

Einfluss der Standortbedingungen bei der thermischen Nutzung von Haldenschwelbränden

Influence of site conditions on the geothermal utilisation of smouldering mining dumps

Sylvia Kürten¹, Martin Feinendegen², Yves Noël³

¹ Dipl.-Ing. Sylvia Kürten, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen, kuerten@geotechnik.rwth-aachen.de

² AOR Dipl.-Ing. Martin Feinendegen, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen, feinendegen@geotechnik.rwth-aachen.de

³ Dipl.-Ing. Yves Noël, Technologie der Energierohstoffe, RWTH Aachen, noel@teer.rwth-aachen.de

Zusammenfassung

Haldenschwelbrände stellen ein großes bisher ungenutztes Energiepotential dar. Vor allem in alten Haldenkörpern des Steinkohlebergbaus sind auf Grund einer schlechten Aufbereitungs- und Verdichtungstechnik in der Vergangenheit Schwelbrände vorhanden. In einem Verbundprojekt wurde die Möglichkeit der thermischen Nutzung von Haldenschwelbränden mit einer Pilotanlage an einem Standort im westlichen Ruhrgebiet untersucht. Mit Hilfe von drei 25 m tiefen Erdwärmesonden konnte eine langfristige Gesamtanzugsleistung von ca. 8 kW erreicht werden. Die thermische Nutzung von Haldenschwelbränden wird maßgeblich durch die vorhandenen (extremen) Standortbedingungen beeinflusst. Hierbei sind neben den hohen Temperaturen vor allem die thermischen Eigenschaften des Halden- und des Materials der Bohrlochverfüllung sowie die zusätzlichen Wärmetransportvorgänge (z.B. aus Strahlung und Konvektion) für eine Anlagenauslegung zu beachten.

Schlüsselworte: Haldenschwelbrand, Selbstentzündung, Wärmeleitfähigkeit, Geothermie, Standortbedingungen, Laborversuche, Simulation

Abstract

Smouldering mining dumps represent a large source of energy that has not been exploited yet. In former times, techniques for coal processing as well as for compacting mining residues have not been developed sufficiently. Therefore, mining dumps that have been raised in the first half of the 20th century may contain a high carbon content. The lack of compaction during the build-up of the mining dump enables the access of oxygen that, in combination with carbon, leads to a self-ignition process inside the dump. Using the example of a dumpsite in the western Ruhr-Area, the geothermal utilization of smouldering fires has been investigated in the scope of a joint research project. Doing so, three borehole heat exchangers with a depth of 25 m each were installed. A long-term heat extraction with an overall performance of 8 kW could be achieved. It can generally be said that the efficiency of the thermal use of a smouldering fire highly depends on the local conditions within the site. At this point, the dumpsite's temperature level, the thermal properties of the dump material as well as of the backfill material of the borehole should be considered when dimensioning a potential plant. Additionally, mechanisms of heat transport (conduction, radiation and convection) should be taken into account.

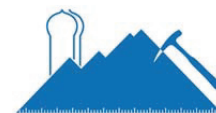
Keywords: Smouldering mining dump, self-ignition, geothermal utilization, local conditions, heat conductivity, modelling, laboratory tests

1 Einleitung

Bergehalden gehören zum bekannten Landschaftsbild in (deutschen) Steinkohlerevieren. Wenig bekannt ist dagegen die Tatsache, dass in vielen alten Halden Schwelbrände vorhanden sind. Durch eine schlechte Aufbereitungstechnik in der Vergangenheit weist das abgelagerte Material einen hohen Restkohlehalt auf. Durch eine schlechte Verdichtung des Materials beim Einbau ist darüber hinaus ein kontinuierlicher Sauerstoffeintrag in den Haldenkörper möglich. Durch die Reaktion der Restkohle mit dem Sauerstoff kommt es zu Schwelbränden im Haldenkörper. Diese Schwelbrände sind durch hohe Temperaturen gekennzeichnet und weisen somit ein hohes Energiepotential auf, welcher derzeit ungenutzt bleibt (s. z.B. DORTMANN & HEIN,

1991). In einem Verbundprojekt zweier Institute der RWTH Aachen (Geotechnik im Bauwesen, GiB und Technologie der Energierohstoffe, TEER) sowie dem Fraunhofer Institut UMSICHT (Oberhausen) und den Firmen DMT - Fachstelle für Brandschutz (Dortmund) und aix-o-therm GeoEnergien (Marl) wurde die thermische Nutzbarkeit von Haldenschwelbränden erprobt. Dazu wurde eine Pilotanlage über drei Jahre betrieben. Ergänzend zum Anlagenbetrieb wurde eine Vielzahl von praktischen, theoretischen und numerischen Untersuchungen durchgeführt um eine Verallgemeinerung der Ergebnisse zu erreichen.

Bei der thermischen Nutzung von Haldenschwelbränden spielen die vorhandenen, zum Teil sehr extremen, Standortbedingungen im Vergleich zu herkömmlichen oberflächennahen geothermischen Anlagen eine entscheidende Rolle.



Hierbei sind vor allem die hohen Temperaturen im Haldenkörper in Verbindung mit den schlechten thermischen Eigenschaften des Haldenmaterials zu beachten.

In diesem Beitrag werden die Pilotanlage sowie ausgewählte Ergebnisse der praktischen und theoretischen Untersuchungen im Hinblick auf die Bedeutung der Standortbedingungen für den Wärmeentzug aus Haldenschwelbränden vorgestellt.

2 Pilotanlage „Haldengeothermie“

Zur Ermittlung der thermischen Nutzbarkeit von Haldenschwelbränden wurde eine Pilotanlage auf einem Haldenstandort in Duisburg installiert. In der untersuchten Halde sind Schwelbrände seit 1948 dokumentiert. Aus diesem Grund steht die Halde bis zum heutigen Zeitpunkt unter Bergaufsicht und es ist ein ausgedehntes Monitoringsystem (86 Temperaturmessstellen) vorhanden. Im Haldenkörper sind fünf akute Warmbereiche (Schwelbrandherde) bekannt, die sich über den Haldenplateaurand verteilen (vgl. Abb. 1). Auf Basis des vorhandenen Monitoring wurde der Warmbereich 6 (WB6) als Standort für die Pilotanlage gewählt. Insgesamt wurden drei Erdwärmesondenfelder installiert. Jedes Feld bestand aus einer 25 m tiefen coaxialen Erdwärmesonde und aus fünf, ebenfalls 25 m tiefen, Temperaturmesspegeln, die in zwei Halbkreisen (Radius 2,5 m und 5 m) um die Sonde herum angeordnet sind.

Die angetroffenen Temperaturen lagen mit über 400 °C weit über den Erwartungen. Diese hohen Temperaturen hatten einen deutlichen Einfluss auf die Wahl der zu verwendenden Materialien. Beispielsweise musste für die Verfüllung des Bohrlochs ein thermisch ungünstiger, trockener Sand verwendet werden (KÜRTEEN et al. 2011).

Die Pilotanlage wurde über drei Jahre betrieben, in denen verschiedene Thermal Response Tests (TRT) zur Bestimmung der Kurzzeitleistungsfähigkeit (vgl. Kapitel 3.3) sowie Langzeitversuche durchgeführt wurden. Für die gesamte Anlage konnte dabei eine langfristige Entzugsleistung von 8 kW prognostiziert werden, was einer spezifischen Leistung von ca. 100 W/m entspricht. Herkömmliche Erdwärmesonden weisen je nach Untergrund durchschnittliche Leistungen zwischen 20 W/m und maximal 80 W/m auf (VDI 4640-2 2001). Haldenmaterial weist eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf (vgl. Kapitel 3.2.1) und kann damit als schlechter Untergrund eingestuft werden. Die Pilotanlage erreicht somit deutlich bessere Entzugsleistungen (ca. Faktor 4) als herkömmliche Sonden im vergleichbaren Untergrund. Die Temperaturen innerhalb des Haldenkörpers sind allerdings auch um bis zu 40mal höher, als im natürlich gewachsenen Untergrund (ca. 10-12 °C).

Mögliche Ursachen für diese im Vergleich zu herkömmlichen oberflächennahen geothermischen Anlagen relativ geringe Ertragssteigerung können sowohl in den Standortbedingungen als auch auf der anlagentechnischen Seite gefunden werden. Zur genauen Bestimmung der Ursache für die vergleichsweise niedrige Anlagenleistung wurde die Wärmeleitfähigkeit des Haldenmaterials in Laborversuchen bestimmt. Zusätzlich wurde in praktischen Versuchen ein für potenzielle Haldengeothermieanwendungen nutzbares Sondenverfüllmaterial konfektioniert. Die praktischen Un-

tersuchungen bildeten die Grundlage für weiterführende theoretische und numerische Parameterstudien, die die maßgebenden Einflussfaktoren identifizieren sollen.

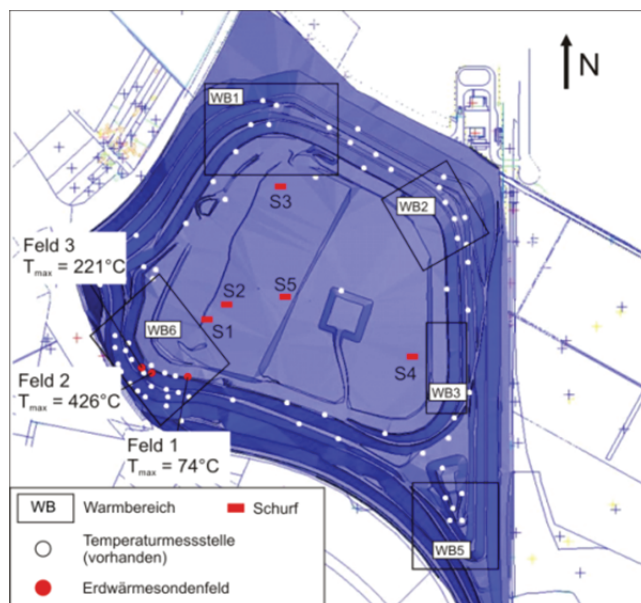


Abb. 1: Überblick über den Haldenkörper mit Lage der installierten Erdwärmesondenfelder.

Fig. 1: Overview of the dump with borehole heat exchanger fields included.

3 (Labor-)Versuche zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Pilotanlage

3.1 Geotechnische Standardversuche

Zur Bestimmung der Eigenschaften des Haldenmaterials wurden auf dem Haldenplateau fünf Schürfe erstellt (vgl. Abb. 1) und in verschiedenen Tiefen Materialproben entnommen. Aus Sicherheitsgründen wurden alle Schürfe außerhalb bekannter Warmbereiche ausgeführt. Trotzdem wurden hier zum Teil Temperaturen von bis zu 60 °C in 5 m Tiefe angetroffen, was das hohe Energiepotential des Haldenkörpers bestätigt. Zur Charakterisierung des Materials wurden verschiedene (geotechnische Standard-) Versuche im Labor durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Ergebnisse der Laborversuche am Originalmaterial.

Tab. 1: Results from the laboratory tests (original material)

Schurf	Materialeigenschaften			
	Trockendichte [g/cm ³]	k _r -Wert [10 ⁻³ m/s]	Kalkgehalt [%]	Glühverlust [%]
1	1,986	9,7	15,8	3,0
2	1,438	9,9	9,7	5,7
3	1,389	6,7	14,1	6,5
4	1,525	5,7	13,3	6,9
5	1,456	5,6	15,0	7,0
Mittelwert	1,559	7,0	13,7	5,8

Es zeigt sich, dass trotz der durch die Schüttungsgeschichte verursachten, inhomogenen Materialverteilung innerhalb des Haldenkörpers die Materialeigenschaften relativ geringe Streuungen aufweisen. Die im Labor erzielten Ergebnisse spiegeln jedoch die hohe Selbstentzündungsneigung des Materials wider. So weist das Material eine relativ geringe Trockendichte ($\rho_{d,m} = 1,6 \text{ g/cm}^3$), einen hohen Glühverlust ($V_{Gl,m} = 5,8 \%$) sowie eine hohe Durchlässigkeit ($k_{f,m} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) auf. Alle diese Faktoren erhöhen die Selbstentzündungsneigung des Materials.

3.2 Thermische Eigenschaften

3.2.1 Wärmeleitfähigkeit des Haldenmaterials

Die Wärmeleitfähigkeit des Haldenmaterials im Feld 2 wurde mit einer Halbraumsonde (Wärmeleitfähigkeits-Messgerät TK04) anhand von Bohrkernproben im trockenen Zustand (λ_{tr}) sowie im mit Wasser gesättigten (saturierten) Zustand (λ_{sat}) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt.

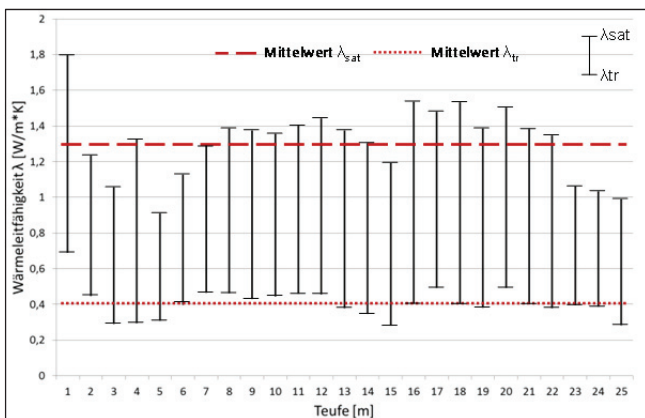


Abb. 2: Wärmeleitfähigkeit des Haldenmaterials über die Tiefe in Abhängigkeit des Sättigungsgrades

Fig. 2: Thermal conductivity of the dump material in relation to saturation-level and depth

Die Wärmeleitfähigkeit im trockenen sowie im saturierten Zustand stellt hierbei den Extremwert einer jeweiligen Bodenschicht dar. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit beträgt im trockenen Probenzustand $0,4 \text{ W/mK}$, im saturierten Fall wurde ein Wert von $1,3 \text{ W/mK}$ gemessen.

Aufgrund der in den Warmbereichen des Haldenkörpers herrschenden hohen Temperaturen kann in der Praxis von einem recht trockenen Material ausgegangen werden. Aufgrund dessen ist für die in situ-Wärmeleitfähigkeit des Haldenmaterials tendenziell dessen Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand anzunehmen.

3.2.2 Wärmeleitfähigkeit des Verfüllsandes

Analog zur Wärmeleitfähigkeit des Haldenmaterials wurde die des Verfüllsandes ermittelt. Aufgrund der homogenen Zusammensetzung wurde dies an einer Einzelprobe durchgeführt. Mit einer Leitfähigkeit von $3,0 \text{ W/mK}$ im saturierten bzw. $1,2 \text{ W/mK}$ im trockenen Zustand weist der Verfüllsand eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit auf als der Haldenkörper. Für die in situ-Situation kann ein nahezu trockener Zustand angenommen werden. Aufgrund einer

geringeren Verdichtung des Sandes im Bohrloch im Vergleich zum Versuchsgerät im Labor, liegt die in situ-Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials wahrscheinlich noch unterhalb des Wertes für den trockenen Zustand.

Nach einem Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten stellt der trockene Haldenkörper die den Wärmetransport im Boden limitierende Komponente dar. Dies kann somit als unmittelbare Ursache für die niedrigen Entzugsleistungen der Pilotanlage angesehen werden, da die geringe Wärmeleitfähigkeit nur in Grenzen durch die vorhandenen hohen Temperaturen kompensiert werden können.

3.3 Thermal Response Tests

Eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit der installierten Sonden der Pilotanlage kann durch die Auswertung von Thermal Response Tests (TRT) erfolgen. Hierbei wird die Sonde mit einer konstanten Leistung beaufschlagt und die resultierende Temperaturantwort gemessen. Durch die Anwendung der sog. Linienquellentheorie kann dann eine effektive Wärmeleitfähigkeit für das System berechnet werden. Details zu der Anwendung und Auswertung von TRTs können z.B. GEHLIN (2002) entnommen werden.

Für die drei Sonden der Pilotanlage wurden verschiedene TRTs bei unterschiedlichen Leistungsniveaus durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass für Leistungen $> 3 \text{ kW}$ kein ausgeprägter Gleichgewichtszustand erreicht werden konnte. Höhere Leistungen können somit von den Sonden nicht dauerhaft gewährleistet werden. Zusätzlich zeigt sich, dass auf Grund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Haldenmaterials (vgl. Kapitel 3.2.1) eine lange Testdauer für das Erreichen des Gleichgewichtszustands erforderlich ist (KÜR-TEN 2012).

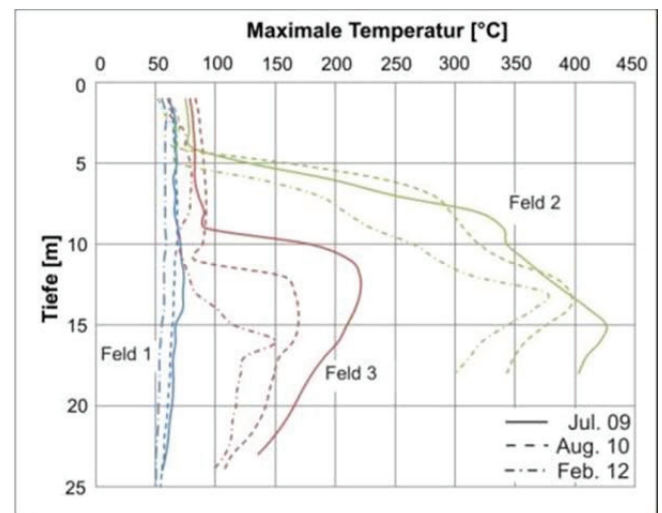
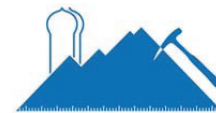


Abb. 3: Maximale Temperaturen in den Sondenfeldern über den Projektzeitraum.

Fig. 3: Maximum temperatures in borhole heat exchanger fields over the project period.

Für die jeweilige Grenzleistung betragen die ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten $1,2 \text{ W/mK}$ für die Sonde 1, $2,1 \text{ W/mK}$ für die Sonde 2 und $1,0 \text{ W/mK}$ für die Sonde 3. Obwohl die vorhandenen Temperaturen im Sondenfeld 3 deutlich höher sind als im Feld 1 (vgl. Abb. 3), ist die effek-



tive Wärmeleitfähigkeit hier niedriger. Es zeigt sich somit, dass die Leistungsfähigkeit der Sonden sowohl von den Untergrundeigenschaften als auch von den Grundtemperaturen beeinflusst wird. Im Feld 1 können möglicherweise durch eine lokal vorhandene niedrige Wärmeleitfähigkeit die niedrigen Temperaturen kompensiert werden.

Aus Abb. 3 wird zusätzlich deutlich, dass der Temperaturabfall im Sondenfeld 3 über die Projektdauer deutlich ausgeprägt ist. Aus dem existierenden Monitoring (vgl. Abb. 1) ist bekannt, dass die maximalen Temperaturänderungen in den letzten fünf Jahren ca. 20°C betragen. Der im Projekt gemessene Temperaturabfall im Feld 3 liegt somit über dem üblichen Schwankungsbereich im Lebenszyklus eines Haldenschwelbrands. Somit scheint an dieser Stelle der Wärmeentzug für den Temperaturabfall verantwortlich zu sein. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit wird nicht genügend Wärme zur Sonde transportiert, so dass eine Regenerierung nicht möglich ist und die Temperaturen dauerhaft absinken.

Bei der Interpretation der Ergebnisse der TRTs ist weiterhin zu beachten, dass die ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit nicht mit der physikalischen Größe „Wärmeleitfähigkeit“ gleichzusetzen ist. Für das trockene Haldenmaterial wurde im Labor eine Wärmeleitfähigkeit von 0,4 W/mK ermittelt. Diese liegt somit deutlich unter der im TRT ermittelten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit als Ergebnis aus dem TRT alle Vorgänge, die zum Wärmetransport bzw. Wärmeentzug beitragen, mit abbildet (vgl. Kapitel 4.1). Aus der Testauswertung wird somit nur ein Wert erhalten, der alle Vorgänge beinhaltet.

Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Temperaturprofile in den Sondenfeldern (vgl. Abb. 3) ist trotz der niedrigen Entzugsleistungen für alle Sonden ein Temperaturabfall über die Zeit ersichtlich. Demnach ist anzunehmen, dass selbst eine theoretische Steigerung der Entzugsleistung längerfristig zu einer noch deutlicheren Abkühlung des Haldenmaterials führen würde, was für eine geringe Wärmeneubildung im Haldenkörper spricht. Aufgrund dessen wurde die niedrige Wärmebildung des Haldenkörpers als mittelbare Ursache für die niedrigen Wärmeentzugsleistungen identifiziert.

4 Maßgebende Einflussfaktoren auf den Wärmeentzug

4.1 Grundlagen zum Wärmetransport und Wärmeübergang

Prinzipiell erfolgt der Wärmetransport im Boden durch Wärmeleitung, Konvektion (frei und erzwungen) sowie durch Strahlung. Der vorherrschende Mechanismus hängt dabei im Wesentlichen vom anstehenden Boden und der Bodenfeuchte ab (FRIVIK et al. 1977). Während bei der herkömmlichen Anwendung der oberflächennahen Geothermie im gewachsenen Boden die Prozesse der Wärmeleitung und bei Vorhandensein einer Grundwasserströmung der erzwungenen Konvektion vorherrschen, sind bei der thermischen Nutzung von Haldenschwelbränden infolge der hohen Temperaturgradienten auch die Prozesse aus Strahlung zu beachten. Einflüsse aus dem Grundwasser können

auf Grund der exponierten Lage des Haldenplateaus und der vorhandenen hohen Temperaturen dagegen vernachlässigt werden. Ein konvektiver Wärmetransport ist somit lediglich in der Luftphase möglich.

Neben dem Wärmetransport im Untergrund ist für den möglichen Wärmeentzug einer Erdwärmesonde der Wärmeübergang zwischen Untergrund und Wärmeträgermedium bedeutend (vgl. Abb. 4). Dieser hängt wiederum von den Strömungsbedingungen im Sondenrohr sowie den einzelnen Materialkomponenten ab. Hierbei ist vor allem die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials von entscheidender Bedeutung VDI 4640-2 (2001).

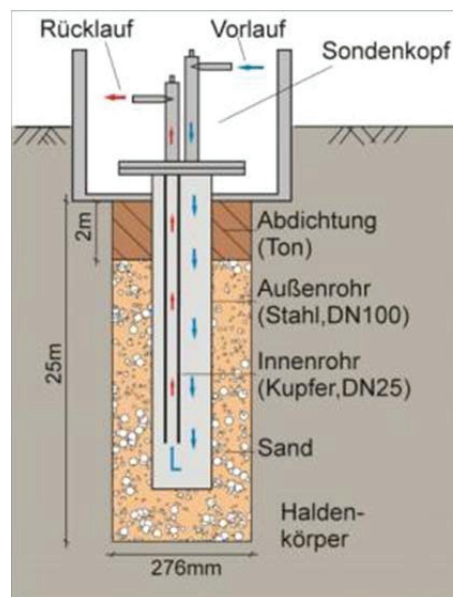


Abb. 4: Vertikaler Schnitt einer Erdwärmesonde
Fig. 4: Schematic cross-section of a borehole heat exchanger

Die Projektionsfähigkeit der innerhalb des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse auf potentielle Haldengeothermieprojekte stellte eines der Projektziele dar. Hierzu wurden verschiedene Parameterstudien durchgeführt, um die Bedeutung der einzelnen Faktoren zu gewichten. Im Folgenden sollen hier exemplarisch die Einflüsse aus dem Verfüllmaterial (Anlagenseite) und dem Haldenmaterial (Standort) vorgestellt werden.

4.2 Einfluss des Verfüllmaterials

Um anlagenseitig einen optimalen Wärmeentzug zu erreichen, wäre ein Sondenverfüllmaterial mit hoher thermischer Leitfähigkeit erforderlich. Für die betrachtete Anwendung weist der verwendete Verfüllsand mit 1,2 W/mK im trockenen Zustand eine ausreichend hohe thermische Leitfähigkeit auf. Bei der Übertragung der Projektergebnisse auf Standorte mit höherer Wärmebildungsrate wäre unter Umständen ein Material mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit vorteilhaft. Aus diesem Grund wurden potentiell geeignete Verfüllstoffe untersucht. Dabei wurden zum einen Materialien untersucht, die eine hohe eigene Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Zum anderen wurden Materialmischungen hergestellt, die durch Zugabe hochwärmeleitfähiger Zuschläge eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen.

4.2.1 Verfüllmaterialien mit hoher eigener Wärmeleitfähigkeit

Zur Identifikation potentiell geeigneter Verfüllmaterialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit wurden neben dem bereits betrachteten Verfüllsand zwei Verfüllbaustoffe des Herstellers HeidelbergCement Baustoffe für Geotechnik auf ihre thermische Leitfähigkeit untersucht. Zum einen wurde ein hoch wärmeleitfähiger Standardverfüllbaustoff welcher in der oberflächennahen Geothermie Anwendung findet, getestet. Zum anderen wurde ein speziell für den Einsatz im Hochtemperaturbereich entwickelter Baustoff untersucht. Beide Proben wurden sowohl mit einer Halbraum- als auch mit einer Vollraumsonde (ebenfalls TK04) analysiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt.

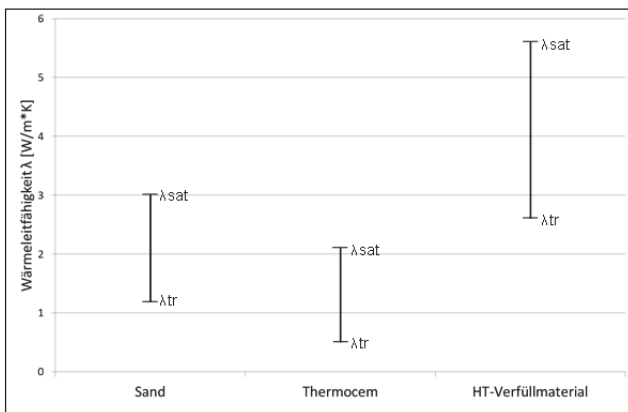


Abb. 5: Wärmeleitfähigkeiten des untersuchten Verfüllmaterials
 Fig. 5: Thermal conductivity of the analysed backfill material

Im Vergleich zum Verfüllsand führt die Verwendung des Standardverfüllbaustoffes nicht zur Verbesserung des Wärmeübergangs zwischen Erdwärmesonde und Haldenkörper. Mit einem Wert von 0,5 W/mK im trockenen Zustand liegt die Wärmeleitfähigkeit des Materials nur knapp über der des Haldenbodens. Im Gegensatz dazu weist das speziell für hohe Temperaturbereiche entwickelte Material im trockenen Zustand mit 2,6 W/mK eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit auf und scheint hinsichtlich dieses Parameters für Anwendungen mit hoher Wärmestromdichte gut geeignet zu sein.

4.2.2 Mischungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit

Zur Verbesserung des Wärmeentzugs wurde versucht, neben der Identifikation gut wärmeleitender Materialien die Wärmeleitfähigkeit des im Pilotversuch verwendeten Verfüllsands durch Zugabe stark leitender Materialien zu erhöhen. Potentielle Zuschlagsstoffe wurden hinsichtlich der Kriterien „Leitfähigkeit“, „Bezugskosten“ sowie „Umweltverträglichkeit“ bewertet. Nach Anwendung dieser Kriterien wurden für eine erste Versuchsreihe Edelstahl-Drehspäne als Zuschlagsstoff ausgewählt. Als Reststoff aus der Metall verarbeitenden Industrie sind diese vergleichsweise günstig verfügbar und besitzen eine thermische Leitfähigkeit von ca. 15 W/mK (EDELSTAHL 2012). Für die Bestimmung der Leitfähigkeit wurden der Verfüllsand sowie die Späne auf eine Korngröße < 4 mm aufbereitet und intensiv vermischt. Die Analyse der Proben erfolgte mittels einer Halbraumlinienquelle.

Die Wärmeleitfähigkeiten der untersuchten Sand-Metall-Mischungen sind in Abb. 6 als Wertepaare dargestellt. Neben den im Labor gemessenen Werten sind die für das Gemisch nach dem Hashin-Shtrikman-Modell (z.B. BENTZ 2007) berechneten Wärmeleitfähigkeiten abgebildet. Während mit steigendem Metallgehalt erwartungsgemäß sowohl saturiert als auch trocken bei den berechneten Werten ein leichter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit ersichtlich ist, konnte dies bei praktischen Versuchen nicht bestätigt werden. Der geringe Anstieg der berechneten Wärmeleitfähigkeiten ist auf den geringen Volumenanteil des Metalls in der Mischung und somit auf den geringen Einfluss der höheren Leitfähigkeit dieses Materials auf die Leitfähigkeit der Gesamtprobe zurückzuführen. Im Gegensatz dazu nimmt infolge des Metallzuschlags das Porenvolumen der Mischprobe zu, was deren Wärmeleitfähigkeit verringert (vgl. Abb. 6, 20 %) und der gesteigerten Leitfähigkeit entgegenwirkt.

Bei Durchführung der praktischen Versuche werden die Ergebnisse neben den oben genannten Einflüssen auf die Wärmeleitfähigkeit zusätzlich von Ungenauigkeiten während der Messung beeinflusst. Diese können sich beispielsweise aus Inhomogenitäten innerhalb der Proben ergeben. Infolge dessen ist durch den Metallzuschlag keine eindeutige Steigerung der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Metallgehalt der Proben erkennbar.

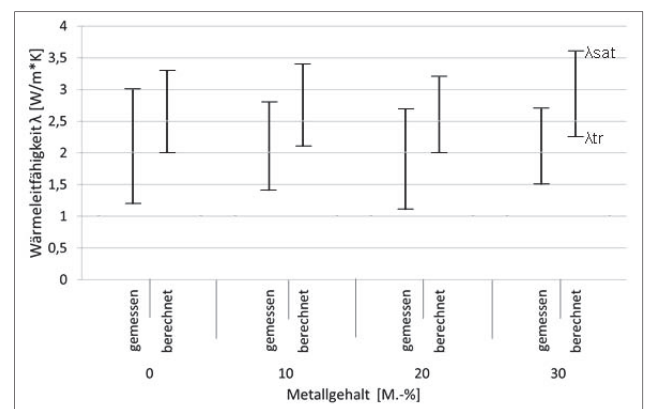


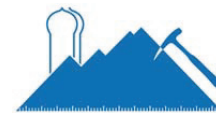
Abb. 6: Wärmeleitfähigkeit des Verfüllsandes bei zunehmendem Metallgehalt

Fig. 6: Thermal conductivity of the backfill material depending on the metal content

4.2.3 Parameterstudie

Die Beurteilung der Bedeutung des Verfüllmaterials für den Wärmeentzug kann über die Betrachtung des Wärmeübergangswiderstands der Sonde erfolgen. Mit Hilfe des Wärmeübergangswiderstands kann die Temperatur an der Außenseite der Verfüllung berechnet werden, die erforderlich ist, um eine bestimmte Entzugsleistung aufrecht zu erhalten. Details zur Bestimmung des Wärmeübergangswiderstands bei coaxialen Sonden können MOTTAGHY & DIJKSHOORN (2012) entnommen werden.

In Abb. 7 ist für die Sonde 2 bei einer Leistung von 3 kW und einem Durchfluss von 4 l/min die erforderliche Bohrlochrandtemperatur T_w in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials λ_v dargestellt. Die Randbedingungen wurden hierbei analog zu denen aus einem durchge-



fürten TRT gewählt. Es zeigt sich, dass bei einer höheren Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials eine geringe Randtemperatur erforderlich ist. Dies bedeutet, dass weniger Wärme über den Haldenkörper transportiert werden muss, was die Leistungsfähigkeit der Anlage steigert. Abb. 7 zeigt jedoch auch, dass eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit auf über 2 W/mK keine ausgeprägte Anlagenverbesserung bedeutet.

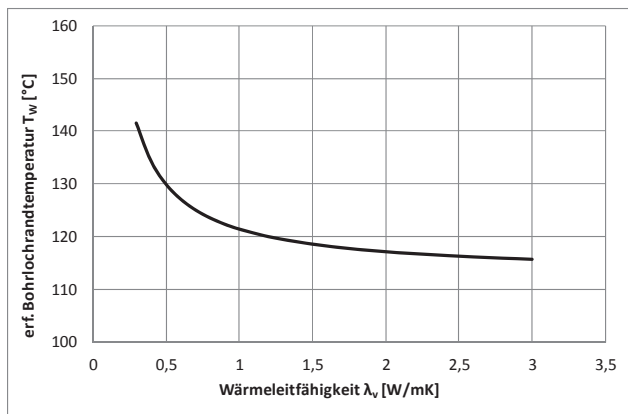


Abb. 7: Erforderliche Bohrlochrandtemperatur in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials.

Fig. 7: Required borehole temperature depending on the thermal conductivity of the backfill material.

4.3 Einfluss des Haldenmaterials

Zur Bestimmung des Einflusses des Haldenmaterials auf den Wärmeertrag der Erdwärmesonden wurden numerische Simulationen mit dem Programm SHEMAT (CLAUSER 2003) durchgeführt. Die Sonde wurde dabei vereinfacht über eine konstante Temperaturrandbedingung abgebildet. Die Temperatur wurde auf die entsprechende Bohrlochwandtemperatur gesetzt (vgl. Kapitel 4.2.3). In den TRTs wurde ermittelt, dass in den Temperaturmessstellen im Abstand von 2,5 m kein nennenswerter Einfluss durch den kurzzeitigen Wärmeentzug im TRT (Testdauer max. 2 Wochen) messbar war. Daher wurde an den Modellrändern die Temperatur der Pegel als Randbedingung gewählt. Abb. 8 zeigt die mögliche Entzugsleistung der Sonde in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Haldenmaterials.

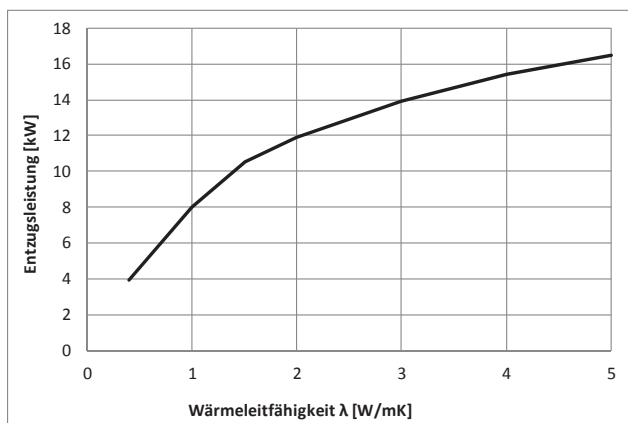


Abb. 8: Entzugsleistung in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Haldenmaterials.

Fig. 8: Heat extraction depending on the thermal conductivity of the dump material.

Es zeigt sich, dass die Wärmeleitfähigkeit einen maßgebenden Einfluss auf den Wärmeertrag besitzt. So ist eine deutliche Steigerung der möglichen Leistung mit steigender thermischer Wärmeleitfähigkeit zu verzeichnen. Der Einfluss des Haldenmaterials ist auch deutlich ausgeprägter als der Einfluss des Verfüllmaterials. Es bestätigt sich, dass der begrenzende Faktor bei der thermischen Nutzung von Haldenschwelbränden in den Standortbedingungen begründet liegt. Die schlechten thermischen Eigenschaften des Materials können somit nur zum Teil durch die hohen Temperaturen kompensiert werden.

5 Fazit

In einem Verbundvorhaben wurde die thermische Nutzung von Haldenschwelbränden untersucht. Dazu wurde eine Pilotanlage über drei Jahre betrieben und verschiedene praktische, theoretische und numerische Untersuchungen durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass die Entzugsleistungen der Erdwärmesonden mit ca. 100 W/m deutlich über denen herkömmlicher geothermischer Anlagen liegt. In Relation zu den hohen vorhandenen Temperaturen fallen die erzielten Leistungen jedoch gering aus. Dies kann zum einen auf die schlechten thermischen Eigenschaften des Haldenmaterials zurückgeführt werden. Zum anderen ist die begrenzte Wärmeneubildung im Haldenkörper ein limitierender Faktor. Zur Optimierung des Wärmeübergangs zwischen Erdwärmesonde und Haldenkörper wurden verschiedene Verfüllmaterialien getestet. Es zeigt sich, dass bei künftigen Vorhaben durch die Verwendung hochleitender Fertigbaustoffe eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Anlage erreicht werden könnte.

Literatur

- BENTZ, D.P. (2007): Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement paste. – *Materials and Structures* **40**: 1073-1080.
- CLAUSER, C. (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers. SHEMAT and Progressing SHEMAT. – 332 Seiten, New York (Springer).
- DORTMANN, H.-D.; HEIN, N. (1991): HALDENBRÄNDE. IN WIGGERING, H., KERTH, M. (HRSG): BERGEHALDEN DES STEINKOHLEBERGBAUS. – 246 SEITEN, WIESBADEN (VIEWEG).
- EDELSTAHL (2012): Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Merkblatt 875 - Edelstahl Rostfrei im Bauwesen - Technischer Leitfaden, Düsseldorf 2012.
- FRIVIK, P.E., THORBERGSEN, E., DEL GIUDICE, S., COMINI, G. (1977): Thermal Design of Pavement Structures in Seasonal Frost Areas. – *Journal of Heat Transfer* **99**: 533-540.
- GEHLIN, S. (2002): Thermal Response Test – Method Development and Evaluation. - Doctoral Thesis, Dep. of Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Schweden.
- KÜRTEIN, S. (2012): Vergleich von verschiedenen Methoden zur Auslegung von Erdwärmesonden am Beispiel der thermischen Nutzung von Haldenschwelbränden. – Veröff. Der Geothermiekongress 2012, Karlsruhe 13.-16. Nov. 2012.

KÜRTEEN, S., FEINENDEGEN, M., SCHWERDT, P., NOEL, Y., KLEIN, A., GASCHNITZ, R. (2011): Haldengeothermie - Chancen und Risiken bei der thermischen Nutzung von Haldenschwelbränden. - *Geotechnik* **34**: 127-135.

MOTTAGHY, D., DIJKSHOORN, L. (2012): Implementing an effective finite difference formulation for borehole heat exchangers

into a heat and mass transport code. – *Renewable Energy* **45**: 59-71.

VDI 4640-2 (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. – Verein Deutscher Ingenieure, Berlin (Beuth Verlag).