fall entspricht die konstante Quelltemperatur der Vorlauftemperatur. Im Lastfall „konstante Leistung“ wird bei steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit aufgrund des zusätzlichen konvektiven Wärmestroms eine geringere Quelltemperatur erforderlich, um die benötigte Leistung zu erzielen. Im Lastfall „konstante Temperatur“ steigt im Umkehrschluss mit der Geschwindigkeit die Leistung der Anlage. Die Temperaturfahne breitet sich jedoch deutlich weiter aus. In der Praxis wird i.d.R. in Abhängigkeit des Wärmebedarfs eines Gebäudes und der Arbeitszahl der Wärmepumpe eine erforderliche Energiemenge, die über das geothermische System bereitgestellt werden muss, ermittelt. Um die Vorgabe zu realisieren wird in Abhängigkeit der vorhandenen thermischen Randbedingungen die Vorlauftemperatur des Systems geregelt. Der Lastfall „konstante Leistung“ entspricht somit der Praxis und soll hier näher betrachtet werden.

Exemplarisch werden die Ergebnisse an einem parallel zur Anstromrichtung 2 m langen thermo-aktiven Bauteil unter paralleler Anströmung an der Längsseite des Bauwerks vorgestellt. Als konstante Leistung wurden 50 W/m^2 angesetzt, was einer charakteristischen Entzugsleistung für flächige thermo-aktive Bauteile entspricht. Abbildung 4-2 zeigt die longitudinale und transversale Ausbreitung der Temperaturfahne unter Einfluss der Grundwasserfließgeschwindigkeit im stationären Zustand, sowohl mit als auch ohne den Einfluss thermischer Dispersion. Als Dispersivität wurden für die theoretische Untersuchung die Werte 0,5 m und 1,0 m angesetzt. Ein stationärer Zustand stellte sich bei allen Fließgeschwindigkeiten spätestens nach 150 d ein. Während im Abstrom eine deutliche Ausbreitung der Temperaturfahne zu verzeichnen ist, ist der Einfluss auf den Anstrom vernachlässigbar und wird deshalb nicht dargestellt.

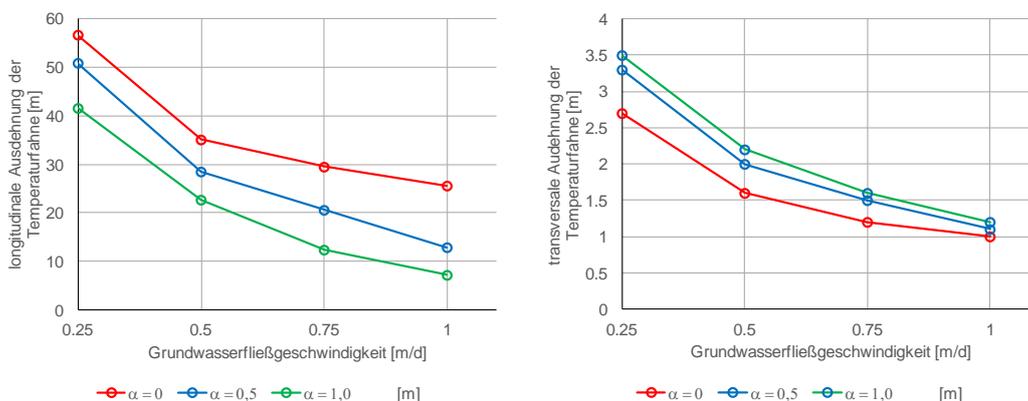


Abbildung 4-2: Temperaturfahnen in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit
links: longitudinale Ausbreitung; rechts: transversale Ausbreitung

Erwartungsgemäß nimmt die Ausbreitung der Temperaturfahne mit zunehmender Grundwasserströmung in longitudinaler und transversaler Richtung ab. Dies kann auf den Anstieg

der erforderlichen Quelltemperatur bei zunehmender Fließgeschwindigkeit des Grundwassers zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 4-3). Generell ist eine größere Fließgeschwindigkeit am Bauteil in Bezug auf die Ausbreitung der Temperaturfahne daher zu begrüßen. Durch die Installation einer FuG-Konstruktion wird die Geschwindigkeit am Bauteil lokal erhöht. Der konvektive Wärmetransport bewirkt einen Anstieg der Bodentemperatur im Kontaktbereich zwischen Bauteil und Untergrund. Infolgedessen steigt die erforderliche Quelltemperatur an und führt generell zu einer weiteren Reduzierung der Temperaturfahnenausbreitung.

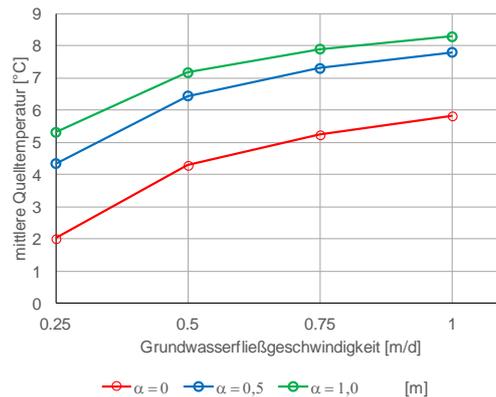


Abbildung 4-3: erforderliche Quelltemperatur in Abhängigkeit der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Durch die FuG-Konstruktion wird jedoch der Fließquerschnitt verengt und die Durchmischung mit dem vom Wärmeentzug unbeeinflussten Wassermassen im Abstrom der Konstruktion verhindert. Daher kann es in Abhängigkeit der Geometrie einer FuG-Konstruktion und den hydrogeologischen Randbedingungen zu einer Verlängerung der Temperaturfahnen kommen. Diese Auswirkungen könne in der Planungsphase durch numerische Simulationen untersucht und bei der Dimensionierung der Konstruktion berücksichtigt werden.

In Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 wird der Einfluss der thermischen Dispersion und im Besonderen der der angesetzten Dispersivität deutlich. Die Ausbreitung der Temperaturfahne in longitudinaler Richtung nimmt unter Berücksichtigung thermischer Dispersivität ab, während sie in transversaler Richtung zunimmt. Dies entspricht den Verhältnismäßigkeiten, die [MG2011] bereits für Erdwärmesonden festgestellt hat. Somit kann der in SHEMAT-Suite implementierte Ansatz im Grundsatz verifiziert werden. Der positive Effekt der thermischen Dispersion lässt sich mit der linearen Abhängigkeit des Dispersionskoeffizienten von der Grundwasserfließgeschwindigkeit erklären (vgl. Gleichung (4-2)). Ein Anstieg der Grundwasserfließgeschwindigkeit führt zu einem deutlichen Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Dieser wird durch eine größere Dispersivität noch verstärkt. Der konduktive Wärmetransport gewinnt an Bedeutung, weshalb unter Berücksichtigung thermischer Dispersion bei gleicher Grundwasserfließgeschwindigkeit die erforderliche Quelltemperatur steigt. Zusätzlich steigt mit der Dispersivität der transversale Wärmetransport. Infolgedessen nimmt die Ausbreitung der Temperaturfahne in transversaler Richtung zu und in longitudinaler Richtung ab.

4.4 Bewertung im Hinblick auf eine gezielte Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit

Ziel der FuG-Konstruktion ist eine lokale Erhöhung der Fließgeschwindigkeit am Bauteil zur Steigerung der Effizienz geothermischer Systeme. Die Effizienzsteigerung kann zum einen durch eine höhere Entzugsleistung oder zum anderen durch eine höhere Fluidtemperatur im Wärmeträgermedium erreicht werden. Neben dem Einfluss auf die Effizienz der Anlage wird durch die Erhöhung der Geschwindigkeit jedoch auch die sich einstellende Temperaturfahne beeinflusst. Unter der Annahme einer konstanten Leistung nimmt die Ausdehnung der Temperaturfahne bei steigender Grundwasserfließgeschwindigkeit ab. Die Vorgabe einer maximalen Ausdehnung von 5,0-10,0 m kann für das hier untersuchte Modell jedoch auch bei großen Fließgeschwindigkeiten nicht eingehalten werden. Die Installation einer FuG-Konstruktion kann zu einer Verlängerung der Temperaturfahne führen. Bei der Planung und Dimensionierung der Konstruktion ist die resultierende Geschwindigkeit am Bauteil daher so zu wählen, dass eine möglichst große Leistung bei maximal tolerierbarer Ausdehnung der Temperaturfahne aus genehmigungsrechtlicher Sicht erreicht wird.

Die Untersuchungen zeigen darüber hinaus, dass für eine Bewertung der Ausbreitung von Temperaturfahnen eine genaue Kenntnis der benötigten Entzugsleistung sowie der thermischen und hydrologischen Eigenschaften des Untergrundes erforderlich ist. Für eine genaue Beurteilung der Auswirkungen auf das Temperaturfeld sind anschließend numerische Simulationen erforderlich. Unter Berücksichtigung thermischer Dispersion wird durch den Ansatz nach [Sa1982] aufgrund erhöhter effektiver Wärmeleitfähigkeit eine geringere Ausbreitung der Temperaturfahne ermittelt. Werden Einflüsse thermischer Dispersion vernachlässigt führt dies im Endeffekt somit eher zu einer Überschätzung der Temperaturfahnen. Das primäre Ziel des Projekts ist die eine Steigerung der Entzugsleistung. Die Berücksichtigung thermischer Dispersion über den Ansatz nach [Sa1982] kann als Folge der erhöhten effektiven Wärmeleitfähigkeit zu einer Überschätzung der erzielbaren Leistungen führen. Im weiteren Verlauf wurde daher auf die Berücksichtigung thermischer Dispersion verzichtet. Für den Fall einer gezielten Untersuchung der Ausbreitung von Temperaturfahnen, sollten die Einflüsse thermischer Dispersion jedoch untersucht werden. In diesem Zusammenhang ist der gewählte Ansatz zu Berücksichtigung thermischer Dispersion gerade in Bezug auf die Auswirkungen auf die Entzugsleistung allerdings kritisch zu diskutieren.

5 Untersuchungen zur Funnelgeometrie

5.1 Allgemeines

Die gezielte Steuerung des Grundwassers mit Hilfe einer FuG-Konstruktion wird bislang vor allem zur Grundwasserreinigung eingesetzt. Auf Grund von Altlasten kontaminiertes Grundwasser wird dabei mit Hilfe von undurchlässigen Leitwänden, den sogenannten Funneln durch ein Gate geführt,

in dem Anlagen zur Wasseraufbereitung angeordnet sind (s. Abbildung 5-1). Bei den Funneln handelt es sich in der Regel um undurchlässige Dicht- oder Spundwände. Zu den Vorteilen der Konstruktion zählt, dass diese in das natürliche Gefälle einer Grundwasserströmung integriert werden kann und somit kein Pumpeneinsatz erforderlich ist. Nachteilig sind dagegen die hohen Installationskosten für die Funnel-Konstruktion und die Reinigungsanlagen [We2005]. Details zur Technologie sowie Beispiele ausgeführter Projekte können der Literatur entnommen werden (z.B. [Bi2004], [Eg2007], [We2005]).

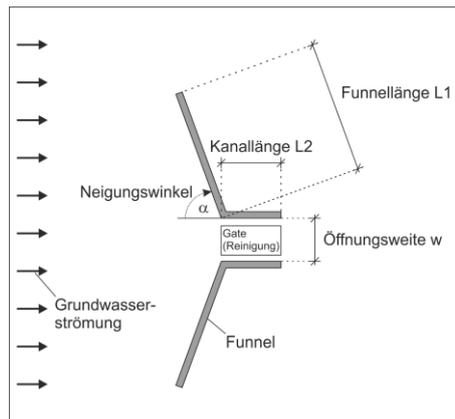


Abbildung 5-1: Funnel-and-Gate-Technologie

Durch das Einbringen einer FuG-Konstruktion werden dem Grundwasser Fließwege vorgegeben, die infolge der Querschnittsverengung im Gate zu erhöhten Fließgeschwindigkeiten führen. Bei einem Einsatz an geothermischen Anlagen kann die resultierende lokale Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit gezielt zur Steigerung der Entzugsleistung eingesetzt werden.

5.2 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Um durch eine FuG-Konstruktion eine Steigerung der Entzugsleistung thermo-aktiver Bauteile zu erzielen, muss eine optimale Anordnung der Leitwände ermittelt werden. Eine Abschätzung der Wirksamkeit kann dabei anhand der erzielbaren Geschwindigkeiten erfolgen, da in Abhängigkeit der Grundwasserströmung Wärme zur Entzugsstelle transportiert wird.

Zur Ermittlung der optimalen Geometrie wurden numerische Simulationen mit SHEMAT-Suite durchgeführt. Dabei wurden die Funnelneigung α [°], die Funnellänge $L1$ [m], die Öffnungsweite des Gates w [m] und die Kanallänge $L2$ [m] variiert (vgl. Abbildung 5-1) und deren Einfluss untersucht. Die FuG-Konstruktion wurde dabei zunächst als undurchlässige Dichtwand modelliert. Als Untergrund wurde ein homogener Sand mit einer Durchlässigkeit von $9,3 \cdot 10^{-5}$ m/s angesetzt. Dies entspricht den Eigenschaften des in den Laborversuchen eingesetzten Sandes. Die Erkenntnisse werden im Folgenden exemplarisch an repräsentativen Ergebnissen vorgestellt.

In der Literatur werden FuG-Konstruktionen meist in Form eines Trichters dargestellt. Eine Variation der Funnelneigung zeigt jedoch, dass bei Öffnung des Trichters die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gate ansteigt. Die maximale Geschwindigkeit wird bei einem Winkel

von $\alpha = 90^\circ$ und somit bei einer zur Strömung senkrechten Ausrichtung des Funnelements erreicht (Abbildung 5-2 links).

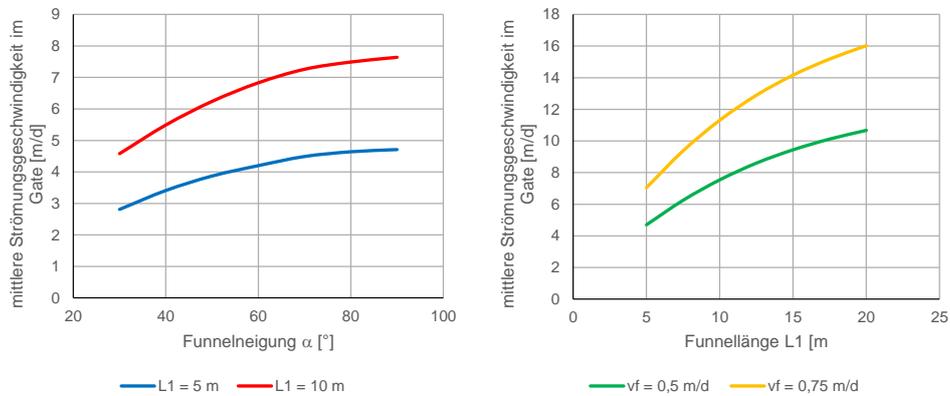


Abbildung 5-2: mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gate
links: infolge der Funnellänge α ($v_f = 0,5$ m/d); rechts: infolge der Funnellänge L_1 ($\alpha = 90^\circ$)

Im Bereich vor dem Funnelement kommt es aufgrund der Undurchlässigkeit zu einem Aufstau, infolgedessen die Fließwege der Grundwasserströmung umgeleitet werden. Mit abnehmender Neigung der Funnelemente verlagert sich dieser Bereich gegen die Strömungsrichtung. Die Geschwindigkeit im Gate wird daher maßgeblich durch die senkrechte Projektion des Funnels beeinflusst. Dies wird in Abbildung 5-2 links für einen im Winkel von 30° geneigten 10 m langen Funnel deutlich. Die zur Strömung senkrechte Projektion hat in diesem Fall eine Länge von 5 m weshalb die Geschwindigkeit im Gate identisch zu der eines um 90° geneigten und 5 m langen Funnels ist. Eine Vergrößerung der senkrecht zur Strömung installierten Funnellänge bewirkt folglich, dass ein größerer Teil des Grundwassers in Richtung Gate umgelenkt wird und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ansteigt (Abbildung 5-3 rechts).

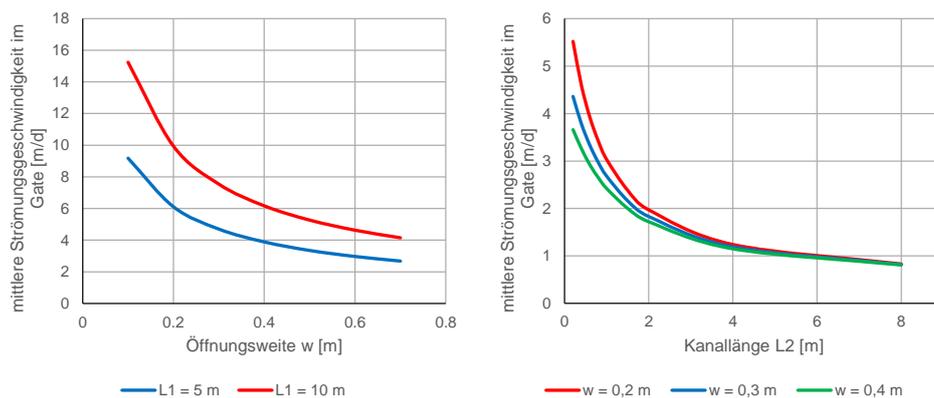


Abbildung 5-3: mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gate ($v_f = 0,5$ m/d, $\alpha = 90^\circ$);
links: infolge der Öffnungsweite w ; rechts: infolge der Kanallänge L_2

Während bei einer Verlängerung von 5 m auf 10 m ein Anstieg von ca. 50 % zu verzeichnen ist, steigt die Strömungsgeschwindigkeit bei einer weiteren Verdopplung nur noch um 30 %. Der positive Effekt eines längeren Funnels nimmt demnach mit steigender Funnellänge ab.

Die Öffnungsweite bestimmt, wie stark sich die Fließwege der Grundwasserströmung verdichten müssen, um das Gate zu durchströmen. Nach dem Gesetz der Kontinuität führt eine Verengung des Fließquerschnitts daher zu einer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit. Sehr kleine Öffnungsweiten bewirken einen überproportionalen Anstieg während bei einer Vergrößerung des Gates eine deutliche Abnahme der erzielbaren Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen ist (Abbildung 5-3 links).

Während in allen Simulationen im Bereich des Gates ein signifikanter Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten festgestellt werden kann, sinkt die Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar nach dem Gate schnell ab. Im Bereich des Gates ist die Strömung vergleichbar mit einer Rohrströmung und zeichnet sich durch annähernd parallele Stromlinien aus. Unmittelbar nach dem Gate weichen die Stromlinien von der parallelen Bahn ab, es kommt zu einer Aufweitung der Strömungspfade und einer Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit. In einem Abstand von ca. 1 m liegt daher nahezu die Anfangsgeschwindigkeit der Grundwasserströmung vor. Für die Anwendung im Bereich thermo-aktiver Bauteile kann es jedoch erforderlich sein, eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit nicht nur punktuell zu erzeugen, sondern entlang des Bauteils aufrecht zu erhalten. Dies kann mit Hilfe der Ausbildung eines Kanals in Form von zwei weiteren Leitwänden realisiert werden (vgl. Abbildung 5-1). Ähnlich zur Rohrströmung wird im Kanal ein nahezu konstantes Geschwindigkeitsprofil erzeugt. Die Untersuchungen zum Einfluss der Kanallänge zeigen jedoch, dass mit steigender Länge des Kanals die Geschwindigkeit abnimmt (Abbildung 5-3 rechts). Der Grund dafür ist der mit der Kanallänge steigende hydraulische Widerstand, der für die Durchströmung überwunden werden muss. Der Effekt einer großen Strömungsgeschwindigkeit infolge einer geringen Öffnungsweite wird bereits bei einer Kanallänge L_2 von 1 m um ca. 50 % reduziert. Zudem nimmt der Unterschied zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Öffnungsweiten ab und liegt bereits bei einer Länge von 2 m bei lediglich 5 %.

Im Projekt erfolgt die Steuerung des Grundwassers durch Injektionskörper, die im Gegensatz zu Dicht- oder Spundwänden nicht vollständig undurchlässig sind. Wird die Durchlässigkeit der Funnel größer kommt es nicht zu einer vollständigen Umströmung des Hindernisses und die Strömungsgeschwindigkeit im Gate nimmt ab. Untersuchungen zum Einfluss der Durchlässigkeit zeigen jedoch, dass bereits mit einer im Vergleich zum Boden um zwei Zehnerpotenzen geringeren Durchlässigkeit im Bereich des Gates eine signifikante Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit erzielt werden kann (Abbildung 5-4).

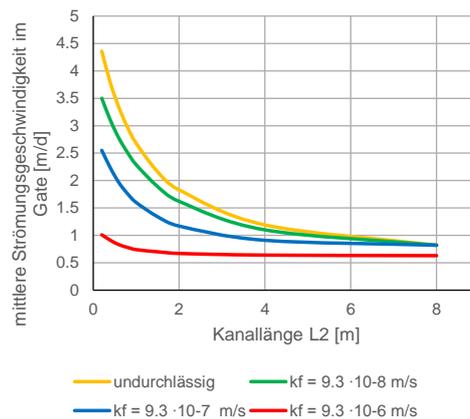


Abbildung 5-4: mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gate infolge der Kanallänge L_2 in Abhängigkeit der Durchlässigkeit der Funnel ($v_f = 0,5$ m/d, $\alpha = 90^\circ$)

5.3 Zusammenfassende Bewertung im Hinblick auf eine gezielte Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit

Die durchgeführten Untersuchungen zur Ausbildung der FuG-Konstruktion zeigen, dass für den Einsatz im Bereich geothermischer Anlagen eine gegenseitige Beeinflussung der Konstruktionselemente berücksichtigt werden muss. Neben einer zur Strömung senkrechten Anordnung der Funnelemente sind in diesem Zusammenhang vor allem die Öffnungsweite und die Länge des Kanals von Bedeutung. Dies konnte auch in Zusammenhang numerischer Simulationen zur Steigerung der Entzugsleistung unter Einfluss einer FuG-Konstruktion festgestellt werden. Eine abschließende Bewertung zur optimalen Funnelgeometrie erfolgt im Zusammenhang dieser energetischen Betrachtung (vgl. Kapitel 8).

Die durchgeführte Untersuchung beschränkte sich auf die Erzielung möglichst großer Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Gates. Bei der Dimensionierung der Konstruktion sind in der Praxis neben den in dieser Parameterstudie untersuchten noch weitere Einflussfaktoren wie das vorhandene Platzangebot sowie Toleranzen bei der Herstellung der Injektionskörper zu beachten.

6 Injektionskörper

6.1 Allgemeines

Für einen Einsatz als Leitwand in einer FuG-Konstruktion können eine geringe Durchlässigkeit sowie eine möglichst lagegenaue Installation als die maßgebenden Anforderungen für die Injektionskörper definiert werden. Für die Grundwassersteuerung ist dabei im Besonderen das Verhältnis der Durchlässigkeit der Injektionskörper zu der des Bodens entscheidend (vgl. Kapitel 5.2). Der Einsatz von Injektionskörpern der Firma Uretek wurde im Projekt daher auf diese Ziele hin untersucht.

Ursprünglich wird die Injektionstechnik von Uretek für Hebungsinjektionen, insbesondere bei der Sanierung von Setzungsschäden eingesetzt. Dazu wird ein Zweikomponenten-Kunstharzsystem,

bestehend aus einem Polyol (Alkoholkomponente) und einem Isocyanat (Härterkomponente), verwendet, welches in einer mobilen Mischanlage bereitgestellt wird. Die Komponenten werden in getrennten Schläuchen zum Einsatzort gepumpt, in der Injektionspistole mit konstantem Druck (ca. 3 - 5 bar) vermischt und durch Injektionslanzen in den Untergrund verpresst. Als Injektionslanzen werden i.d.R. Stahlrohre mit einem Durchmesser von 11 mm und einer Wandstärke von 1 mm eingesetzt. Die Komponenten reagieren sofort, wodurch das Harz im Boden expandiert und sich in Richtung des geringsten Widerstandes ausdehnt. Die entstehenden Expansionsdrücke verursachen ein Aufreißen des Bodens wodurch Hohlräume entstehen, die vom Injektionsmaterial aufgefüllt werden. Dies ermöglicht z.B. eine gezielte Anhebung von Bauwerken oder eine Hohlraumverfüllung. Die Expansionskraft ist dabei ausschließlich abhängig vom eingesetzten Injektionsmaterial, weshalb das „Aufsprengen“ des Bodens nicht durch den Injektionsdruck bestimmt wird. Das Expansionsverhalten kann über die chemische Zusammensetzung des Materials gesteuert werden. Diese beeinflusst die Reaktionstemperatur und damit die Viskosität und die Reaktionsgeschwindigkeit. Bei größeren Temperaturen ist das Material fließfähiger. Gleichzeitig wird die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht, wodurch das Injektionsmaterial schneller aushärtet. Der ausgehärtete Injektionskörper ist durch eine hohe Festigkeit und eine niedrige Durchlässigkeit gekennzeichnet. Zudem zeichnet er sich durch eine sehr gute Umweltverträglichkeit (vgl. Kapitel 2) sowie durch eine hohe Chemikalienbeständigkeit aus. Die Injektionskörper können demzufolge als langzeitbeständige Bauwerke angesehen werden und bieten sich für den Einsatz als Leitwand in einer FuG-Konstruktion an. Das Verfahren ist durch eine hohe Produktivität gekennzeichnet (10 - 15 laufende Meter im Grundriss bei 5 m Tiefe pro Tag). Injektionstiefen bis 5 m sind ohne Zusatzmaßnahmen machbar (Quelle: Uretek).

In einer Kooperation zwischen dem GiB und Uretek wurde die Anwendung der Injektionskörper bereits auf die Erschütterungsreduktion von Emissionen aus dem Schienenverkehr erweitert [Sad2008]. Dabei konnte unter anderem gezeigt werden, dass sich die Injektionskörper schnell einbringen lassen und somit auch für einen Einsatz im Bestand denkbar sind.

Um den Einsatz der Injektionstechnik der Firma Uretek für die Erstellung einer FuG-Konstruktion zu untersuchen, wurden Injektionsversuche im Labor und im Feld durchgeführt. Unter Berücksichtigung der formulierten Anforderungen ist ein Injektionsmaterial mit großer Expansionskraft und hoher Dichte erforderlich. Daher kamen in den Versuchen die Expansionsharze Resin 0975 und Resin 1735 zum Einsatz. Beide zeichnen sich durch eine sehr hohe Dichte und Festigkeit aus. Resin 0975 entwickelt freigeschäumt eine Dichte von 100 kg/m^3 und Resin 1735 eine Dichte von 50 kg/m^3 . Resin 1735 ist demnach das expansivere Injektionsmaterial. Im Untergrund ist die Dichte des Materials abhängig vom Widerstand auf den es bei der Expansion trifft. In Abhängigkeit des vorliegenden Spannungszustandes sind daher deutlich größere Dichten möglich. Dies ist vor allem an Unterschieden in der Farbe und der Struktur zu erkennen (vgl. Abbildung 6-1).

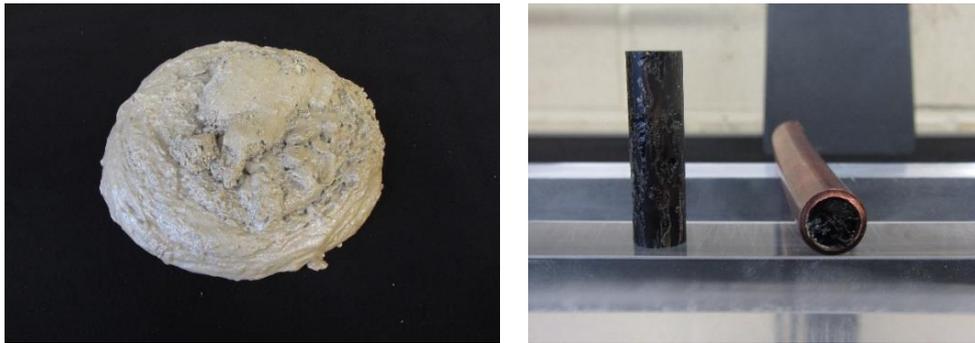


Abbildung 6-1: Ausgehärtetes Expansionsharz Resin 0975
links: freigeschäumt; rechts: unter Druck in der Injektionslanze ausgehärtet

Ein weiterer Unterschied zwischen den eingesetzten Harzen ist die Fließfähigkeit, die die Ausdehnung des Materials im Porenraum bzw. des aufgesprengten Boden beeinflusst. Resin 1735 hat eine längere offene Zeit und ist somit länger fließfähig.

Für den Einsatz in einer FuG-Konstruktion ist die Erstellung eines vertikalen Schlitzes (Dichtwand) erforderlich. Um die horizontale Ausbreitung des Injektionsmaterials zu begrenzen und eine Verbindung zwischen benachbarten Injektionskörpern zu schaffen, wurde das Injektionsverfahren daher angepasst. Zum einen wurde dafür ein enges Injektionsraster gewählt und zum anderen wurden die Injektionslanzen während der Injektion kontinuierlich gezogen.

6.1 Injektionsversuche im Labor

Der Spannungszustand im Untergrund beeinflusst das Expansionsverhalten und damit die Dichte des Injektionskörpers. In der Regel ist im Untergrund die vertikale Spannung größer als die horizontale Spannung. Für eine Ausbreitung des Injektionsmaterials in vertikaler Richtung ist demnach eine geringere Kraft erforderlich, da die geringeren horizontalen Spannungen einfacher überwunden werden können und sich somit ein Riss in vertikaler Richtung öffnet. Wird ein vollständig homogener Boden unter K_0 -Bedingungen vorausgesetzt, entstehen daher vertikale Injektionskörper. Unter Laborbedingungen ist es nur mit großem Aufwand möglich natürliche Randbedingungen zu simulieren. Zur Abschätzung des Expansionsverhaltens und zur Planung eines Großversuchs wurde daher zunächst ein Vorversuch in einer Plexiglastische mit den Abmessungen 0,8 m x 0,6 m x 0,6 m durchgeführt. Dabei wurde ein homogener Sand mit einer Trockendichte $\rho_s = 1,63 \text{ g/cm}^3$ und einer Durchlässigkeit von $k_{f,s} = 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ verwendet. Injiziert wurde durch eine mittig eingebrachte Injektionslanze. Als Injektionsmaterial wurde Resin 0975 eingesetzt. Während der Injektion zeigte sich, dass die Ausbreitung des Injektionsmaterials in diesem Maßstab und ohne entsprechende Auflast nicht zu kontrollieren war. Für einen Großversuch wurde daher eine Grube im Maßstab 2,91 m x 1,5 m x 2,44 m als Injektionsraum vorbereitet, die bis zu einer Höhe von 1,15 m mit Sand verfüllt wurde. Um im Labor einen vertikalen Schlitz zu erstellen, wurde in der Mitte des Versuchstandes eine Styrodurplatte (0,9 m x 0,05 m) eingebaut. In der Mitte der Platte wurde eine Injektionslanze so installiert, dass durch die Platte injiziert werden konnte und das Material während der Injektion unterhalb der Platte austrat. Die Styrodurplatte war in einem Stahlrahmen befestigt und

über eine Traverse mit einem Lastzug verbunden. Auf diese Weise konnte sie während der Injektion kontinuierlich aus dem Sandkörper gezogen werden. Dem Material wurde somit Expansionsraum zur Verfügung gestellt und die Richtung der Ausdehnung vorgegeben. Über Betonplatten auf der Sandoberfläche, wurde eine flächige Auflast als zusätzlicher Widerstand gegen die Ausbreitung des Materials aufgebracht. Eine seitliche Ausdehnung des Materials wurde über zwei an den Stirnseiten der Styrodurplatte eingebrachte Spundwandprofile verhindert (s. Abbildung 6-2 links). Eine detaillierte Konstruktionszeichnung kann dem Anhang entnommen werden. Im Anschluss an den Versuch wurde der Injektionskörper freigelegt.



Abbildung 6-2: Vorbereitung des Laborversuchs (links) und freigelegter Injektionskörper (rechts)

Durch den vorgegebenen Injektionsraum breitete sich das Injektionsmaterial wie geplant aus und hatte die Form eines schmalen vertikalen Injektionsschlitzes (s. Abbildung 6-2 rechts). Der Injektionskörper wurde in späteren Wärmeentzugsversuchen als in der FuG-Konstruktion eingesetzt (vgl. Kapitel 7.2).

Der erstellte Injektionskörper weist eine Sandwichstruktur auf. Im Kern besteht er aus reinem Injektionsmaterial höherer Dichte. Zum äußeren Rand nimmt die Dichte ab und der Körper besteht aus einem Gemisch aus Sand und Injektionsmaterial. Da eine kontrollierte Injektion im Labor nur unter den beschriebenen Randbedingungen möglich war, wurden weitere Versuche im Feld durchgeführt.

6.2 Injektionsversuche im Feld

Um das Injektionsverfahren und das Expansionsverhalten unter in-situ Bedingungen zu untersuchen wurden zwei Versuchsreihen in der Abbau- und Produktionsstätte der Willy-Dohmen GmbH Co. KG durchgeführt. Dort wurden dem Projektverbund Versuchsflächen für zwei Versuchsreihen zur Verfügung gestellt. Im Bereich der ersten Versuchsreihe waren oberflächennah anstehende ca. 5 m mächtige Auffüllung sowie die darunter anstehende bis zu 20 m mächtige sandige Kiesschicht bereits abgetragen. Die Injektionen wurden im unter der Kiesschicht anstehenden schluffigen Feinsand (S,u) durchgeführt. Aufgrund der früheren Auflast handelt es sich um einen sehr dicht gelagerten Feinsand. Im Bereich der zweiten Versuchsreihe wurde lediglich die oberflächennah

anstehende Auffüllung abgetragen. Die Injektion erfolgte demzufolge in den anstehenden sandigen Kies (G,s).

In der erste Versuchsreihe wurde die Erstellung von zwei Schlitzten mit den Abmessungen 2,0 m x 2,0 m x 0,1 m geplant (Abbildung 6-3).

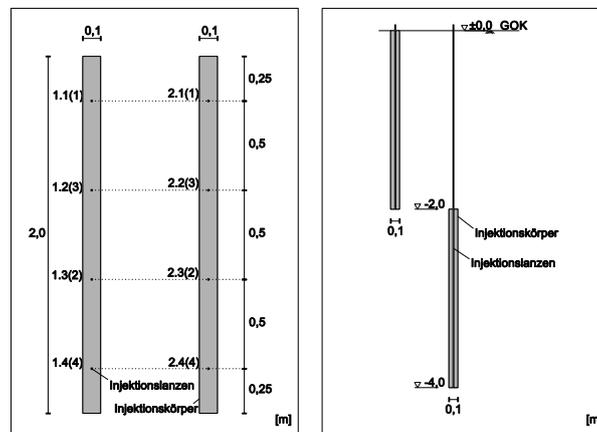


Abbildung 6-3: Geplante Injektionskörper der ersten Versuchsreihe im Feld
links: Grundriss; rechts: Schnitt

Der erste Schlitz wurde in einer Tiefe von -4 m bis -2,0 m unter der Geländeoberkante (GOK) und die zweite in einer Tiefe von -2 m unter GOK erstellt. Für die Injektion wurden jeweils vier Injektionslanzen in einem Abstand von 0,5 m abgeteuft. Um einen vertikalen Schlitz zu erstellen, wurden die Injektionslanzen während der Injektion kontinuierlich gezogen. Auf diese Weise sollten einzelne flächige Injektionskörper erstellt werden. Der Ablauf der Injektionen erfolgte im Pilgerschrittverfahren. Während der Injektion des ersten Schlitzes ließ sich an der GOK keine Veränderung feststellen. Bei der Injektion des zweiten Schlitzes trat das Injektionsmaterial an der Oberfläche am Rand der Injektionslanze aus. Die Lanzen konnten daher nur bis etwa -0,7 m unter GOK gezogen werden, da ab dieser Tiefe das Material nur noch an die Oberfläche strömte. Eine Erstellung oberflächennaher Schlitzte ist somit ohne zusätzliche Maßnahmen nicht möglich.

Zur Untersuchung der Injektionskörper wurden diese im Anschluss freigelegt. Es zeigte sich schnell, dass die Injektionskörper in beiden Versuchen aus sehr filigranen vertikalen Platten bestanden, die sich mit einer Dicke von ca. 1,5 cm bis ca. 4,0 cm axial um die Injektionslanze ausgebildet hatten (s. Abbildung 6-4). Die Entstehung derartiger Injektionskörper kann durch den großen Überlagerungsdruck und den nur geringen Expansionsraum im feinen Sand begründet werden. Die Richtung der Ausbreitung lag allerdings nicht in der geplanten Achse, sodass keine vollständige Verbindung zwischen den Injektionskörpern der einzelnen Lanzen festgestellt werden konnte.

Aufgrund der filigranen Struktur und der weiten Ausbreitung waren eine vollständige Freilegung der Injektionskörper sowie eine ungestörte Probenentnahme nicht möglich. Zur Probenentnahme mussten daher einzelne Plattenelemente aus dem Körper gebrochen werden. An diesen war die bereits in den Laborversuchen festgestellte Struktur der Injektionskörper erkennbar (s. Abbildung 6-4).



Abbildung 6-4: Freigelegter Injektionskörper der ersten Versuchsreihe

In der zweiten Versuchsreihe wurde ein im Vergleich zur ersten Versuchsreihe engeres Injektionsraster gewählt, um eine Verbindung zwischen den Injektionskörpern der einzelnen Lanzen zu gewährleisten. Die Lanzen wurden dafür in einem Abstand von 0,3 m bis auf eine Tiefe von 3,0 m abgeteuft (s. Abbildung 6-5).

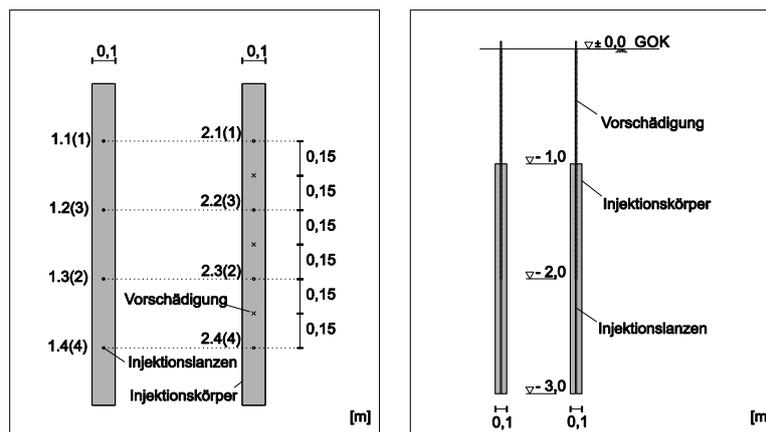


Abbildung 6-5: Geplante Injektionskörper der zweiten Versuchsreihe im Feld
links: Grundriss; rechts: Schnitt

Um einen Materialaustritt an der GOK zu verhindern, wurden die Injektionslanzen nur bis auf -1,0 m unter GOK gezogen. Es sollten somit Schlitz mit den Abmessungen 1,2 m x 2,0 m x 0,1 m erstellt werden. An zweiten Injektionsschlitz wurden zusätzlich Bohrungen zur Vorschädigung zwischen den Injektionslanzen abgeteuft. Damit sollte untersucht werden, ob dies die Ausbreitung der Injektion in der geplanten Achse begünstigen kann. Die Vorschädigung erfolgte nur bis in eine Tiefe von -2,0 m unter GOK, um einen direkten Materialaustritt zu verhindern. Für die Erstellung der Injektionskörper wurde in diesem Versuch das expansivere Harz Resin 1735 eingesetzt. Der sonstige Injektionsablauf erfolgte analog zur ersten Versuchsreihe.

Bei der Injektion des ersten Schlitzes entstanden Risse an der GOK zwischen den Injektionslanzen. Der Boden wurde somit in der geplanten Achse aufgesprengt, was auf das engere Injektionsraster zurückgeführt werden kann. Bei der Injektion des zweiten Schlitzes wurde zudem eine radiale Hebung der GOK um die Injektionslanzen festgestellt, was auf eine Säulenform der einzelnen

Injektionskörper schließen lässt. Während der Injektion in Lanze 2.3 trat Material durch die Vorschädigungsbohrungen an die GOK. Die Ausbreitung der Körper in der geplanten Richtung sowie die Wirksamkeit der Vorschädigungen wurden somit bestätigt.

Der Aushub des Injektionskörpers zeigte im Gegensatz zu den Injektionskörpern der ersten Versuchsreihe eine dichte Wand in der geplanten Achse. Die horizontale Ausbreitung variierte jedoch stark, sodass ein massiver bis zu einen Meter breiter Injektionskörper angetroffen wurde. Unterschiede in der Ausbreitung und Form beider Schlitze konnten nicht festgestellt werden. Im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe im Sand hatte der Injektionskörper eine zu Waschbeton ähnliche Struktur und bestand aus einem Materialmix aus Injektionsmittel und sandigem Kies (Abbildung 6-6).



Abbildung 6-6: Probe des Injektionskörpers der zweiten Versuchsreihe

Der Grund dafür ist, dass das Injektionsmaterial in den Porenraum geströmt ist und auf diese Weise den Untergrund verdichtet hat. Ein wirkliches „Aufsprengen“ des Erdreichs hat demnach nicht stattgefunden. Der Injektionskörper wies eine hohe Dichte und Festigkeit auf, weshalb ebenfalls nur Proben ausgebrochen werden konnten.

6.3 Ergebnisübersicht und -bewertung

Aus den Injektionskörpern der Labor- und Feldversuche wurden Proben entnommen an denen im Labor die Durchlässigkeit und die Dichte der Körper bestimmt wurde. Zur Bestimmung der Bodeneigenschaften wurde zudem eine ungestörte Bodenprobe des schluffigen Sandes aus Geilenkirchen entnommen. Für den sandigen Kies liegen keine Informationen vor, weshalb für einen Vergleich charakteristische Werte für einen sandigen Kies angesetzt werden. Die Eigenschaften des im Labor verwendeten Sandes sind bekannt. In Tabelle 6-1 ist eine Übersicht der Eigenschaften der Böden und der Injektionskörper zusammengestellt. Darin sind die gewählten charakteristischen Werte grau schattiert.

Die Injektionskörper aus den Laborversuchen und der zweiten Versuchsreihe im Feld weisen ähnliche Durchlässigkeiten auf. Im Vergleich zum Untergrund wurde eine ausreichend niedrige Durchlässigkeit festgestellt. Die Proben der Versuchsreihe im schluffigen Sand weisen dagegen eine

im Vergleich zum Untergrund höhere Durchlässigkeit auf. Eine Grundwassersteuerung wäre damit nicht möglich. Die relativ hohe Durchlässigkeit kann jedoch auf die Beschaffenheit der Proben zurückgeführt werden. Durch das Ausbrechen einzelner filigraner Platten können im Injektionskörper Risse entstehen. Darüber hinaus ist die Probendicke im Vergleich zu den anderen Proben sehr klein, wodurch der Einfluss derartiger Fehlstellen bei der Bestimmung der Durchlässigkeit verstärkt wird. Die in der zweiten Versuchsreihe geborgenen Injektionskörper waren deutlich größer, so dass eine Entnahme ungestörter Proben aus der Mitte der Körper möglich war. Die für die Proben der Injektionskörper der Laborversuche und der zweiten Versuchsreihe im Feld bestimmten Durchlässigkeiten können daher als maßgeblich angesehen werden. Zumal der Einsatz einer Grundwassersteuerung ohnehin eher in durchlässigeren rolligen Böden in Frage kommt. Auf dieser Grundlage kann festgehalten werden, dass mit dem Injektionsverfahren der Firma Uretek für eine Grundwassersteuerung ausreichend undurchlässige Wände erstellt werden können.

Tabelle 6-1: Durchlässigkeiten und Dichten der Injektionskörper und des Bodens

Kurzzeichen	Boden		Injektionskörper		
	Dichte	Durchlässigkeit	Dichte	Durchlässigkeit	Probendicke
	ρ [g/cm ³]	k_f [m/s]	ρ [g/cm ³]	k_f [m/s]	d [cm]
S	1,44	$9,3 \cdot 10^{-5}$	0,646	$4,84 \cdot 10^{-7}$	3,15
S	1,44	$9,3 \cdot 10^{-5}$	0,340	$2,37 \cdot 10^{-7}$	6,62
S,u	2,116	$1,17 \cdot 10^{-9}$	1,164	$1,24 \cdot 10^{-5}$	1,57
S,u	2,116	$1,17 \cdot 10^{-9}$	1,374	$1,34 \cdot 10^{-5}$	1,83
G,s	2,00 - 2,25	$1,0 \cdot 10^{-2} - 1,0 \cdot 10^{-5}$	1,789	$3,64 \cdot 10^{-8}$	11,13
G,s	2,00 - 2,25	$1,0 \cdot 10^{-2} - 1,0 \cdot 10^{-5}$	1,795	$5,10 \cdot 10^{-7}$	11,00
G,s	2,00 - 2,25	$1,0 \cdot 10^{-2} - 1,0 \cdot 10^{-5}$	1,749	$2,06 \cdot 10^{-7}$	11,29

Eine weitere Anforderung für den Einsatz als Leitwand war die lagegenaue Installation der Injektionskörper. Die Laborversuche zeigen, dass die Erstellung eines vertikalen Schlitzes bei Vorgabe eines definierten Expansionsraums möglich ist. In situ wäre diese Vorgehensweise jedoch sehr aufwendig und daher unwirtschaftlich. In der zweiten Versuchsreihe im Feld konnte festgestellt werden, dass durch ein sehr enges Injektionsraster und ein angepasstes Verfahren im sandigen Kies ein zusammenhängender Injektionskörper erstellt werden kann. Eine zusätzliche Vorschädigung des Untergrundes in der geplanten Achse konnte dabei als wirksam identifiziert werden. Die horizontale Ausbreitung (quer zur geplanten Achse) war dagegen nur schwer zu kontrollieren.

Die Ausbreitung des Injektionsmaterials ist generell abhängig von der Bodenart und dem herrschenden Spannungszustand. Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe können daher nicht ohne weiteres auf davon abweichende Randbedingungen übertragen werden. Auf Basis der im Projekt durchgeführten Versuche kann daher keine abschließende Bewertung der Eignung des

Injektionsverfahrens zur Erstellung vertikaler Schlitzte vorgenommen werden. Für eine derartige Bewertung ist eine größere Anzahl an Versuchen notwendig. Erst auf Grundlage einer größeren Datenbasis ist eine verlässliche Übertragbarkeit der Ergebnisse auch auf andere Böden und Randbedingungen möglich. Gegebenenfalls sind in zukünftigen Untersuchungen auch Weiterentwicklungen bzw. Modifizierungen des Injektionsverfahrens zu diskutieren, die im Rahmen dieses Projekts nicht vorgesehen waren.

7 Wärmeentzugsversuche an thermo-aktiven Abdichtungselementen

7.1 Allgemeines

Zur Ermittlung der Wirksamkeit einer FuG-Konstruktion zur Steigerung der Entzugsleistung wurden Wärmeentzugsversuche an thermo-aktiven Abdichtungselementen durchgeführt. Der verwendete Versuchsstand wurde im Rahmen eines vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) geförderten Forschungsprojekt zur Ermittlung der Effizienz von thermo-aktiven Abdichtungselementen entwickelt [Zie2011] und wurde bereits im von der DBU geförderten Projekt zur „Entwicklung einer Software zur Berechnung der Erdwärmenutzung mittels thermo-aktiver Abdichtungselemente an erdberührenden flächigen Bauteilen“ (AZ29646) für weitere Wärmeentzugsversuche eingesetzt. Der schematische Aufbau des Versuchsstands ist in Abbildung 7-1 dargestellt.

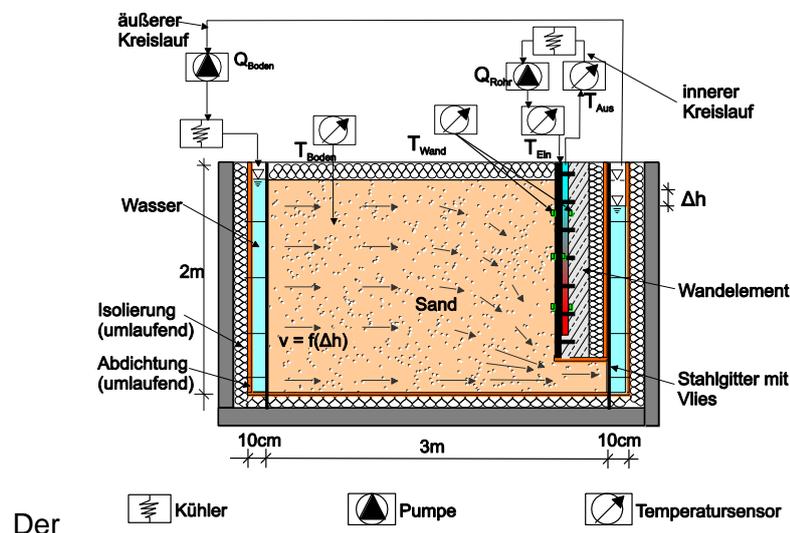


Abbildung 7-1: Schematischer Aufbau des Versuchsstands [Kü2014]

Der Versuchsstand ist durch zwei Kreisläufe gekennzeichnet, wobei der äußere Kreislauf die Temperatur und die Grundwassergeschwindigkeit im Bodenkörper regelt, während über den inneren Kreislauf die Vorlauftemperatur und der Volumenstrom im Absorbersystem eingestellt werden können. Es können somit prinzipiell verschiedene Rand- und Betriebsparameter im Versuch getestet

werden. Durch die großen Abmessungen des Versuchsstands (3 m x 3 m x 2 m) ist eine Abbildung der Verhältnisse ohne nennenswerte Maßstabeffekte möglich.

7.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Für die im Projekt durchgeführten Wärmeentzugsversuche wurde auf den bestehenden Versuchsaufbau zurückgegriffen. Allerdings wurde das thermo-aktive Abdichtungselement entgegen der schematischen Darstellung aus Abbildung 7-1 so positioniert, dass eine zum Bauteil parallele Strömung eingestellt werden konnte. Im Wandelement sind in einem Abstand von 0,1 m jeweils zwei verschiedene Rohrsystemen (U-Rohr und W-Rohr) installiert (s. Abbildung 7-2). Als Absorberrohre wurden Rohre aus Polyethylen (PE) mit einem Außendurchmesser von $d_a = 25$ mm und einem Innendurchmesser von $d_i = 20$ mm verwendet. Die resultierende Rohrlänge für die U-Schleife beträgt $L_p = 3,4$ m und für die W-Schleife $L_p = 7,8$ m.

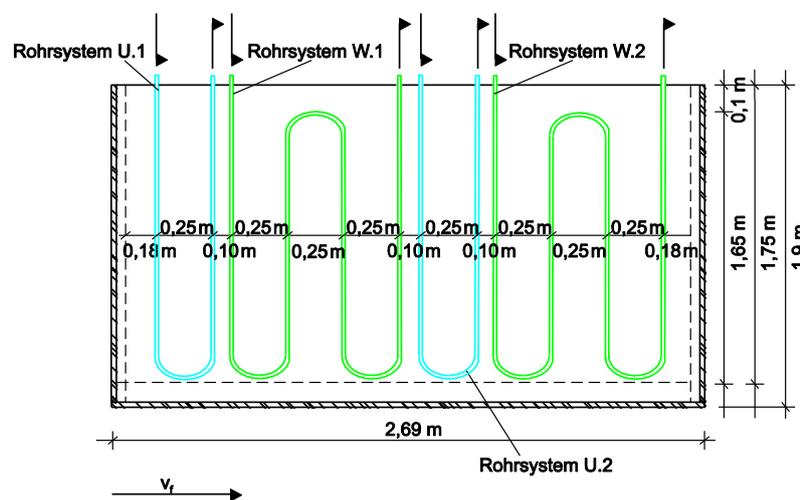


Abbildung 7-2: Rohranordnung im Laborversuch [Kü2014]

Als Versuchsboden wurde ein enggestufter Sand verwendet, dessen bodenmechanische Eigenschaften durch Laborversuche bestimmt [Zie2011] wurden und dem Anhang zu entnehmen sind. Der Boden wurde unter Wasser in den Versuchsstand eingebaut. Daher entspricht die Einbaudichte ungefähr der Proctordichte [Zie2011]. Um den Einfluss einer Grundwassersteuerung zu untersuchen, wurde in den Laborversuchen eine FuG-Konstruktion mittig vor dem Wandelement installiert. Somit sollten immer jeweils zwei Systeme (U-Rohr und W-Rohr) im Einflussbereich und zwei Systeme außerhalb des Einflussbereichs der Konstruktion liegen.

In den durchgeführten Versuchen wurden die Vorlauftemperatur T_{ein} und der Volumenstrom Q_v im Rohrsystem konstant gehalten und die sich einstellende Rücklauftemperatur gemessen. Damit entsprechen die Versuche prinzipiell dem für Erdwärmesonden bekannten Thermal Response Tests (TRT) (z.B. [Ge2000]). Aus der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf kann die Entzugsleistung nach Gleichung (7-1) berechnet werden.

$$P = c_{v,F} \cdot Q_v \cdot \Delta T = c_{v,F} \cdot Q_v \cdot (T_{aus} - T_{ein}) \quad (7-1)$$

Die Vor- und Rücklauftemperaturen wurden für jedes Teilsystem direkt am Systemeintritt bzw. Systemaustritt erfasst. Als Temperatursensoren wurden dafür Widerstandsthermometer der Ausführung PT100 verwendet. Diese verfügen über eine ausreichend hohe Messgenauigkeit von $\Delta T = \pm 0,1$ K. Um den Einfluss der FuG-Konstruktion auf das Strömungsbild zu beobachten, wurden Filterrohre installiert in denen die Standrohrhöhe mit einem akustischen Lot gemessen wurde. Für weitere Informationen zum Versuchsaufbau und zur messtechnischen Instrumentierung wird auf [Kü2014] verwiesen.

7.3 Versuchsprogramm

Es wurden zwei Versuchsreihen mit insgesamt ca. 40 Einzelversuchen durchgeführt, wobei einige Parametersätze zur Sicherheit doppelt getestet wurden. Dabei wurden unterschiedliche FuG-Konstruktionen untersucht. In der ersten Versuchsreihe (1. VR) wurde der in den Laborversuchen erstellte Injektionskörper im Versuchstand eingebaut. Da dieser nur eine Höhe von ca. 1,0 m hatte, wurde dieser in den Versuchen unterströmt. Um den Einfluss der Unterströmung auszuschließen und gleichzeitig die Wirkung eines Kanals zu untersuchen, wurde in der zweiten Versuchsreihe (2. VR) eine Styrodurwand installiert. Der installierte Funnel hatte eine Länge $L1 = 1$ m und der Kanal eine Länge $L2 = 0,3$ m. Somit wurde die lokale Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit über die gesamte zweite U-Schleife aufrechterhalten. Des Weiteren hatte der Funnel eine Höhe von 2,0 m und konnte demzufolge nicht unterströmt werden. Detaillierte Konstruktionszeichnungen beider Versuchsreihen sind dem Anhang zu entnehmen.

In den Einzelversuchen wurden immer je ein U- und ein W-Rohr durchströmt. Die Systeme wurden dabei jeweils mit einem Volumenstrom von $Q_v = 225$ l/h beaufschlagt. Die Vorlauftemperatur wurde in den Versuchen konstant bei $T_{ein} = 2,5$ °C gehalten. Die Bodentemperatur T_B betrug im Mittel 11 °C. Um den Einfluss der Grundwasserströmung abzubilden, wurden in den Versuchsreihen verschiedene Geschwindigkeiten untersucht. Dazu wurde zwischen den Zu- und Ablauftanks mittels verschiedener Pumpen eine Potentialdifferenz eingestellt. In den im Parallelprojekt (AZ 29646) durchgeführten Versuchen konnte erstaunlicherweise kein großer Einfluss der Grundwasserströmung festgestellt werden. Daher wurde über hydraulische Vorsimulationen die in Abhängigkeit der Anordnung der FuG-Konstruktion zu erwartende Strömungsgeschwindigkeit im Gate ermittelt. Tabelle 7-1 gibt eine Übersicht über die mittleren Potentialdifferenzen, die Ausgangsströmungsgeschwindigkeit und die im Gate erzielten Strömungsgeschwindigkeiten.

Tabelle 7-1: Mittlere Potentialdifferenzen und Strömungsgeschwindigkeiten im Großversuch

Parameter	Symbol	Werte			
		0,23	0,46	0,56	0,70
Potentialdifferenz	Δh [m]	0,23	0,46	0,56	0,70
Grundwassergeschwindigkeit	v_f [m/d]	0,64	1,27	1,55	1,93
mittlere Geschwindigkeit im Gate (1. VR)	v_f [m/d]	0,84	1,68	2,05	2,56
mittlere Geschwindigkeit im Gate (2. VR)	v_f [m/d]	1,21	2,41	2,94	3,67

Durch die Anordnung der Wand in der ersten Versuchsreihe mit einer Öffnungsweite von $w = 0,4$ m sollte eine Steigerung der Geschwindigkeit um ca. 40 % erzielt werden. Die Anordnung einer undurchlässigen Styrodurwand konnte den Effekt noch verstärken. Um den Einfluss der Konstruktion darüber hinaus zu vergrößern, wurde in der zweiten Versuchsreihe eine Öffnungsweite von $w = 0,2$ m gewählt, um eine Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit um ca. 100 % zu erzielen. Somit wurden ein deutlicher Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und die in numerischen Simulationen ermittelte Steigerung der Entzugsleistung erwartet (vgl. Kapitel 8).

Die Voruntersuchungen zeigten außerdem, dass die Größe des Versuchstandes für die Untersuchung der Grundwassersteuerung möglicherweise zu klein ist. Durch den Einbau der Funnelemente kann ein Aufstau entstehen, welcher einen nicht zu vernachlässigenden Randeinfluss darstellt.

Die größten Schwierigkeiten in der Versuchsdurchführung lagen in der Einstellung einer (konstanten) Bodentemperatur zu Versuchsbeginn und einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit. Durch die Einstellung der Potentialdifferenz über den Betrieb verschiedener Pumpen war die Strömungsgeschwindigkeit großen Schwankungen unterworfen. Weiterhin war die Einstellung eines konstanten Volumenstroms schwieriger als erwartet, da die Kontrolle und Steuerung des Volumenstroms manuell erfolgte. Die Schwankungen im Volumenstrom konnten in den Versuchen jedoch auf $\Delta Q_V = \pm 10$ % minimiert werden. Eine störungsfreie Messung des Volumenstroms in Vor- und Rücklauf ist z.B. mit magnetisch-induktiven- oder Ultraschallverfahren möglich. Die dafür erforderliche Messtechnik ist jedoch sehr teuer und war in diesem Projekt nicht vorgesehen. Auf eine Erfassung des genauen zeitlichen Verlaufs des Volumenstroms wurde daher aus Kostengründen verzichtet.

Während der Auswertung der zweiten Versuchsreihe wurden zudem Ungenauigkeiten in den Messergebnissen des Temperaturfühlerpaares im Vor- bzw. Rücklauf der U-Rohre festgestellt. Die im Rücklauf der Systeme gemessene Temperatur war geringer als die im Vorlauf. Da die Bodentemperatur in allen Versuchen größer als die Vorlauftemperatur war, ist dieses Ergebnis physikalisch nicht zu erklären und weist auf einen Messfehler hin. Dieser wurde aufgrund der großen Datenmenge, der ohnehin geringen Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf sowie des Rauschens der Messwerte während der Versuche leider nicht festgestellt.

Im Nachhinein wurden umfangreiche Versuche unternommen, um den Fehler zu korrigieren. Dafür wurden unter anderem Referenzmessungen mit allen in den Leitungen installierten Temperaturfühlern durchgeführt. In diesen Messungen wurde allerdings eine fehlerfreie Temperaturerfassung der Messfühler festgestellt. Alle Messfühler sowie weitere Kontrollfühler lieferten die gleichen Messergebnisse. Eine Beschädigung der Messfühler kann somit ausgeschlossen werden. Allerdings ist es möglich, dass die Leitungen der Fühler entweder beim Einbau vor der zweiten Versuchsreihe beschädigt wurden oder dass die Fühler nicht vollständig im Fluid lagen und es daher zu den Messfehlern kam. Eine Korrektur der Messergebnisse anhand der

Ergebnisse der unbeschädigten Temperaturfühler war aufgrund der Streuung der Messergebnisse ebenfalls nicht möglich. Da keine verlässlichen Messwerte vorliegen, können die Ergebnisse der U-Rohre aus der zweiten Versuchsreihe nicht verwendet werden. Der Einfluss der Konstruktion kann daher aus der zweiten Versuchsreihe nicht abgeleitet werden.

7.4 Ergebniszusammenfassung

Jeder Parametersatz wurde in beiden Versuchsreihen über 6 Stunden betrieben, um einen quasi stationären Zustand zu erreichen. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten in diesem Zustand. Die Pegelstände in den Standrohren wurden jeweils nach einer Versuchsdauer von 3 Stunden ermittelt. Eine detaillierte Übersicht der erzielten Ergebnisse befindet sich im Anhang.

Aus den Pegelständen lässt sich über Interpolation ein Plot der sich in den Versuchen einstellenden Wasseroberfläche erstellen. Abbildung 7-3 zeigt die Wasseroberfläche exemplarisch für Potentialdifferenzen von 0,23 m und 0,56 m.

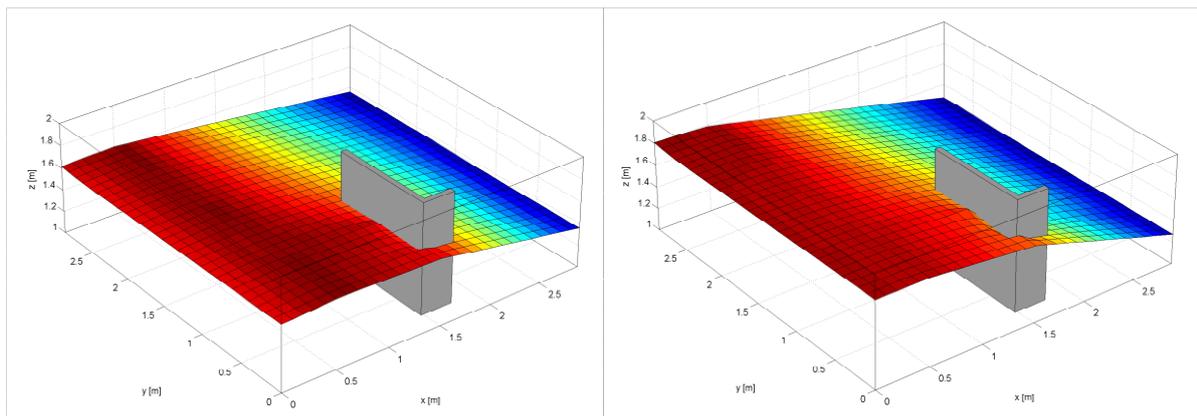


Abbildung 7-3: Plot der interpolierten Pegelstände der Laborversuche
links: $\Delta h = 0,23$ m; rechts: $\Delta h = 0,56$ m

In den Plots ist die Auswirkung der Konstruktion auf die Strömung zu erkennen. Vor dem Element kommt es zum Aufstau, was im Bereich des Gates zu erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten führt. Es wird jedoch deutlich, dass bereits in geringem Abstand zum Zulauf größere Pegelstände als im Zulauf gemessen wurden (dunklere Färbung). Demzufolge beeinflusst der Aufstau die Strömung auch in den Randbereichen. Vergleichbare Ergebnisse können ebenfalls anhand der Pegelstände der ersten Versuchsreihe festgestellt werden. Der Versuchstand weist demnach keine ausreichende Größe auf, um Randeinflüsse im Falle einer gezielten Grundwassersteuerung auszuschließen.

In Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 sind die, auf die installierte Rohrlänge normierten, gemessenen Entzugsleistungen beider Versuchsreihen in Abhängigkeit der Ausgangsströmungsgeschwindigkeit dargestellt. Dabei wird zwischen den durchströmten Systemen (U-Rohr und W-Rohr) sowie zwischen den Systemen vor und hinter der FuG-Konstruktion unterschieden. Aufgrund der Messfehler der zweiten Versuchsreihe sind für diese nur die Ergebnisse der W-Rohre dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen die gleichen Verhältnismäßigkeiten wie die im Parallelprojekt (AZ 29646) durchgeführten Versuche. Für die U-Schleifen können größere bezogene Entzugsleistungen ermittelt werden als für die W-Schleifen. Bei einer Betrachtung der absoluten Werte liefern die W-Schleifen jedoch stets die größeren Leistungen. Die Ergebnisse der U-Schleifen sind durch deutlich größere Streuungen gekennzeichnet, was auf die relativ kurze Rohrlänge zurückgeführt werden kann, die die Einstellung stabiler Werte erschwert.

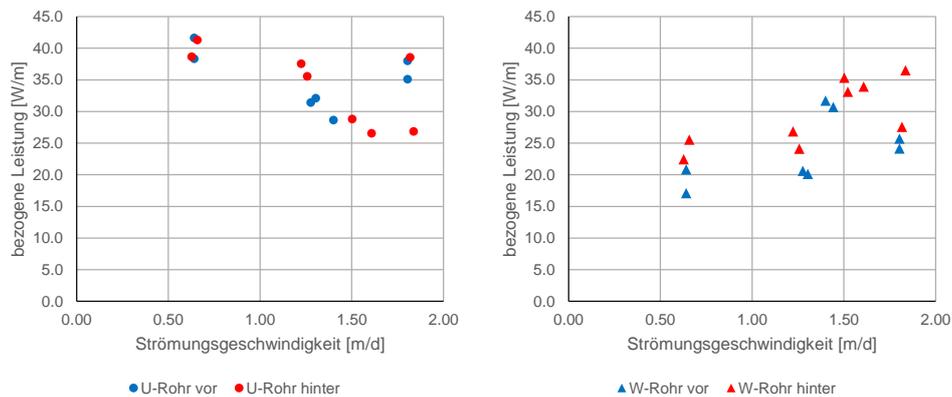


Abbildung 7-4: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit in der ersten Versuchsreihe

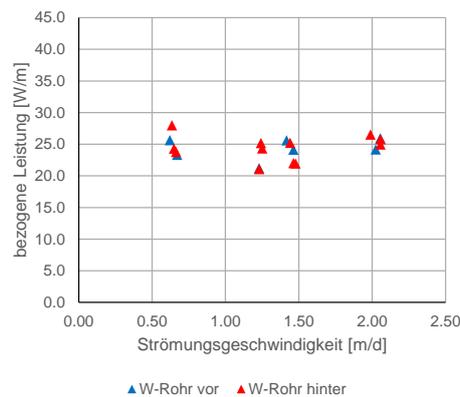


Abbildung 7-5: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit in der zweiten Versuchsreihe

Die in der ersten Versuchsreihe erzielten Entzugsleistungen zeigen für die U-Rohre keinen deutlich der Strömungsgeschwindigkeit zuzuordnenden Unterschied. Während für die W-Rohre in der ersten Versuchsreihe ein Anstieg der Leistung mit der Strömungsgeschwindigkeit festgestellt werden kann, ist ein vergleichbarer Effekt in der zweiten Versuchsreihe nicht zu erkennen. Einzig für die W-Rohre der ersten Versuchsreihe kann ein Unterschied zwischen den Entzugsleistungen vor und hinter der FuG-Konstruktionen festgestellt werden. Die Unterschiede können daher nicht eindeutig auf die Strömungsgeschwindigkeit bzw. die Konstruktion zurückgeführt werden, sondern können ebenfalls durch im Labor auftretenden Streuungen entstanden sein. Aufgrund der Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeit durch Randeinflüsse ist eine numerische Reproduzierung der Laborversuche zur Verifizierung nicht möglich.

Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass eine detaillierte Bewertung des Einflusses einer FuG-Konstruktion auf die Leistungsfähigkeit von thermo-aktiven Bauteilen auf Grundlage der

durchgeführten Laborversuche nicht erfolgen kann. Aussagen zum Einfluss der FuG-Konstruktion können daher nur auf Grundlage numerischer Simulationen erfolgen. Für eine Verifizierung der Erkenntnisse sind weitere Laborversuche bzw. Untersuchungen an einer realen Baumaßnahme notwendig. Es kann allerdings festgehalten werden, dass um Randeinflüsse auszuschließen und einen ungestörten Strömungszustand unter Einfluss einer FuG-Konstruktion zu erzielen ein größerer Versuchsstand erforderlich ist. Der dafür erforderliche Umbau war in diesem Projekt nicht realisierbar.

8 Numerische Untersuchungen zur möglichen Steigerung der Entzugsleistung

8.1 Grundlagen der numerischen Untersuchungen

Zur Ermittlung der möglichen Leistungssteigerungen durch eine FuG-Konstruktion wurden numerische Untersuchungen unter Verwendung des im Parallelprojekt (AZ 29646) entwickelten Berechnungsansatzes für flächige thermo-aktive Bauteile durchgeführt [Kü2014]. Die Berechnungen wurden dabei exemplarisch am Beispiel der am GiB entwickelten thermo-aktiven Abdichtungselemente durchgeführt. In Voruntersuchungen wurden unterschiedliche Bauteillängen- und Anordnungen sowie Strömungsrichtungen untersucht. Dabei konnten vergleichbare Leistungssteigerungen sowie aus der Variation einzelner Parameter resultierende Verhältnismäßigkeiten festgestellt werden. Die Ergebnisse werden in diesem Bericht daher exemplarisch an einem Basismodell vorgestellt, das sich an der Konstruktion der durchgeführten Laborversuche orientiert. Als Basismodell wurde eine in den Untergrund einbindende Betonwand unter Einfluss einer parallelen Strömung modelliert. Die Wandlänge wurde dabei zu $L = 10$ m (davon die mittleren 2 m thermisch aktiviert) und die Wandtiefe zu $T = 5$ m gewählt.

Die Eigenschaften des Basismodells wurden auf Grundlage der im Parallelprojekt (AZ 29646) durchgeführten Parameterstudie zur Identifizierung von Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von flächigen thermo-aktiven Bauteilen gewählt. Diese hat ergeben, dass in der Praxis der Volumenstrom im System so gewählt werden sollte, dass sich ein Strömungszustand außerhalb des laminaren Bereichs einstellt. Um zu niedrige Rücklauftemperaturen infolge eines zu großen Volumenstroms zu vermeiden, ist gleichzeitig eine Reynoldszahl $Re > 5.000$ zu empfehlen. Im Basismodell wurde daher ein Volumenstrom von $Q_v = 450$ l/h gewählt.

Die Vorlauftemperatur sollte in Abhängigkeit der vorhandenen Untergrundtemperatur festgelegt werden. Im Basismodell wurde bei einer Bodentemperatur $T_B = 10$ °C eine konstante Vorlauftemperatur von $T_{VL} = 2,5$ °C eingestellt.

Bei thermo-aktiven Bauteilen ist die Verwendung möglichst langer Rohrschlaufen zu empfehlen. Für lange Rohrschlaufen steigt die Rücklauftemperatur an, was sich positiv auf die Gesamtenergiebilanz eines Systems auswirkt. Bei der Verlegung der Rohre hat der Schenkelabstand einen maßgeblichen Einfluss. Die Temperaturdifferenz sowie die bezogenen Leistungen im Absorbersystem nehmen mit

steigendem Schenkelabstand ab. Zur Maximierung der Rohrlänge sollten daher kleine Schenkelabstände realisiert werden. Die Absorberrohre im Basissystem folgen daher einer schlaufenförmigen Anordnung mit 10 Rohrsträngen (Reihenschaltung) bei einer gesamten Rohrlänge von 38,2 m. Der Schenkelabstand der Rohre beträgt 0,2 m und liegt damit innerhalb des zulässigen Biegeradius für Absorberrohre (Rohre auf PE-Basis ca. $R_{min} = 5 - 10 \cdot d_a$). Eine Gesamtübersicht der Eigenschaften des Basismodells ist dem Anhang zu entnehmen.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen werden im Rahmen einer Parameterstudie vorgestellt.

8.2 Grundlagen der Parameterstudie

Die möglichen Ertragssteigerungen von flächigen thermo-aktiven Bauteilen durch die Steuerung des Grundwassers sind direkt abhängig von der Geometrie und den Eigenschaften der installierten FuG-Konstruktion. Grundsätzlich wird die Entzugsleistung eines thermo-aktiven Bauteils von den Bauteileigenschaften und den standortspezifischen Untergrundeigenschaften beeinflusst. Bei den Bauteileigenschaften ist zwischen Betriebs- und konstruktiven Parametern zu unterscheiden. Durch die Installation einer FuG-Konstruktion kann mit der Grundwasserfließgeschwindigkeit lediglich eine standortspezifische Größe beeinflusst werden. Daher wurden in der Parameterstudie die Betriebs- und die konstruktiven Parameter des Bauteils im Basismodell konstant gehalten, während die der FuG-Konstruktion variiert wurden. Tabelle 8-1 gibt eine Übersicht über die Referenzkonstruktion sowie die Spannweite der variierten Parameter.

Tabelle 8-1: Parameter des Referenzmodells und deren Variation in der Parameterstudie

Parameter	Symbol	Wert	Variation
Grundwasserfließgeschwindigkeit	v_f [m/d]	0,50	0,25 - 1,0
Neigungswinkel	α [°]	90	
Funnellänge	L1 [m]	5,0	5,0 - 10,0
Kanallänge	L2 [m]	0,8	0,2 - 2,0
Öffnungsweite	w [m]	0,4	0,3 - 0,6
Durchlässigkeit Funnelement	$k_{r,F}$ [m/s]	$9,3 \cdot 10^{-7}$	$9,3 \cdot 10^{-6} - 9,3 \cdot 10^{-9}$
Wärmeleitfähigkeit Funnelement	λ_F [W/(mK)]	0,03	0,015 - 1,0
Tiefe Funnelement	T_F [m]	5	1,0 - 5,0

Bei der Auswertung der Parameterstudie werden die sich ergebenden Entzugsleistungen, die das wesentliche Kriterium für einen effizienten Wärmeentzug aus dem Untergrund (Primärkreislauf) darstellen, im stationären Zustand betrachtet. Zur Erreichung dieses Zustandes wurde die Simulationsdauer zu 720 h gewählt. Da die Betriebsparameter konstant gehalten wurden, korreliert die Entzugsleistung direkt mit der Rücklauftemperatur, der Eingangsgröße in den Sekundärkreislauf bzw. das Heizsystem. Prinzipiell ist eine hohe Entzugsleistung bei einer hohen Rücklauftemperatur

wünschenswert. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten wurden die Ergebnisse stets auf die Leistung des Basismodells bezogen. Die Ergebnisse werden am Beispiel von Grundwasserfließgeschwindigkeiten von 0,25 m/d und 0,5 m/d vorgestellt. Die dabei erzielten Entzugsleistungen im stationären Zustand betragen $P_{0,25\text{ m/d}} = 52,5\text{ W/m}^2$ und $P_{0,5\text{ m/d}} = 60,67\text{ W/m}^2$.

8.3 Ergebnisse der Parameterstudie

8.3.1 Einfluss der Öffnungsweite und der Kanallänge

Generell gewinnt der konvektive Wärmetransport durch eine erhöhte Grundwasserfließgeschwindigkeit an Bedeutung. Durch den konvektiven Wärmetransport erfolgt eine schnelle Nachlieferung warmen Porenwassers und damit ein Anstieg der Bodentemperatur im Kontaktbereich zwischen Bauteil und Untergrund. Diese ist eine maßgebende Größe für den Wärmetransport. Eine geringe Öffnungsweite führt zu größeren Fließgeschwindigkeiten im Gate. Für den Einsatz an flächigen thermo-aktiven Bauteilen kann es notwendig sein, diese erhöhte Fließgeschwindigkeit über einen Teil des Bauteils aufrecht zu erhalten. Durch die Errichtung eines Kanals kann dies erreicht werden (vgl. Kapitel 5.2). Der Effekt der Öffnungsweite nimmt jedoch mit steigender Kanallänge ab. Die Parameter Öffnungsweite w und Kanallänge $L2$ beeinflussen sich somit gegenseitig und müssen daher gekoppelt betrachtet werden. Dafür wurde die Öffnungsweite zwischen 0,3 m und 0,6 m und die Kanallänge zwischen 0,2 m und 2,0 m variiert. Die Funnellänge $L1$ blieb dabei unverändert bei einer Länge von 5,0 m.

Abbildung 8-1 zeigt, die mögliche Steigerung der Entzugsleistung bei einer Ausgangsfließgeschwindigkeit von $v_f = 0,5\text{ m/d}$. Die Leistungen werden dabei auf die im Basismodell erzielte Entzugsleistung bezogen.

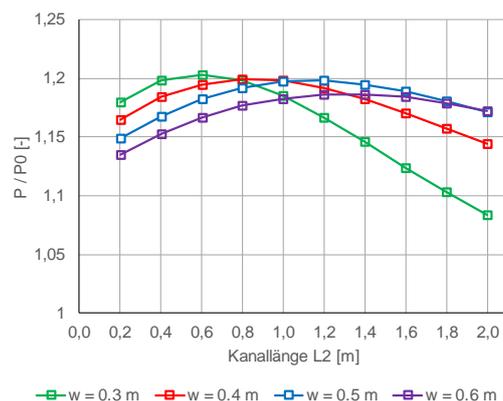


Abbildung 8-1: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Öffnungsweite w und der Kanallänge $L2$ ($v_f = 0,5\text{ m/d}$)

Es wird deutlich, dass eine maximale Steigerung bei einer Öffnungsweite von 0,3 m und einer Kanallänge von 0,6 m erzielt wird. Die Steigerung liegt in einer Größenordnung von ca. 20 %. Mit einer größeren Öffnungsweite kann ebenfalls eine vergleichbare Leistungssteigerung erzielt werden. Dafür muss die erhöhte Fließgeschwindigkeit jedoch über eine größere Strecke aufrechterhalten werden, weshalb eine größere Kanallänge erforderlich wird. So kann bei der Öffnungsweite des

Referenzmodells von 0,4 m mit einer Kanallänge von 0,8 m eine Leistungssteigerung von 19,9 % realisiert werden. Wird die Öffnungsweite jedoch zu groß, kann durch die Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit am Bauteil kein vergleichbarer Anstieg der Entzugsleistungen mehr erzielt werden ($w = 0,6$ m).

Außerdem wird deutlich, dass die maximale Leistungssteigerung nicht grundsätzlich bei einer Kanallänge, die der Bauteillänge entspricht, erzielt wird. Die Erklärung dafür liefert eine Betrachtung der Bodentemperatur am Bauteilrand. Die Steigerung der Fließgeschwindigkeit korreliert mit den in Kapitel 5.2 durchgeführten Untersuchungen und wird an dieser Stelle daher nicht gesondert betrachtet. Abbildung 8-2 zeigt die Temperatur am Bauteilrand in- und außerhalb des erstellten Kanals sowie die über die Bauteillänge gemittelte Bodentemperatur exemplarisch für das Referenzmodell mit einer Öffnungsweite von $w = 0,4$ m.

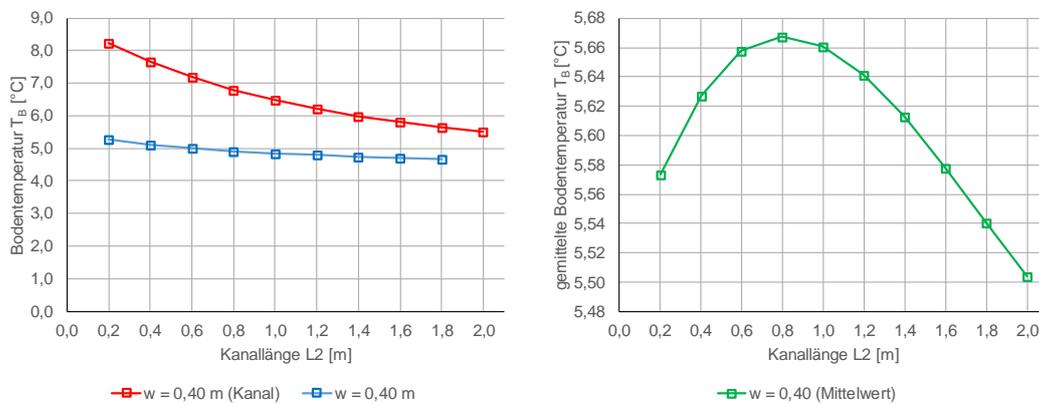


Abbildung 8-2: mittlere Bodentemperatur am Bauteilrand ($w = 0,4$ m)
links: inner- und außerhalb des Kanals; rechts: über die Bauteillänge gemittelt

Die maximale Temperatur im Bauteil wird prinzipiell bei einer kurzen Kanallänge erzielt, was im Zusammenhang mit der größeren Fließgeschwindigkeit steht. Im Umkehrschluss nimmt die Temperatur mit zunehmender Länge des Kanals ab (Abbildung 8-2 links). Da außerhalb des Kanals eine Aufweitung der Strömung und eine damit verbundene Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit stattfindet, ist die mittlere Bodentemperatur außerhalb des Kanals deutlich geringer und nimmt mit steigender Kanallänge ebenfalls ab. Wird die über die Bauteillänge gemittelte Bodentemperatur betrachtet (Abbildung 8-2 rechts), ist zu erkennen, dass die maximale Durchschnittstemperatur bei einer Kanallänge von 0,8 m erreicht wird. Für das Referenzmodell wird demzufolge auch die maximale Leistungssteigerung bei einer Kanallänge von $L_2 = 0,8$ m erreicht.

Die bislang vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf eine Anfangsfließgeschwindigkeit des Grundwassers von $v_f = 0,50$ m/d. In Abhängigkeit der Anfangsgeschwindigkeit verändern sich jedoch auch die erzielbaren Leistungssteigerungen bei identischer FuG-Konstruktion. In Abbildung 8-3 wird exemplarisch die mögliche Steigerung der Entzugsleistung bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $v_f = 0,25$ m/d dargestellt. Die maximal mögliche Steigerung der Entzugsleistung wird bei dieser Fließgeschwindigkeit durch eine Öffnungsweite $w = 0,5$ m und eine Kanallänge $L_2 = 0,6$ m realisiert. Die maximale absolute Steigerung beträgt jedoch nur ca. 12 %. Die erzielbaren

Leistungssteigerungen werden demnach nicht nur durch die FuG-Konstruktion, sondern auch durch die Anfangsfließgeschwindigkeit beeinflusst. Die prozentuale Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit durch dieselbe FuG-Konstruktion ist für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten identisch (Abbildung 8-4 links). Die absolute Strömungsgeschwindigkeit ist bei einer hohen Anfangsgeschwindigkeit jedoch deutlich größer. Aufgrund des größeren Einfluss des konvektiven Wärmetransport ist die Bodentemperatur im Kontaktbereich im stationären Zustand daher ebenfalls größer (Abbildung 8-4 rechts).

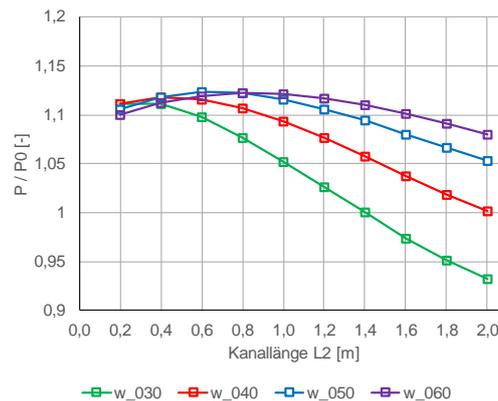


Abbildung 8-3: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Öffnungsweite w und der Kanallänge L_2 ($v_f = 0,25$ m/d)

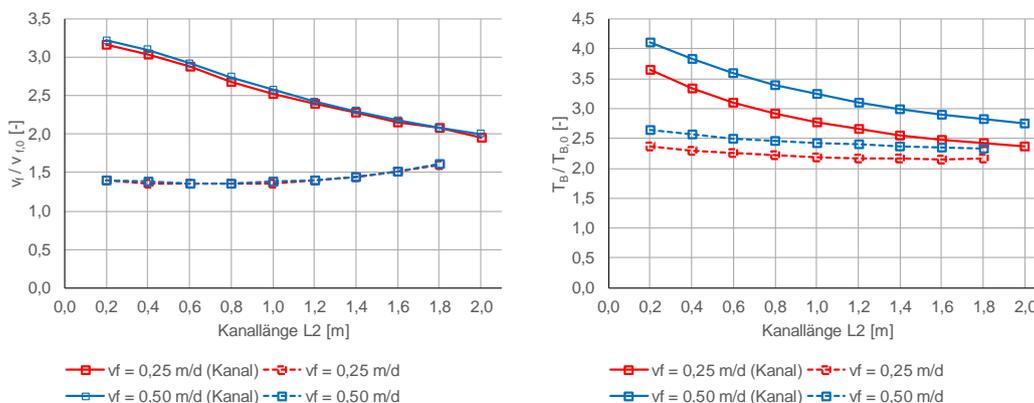


Abbildung 8-4: mittlere Fließgeschwindigkeit (links) und Bodentemperatur (rechts) am Bauteilrand in Abhängigkeit der Kanallänge L_2 für $v_{f,0} = 0,25$ m/d und $v_{f,0} = 0,50$ m/d ($w = 0,40$ m)

In Abbildung 8-3 ist darüber hinaus zu erkennen, dass durch eine FuG-Konstruktion die erzielbare Leistung auch sinken kann. Die Konstruktion sorgt zwar für eine größere Strömungsgeschwindigkeit, verhindert aber gleichzeitig den Wärmetransport quer zur Bauteilrichtung. Dadurch kann eine FuG-Konstruktion im Vergleich zum Basismodell zu niedrigeren Bodentemperaturen im Kontaktbereich führen.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich Öffnungsweite und Kanallänge gegenseitig beeinflussen. Die Steigerung der Entzugsleistung ist darüber hinaus abhängig von der Anfangsfließgeschwindigkeit. Eine pauschale Aussage zu möglichen Steigerungen der Entzugsleistung ist daher nicht möglich. In Abhängigkeit der hydraulischen und thermischen Randbedingungen muss daher in der Planung eine

optimale Geometrie ermittelt werden. Das maßgebliche Bewertungskriterium bei der Dimensionierung ist die sich einstellende mittlere Bodentemperatur im Kontaktbereich zwischen Bauteil und Untergrund.

8.3.2 Einfluss der Funnellänge

Die Untersuchungen aus Kapitel 5.2 zeigen steigende Strömungsgeschwindigkeiten im Gate infolge einer Vergrößerung der Funnellänge $L1$. Demzufolge muss eine größere Länge zu einer weiteren Steigerung der Entzugsleistung führen. Um diesen Einfluss zu untersuchen wurde die Funnellänge sukzessive auf 10,0 m gesteigert.

Wie erwartet geht mit einer Steigerung der Funnellänge eine gleichzeitige Steigerung der Entzugsleistung einher (Abbildung 8-5 links). Diese beruht auf der infolge der Strömungsgeschwindigkeit steigenden Bodentemperatur im Kontaktbereich (Abbildung 8-5 rechts). Die doppelte Funnellänge führt in diesem Beispiel zu einer Steigerung der Leistung um 8 %.

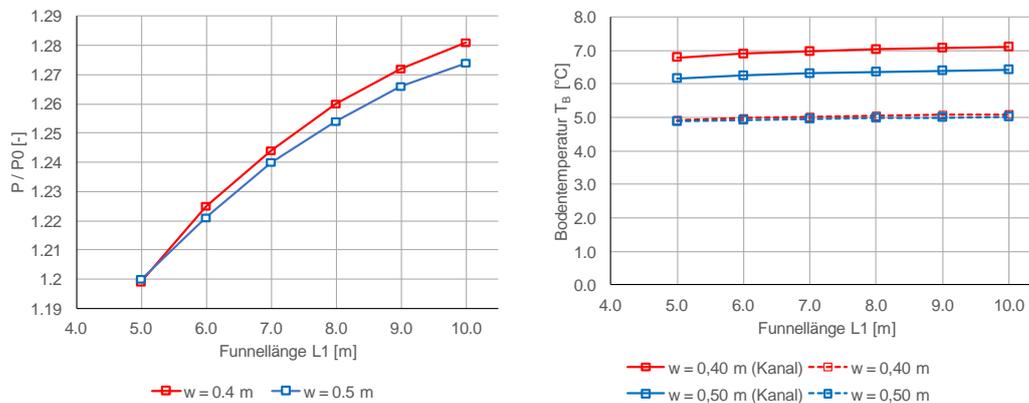


Abbildung 8-5: Steigerung der Entzugsleistung (links) und mittlere Bodentemperatur am Bauteilrand innerhalb und außerhalb des Kanals (rechts) in Abhängigkeit der Funnellänge $L1$ ($v_f = 0,50$ m/d)

Da der Einfluss der Funnellänge auf die Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmender Länge abnimmt (vgl. Abbildung 5-2), nimmt auch der Einfluss auf die Entzugsleistung ab. Eine unbegrenzte Steigerung der Entzugsleistung ist somit nicht möglich. Auf die mögliche Steigerung der Entzugsleistung durch eine FuG-Konstruktion hat die Funnellänge jedoch einen signifikanten Einfluss, weshalb eine Konstruktion mit großer Funnellänge zu bevorzugen ist.

8.3.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit

Die FuG-Konstruktion begrenzt den Wärmeaustausch quer zur Bauteilrichtung. Ein Einflussparameter für den Wärmetransport durch die Konstruktion ist die Wärmeleitfähigkeit der Funnel λ_F . Diese ist für das Injektionsmaterial der Firma Uretek nicht bekannt, da sie für den bisherigen Einsatz keine Relevanz hatte. Als Referenzwert wurde in den Untersuchungen daher auf der sicheren Seite ein für PUR-Dämmplatten charakteristischer Wert von $\lambda_F = 0,30$ W/(mK) angesetzt. In Abhängigkeit der Dichte und der Zusammensetzung der Injektionskörper (Materialmix aus Boden und Injektionsmaterial) kann die Wärmeleitfähigkeit jedoch größere Werte annehmen.

Eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit der Konstruktion im Referenzmodell zeigt generell einen geringen Einfluss auf die erzielbare Entzugsleistung. Dies wird am Beispiel der verschiedenen FuG-Konstruktionen im Referenzmodell deutlich (Abbildung 8-6).

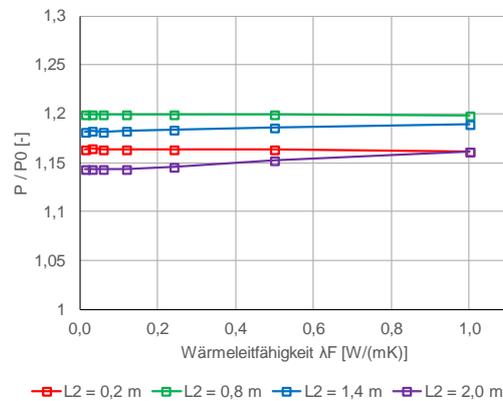


Abbildung 8-6: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ_F am Beispiel verschiedener Kanallängen L_2 ($v_f = 0,50$ m/d]

Bei einer kurzen Kanallänge ist aufgrund des ungestörten Wärmetransports außerhalb des Kanals erwartungsgemäß kein Einfluss zu verzeichnen (z.B. $L_2 = 0,2$ m oder $0,8$ m). Eine Steigerung der Entzugsleistung ist dagegen bei größeren Kanallängen zu erkennen (z.B. $L_2 = 1,4$ m oder $2,0$ m). Diese beträgt bei einer Steigerung von $\lambda_F = 0,30$ W/(mK) auf $\lambda_F = 1,00$ W/(mK) jedoch maximal 2 % und ist somit vernachlässigbar klein. Die Wärmeleitfähigkeit der Konstruktion ist demzufolge von eher untergeordneter Bedeutung für die Steigerung der Entzugsleistung.

8.3.4 Einfluss der Durchlässigkeit

Die Beeinflussung der Grundwasserfließgeschwindigkeit durch eine FuG-Konstruktion wird maßgeblich von der Durchlässigkeit der Funnel beeinflusst. Der Einfluss auf die erzielbaren Strömungsgeschwindigkeiten im Gate steht in direktem Zusammenhang zur Bodentemperatur im Kontaktbereich und somit auch zur realisierbaren Leistungssteigerung. Die Durchlässigkeit der Funnel kann in Abhängigkeit der Randbedingungen während der Injektion schwanken. Im Rahmen der Parameterstudie wurde die Durchlässigkeit im Referenzmodell daher zwischen $k_{f,F} = 9,3 \cdot 10^{-6} - 9,3 \cdot 10^{-9}$ W/(mK) variiert.

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, ist bereits mit einer um zwei Zehnerpotenzen geringeren Durchlässigkeit eine gute Grundwassersteuerung möglich. Wird die Konstruktion undurchlässiger, wird ein zu einer vollständig undurchlässigen Dichtwand vergleichbarer Effekt erzielt. Dies wird auch bei der Betrachtung der möglichen Steigerung der Entzugsleistung deutlich (Abbildung 8-7). Infolge einer größeren Durchlässigkeit lässt sich keine signifikante Steigerung der Fließgeschwindigkeit im Gate erreichen. Die Steigerung der Entzugsleistung nimmt demzufolge ab. Bei einer größeren Funnellänge kommt es sogar zu einer Reduzierung der Entzugsleistung gegenüber dem Basismodell. Eine geringere Durchlässigkeit führt hingegen zu größeren Fließgeschwindigkeiten im Gate und demzufolge ebenso zu höheren Entzugsleistungen. Der Zuwachs der Entzugsleistung nimmt bei einer weiteren Reduzierung der Durchlässigkeit ab. Der Effekt einer nahezu

undurchlässigen Dichtwand ist erreicht und eine weitere Steigerung der Fließgeschwindigkeit im Gate ist nicht mehr möglich.

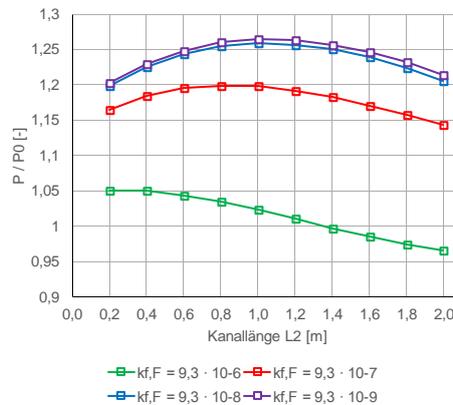


Abbildung 8-7: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Durchlässigkeit $k_{f,F}$ am Beispiel verschiedener Kanallängen L_2 ($w = 0,40$ m; $v_f = 0,50$ m/d)

8.3.5 Einfluss der Funneltiefe

In den bisherigen Untersuchungen wurde die FuG-Konstruktion über die gesamte Modelltiefe angenommen um eine Unterströmung auszuschließen. Um den Einfluss der Unterströmung der Konstruktion auf die erzielbare Steigerung der Entzugsleistung bewerten zu können, wurde die Funneltiefe in der Parameterstudie variiert. Die Rohrstränge des thermo-aktiven Bauteils reichen bis in eine Tiefe von 3,8 m. Somit erstreckt sich die FuG-Konstruktion bei einer Funneltiefe von 4 m noch über die gesamte Tiefe des Bauteils.

In Abbildung 8-8 wird die Entzugsleistung des Referenzmodells in Abhängigkeit der Funneltiefe dargestellt. Erwartungsgemäß sinkt mit abnehmender Funneltiefe die mögliche Steigerung der Entzugsleistung. Der positive Effekt einer höheren Grundwasserfließgeschwindigkeit und der infolgedessen steigenden Bodentemperatur im Kontaktbereich wirkt bei einer Tiefe $T_F < 4,0$ m nicht mehr über die gesamte Bauteiltiefe. Somit steht ein Teilbereich der Absorberrohe im Kontakt mit kühlerem Erdreich und die erzielbare Leistungssteigerung nimmt ab.

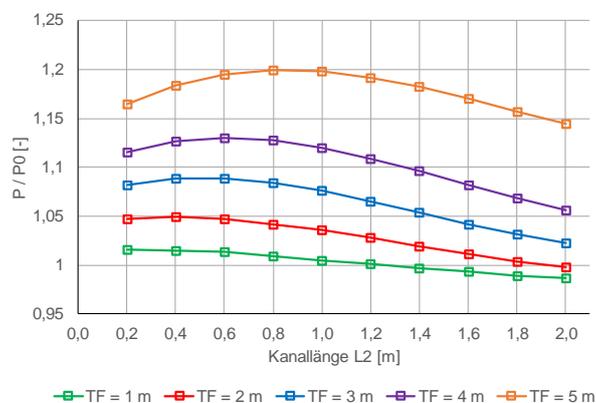


Abbildung 8-8: Steigerung der Entzugsleistung in Abhängigkeit der Funneltiefe T_F am Beispiel verschiedener Kanallängen L_2 ($w = 0,40$ m; $v_f = 0,50$ m/d)

Durch Einfluss der Unterströmung wird dem Grundwasser eine weitere Möglichkeit gegeben das Hindernis zu umströmen. Die Strömungsgeschwindigkeit im Gate nimmt infolgedessen ab. Zusätzlich nimmt die Geschwindigkeit durch die zusätzliche Unterströmung sowohl innerhalb als auch außerhalb des Kanals deutlich ab (vgl. Abbildung 8-9).

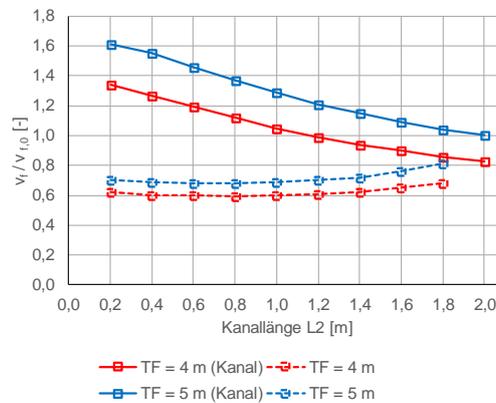


Abbildung 8-9: mittlere Fließgeschwindigkeit am Bauteilrand in Abhängigkeit der Kanallänge L_2 für $T_F = 4$ m und $T_F = 5$ m ($w = 0,40$ m)

Um eine maximale Ertragssteigerung des thermo-aktiven Bauteils zu erzielen sollte der Einfluss einer Unterströmung daher minimal gehalten werden. Die FuG-Konstruktion sollte daher immer eine größere Tiefe als das Bauteil aufweisen.

8.4 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die durchgeführte Parameterstudie hat gezeigt, dass die Effizienz von thermo-aktiven Bauteilen durch die Installation einer FuG-Konstruktion grundsätzlich gesteigert werden kann. Die Höhe der realisierbaren Leistungssteigerung hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Für das hier betrachtete System sind die Faktoren mit den größten Auswirkungen die Geometrie und die Durchlässigkeit der FuG-Konstruktion. Zur Geometrie zählen die Öffnungsweite, die Funnellänge, die Kanallänge und die Funneltiefe. Das Ergebnis der Parameterstudie bestätigt somit die Notwendigkeit einer detaillierten Planung der Konstruktion unter gekoppelter Beachtung aller beteiligten Einflussfaktoren. Somit ist vor der Installation einer FuG-Konstruktion im Bereich thermo-aktiver Bauteile eine systemangepasste Dimensionierung erforderlich. Diese kann mit dem im Parallelprojekt (AZ 29646) entwickelten Berechnungsansatz erfolgen.

Obwohl eine systemangepasste Dimensionierung der Konstruktion erforderlich ist, können auf Basis der erzielten Ergebnisse allgemeine Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Mit einer geringen Öffnungsweite werden die größten Fließgeschwindigkeiten am Bauteil und damit eine Steigerung der Bodentemperaturen im Kontaktbereich erzielt. Prinzipiell sind jedoch auch mit unterschiedlichen Öffnungsweiten vergleichbare Leistungssteigerungen realisierbar. Dafür ist jedoch eine an die Öffnungsweite angepasste Kanallänge zu beachten. Eine gekoppelte Betrachtung dieser Konstruktionselemente ist in der Planung daher zwingend notwendig. Der Handlungsspielraum bei

der Wahl der Öffnungsweite erlaubt es somit auf Herstellungstoleranzen bei der Erstellung der FuG-Konstruktion zu reagieren indem diese in der Planung der Konstruktion berücksichtigt werden.

Die Fließgeschwindigkeit im Gate ist direkt abhängig von der installierten Funnellänge. Im Allgemeinen kann daher die Leistungssteigerung mit einer Vergrößerung der Funnellänge optimiert werden. In der Planung sollte daher das vorhandene Platzangebot durch einen möglichst langen Funnel effektiv ausgenutzt werden. Dabei sind die Investitionskosten der Konstruktion jedoch den erzielbaren Leistungssteigerungen gegenüberzustellen. Bei der Dimensionierung der Konstruktion ist die Funneltiefe ein weiterer maßgeblicher Einflussparameter. Am Fuß der Konstruktion sinkt infolge der zusätzlichen Unterströmung die Grundwasserfließgeschwindigkeit im Bereich des Gates. Um eine mögliche Minimierung der erzielbaren Leistungssteigerungen zu verhindern, muss die Funneltiefe mindestens der Tiefe des thermo-aktiven Bauteils entsprechen. Die Einflüsse können durch eine größere Funneltiefe zusätzlich reduziert werden. Eine pauschale Aussage zur erforderlichen Funneltiefe kann nicht erfolgen. Diese sollte stets im Rahmen numerischer Simulationen in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen ermittelt werden.

Die Auswirkungen der FuG-Konstruktion auf das Strömungsbild werden maßgeblich von der Durchlässigkeit beeinflusst. Mit der Installation einer möglichst undurchlässigen Konstruktion können die größten Leistungssteigerungen realisiert werden. Eine Fehleinschätzung der Durchlässigkeit kann zu abweichenden Fließgeschwindigkeiten im Gate führen. Da die Konstruktion zur Steigerung der Entzugsleistung an die vorhandenen Fließgeschwindigkeiten angepasst werden muss, ist neben den geometrischen Konstruktionsparametern bei der Planung ein Hauptaugenmerk auf die Durchlässigkeit der Konstruktion zu legen.

Neben den Konstruktionsparametern der Funnel sind die Standorteigenschaften bei der Dimensionierung zu berücksichtigen. Dies macht eine detaillierte Standorterkundung zwingend erforderlich. Hierbei sollten neben der anstehenden Bodenart (bzw. deren thermischen Eigenschaften) vor allem die anstehenden Grundwasserverhältnisse erfasst werden. Die Parameterstudie hat gezeigt, dass die erzielbare Leistungssteigerung maßgeblich von der Ausgangsfließgeschwindigkeit abhängt. Gleichzeitig ist die Konstruktion in Abhängigkeit dieser Fließgeschwindigkeit zu dimensionieren. Bei stark variierenden Fließgeschwindigkeiten sind diese durch eine Anpassung der Konstruktion in der Planung zu berücksichtigen. Werden die Grundwasserverhältnisse in der Planung falsch eingeschätzt, kann dies im schlimmsten Fall zu einer Reduzierung der Entzugsleistung aufgrund einer fehlerhaften Dimensionierung der Konstruktion führen.

9 Ökologische und Ökonomische Bilanzierung des Verfahrens

Im Rahmen des Projekts wurde die Möglichkeit einer gezielten Erhöhung der Grundwasserfließgeschwindigkeit am Bauteil zur Effizienzsteigerung thermo-aktiver flächiger Bauteile untersucht. Dazu wurde der Einsatz einer FuG-Konstruktion aus Injektionskörpern zur gezielten Steuerung des Grundwassers geprüft.

Das Wärmepotential im Boden wird durch die thermischen Eigenschaften des anstehenden Bodens, die Bodentemperatur und die Grundwasserströmung gesteuert. Letztere bildet dabei eine maßgebliche Einflussgröße, da mit wachsender Strömungsgeschwindigkeit der konvektive Wärmetransport an Bedeutung gewinnt und das energetische Potential im Boden ansteigt. Eine gezielte Nutzung des Grundwassers zur Ertragssteigerung von geothermischen Anlagen findet derzeit jedoch noch nicht statt, sodass das große Energiepotential bislang ungenutzt bleibt. Das Hauptaugenmerk im Projekt lag somit auf der Energieressource Grundwasser, deren natürliches Energiepotential durch den Einsatz einer FuG-Konstruktion effektiver genutzt werden kann.

Die Effizienz einer geothermischer Anlagen kann entweder durch einer größere Entzugsleistung (bei konstanter Vorlauftemperatur) oder durch eine höhere mögliche Vorlauftemperatur (bei konstanter Entzugsleistung) gesteigert werden. Als Bewertungskriterium für einen effizienten Wärmeentzug im Primärkreislauf einer geothermischen Anlage kann generell eine möglichst große Entzugsleistung bei einer möglichst hohen Rücklauftemperatur herangezogen werden. Eine höhere Vorlauftemperatur führt unter Voraussetzung einer konstanten Entzugsleistung gleichzeitig zu höheren Rücklauftemperaturen im System. Diese bildet die Eingangsgröße des Sekundärkreislaufs bzw. des Heizsystems. Durch eine hohe Rücklauftemperatur kann der Wirkungsgrad der Wärmepumpe gesteigert werden, da eine Reduzierung des Fremdenergie- bzw. Hilfsenergiebedarfs möglich ist. Im Projekt wurde gezeigt, dass durch die Installation einer FuG-Konstruktion eine gezielte Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit am Bauteil realisiert werden kann. Infolge des größeren konvektiven Wärmestroms, erfolgt ein direkter Anstieg der Bodentemperaturen im Kontaktbereich zwischen Untergrund und Bauteil. Bei einer konstanten Vorlauftemperatur führt dies wiederum zu einer signifikanten Steigerung der Entzugsleistung. Im Umkehrschluss kann durch eine FuG-Konstruktion unter Vorgabe einer konstanten Entzugsleistung eine höhere Vorlauftemperatur realisiert werden. Dies wirkt sich jedoch nicht nur positiv auf den Sekundärkreislauf aus, da infolge einer höheren Vorlauftemperatur auch mit geringeren Auswirkungen auf das natürliche Temperaturregime im Untergrund zu rechnen ist. Somit hat die Installation einer FuG-Konstruktion die gezielte Steigerung der Effizienz einer geothermischen Anlage und eine damit verbundene Umweltentlastung zur Folge.

Die Steuerung des Grundwassers erfolgte im Projekt durch den Einsatz von Injektionskörpern. Der Vorteil der Injektionskörper im Vergleich zu herkömmlichen Funnel-Bauwerken liegt in der einfachen und kostengünstigen Herstellungsmethode. Untersuchungen bestätigten, dass mit dieser Methode eine Steuerung des Grundwassers prinzipiell möglich ist. Darüber hinaus kann das Injektionsgut auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen als für die Umwelt unbedenklich eingestuft werden. Somit sind durch den Einsatz keine nachteiligen Auswirkungen auf das Grundwasser zu erwarten. In Verbindung mit der Langzeitbeständigkeit der Injektionskörper ist grundsätzlich ein Verbleib der Körper im Untergrund auch über die Nutzungsdauer hinaus möglich. Bei Bedarf kann das System jedoch sowohl aus ökologischer Sicht als auch aus baupraktischer Sicht komplett zurückgebaut werden.

Der Einsatz einer FuG-Konstruktion bietet somit aus ökologischer und ökonomischer Sicht Vorteile. Durch die gezielte Steuerung des Grundwassers mit Injektionskörpern kann die natürliche Energieressource Erdwärme optimaler genutzt werden. Das Verfahren erlaubt es die Effizienz einer geothermischen Anlage zu steigern und das Energiepotential des Grundwassers zukünftig besser zu nutzen. Die effektive Nutzung des Energiepotentials des Grundwassers wirkt sich zudem positiv auf die Dimensionierung der Wärmepumpe aus.

10 Fazit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchung der Möglichkeit der Ertragssteigerung von thermo-aktiven flächigen Bauteilen durch Steuerung der Grundwasserströmung mittels neuartiger Injektionskörper“ wurde eine mögliche Steigerung der Grundwasserfließgeschwindigkeit am Bauteil durch den Einsatz einer FuG-Konstruktion untersucht. In der Konstruktion sollten dabei Injektionskörper aus einem Zweikomponenten Epoxidharz (Polyurethan) der Firma Uretek eingesetzt werden.

Die Installation einer FuG-Konstruktion im Grundwasser setzt voraus, dass durch diese keine nachteilige Auswirkung auf das Grundwasser und das Bauteil ausgeübt wird. In diesem Zusammenhang wurden die Umweltverträglichkeit des nicht ausgehärteten Injektionsguts, der Einfluss von Aufstauwirkungen und die Ausbreitung von Temperaturfahnen untersucht. Durch die Ergebnisse inverser Säulenversuche wurde die Unbedenklichkeit des Injektionsguts beim Einsatz im Grundwasser belegt. Numerische Simulationen zur Ausbreitung der Schadstofffahne bestätigen zudem eine starke Verdünnung im Umfeld der Injektionen. Es findet demnach eine nicht umweltrelevante ausschließlich lokale Beeinträchtigung statt. Eine Erhöhung der Grundwasserfließgeschwindigkeit am Bauteil führt im Anstrom zu einem erhöhten Aufstau, während im Abstrom ein erhöhter Sunk auftritt. Für verschiedene Grundwassergeschwindigkeiten und Bauteilgeometrien wurde die resultierende Erhöhung der Aufstau- bzw. Sunkhöhe sowie die daraus resultierenden Belastungen und Setzungen bestimmt. Die Untersuchungen haben ergeben, dass die resultierenden Setzungen sowie die zusätzlichen Belastungen auf die Wand als vernachlässigbar gering eingestuft werden können. Durch die Installation einer FuG-Konstruktion sind demnach keine nachteiligen Auswirkungen auf das Umfeld oder das Bauteil durch einen Schadstoffeintrag oder durch Aufstauwirkungen zu erwarten.

Des Weiteren wird durch eine FuG-Konstruktion das Strömungsprofil im Untergrund beeinflusst, was zu einer Änderung der sich einstellenden Temperaturfahne führt. Die Ausbreitung der Temperaturfahne im Untergrund ist aus genehmigungsrechtlicher Sicht relevant, da durch ihre Eingrenzung eine gegenseitige Beeinflussung von mehreren Anlagen vermieden und die Regeneration des Untergrunds gewährleistet werden soll. Im Rahmen des Projekts wurden Untersuchungen zur Ausbreitung von Temperaturfahnen für verschiedene Randbedingungen durchgeführt. Eine pauschale Aussage zur Bewertung von Temperaturfahnen ist grundsätzlich nicht möglich, womit die Vorgaben pauschaler Mindestabstände kritisch zu betrachten sind. Die

Ausbreitung der Temperaturfahne hängt neben der Fließgeschwindigkeit von der Bauteilgeometrie und der Entzugsleistung ab. Eine Steigerung der Effizienz macht sich im Lastfall einer konstanten Entzugsleistung allerdings in steigenden Vor- und Rücklauftemperaturen bemerkbar, wodurch die Ausbreitung der Temperaturfahne reduziert werden kann. Da durch eine FuG-Konstruktion trotz erhöhter Fließgeschwindigkeiten eine Verlängerung der Temperaturfahne auftreten kann, ist immer eine integrierte Betrachtung in Verbindung mit der geplanten FuG-Konstruktion erforderlich. Die numerischen Untersuchungen zeigten darüber hinaus die Abweichungen infolge der Berücksichtigung thermischer Dispersion. Deren Einfluss hängt dabei stark vom gewählten Berechnungsansatz und der angesetzten Dispersivität ab. In diesem Zusammenhang besteht weiterhin Forschungsbedarf, um die Notwendigkeit der Berücksichtigung thermischer Dispersion abschließend zu klären und einen verlässlichen Berechnungsansatz zu verifizieren.

In Injektionsversuchen wurde der Einsatz innovativer Injektionskörper der Firma Uretek als Leitwände der FuG-Konstruktion untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die Injektionskörper eine für eine Grundwassersteuerung ausreichend geringe Durchlässigkeit aufweisen. Eine größere Herausforderung stellte jedoch die lagegenaue und oberflächennahe Installation sowie die Begrenzung der horizontalen Ausbreitung des Injektionsmaterials dar. Thermoaktive Bauteile werden in der Regel oberflächennah installiert, sodass eine Steuerung der Grundwasserströmung auch in der Nähe zur Oberfläche erforderlich wird. Die Ausbildung und Orientierung des Injektionskörpers im Allgemeinen hängt maßgeblich von den vorliegenden Untergrundeigenschaften ab und ist damit starken Schwankungen unterworfen. Auf Basis der im Projekt durchgeführten Versuchsreihen kann keine abschließende Bewertung der Eignung des Injektionsverfahrens zur Erstellung lagegenauer vertikaler Schlitzte erfolgen. In diesem Zusammenhang sind weitere Versuchsreihen unter kontrollierten Randbedingungen erforderlich, um eine Übertragbarkeit auf andere Standorteigenschaften zu ermöglichen. Darüber hinaus besteht weiterer Forschungsbedarf, um eventuell erforderliche Weiterentwicklungen des Injektionsverfahrens sowie eine detaillierte Untersuchung von Hilfsmaßnahmen zu untersuchen. Zu den Hilfsmaßnahmen können unter anderem die in diesem Projekt bereits untersuchte Vorschädigung zur gezielten Vorgabe einer Expansionsrichtung oder die Aufbringung einer Auflast, um oberflächennahe Injektionen zu ermöglichen, gehören.

In Wärmeentzugsversuchen im Labor sollte zum einen die Wirksamkeit einer FuG-Konstruktion zur Steuerung einer Grundwasserströmung und zum anderen die möglichen Steigerungen der Entzugsleistungen thermoaktiver Bauteile untersucht werden. Eine effektive Grundwassersteuerung konnte durch die in Filterrohren gemessenen Standrohrhöhen nachgewiesen werden. Es zeigte sich jedoch, dass die Größe des Versuchstandes nicht ausreicht, um Randeinflüsse bei der Grundwasserströmung unter Einfluss der FuG-Konstruktion auszuschließen. Eine Steigerung des Wärmeentzugs konnte in den Laborversuchen daher nicht bestätigt werden. Ein weiterer Grund dafür waren die in der Versuchsauswertung festgestellten Messungenauigkeiten, die auf eine Beschädigung beim Einbau der Messtechnik zur Erfassung der Vor- und Rücklauftemperaturen zurückgeführt werden konnten. Für zukünftige Untersuchungen im

Versuchstand muss daher eine Optimierung der messtechnischen Erfassung erfolgen. Des Weiteren wird die Einrichtung einer zukünftigen Echtzeit-Auswertung der Versuchsergebnisse in Betracht gezogen.

In numerischen Simulationen konnten Erkenntnisse zur optimalen Geometrie einer FuG-Konstruktion gewonnen werden. Dabei stellte sich eine zur Strömung senkrechte Ausrichtung der Konstruktion als besonders effektiv heraus. In weiteren Simulationen konnte unter Verwendung des im Parallelprojekt (AZ 29646) entwickelten Berechnungsansatzes die Möglichkeit einer Steigerung der Entzugsleistung durch eine aktive Grundwassersteuerung nachgewiesen werden. Demnach ist durch die Installation einer FuG-Konstruktion eine signifikante Steigerung der Entzugsleistungen möglich. Die Konstruktion ist dabei jedoch immer systemangepasst und in Abhängigkeit der hydrologischen und thermischen Untergrundeigenschaften auszulegen. Eine Verifizierung der Ergebnisse der numerischen Simulationen anhand der im Projekt durchgeführten Laborversuche ist nicht möglich. Für eine Verifizierung wäre eine Anwendung der Konstruktion und messtechnische Überwachung innerhalb eines Pilotprojekts oder die Durchführung weiterer Laborversuche erforderlich. Für die Versuche im Labor ist in diesem Zusammenhang eine Vergrößerung des Versuchstandes erforderlich, um Randeinflüsse der Grundwassersteuerung auszuschließen.

Im Rahmen des Projekts wurde zur Bewertung der möglichen Leistungssteigerungen ausschließlich der Primärkreislauf der geothermischen Anlage betrachtet. Als Ergebnis der Berechnungen wurden die Entzugsleistungen erhalten und verglichen. Da die Betriebsparameter der Anlage konstant gehalten wurden korrelieren die Steigerungen der Entzugsleistung mit denen der Rücklauftemperatur. Die Rücklauftemperatur kann als Eingangsgröße für die Dimensionierung der Wärmepumpe bzw. des Sekundärkreislaufes dienen. In der Praxis interagieren beide Teilsysteme miteinander, weshalb eine vollständige Bewertung der Steigerung der Effizienz einer geothermischen Anlage eine gekoppelte Betrachtung der Untergrund- mit der Gebäudesimulation erfordert.

Die hier durchgeführte Parameterstudie wurde für einen relativ kleinen Maßstab durchgeführt, um die prinzipiellen Zusammenhänge und Einflussfaktoren aufzuzeigen. Für eine Übertragung der Ergebnisse auf ein reales Projekt können die Abbildung großflächiger und schwankender Grundwasserverhältnisse sowie die Verwendung von realen Temperaturmodellen für den Untergrund erforderlich sein. Darüber hinaus werden thermo-aktive Bauteile oftmals in Gruppen angeordnet, sodass eine mögliche Beeinflussung benachbarter Bauteile durch die FuG-Konstruktion zu beachten ist. Für diese Untersuchungen sind großmaßstäbliche Untersuchungen erforderlich, die auch den Sekundärkreislauf einbeziehen müssen.

Einige der im Abschlussbericht vorgestellten Ergebnisse wurden bereits in einer Veröffentlichung publiziert und auf Konferenzen vorgestellt (vgl. Kapitel 1). Eine weitere Verbreitung der Ergebnisse in Fachzeitschriften ist geplant, sodass die Erkenntnisse interessierten Planern und Ingenieuren zugänglich gemacht werden.

Literaturverzeichnis

- [Ba2011]: BAUER, D.: *Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, 2011.
- [Bi2004]: BIRKE, V.; BURMEIER, H.; NIEDERBACHER, P.; WEGNER, M.; MAIER, M.; KÜHLERS, D.; EGGERS, J.; MAIER, D., WEINDL, J.; KOCH, M.: *Zur Abreinigungsleistung durchströmter Reinigungswände: Hinweise und Rückschlüsse für die Sanierungspraxis und weitere Entwicklung*. Altlasten Spektrum, Nr. 13, Heft 6, S. 301-317, 2004.
- [Br2006] BRANDL, H.: *Energy foundations and other thermo-active ground structures*. Géotechnique Vol. 56(2), 2006; p. 81-122.
- [Bra2009] BRAMESHUBER, W.; VOLLPRACHT, A.: *Untersuchungen zum Auslaugverhalten von Abdichtungs- und Injektionsstoffen*. Forschungsbericht F7048, 2009.
- [Bra2011] BRAMESHUBER, W.; VOLLPRACHT, A.: *Bewertung der Umweltverträglichkeit von Abdichtungs- und Injektionsstoffen*. Kurzberichte aus der Bauforschung, Jahrgang 52(2011), Heft 5.
- [Ch2000] CHIASSON, A.D.; REES, S.J.; SPITLER, J.D.: *A Preliminary Assessment of the Effects of Groundwater Flow on Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems*. ASHRAE Transactions. No. 106(1), 2010; p. 380-393.
- [Cl2003] CLAUSER, C. (Hrsg.): *Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers. SHEMAT and Processing SHEMAT*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [DI2011] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (DIBt) (Hrsg.): *Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser*. Berlin 2011.
- [Do1985] DOMENICO, P.A.; ROBBINS, G.A.: *A New Method of Contaminant Plume Analysis*. Groundwater, Vol. 23(4), 1985; p. 476-485.
- [Eg2007] EGGERS, J.; MAIER, D.; MAIER, M.; ROTH, K.: *Funnel-and-Irradiate Technologie (FIT) zur in-situ Aufbereitung belasteter Grundwässer*. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, 2007.
- [Er1999] ERNST, C.: *Beitrag zur Bestimmung des Grundwasserstaus durch Baukörper, die in den Grundwasserstrom hineinreichen sowie die Bewertung von Wasserumleitungen durch Drains*. Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät für Bauingenieurwesen, Professur Grundbau, 1999.
- [Fa1986] FAROUKI, O.T.: *Thermal Properties of Soils*. Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 11, 1986, Trans Tech Publications.
- [Fe2007] FERGUSON, G.: *Heterogeneity and Thermal Modelling of Ground Water*. Groundwater, No. 45(4), 2007; p. 586-594.
- [Fr1979] FRIED, J.J.; MUNTZER, P.; ZILLIOX, L.: *Groundwater Pollution by Transfer of Oil*. Groundwater, No. 17(6), 1979; p. 586-594.
- [Ge1992] GELHAR, L.; WELTY, C.; REHFELDT, K.: *A critical Review of Data on field-scale Dispersion in Aquifers*. Water Resources Research, Vol. 28(7), 1992; p. 1955-1974.
- [Gl2009] GLITSCH, W.; SPANG, C.: *Innerstädtische Tunnelbauwerke als Strömungshindernis für das Grundwasser - Grundwasserkommunikationsanlagen zur Beherrschung von Aufstau und Sunk am Beispiel des City Tunnel Leipzig*. Taschenbuch für den Tunnelbau 2009. 33 Jahrgang, VGE Verlag GmbH, Essen.

- [Hä2010] HÄHNLEIN, S.; MOLINA-GIRALDO, N.; BLUM, P.; BAYER, P.; GRATHWOHL, P.: *Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden*. Grundwasser, Nr. 15, 2010; S. 123-133.
- [Hy2006] HYGIENE-INSTITUT DES RUHRGEBIETS: *Chemisch/toxikologische Untersuchungen eines Zweikomponenten-Polyurethan-Systems*. Untersuchungsbericht 2006; <http://www.uretek.de/hygieneinstitut.pdf> (06.08.2013).
- [It2010] ITTERSHAGEN, M.: *Barrierewirkung von Baugruben im Grundwasser - Hydraulische Anforderungen und Ausgleichsmaßnahmen*. 7. Kolloquium Bauen in Boden und Fels 2010. Technische Akademie Esslingen (Hrsg.), Ostfildern.
- [Ki1987] KINZELBACH, W.: *Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser*. Schriftenreihe gwf Wasser-Abwasser, Band 21 (1987); R. Oldenburg Verlag, München.
- [Kp2014] KOPPMANN, D.; ZIEGLER, M.; KÜRTEEN, S.; MOTTAGHY, D.: *Auslegung und Berechnung von thermo-aktiven Bauteilen bei vorhandener Grundwasserströmung*. Bbr 65, Heft 12 (2014), S. 64-69.
- [Kü2014] KÜRTEEN, S.: *Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen am Beispiel thermo-aktiver Abdichtungselemente*. Dissertation. Fakultät für Bauingenieurwesen, RWTH Aachen, 2014.
- [LA2004] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER: *Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser*. Kulturbuch-Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- [Le2007]: LEE, C.K.; LAM, N.H.: *Effects of Groundwater Flow Direction on Performance of Ground Heat Exchanger Borefield in Geothermal Heat Pump Systems using 3-D Finite Difference Method*. Processing: Building Simulation 2007; p. 337-341.
- [MG2011] MOLINA-GIRALDO, N.; BAYER, P.; BLUM, P.: *Evaluating the influence of thermal dispersion on temperature plumes from geothermal systems using analytical solutions*. International Journal of Thermal Sciences, No. 50, 2012; p. 1223-1231.
- [Mo2012] MOTTAGHY, D.; DIJKSHOORN, L.: *Implementing an effective finite difference formulation for borehole heat exchangers into a heat and mass transport code*. Renewable Energy, No. 45, 2012; p. 59-71.
- [Od2009] ODENWALD, B.; HEKEL, U.; THORMANN, H.: *Grundwasserströmung – Grundwasserhaltung*. In: WITT, K.J. (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch – Teil 2: Geotechnische Verfahren*. 7 Auflage 2009, Ernst & Sohn, Berlin.
- [OE2005] OECD: *OECD Guideline for Testing of Chemicals. Section 3: Degradation and Accumulation. Test No 301: Ready Biodegradability*. 17. July 1992, DOI: 10.1787/9789264070349-en.
- [Pa2006] PANNIKE, S.; KÖLLING, M.; PANTELEIT, B.; REICHLING, J.; SCHEPS, V.; SCHULZ, H.D.: *Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärme-sondenanlagen in Lockersedimenten*. Grundwasser, Nr. 1, 2006; S. 6-18.
- [Pu2013] PUTTKE, B.: *Coastal Waters as profitable Renewable Energy Source*. Coastal & Marine, Vol. 22(1), 2013; p. 16.
- [Ra2006] RATH, V., A. WOLF und M. BÜCKER: *Joint three-dimensional inversion of coupled groundwater flow and heat transfer based on automatic differentiation: Sensitivity calculation, verification and synthetic examples*. Geophysical Journal International, Vol. 167 (1), p. 453–466, 2006.
- [Sa1982] SAUTY, J. P.; GRINGARTEN, A. C.; FABRIS, H.; THIERY, D.; MENJOZ, A.; LANDEL, P. A.: *Sensible Energy Storage in Aquifers – 2. Field Experiments and Comparison with Theoretical Results*. Water Resources Research, Vol. 18 (1), 1982; p. 253-265.

- [Sad2008] SADEGH-AZAR, P.: *Erschütterungsreduktion durch aufgeschäumte Isolierkörper im Boden*. Dissertation. Fakultät für Bauingenieurwesen, RWTH Aachen, 2014.
- [Sc2004] SCHÖSSNER, H.; KUNZ, H.: *Erarbeitung einer standardisierten Methode zur Beurteilung der Auswirkungen von Bauprodukten zur Bodeninjektion und Kanalsanierung auf Boden und Grundwasser unter Verwendung des Säulenversuchs mit umgekehrter Fließrichtung*. Bauforschungsbericht - Kurzbericht, Band T 3056, 2004; Fraunhofer IRB Verlag;
- [Sch1981] SCHNEIDER, G.: *Berechnung der Beeinflussung des Grundwasserstroms durch Baumaßnahmen*. Die Bautechnik, Heft 2., S. 67-69.
- [Sch1982] SCHNEIDER, G.: *Möglichkeiten zur Berechnung der Grundwasserspiegelbeeinflussung durch ein sehr langes Bauwerk mit abschnittswisen Durchbrüchen*. Die Bautechnik, Heft 10, S. 332-337.
- [Sch1983] SCHNEIDER, G.: *Beeinflussung des Grundwasserstroms durch Baumaßnahmen mit Grundwasserdurchleitungen bei gleichzeitiger Umströmungsgeschwindigkeit*. Die Bautechnik, Heft 6, S. 189-196.
- [Sch1983a] SCHNEIDER, G.: *Grundwasseraufstau vor Bauwerken bei gleichzeitiger Unter- und Umströmungsmöglichkeit*. Die Bautechnik, Heft 11, S. 391-394.
- [Sch1995] SCHNEIDER, G.: *Beeinflussung des Grundwasserstroms durch Bauwerke mit räumlicher Erstreckung*. Die Bautechnik, Heft 5, S. 289-298.
- [Sm1983] SMITH, L.; CHAPMAN, D.: *On the Thermal Effects of Groundwater Flow – 1. Regional Scale Systems*. Journal of Geophysical Research, Vol. 88(B1), 1983; p. 593-608.
- [Wa2011] WAGNER, R.R.: *Inverser Säulenversuch zur Beurteilung der Auswirkungen von Bodeninjektionsmitteln auf Boden und Grundwasser*. Dissertation 2011; Freie Universität Berlin – Fachbereich Geowissenschaften.
- [We2005] WEINDL, J.; KOCH, M.; TIDDEN, F.: *Funnel-and-Gate-Technik zur Sanierung eines Gaswerkstandorts*. TeraTech 7-8, TT2-TT5, 2005.
- [Wi1976] WINDQVIST, G.; HAYDEN, H.: *Heat Transfer in Groundwater*. VBB Rep. 92203543. VBB, Stockholm, 1976.
- [Zi2011] ZILCH, K.; DIEDERICHS, C.J.; KATZENBACH, R.; BECKMANN, K.J. (Hrsg): *Handbuch für Bauingenieure – Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit*. 2. Auflage, 2012, Springer-Verlag, Heidelberg.
- [Zie2011] ZIEGLER, M.; KÜRTEIN, S.: *Erdwärmennutzung mit Hilfe von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen an erdberührten Untergeschoßkonstruktionen im Grundwasser*. Abschlussbericht (Forschungsinitiative Zukunft Bau; Band F2788); Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2011.

Anhang

A.1 Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Auswirkung von Aufstauwirkungen

A.1.1 Setzungen

Die Setzungen eines Bodens ergeben sich aus den setzungserzeugenden Spannungen:

$$s = \frac{\Delta\sigma}{E_s} \cdot d_B$$

Hierin ist E_s [kN/m²] der Steifemodul des Bodens. Im Falle einer Grundwasserabsenkung ergibt sich die setzungserzeugende Spannung aus der Vergrößerung der Wichte des Bodens im Bereich der Grundwasserabsenkung:

$$\Delta\sigma = (\gamma - \gamma') \cdot h_{max}$$

A1.2 Erddruck und Wasserdruck

Die Verteilung des Erddrucks in einem kohäsionslosen Boden berechnet sich wie folgt:

$$e_{ah}(z) = K_{agh} \cdot z \cdot \gamma^*$$

Für den Ansatz des Erdruhedrucks (unverschiebliche Wand) wird der Erddruckbeiwert K_{agh} durch den Erdruhedruckbeiwert K_0 ersetzt:

$$K_0 = 1 - \sin\varphi$$

Die effektive Wichte entspricht in „trockenem“ Bereich der Feuchtwichte γ , für den strömungsbeeinflussten Bereich berechnet sie sich zu:

$$\gamma^* = \gamma' + i \cdot \gamma_w ,$$

wobei die Wichte des Wassers $\gamma_w = 10$ kN/m³ beträgt.

Die Verteilung des Wasserdrucks berechnet sich zu:

$$p_w(z) = \gamma_w \cdot z$$

Der Bemessungswert der Beanspruchung E_d [kN/m] aus Erd- und Wasserdruck lautet:

$$E_d = \gamma_G \cdot E_{ah} + \gamma_{G,E0} \cdot P_w$$

wobei sich die Erddruck- und die Wasserkraft durch Integration der jeweiligen Verläufe ergeben.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Tabelle A1: Auswirkungen einer Steigerung der Grundwassergeschwindigkeit

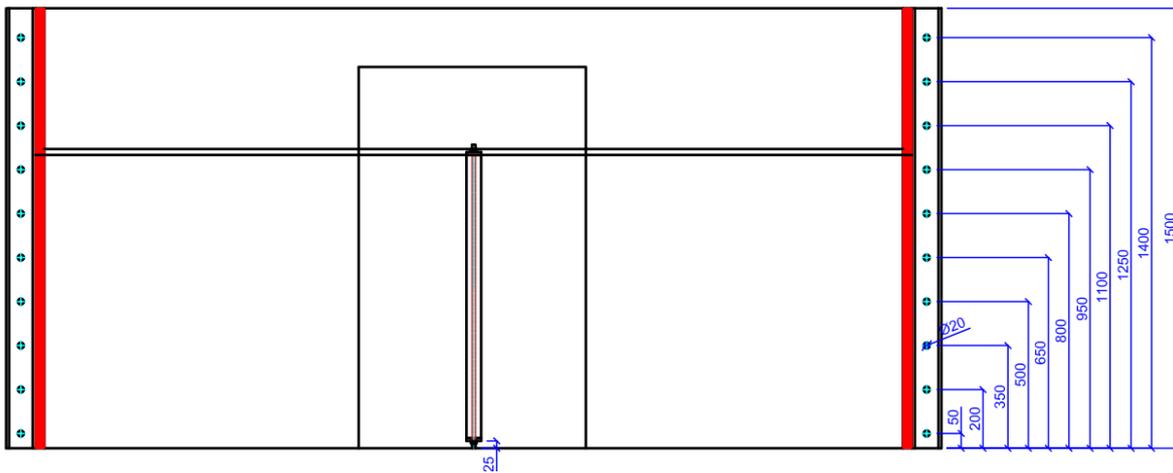
		a/H = 0,1	a/H = 0,5	a/H = 0,8
Wasserspiegeldifferenz	[cm]	28,8	20,2	8,4
Erddruck (vorher)	[kN/m]	254,6	96,1	26,4
Erddruck (nachher)	[kN/m]	251,0	94,5	26,2
Wasserdruck (vorher)	[kN/m]	406,4	125,5	20,1
Wasserdruck (nachher)	[kN/m]	432,7	135,82	21,8
Erhöhung (charakteristisch)	[%]	3,4	4,0	3,1
Erhöhung (Bemessungswerte) ¹⁾	[%]	3,7	4,2	3,4
Setzungen	[mm]	0,3	0,2	0,09
¹⁾ Teilsicherheitsbeiwerte: $\gamma_{G,E0} = 1,2$ (Erdruhedruck); $\gamma_G = 1,35$ (Wasserdruck)				

A.2 Injektionsversuche

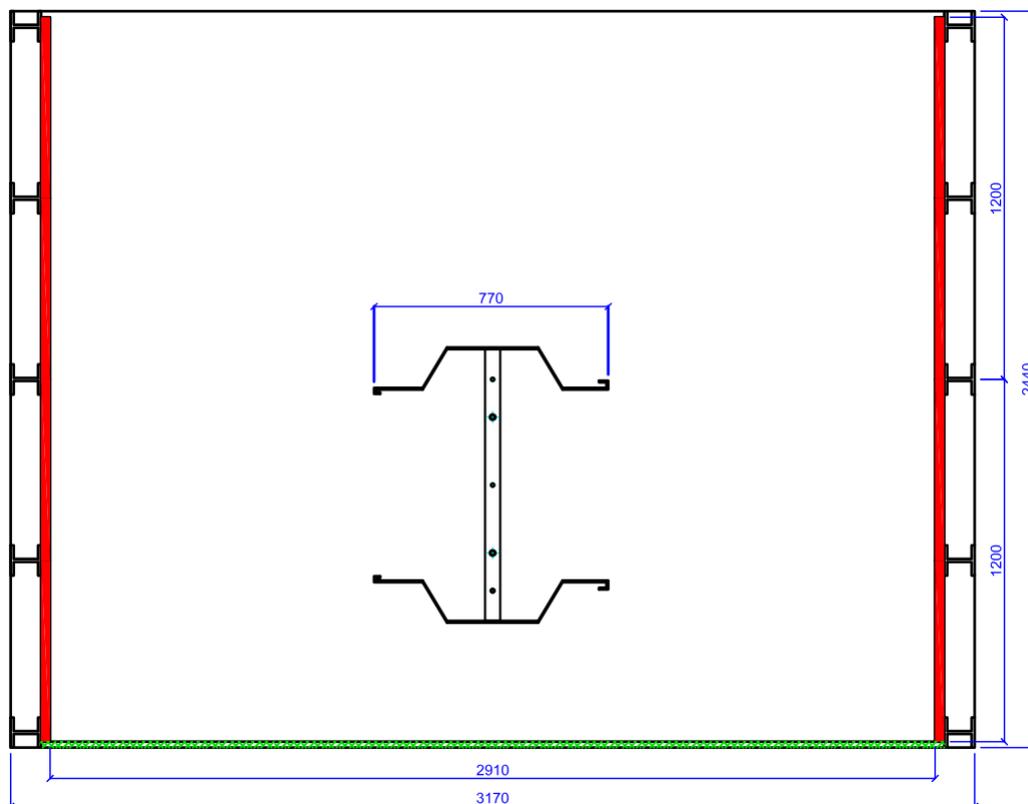
A.2.1 Konstruktion

Konstruktion des Versuchstandes Injektionsversuche im Labor

Seitenansicht



Draufsicht



A.3 Wärmentzugsversuche

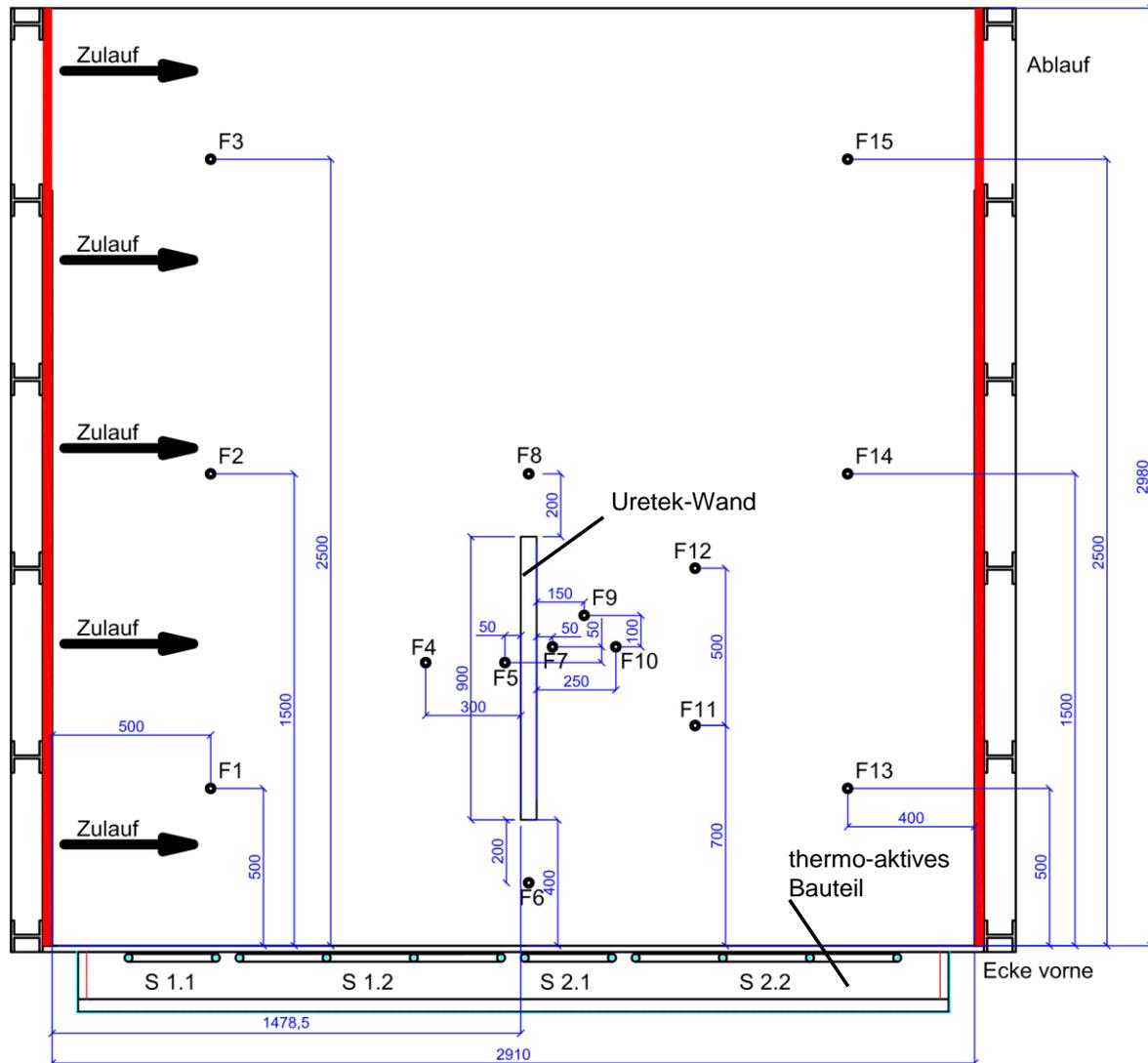
A.3.1 Eigenschaften

Tabelle A2: Eigenschaften der getesteten Systeme im Großversuch im Labor

Parameter	Symbol	Wert
Boden(Sand)		
Durchlässigkeitsbeiwert	k_f [m/s]	$9,3 \cdot 10^{-5}$
Minimaler Porenanteil	n_{\min} [-]	0,33
Maximaler Porenanteil	n_{\max} [-]	0,46
Trockendichte bei dichtester Lagerung	$\rho_{d,\max}$ [g/cm ³]	1,79
Trockendichte bei lockerster Lagerung	$\rho_{d,\min}$ [g/cm ³]	1,44
Proctordichte	ρ_{pr} [g/cm ³]	1,73
Porenanteil bei Proctordichte	n_{pr} [-]	0,35
Korndichte	ρ_s [g/cm ³]	2,67
Wärmeleitfähigkeit der Kornfraktion	λ_s [W/(mK)]	6,95
Wärmekapazität der Kornfraktion	$c_{v,s}$ [J/(m ³ K)]	$1,97 \cdot 10^6$
Beton		
Dichte	ρ_c [g/cm ³]	2,26
Wärmeleitfähigkeit	λ_c [W/(mK)]	2,48
Wärmekapazität	$c_{v,c}$ [J/(m ³ K)]	$2,3 \cdot 10^6$

A.3.2 Konstruktion

Grundriss der Konstruktion des Versuchstandes der ersten Versuchsreihe
Position der Uretek-Wand und Positionierung der Filterrohre im Versuch



A.3.3 Ergebnisübersicht

Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

Bezeichnung	Durchströmte Systeme				Vorlauftemperatur				Rücklauftemperatur				Leistung			
	U1	U2	W1	W2	Tein,1 [°C]	Tein,2 [°C]	Tein,m [°C]	Taus,1 [°C]	Taus,2 [°C]	Taus,m [°C]	P ₁ [W]	P ₂ [W]	P ₁ [W/m]	P ₂ [W/m]		
U-W vor_0.23_1.1	x		x		3.7	4.1	3.9	4.2	4.5	4.4	145.7	126.6	38.3	17.1		
U-W vor_0.23_1.2	x		x		2.4	2.8	2.6	3.0	3.4	3.2	158.2	154.5	41.6	20.9		
U-W nach_0.23_1.1		x		x	2.4	2.7	2.6	3.0	3.5	3.2	156.9	189.1	41.3	25.6		
U-W nach_0.23_1.2		x		x	2.5	2.8	2.6	3.0	3.4	3.2	147.0	166.3	38.7	22.5		
U-W vor_0.46_1.1	x		x		2.5	2.7	2.6	2.9	3.3	3.1	119.4	152.7	31.4	20.6		
U-W vor_0.46_1.2	x		x		2.6	2.9	2.7	3.1	3.4	3.3	122.0	149.1	32.1	20.2		
U-W nach_0.46_1.1		x		x	2.6	2.8	2.7	3.1	3.6	3.3	142.7	198.8	37.6	26.9		
U-W nach_0.46_1.2		x		x	2.5	2.8	2.6	3.0	3.4	3.2	135.2	178.5	35.6	24.1		
U-W vor_0.56_1.1	x		x		2.6	2.5	2.6	3.0	3.4	3.2	108.8	234.7	28.6	31.7		
U-W vor_0.56_1.2	x		x		3.2	2.9	3.1	3.4	3.8	3.6	48.9	227.4	12.9	30.7		
U-W nach_0.56_1.1		x		x	2.8	2.6	2.7	3.2	3.6	3.4	100.9	251.2	26.6	34.0		
U-W nach_0.56_1.2		x		x	2.7	2.6	2.7	3.1	3.6	3.4	109.6	261.6	28.8	35.4		
U-W vor_0.70_1.1	x		x		2.5	2.7	2.6	3.0	3.4	3.2	133.4	178.8	35.1	24.2		
U-W vor_0.70_1.2	x		x		2.4	2.6	2.5	2.9	3.3	3.1	144.5	190.3	38.0	25.7		
U-W nach_0.70_1.1		x		x	2.5	2.7	2.6	3.0	3.5	3.2	146.5	204.2	38.6	27.6		
U-W nach_0.70_1.2		x		x	2.7	2.6	2.6	3.1	3.6	3.3	102.1	270.3	26.9	36.5		

Bezeichnung	Durchfluss Q _v [l/h]	Potentialdifferenz Δh [m]	Standrohrhöhen																
			Zu	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	Ab
U-W vor_0.23_1.1	225	0.23	21.3	20.4	22.5	20.0	26.0	26.7	28.1	29.4	30.5	29.1	30.5	31.5	35.0	40.6	40.0	39.9	44.5
U-W vor_0.23_1.2	225	0.23	21.3	20.7	23.4	21.0	26.1	27.1	28.4	29.6	30.5	28.9	30.7	31.7	35.3	39.9	39.2	39.2	44.5
U-W nach_0.23_1.1	225	0.24	21.1	20.8	21.8	20.8	26.1	26.6	28.1	29.2	30.2	28.8	30.1	32.7	34.4	38.4	39.0	39.4	44.9
U-W nach_0.23_1.2	225	0.23	21.5	20.8	23.2	21.2	26.2	27.3	28.2	29.3	30.8	29.1	30.5	32.5	34.9	39.2	38.8	38.7	44.2
U-W vor_0.46_1.1	225	0.46	12.4	13.5	13.9	13.7	22.1	24.7	28.6	30.0	29.8	29.9	31.9	36.0	38.7	48.9	48.7	48.6	58.6
U-W vor_0.46_1.2	225	0.47	13.2	13.5	15.3	13.0	22.2	24.7	29.2	31.6	30.8	31.5	33.6	37.7	41.0	51.3	51.0	51.1	60.4
U-W nach_0.46_1.1	225	0.44	12.1	11.7	14.0	13.9	21.5	24.0	27.8	29.4	29.2	29.1	31.0	35.2	38.4	46.7	47.8	47.1	56.4
U-W nach_0.46_1.2	225	0.46	11.5	13.4	13.5	13.0	21.6	24.3	27.9	29.7	29.2	29.3	31.2	35.3	38.7	46.6	48.5	48.3	57.0
U-W vor_0.56_1.1	225	0.51	14.3	18.4	20.2	18.5	25.3	28.1	32.3	34.6	33.2	34.4	36.3	40.6	43.4	53.7	54.0	53.7	65.0
U-W vor_0.56_1.2	225	0.52	16.5	20.4	22.3	20.7	27.3	28.9	33.1	35.2	33.8	34.9	36.7	41.0	43.1	53.7	54.3	54.0	68.7
U-W nach_0.56_1.1	225	0.58	9.7	14.8	16.5	14.8	22.4	25.4	30.2	32.5	31.1	32.3	34.6	39.5	42.3	54.9	55.3	54.8	67.9
U-W nach_0.56_1.2	225	0.54	11.7	16.2	18.1	16.2	23.3	25.9	30.5	33.0	31.1	32.7	34.7	39.2	41.6	53.6	54.3	53.9	66.1
U-W vor_0.70_1.1	225	0.65	7.0	9.1	11.2	10.0	20.2	24.7	29.9	33.2	31.6	33.2	35.2	42.0	43.2	59.5	59.2	58.4	72.3
U-W vor_0.70_1.2	225	0.65	7.2	9.8	11.6	10.0	19.6	24.9	30.3	33.1	31.0	33.2	35.3	41.9	44.4	59.2	59.3	59.0	72.5
U-W nach_0.70_1.1	225	0.66	7.2	10.4	11.5	10.2	20.1	25.5	30.6	33.6	31.5	33.3	35.5	42.1	44.9	59.5	59.7	59.3	73.0
U-W nach_0.70_1.2	225	0.67	12.5	18.2	19.7	18.2	26.7	30.9	36.4	39.4	36.8	39.2	41.4	47.3	49.8	64.3	64.5	63.9	79.0

A.3.5 Ergebnisübersicht

Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe

Bezeichnung	Durchströmte Systeme			Vorkauftemperatur				Rücklauftemperatur				Leistung			
	U1	U2	W1 W2	Tein,1 [°C]	Tein,2 [°C]	Tein,m [°C]	Taus,1 [°C]	Taus,2 [°C]	Taus,m [°C]	P ₁ [W]	P ₂ [W]	P ₁ [W/m]	P ₂ [W/m]		
U-W_vor_0.23_1.1	x		x	2.7	2.7	2.7	3.4	3.4	3.4	190.0	190.0	25.7	25.7		
U-W_vor_0.23_1.2	x		x	2.6	2.6	2.6	3.3	3.3	3.3	172.8	172.8	23.3	23.3		
U-W_nach_0.23_1.1		x	x	2.8	2.8	2.8	3.5	3.5	3.5	180.0	180.0	24.3	24.3		
U-W_nach_0.23_1.2		x	x	2.6	2.6	2.6	3.3	3.3	3.3	176.2	176.2	23.8	23.8		
U-W_vor_0.46_1.1	x		x	2.8	2.8	2.8	3.4	3.4	3.4	157.0	157.0	21.2	21.2		
U-W_nach_0.46_1.1		x	x	2.8	2.8	2.8	3.4	3.4	3.4	156.0	156.0	21.1	21.1		
U-W_nach_0.46_1.2		x	x	2.6	2.6	2.6	3.3	3.3	3.3	186.4	186.4	25.2	25.2		
U-W_vor_0.56_1.1	x		x	2.8	2.8	2.8	3.5	3.5	3.5	178.6	178.6	24.1	24.1		
U-W_vor_0.56_1.2	x		x	2.6	2.6	2.6	3.3	3.3	3.3	189.6	189.6	25.6	25.6		
U-W_nach_0.56_1.1		x	x	2.6	2.6	2.6	3.3	3.3	3.3	162.5	162.5	22.0	22.0		
U-W_nach_0.56_1.2		x	x	2.6	2.6	2.6	3.3	3.3	3.3	186.8	186.8	25.2	25.2		
U-W_vor_0.70_1.1	x		x	2.5	2.5	2.5	3.2	3.2	3.2	179.0	179.0	24.2	24.2		
U-W_vor_0.70_1.2	x		x	2.8	2.8	2.8	3.5	3.5	3.5	192.0	192.0	25.9	25.9		
U-W_nach_0.70_1.1		x	x	2.6	2.6	2.6	3.4	3.4	3.4	196.4	196.4	26.5	26.5		
U-W_nach_0.70_1.2		x	x	2.7	2.7	2.7	3.4	3.4	3.4	191.0	191.0	25.8	25.8		
U-U_0.46_1.1	x		x	2.6	2.6	2.6	3.1	3.1	3.1	127.0	127.0	33.4	33.4		
U-U_0.56_1.1	x		x	2.6	2.6	2.6	3.2	3.2	3.2	144.2	144.2	37.9	37.9		
U-U_0.70_1.1	x		x	2.7	2.7	2.7	3.2	3.2	3.2	134.2	134.2	35.5	35.5		
W-W_0.23_1.1			x	2.6	2.6	2.6	3.4	3.4	3.4	207.3	207.3	28.0	28.0		
W-W_0.46_1.1			x	2.7	2.7	2.7	3.3	3.3	3.3	180.1	180.1	24.3	24.3		
W-W_0.56_1.1			x	2.8	2.8	2.8	3.4	3.4	3.4	163.0	163.0	22.0	22.0		
W-W_0.70_1.1			x	2.8	2.8	2.8	3.5	3.5	3.5	184.8	184.8	25.0	25.0		

Bezeichnung	Durchfluss Q _v [l/h]	Potential- differenz Δh [m]	Standrohrhöhen																	
			Zu	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	Ab	
U-W_vor_0.23_1.1	225	0.225	20.0	14.7	14.5	14.0	17.7	18.1	20.5	27.1	25.2	28.0	28.5	29.6	30.1	33.3	33.5	34.5	42.5	
U-W_vor_0.23_1.2	225	0.243	36.2	33.6	33.8	33.3	35.4	35.4	36.7	43.8	40.9	44.7	45.7	48.5	47.7	53.9	54.4	55.4	60.5	
U-W_nach_0.23_1.1	225	0.235	20.5	18.5	16.6	15.2	18.5	18.0	20.2	29.1	24.1	28.7	31.5	33.5	33.6	40.1	41.0	41.2	44.0	
U-W_nach_0.23_1.2	225	0.24	36.2	33.6	33.5	33.6	34.9	35.4	36.5	43.4	40.6	44.3	45.7	47.1	54.0	54.3	55.3	60.2		
U-W_vor_0.46_1.1	225	0.445	17.0	16.0	17.0	15.8	21.2	21.5	24.0	38.8	29.2	38.0	40.2	43.9	43.2	52.2	52.8	53.0	61.5	
U-W_nach_0.46_1.1	225	0.445	18.5	17.5	18.0	17.0	22.0	22.6	25.2	40.0	30.5	38.9	41.5	45.2	44.0	53.6	54.0	54.1	63.0	
U-W_nach_0.46_1.2	225	0.45	23.2	22.5	23.0	21.7	26.5	27.6	31.3	44.8	36.0	45.1	45.9	49.2	48.7	59.0	59.1	60.5	68.2	
U-W_vor_0.56_1.1	225	0.53	13.0	13.4	13.9	13.5	19.2	19.8	22.5	39.3	27.8	38.0	41.0	45.0	44.0	54.6	55.6	55.6	66.0	
U-W_vor_0.56_1.2	225	0.513	17.7	18.2	18.9	17.0	23.5	24.1	27.4	42.3	32.6	43.1	45.3	49.8	48.0	59.0	59.6	60.5	69.0	
U-W_nach_0.56_1.1	225	0.535	12.5	13.5	13.8	13.4	18.2	18.9	22.2	39.2	27.4	38.0	40.5	45.0	44.0	55.0	55.5	55.5	66.0	
U-W_nach_0.56_1.2	225	0.522	18.9	19.7	20.7	19.0	25.0	25.6	28.7	43.8	39.3	45.2	46.7	49.9	49.6	61.1	61.9	61.1	71.1	
U-W_vor_0.70_1.1	225	0.733	13.5	13.5	13.9	13.4	22.8	23.5	28.0	49.2	33.0	48.0	53.0	55.0	55.0	69.5	70.0	70.0	86.8	
U-W_vor_0.70_1.2	225	0.744	14.0	15.7	16.9	15.1	23.9	24.8	29.6	50.5	35.1	50.9	53.9	60.2	57.0	73.2	75.0	73.1	88.4	
U-W_nach_0.70_1.1	225	0.72	13.0	15.6	15.6	14.0	22.0	22.8	27.0	48.5	32.0	47.0	52.1	54.0	69.2	69.8	69.8	85.0		
U-W_nach_0.70_1.2	225	0.745	12.5	13.5	14.0	14.0	22.1	22.0	26.5	48.0	32.0	47.0	52.5	54.5	70.0	70.5	70.5	87.0		
U-U_0.46_1.1	225	0.445	17.0	16.0	17.0	15.5	21.1	21.4	23.9	38.7	29.0	37.9	40.2	43.4	43.0	52.0	52.5	52.9	61.5	
U-U_0.56_1.1	225	0.525	15.0	15.4	15.8	15.0	18.8	19.5	22.5	40.0	28.0	38.5	41.0	45.6	44.5	55.5	56.8	57.0	67.5	
U-U_0.70_1.1	225	0.71	14.5	15.5	16.5	15.0	22.9	23.6	28.0	49.0	32.6	47.5	52.9	54.6	69.1	69.6	69.5	85.5		
W-W_0.23_1.1	225	0.23	36.5	33.1	33.1	33.1	32.3	34.5	34.4	35.7	42.5	39.7	43.6	44.8	47.1	46.7	52.8	53.4	54.3	59.5
W-W_0.46_1.1	225	0.453	23.1	22.7	23.4	22.0	27.2	27.4	30.0	43.5	35.6	44.8	47.6	49.7	50.0	59.1	60.6	61.4	68.4	
W-W_0.56_1.1	225	0.53	25.0	24.9	26.6	25.0	30.4	31.5	34.8	49.5	39.6	50.6	56.6	56.0	67.8	67.2	68.0	78.0		
W-W_0.70_1.1	225	0.745	14.0	14.2	15.4	13.9	22.3	23.6	28.6	48.6	34.8	50.7	53.7	57.3	58.0	71.9	74.3	72.8	88.5	

A.4 Parameterstudie

A.3.1 Parameterübersicht

Tabelle A2: Eigenschaften / Parameter des Basismodells der numerischen Simulationen

Parameter	Symbol	Wert	Variation
Rohrdurchmesser (außen)	d_a [mm]	25	
Wandstärke des Rohres	t_w [mm]	2,5	
Rohrabstand	a [m]	0,20	
Rohrlänge (gesamt)	L_p [m]	38,2	
Rohrverlegung	-	Schlaufe	
Wärmeleitfähigkeit Rohr	λ_p [W/(mK)]	0,4	
Volumenstrom	Q_v [l/h]	450	
Glykol-Gehalt	G [Vol.-%]	0	
Vorlauftemperatur	T_{in} [°C]	2,5	
Dicke der Wärmeleitlamelle	d_L [m]	0,002	
Wärmeleitfähigkeit der Wärmeleitlamelle	λ_L [W/(mK)]	0,4	
Dicke der Rohrschicht	d_c [m]	0,1375	
Wärmeleitfähigkeit der Rohrschicht	λ_c [W/(mK)]	2,5	
Dicke der Dämmschicht	d_D [m]	0,04	
Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht	λ_D [W/(mK)]	0,04	
äußerer Wärmeübergangswiderstand	$R_{s,e}$ [W/m ² K]	0,001	
innerer Wärmeübergangswiderstand	$R_{s,i}$ [W/m ² K]	0,13	
Temperatur im Innenraum	T_2 [°C]	10	
Wärmeleitfähigkeit des Bodens	λ_B [W/(mK)]	3,1	
Wärmekapazität des Bodens	$C_{v,B}$ [MJ/(m ³ K)]	2,7	
Porenanteil des Bodens	n [-]	0,35	
Untergrundtemperatur	T_B [°C]	10	
Durchlässigkeitsbeiwert	$k_{f,B}$ [m/s]	$9,3 \cdot 10^{-5}$	
Grundwassergeschwindigkeit	v_f [m/d]	0	0 - 1,0
Strömungsrichtung		parallel	