

Kurzbericht

Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-09.10 / II 2 – F20-09-1-041

Forschungsthema: „Erdwärmenutzung mit Hilfe von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen an erdberührten Untergeschoßkonstruktionen im Grundwasser“

Kurztitel: „Geothermisch wirksame Abdichtungselemente“

Forschende Stelle: Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler

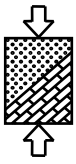
Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Sylvia Kürten

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

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

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

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



1 Ziel der Forschungsaufgabe

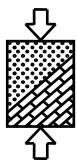
Die Nutzung oberflächennaher Erdwärme mittels Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren hat mittlerweile eine weite Verbreitung gefunden. Vermehrt werden in letzter Zeit auch statisch erforderliche Betonbauteile zur Wärmeengewinnung genutzt, in dem die notwendigen Absorberleitungen an der erforderlichen Bewehrung befestigt werden. In diesen Fällen entfallen zusätzliche Bohrkosten, wie sie bei der Installation von herkömmlichen Geothermiesystemen anfallen. Besonders geeignet sind Bauteile, die aus großen erdberührenden Flächen bestehen.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Nutzung von Erdwärme mit Hilfe von erdberührenden Bauteilen im Bereich des Hochbaus zu erweitern. Dazu sollten geothermisch wirksame Abdichtungselemente entwickelt und erprobt werden. Die Entwicklung des Prototyps sollte dabei in Zusammenarbeit mit der Firma NAUE GmbH & Co. KG erfolgen und auf dem Status Quo der Erdwärmennutzung aus erdberührenden Bauteilen aufbauen. Die Erprobung der Elemente sollte mit Hilfe von Laborversuchen und theoretischen Untersuchung unter verschiedenen Rahmenbedingungen erfolgen. Dabei war das Ziel, die optimale Systemkonfiguration für die thermo-aktiven Abdichtungselemente zu ermitteln. Das Einsatzgebiet der Elemente liegt bei Untergeschoßkonstruktionen im (strömenden) Grundwasser, die bauphysikalisch ohnehin eine Abdichtung benötigen. Die entwickelten Elemente vereinen somit eine energetische und eine bauphysikalische Funktion. Das vorhandene Grundwasser stellt dabei ein zusätzliches natürliches Energiepotential dar, welches für die Auslegung von geothermischen Anlagen möglichst genau quantifiziert werden sollte. Durch die systematische Untersuchung von verschiedenen Einflussparametern auf den Wärmeertrag und den Wärmeübergangswiderstand der Elemente sollte eine Übertragung der physikalischen Zusammenhänge auf andere Bauteile gewährleistet werden.

2 Durchführung der Forschungsaufgabe

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden neuartige thermo-aktive Abdichtungselemente in Zusammenarbeit mit der Firma NAUE entwickelt und deren Wirksamkeit durch verschiedene praktische und theoretische Untersuchungen untersucht. Zur Beurteilung der Ergebnisse wurden diese in Bezug zu dokumentierten Entzugsleistungen aus der Praxis gesetzt.

In Anlehnung an thermo-aktive erdberührende Betonbauteile wurden Betonschutzplatten aus PEHD durch die Ausstattung mit Absorberleitungen thermisch aktiviert. In einem eigens konzipierten Versuchsstand wurde am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen die Wirksamkeit der thermo-aktiven Abdichtungselemente durch die Bestimmung der spezifischen Entzugsleistung und des Wärmeübergangswiderstands untersucht. Der entwickelte Versuchsstand



(Abmessungen 3 m x 3 m x 2 m) ist in Abbildung 1 (links) schematisch dargestellt. Im Rahmen von zwei Großversuchen, die durch verschiedene Wandkonstruktionen mit einer Wandhöhe von 1,7 m gekennzeichnet waren, wurden verschiedene System- und Betriebsparameter getestet. Variiert wurden die Rohranordnung (siehe Abbildung 1, rechts), der Rohrdurchmesser, das Rohrmaterial, der Systemdurchfluss sowie die Grundwassergeschwindigkeit im Bodenkörper.

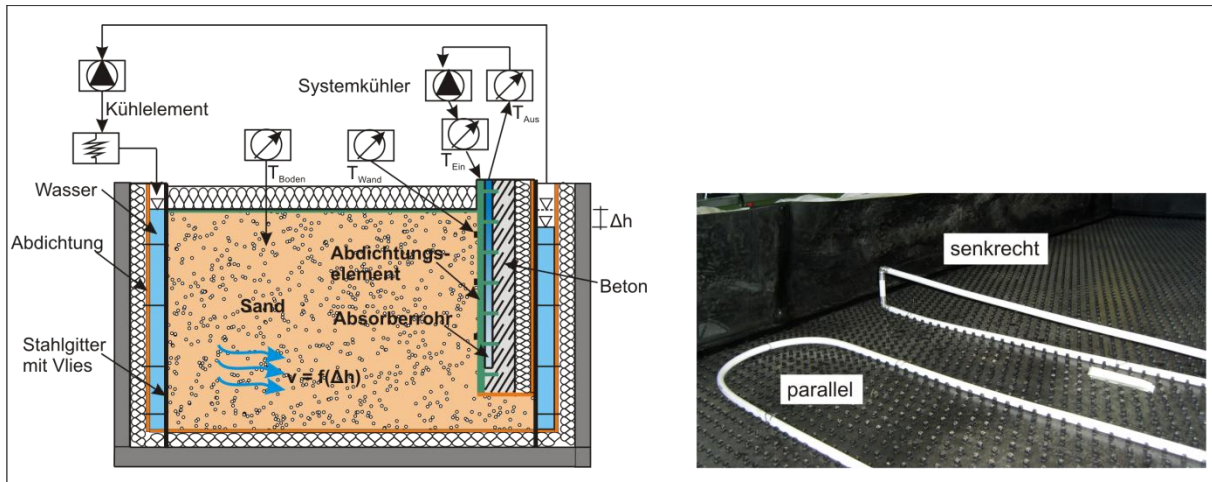


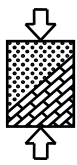
Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsstands im Schnitt (links) und Varianten der Rohrverlegung (rechts)

Eine Übersicht über die untersuchten Systeme und deren Bezeichnung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Systemkonfigurationen in den Laborversuchen

| Bezeichnung | Durchmesser d_a [mm] | Material | Rohrart | Rohranordnung |
|-------------|------------------------|----------|---------------|--------------------|
| System 0.1 | 16 | PE-RT | mehrschichtig | senkrecht zur Wand |
| System 0.2 | 16 | PE-RT | mehrschichtig | parallel zur Wand |
| System 1.1 | 17 | PE-XC | einschichtig | senkrecht zur Wand |
| System 1.2 | 17 | PE-XC | einschichtig | parallel zur Wand |
| System 2.1 | 25 | PE-RT | mehrschichtig | senkrecht zur Wand |
| System 2.2 | 25 | PE-RT | mehrschichtig | parallel zur Wand |

Jedes System wurde für Grundwassergeschwindigkeiten zwischen 0 m/d und 1 m/d und mit Systemdurchflüssen zwischen 100 l/h und 550 l/h getestet. Um einen Gleichgewichtszustand im System zu erreichen betrug die Versuchsdauer in der Regel 6 Stunden für die Wärmeentzugsversuche und 3 Stunden für die Versuche zur Ermittlung des Wärmeübergangswiderstands. Die mittlere Temperatur im Bodenkörper zu Versuchsbeginn betrug ca. 11 °C. Die Eintrittstemperatur ins Absorbersystem wurde konstant auf ca. 2,5 °C eingestellt. Als Messwerte wurden die sich einstellenden Rücklauftemperaturen sowie die Temperaturen im Boden aufgezeichnet.



Zur Ermittlung der wesentlichen Einflussparameter auf den Wärmeentzug wurden aufbauend auf den Laborversuchen zahlreiche numerische Simulationen mit dem Finite-Differenzen Programm SHEMAT durchgeführt. Das numerische Grundmodell wurde an Hand der Laborversuche kalibriert und verifiziert. Ausgehend von dem Grundmodell wurde eine systematische Parameterstudie durchgeführt. Untersucht wurden dabei sowohl Einflüsse aus dem Boden (thermische Eigenschaften, Grundwassergeschwindigkeit, Bodentemperatur) als auch Systemeinflüsse (Rohrabstand, Rohranordnung, Rohrdurchmesser).

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten zusammenfassend dargestellt. Eine Ausführliche Beschreibung sämtlicher Arbeiten und eine umfassende Aufbereitung der Ergebnisse kann dem Abschlussbericht entnommen werden.

3.1 Stand der Technik bei thermo-aktiven Bauteilen

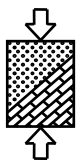
Seit Beginn der 80er Jahre werden vermehrt erdberührende Betonbauteile für die geothermische Nutzung herangezogen. Die Absorberrohre werden dabei an der erforderlichen Bewehrung befestigt. Ausführungsbeispiele finden sich für Energiepfähle, Energieschlitzwände und Energiebodenplatten. Neuere Entwicklungen befassen sich auch mit der geothermischen Aktivierung von Tunnelbauwerken. Eine Übersicht über die dokumentierten Entzugsleistungen von erdberührenden Bauteilen kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Entzugsleistungen für die verschiedenen Systeme (nach Brandl, 2006; Markiewicz, 2004; von der Hude & Sauerwein, 2007; Franzius & Pralle, 2010)

| Bauteil | Spezifische Entzugsleistung |
|--------------------|-----------------------------|
| Energiepfahl | 40 - 120 W/m |
| Energieschlitzwand | 19 – 100 W/m ² |
| Energiebodenplatte | 15 -30 W/m ² |
| Energievlies | 5 – 15 W/m ² |
| Energieanker | 8 -15 W/lfm |
| Energietübbing | 10 – 20 W/m ² |

3.2 Spezifische Entzugsleistungen und Wärmeübergangswiderstand

Zur Beurteilung der Wirksamkeit der thermo-aktiven Abdichtungselemente wurden die spezifische Entzugsleistung sowie der Wärmeübergangswiderstand von verschiedenen Systemkonfigurationen in einem eigens entwickelten Versuchsstand ermittelt und miteinander in Beziehung gesetzt.



Die erzielbare spezifische Entzugsleistung der Elemente wurde in beiden durchgeführten Großversuchen für verschiedene Rand- und Rahmenbedingungen ermittelt. Eine Übersicht über die erzielten Ergebnisse ist in Abbildung 2 dargestellt.

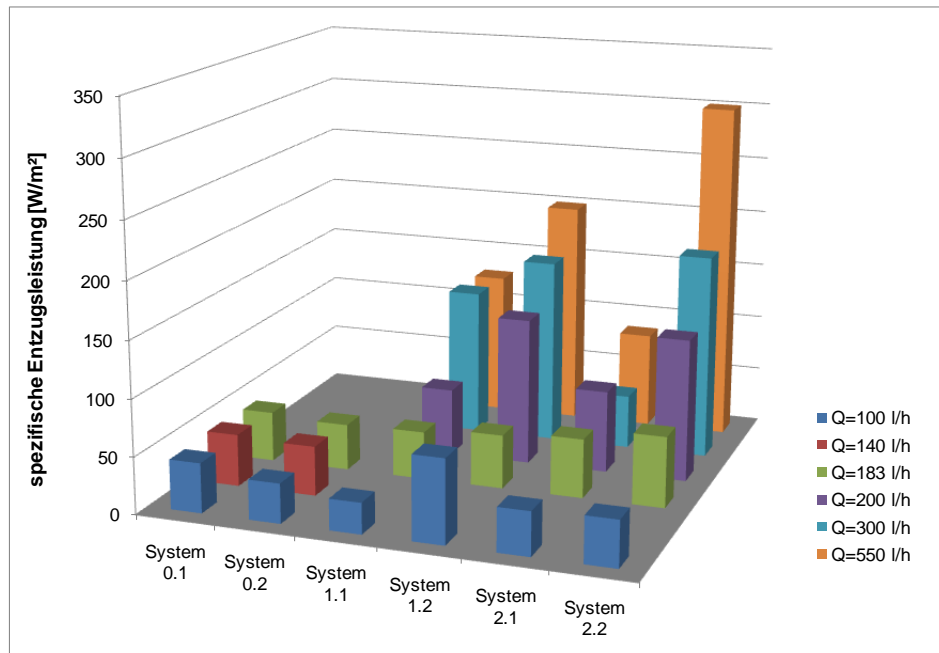


Abbildung 2: spezifische Entzugsleistungen für unterschiedliche Systemkonfigurationen (Laborversuche)

Die Ergebnisse variierten je nach Betriebszustand zwischen 25 W/m^2 und 300 W/m^2 , wobei die höheren Entzugsleistungen für hohe Systemdurchflüsse erzielt werden konnten (siehe auch Kapitel 3.3). Werden die im Rahmen der Laborversuche ermittelten Entzugsleistungen mit den dokumentierten Leistungsdaten aus der Literatur (vgl. Tabelle 2) verglichen, zeigt sich, dass die Wirksamkeit von thermo-aktiven Abdichtungselementen als gut angesehen werden kann.

Im zweiten Großversuch wurde zusätzlich zur spezifischen Entzugsleistung auch der Wärmeübergangswiderstand für die verschiedenen Systeme ermittelt. Dazu wurden zusätzliche Temperaturmessgeber an der Außenseite der Wand angebracht. Die thermo-aktiven Abdichtungselemente sind durch einen unsymmetrischen, flächigen Wärmeübergang gekennzeichnet. Zusätzlich sind der Vor- und Rücklauf räumlich voneinander getrennt. Die physikalisch korrekte Beschreibung des Wärmeübergangs stellt somit ein komplexes Problem dar. Im Rahmen der Versuche wurde daher lediglich eine überschlägliche Ermittlung vorgenommen. Eine Ergebnisübersicht ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die ermittelten Wärmeübergangswiderstände lagen in Abhängigkeit der Betriebs- und Systemparameter zwischen $0,03 \text{ Km/W}$ und $0,3 \text{ Km/W}$, wobei die niedrigen Werte wiederum für hohe Systemdurchflüsse ermittelt werden konnten. Für herkömmliche Erdwärmesonden wird in der Regel ein Wärmeübergangswiderstand von ca. $0,1 \text{ Km/W}$ angegeben. Die hier ermittelten Wärmeübergangswiderstände bestätigen somit die gute Wirksamkeit der thermo-aktiven Abdichtungselemente.

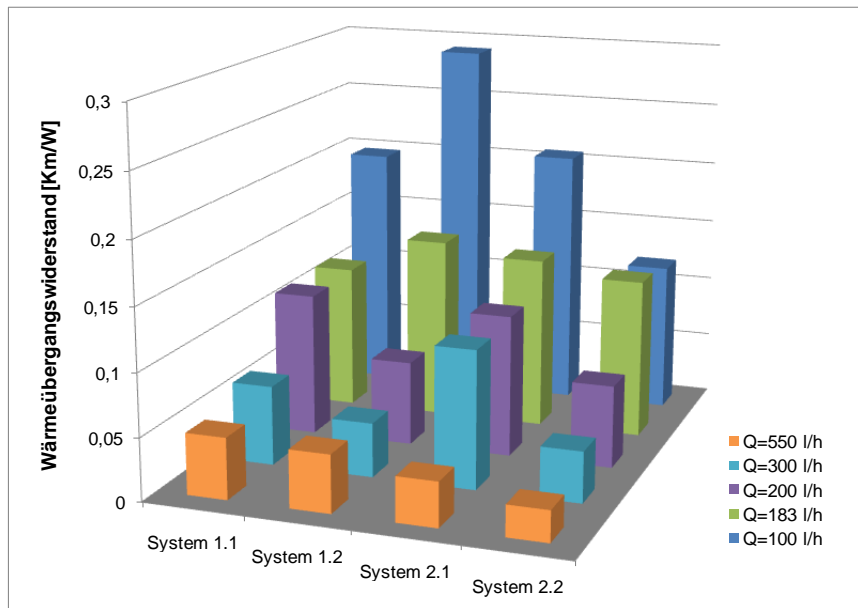
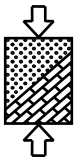


Abbildung 3: Wärmeübergangswiderstände für unterschiedliche Systemkonfigurationen (Laborversuche)

3.3 Einflussparameter auf den Wärmeentzug

Zur optimalen Auslegung von thermo-aktiven Abdichtungselementen ist die Kenntnis der maßgebenden Einflussfaktoren auf den Wärmeentzug erforderlich. Dazu wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine systematische Parameterstudie durchgeführt. Hierbei wurden sowohl die Ergebnisse aus den Laborversuchen sowie numerische Untersuchungen für die Auswertung herangezogen.

Der Einfluss einer Grundwasserströmung konnte versuchstechnisch nicht quantifiziert werden. Eine Erhöhung der Einstromgeschwindigkeit führt auf Grund der sich einstellenden Strömung im Bodenkörper nicht zu einer Erhöhung der Strömung an der Wand in dem gleichem Maße. Die durchgeführten numerischen Berechnungen bestätigen dies. Bei der Betrachtung der weiteren Einflussparameter wird daher auf eine Einbeziehung der Grundwasserströmung verzichtet. Es hat sich somit gezeigt, dass eine Grundwasserströmung den Wärmeentzug nur dann positiv beeinflusst, wenn eine ausreichend große Strömungsgeschwindigkeit auf das Bauteil einwirkt. Zur Ermittlung des genauen Einflusses der Grundwasserströmung auf den Wärmeentzug von thermo-aktiven Abdichtungselementen sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Bei der Betrachtung der relevanten Einflussparameter ist zwischen Einflüssen aus dem Boden und Betriebsparametern zu unterscheiden. Zur Ermittlung des Einflusses des anstehenden Bodens auf den Wärmeentzug wurden dessen thermische Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie die ungestörte Bodentemperatur variiert. Die spezifische Entzugsleistung in Abhängigkeit der entsprechenden Parameter für eine Rohranordnung in Wandebene ist in Abbildung 4 dargestellt.

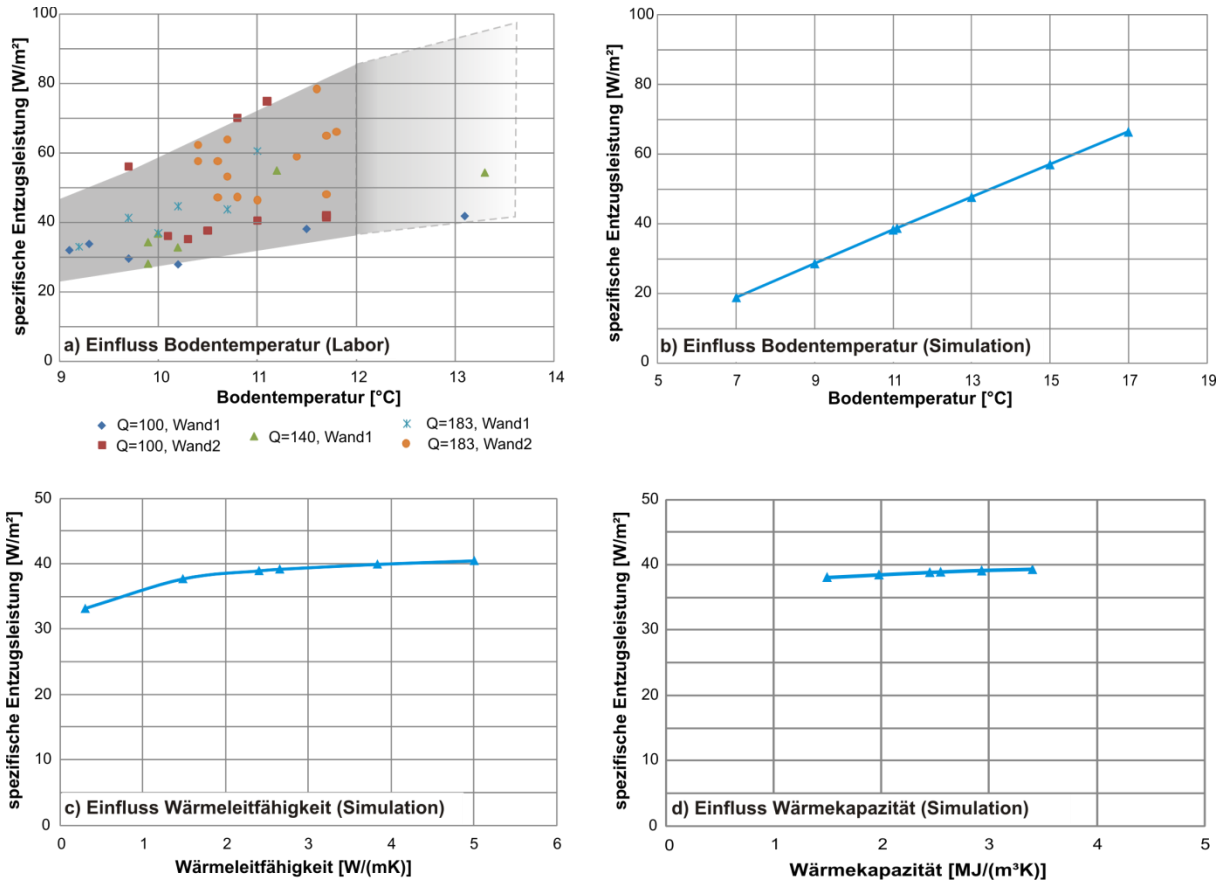
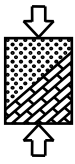
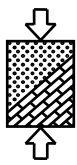


Abbildung 4: Spezifische Entzugsleistung in Abhängigkeit der wesentlichen Bodenparameter

Sowohl die Laborversuche als auch die numerischen Untersuchungen zeigen, dass die ungestörte Bodentemperatur maßgeblich die erzielbare Entzugsleistung bestimmt (Abbildung 4, oben), da mit steigender Untergrundtemperatur ein größeres Energiepotential im Boden enthalten ist. Bei der Betrachtung der thermischen Eigenschaften des Bodens zeigt sich, dass die Wärmeleitung für den hier betrachteten Fall der maßgebende Wärmetransportmechanismus ist (siehe Abbildung 4 c). Die Wärmekapazität hat nur eine untergeordnete Bedeutung, da direkt an der Wand keine ausreichend große Grundwassergeschwindigkeit erzeugt werden konnte (Abbildung 4 d). Der Einfluss der Wärmekapazität wird jedoch mit steigender Grundwasserströmung und damit steigenden Einfluss aus Konvektion steigen.

Die Bodeneigenschaften sind unbeeinflussbare Standortbedingungen, die jedoch für eine korrekte Anlagenauslegung möglichst genau abgebildet werden müssen. Durch die Parameterstudie wurde gezeigt, dass dabei vor allem auf den Ansatz einer korrekten Bodentemperatur geachtet werden muss.

Durch die Wahl der richtigen Betriebsparameter wird die Wirksamkeit von thermoaktiven Abdichtungselementen optimiert. Zusätzlich wird die Effizienz der Anlagen durch ein optimal abgestimmtes Absorberrohrsystem erhöht. Im Rahmen der Parameterstudie wurden daher sowohl der Einfluss der Absorberrohre (Anordnung, Material und Durchmesser) sowie der Einfluss des Systemdurchflusses untersucht.



Als maßgebende Parameter konnten der Systemdurchfluss und die Wärmeübertragungsfläche zwischen Absorberrohr und Erdreich (bzw. Abdichtungselement) identifiziert werden. Der Einfluss des Rohrmaterials kann im Rahmen der verwendeten Rohre auf PE-Basis als vernachlässigbar angesehen werden. Sowohl die Laborversuche als auch die numerischen Berechnungen haben gezeigt, dass eine Rohranordnung in Wandebene auf Grund der größeren Kontaktfläche zum Erdreich den besseren Wärmeertrag liefert. In Abbildung 5 sind daher die jeweiligen Zusammenhänge für eine Rohranordnung in Wandebene dargestellt. Eine Rohranordnung in Wandebene bietet darüber hinaus durch die bessere Ausnutzung der vorhandenen Ankerstruktur der Abdichtungselemente konstruktive Vorteile, sodass diese Verlegungsform für thermo-aktive Abdichtungselemente empfohlen wird.

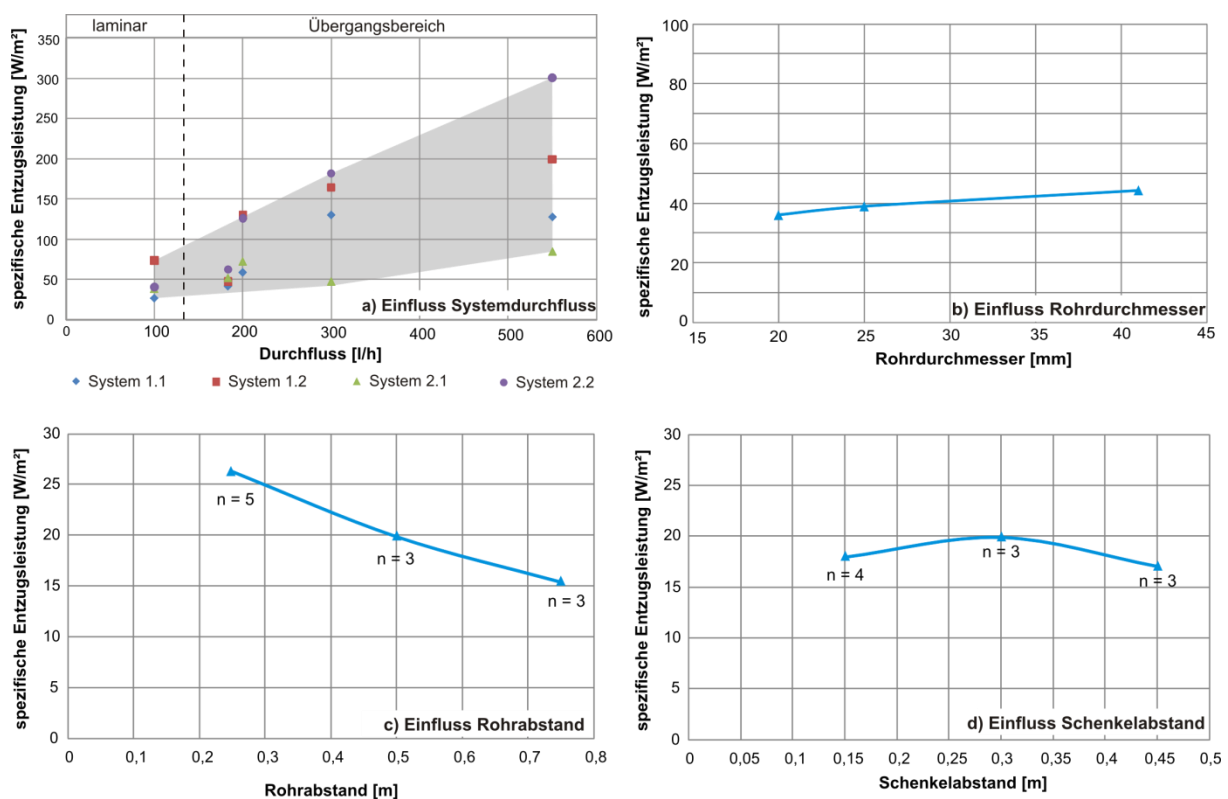


Abbildung 5: Spezifische Entzugsleistung in Abhängigkeit der wesentlichen Systemparameter

Mit steigendem Systemdurchfluss steigt die spezifische Entzugsleistung signifikant an (siehe Abbildung 5 a). Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt beim Verlassen des laminaren Strömungszustands im Absorberrohr, da der Wärmeübergang zwischen Absorberfluid und Rohrwand durch das Vorhandensein einer ansatzweise turbulenten Strömung deutlich verbessert wird. Für den Betrieb von thermo-aktiven Abdichtungselementen sollte daher stets ein Strömungszustand außerhalb des laminaren Bereichs angestrebt werden.

Die Wärmeübertragungsfläche zwischen Erdreich und Wärmeträgerfluid wird neben der Rohranordnung auch durch den Rohrdurchmesser und den Rohrabstand bestimmt. So erhöht sich der Wärmeentzug mit größerem Rohrdurchmesser (siehe

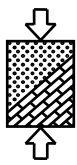
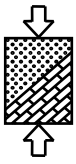


Abbildung 5 b). Der maximal einsetzbare Rohrdurchmesser wird jedoch durch die vorhandene Ankerstruktur der Betonschutzplatten begrenzt. Zusätzlich wird der erforderliche Systemdurchfluss zur Aufrechterhaltung einer Strömung außerhalb des laminaren Zustands bei großem Rohrdurchmesser größer, sodass die erforderliche Pumpenleistung ebenfalls steigt. Bei der Auslegung von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen ist der optimale Rohrdurchmesser daher in Abhängigkeit der verwendeten Abdichtungselemente und den hydraulischen Betriebsparametern nach energetischen und wirtschaftlichen Aspekten zu ermitteln.

Der Wärmeertrag der geothermisch wirksamen Abdichtungselemente als Summe aller verlegten Rohrsysteme vergrößert sich mit kleiner werdendem Rohrabstand (siehe Abbildung 5 c). Bei einem engen Rohrabstand ist zwar eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Rohre zu verzeichnen, sodass die Entzugsleistung des Einzelrohres sinkt. Auf Grund der steigenden Rohranzahl im Wandelement vergrößert sich der Wärmeertrag in Summe jedoch trotzdem. Der Wärmeverlust aus der gegenseitigen Beeinflussung der Rohrsysteme ist somit relativ gering. Zusätzlich beeinflusst der Schenkelabstand zwischen Vor- und Rücklauf den Wärmeertrag aus den Absorberrohren (siehe Abbildung 5 d). Die Wahl des Schenkelabstands sollte daher so erfolgen, dass ein thermischer Kurzschluss vermieden wird. Eine Vergrößerung über diesen kritischen Abstand hinaus führt zu einem Abfall der möglichen Leistung auf Grund des erhöhten Platzbedarfs der einzelnen Rohrsysteme. Bei der Planung der Rohrverlegung innerhalb des thermo-aktiven Abdichtungselements sollte somit ein möglichst enger Abstand der Rohrsysteme untereinander bei optimalem Schenkelabstand gewählt werden, um somit eine möglichst hohe Anzahl an Rohrleitungen in die Wand integrieren zu können.

4 Fazit und Ausblick

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten praktischen und theoretischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die geothermische Nutzung des Untergrunds mit Hilfe von thermo-aktiven Abdichtungselementen möglich ist. Die erzielten Wärmeentzugsleistungen und Wärmeübergangswiderstände sind dabei vielversprechend. Als maßgebliche Einflussparameter auf den Wärmeertrag von Untergeschoßkonstruktionen wurden die ungestörte Bodentemperatur, der Systemdurchfluss sowie die Wärmeübertragungsfläche zwischen Erdreich und Absorberrohr identifiziert. Der Einfluss einer Grundwasserströmung konnte aus versuchstechnischen Gründen nicht genau quantifiziert werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Die hier durchgeführten Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf die Betrachtung des Primärkreislaufs. Weitere Forschungsschwerpunkte liegen in der Einbeziehung des Heizkreislaufs sowie in der detaillierten Beschreibung des Wärmeübergangs bei flächigen thermo-aktiven Bauteilen.



Literaturverzeichnis

- Brandl, H. (2006): Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique, Vol. 56(2), pp. 81-122
- Franzius, J.N.; Pralle, N. (2010): Geothermie im Tunnelbau – Technische, wirtschaftliche und vertragliche Aspekte. Brokerage Event „Nutzung von Geothermie im Bereich unterirdischer städtischer Infrastrukturen“, Bergisch Gladbach
- Markiewicz, R. (2004): Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau. Dissertation TU Wien
- Von der Hude, N.; Sauerwein, M. (2007): Energiepfähle in der praktischen Anwendung. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 76, 95-109