

Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von unterirdischen Langzeit-Wärmespeichern am Beispiel des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm

F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen
Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart
Tel. +49 711 685 63278, Fax: +49 711 685 63242
Email: ochs@itw.uni-stuttgart.de

Saisonale Wärmespeicher – Erdsonden-Wärmespeicher – Wärmeverluste – Wärmeleitfähigkeit – Wärmedämmung

Abstract

The solar assisted district heating system with borehole thermal energy store (BTES) in Neckarsulm is being realized since 1997. Solar heat is stored in the borehole thermal energy store from summer to winter. So far 5263 m² of solar thermal collectors are installed. The BTES presently contains a volume of 63 360 m³ with 528 borehole heat exchangers (double-U-pipes, 30 m deep) for charging and discharging.

The BTES was extended twice; the operation of the first and second extension started in 1999 and in 2002, respectively. For economic and constructional reasons the BTES can only be insulated on the top surface. The BTES in Neckarsulm is insulated by two layers of XPS insulation sheets. The XPS insulation is packed between two liners: the lower one to protect the insulation from getting wet by diffusion from soil moisture, the upper one to protect against rain and surface water. Detailed information about construction and operation can be found in [1] and [2].

The predicted annual storage utilization factor assumed for the case the BTES is fully charged by the solar collectors to temperatures up to 90 °C has not been realized for various reasons, see [3].

This paper focuses on the effect of humidity and temperature on the thermal conductivity of the insulation. Measured data from heat flux and temperature sensors are analyzed; results are compared with data obtained from indoor measurements.

It is observed that despite the diffusible construction in the second extension the insulation is partially moist resulting in an increased thermal conductivity. This may be one of several reasons for the higher thermal losses with respect to the predictions.

1 Einleitung

In Neckarsulm-Amorbach ist seit 1997 eine solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmespeicher (ESWSp) in Betrieb. Der Wärmeeintrag in das Erdreich erfolgt über Doppel-U-Rohr-Sonden (PB, Ø25 mm, 30 m tief). Im ESWSp sind 528 Erdwärmesonden installiert, dies entspricht einem Volumen von 63 360 m³. 1997 wurde ein Pilot-speicher gebaut, der 1998 sowie 2001 auf sein jetziges Volumen erweitert wurde, vgl. Bild 1.

Das Planungsziel, ein Speichernutzungsgrad von 66 % (ohne Wärmepumpe) bei einer Beladung des ESWSp mit Solarkollektoren auf Temperaturen von 85 °C bis 90 °C, konnte bisher aus verschiedenen Gründen nicht erreicht werden, vgl. [3]. Detaillierte Informationen über den Bau und Betrieb des ESWSp sind in [1] und [2] zu finden.

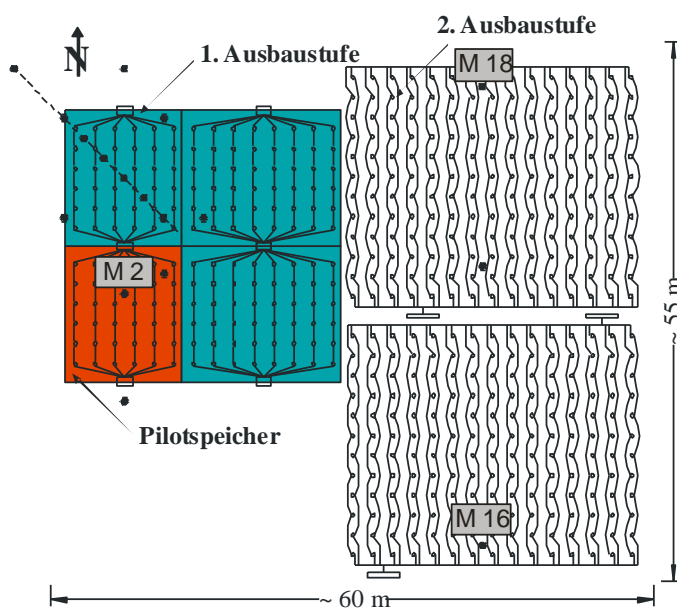


Bild 1: Schema des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm, Lage der Wärmestrom-Messplatten (WSMP) und Temperaturlanzen (M2: Pilot-speicher, M16 und M18 2. Ausbaustufe), Quelle: ITW

2 Aufbau der Wärmedämmung des Erdsonden-Wärmespeichers

Erdsonden-Wärmespeicher können aus bautechnischen und wirtschaftlichen Gründen nur an der Speicheroberseite gedämmt werden. Beim Pilot-speicher und beim ersten Ausbau bestand der Dämmaufbau aus einer Kiesschicht über der Wärmedämmung, einer 20 cm dicken Wärmedämmung aus XPS sowie einer PE-Folie unter der Wärmedämmung.

Der Wärmedämmaufbau muss über die Lebensdauer des Speichers von mindestens 30 bis 40 Jahren Schutz vor Feuchteintrag gewährleisten. Zudem muss das Austrocknen der Baufeuchte bzw. der feucht eingebauten Wärmedämmung ermöglicht werden.

Aufgrund schlechter Erfahrungen in Hinblick auf die Durchfeuchtung der Wärmedämmung wurde für die zweite Ausbaustufe ein optimierter Wärmedämmaufbau entsprechend Bild 2 vorgesehen, vgl. [1].

Die zweite Ausbaustufe des ESWSp ist zur Erdoberfläche hin mit einem diffusionsoffenen Wärmedämmaufbau versehen, sodass Wasserdampf entweichen kann.

Auf eine Sand-Ausgleichsschicht befindet sich eine Kunststoffdichtungsbahn, wodurch das Durchfeuchten der Wärme

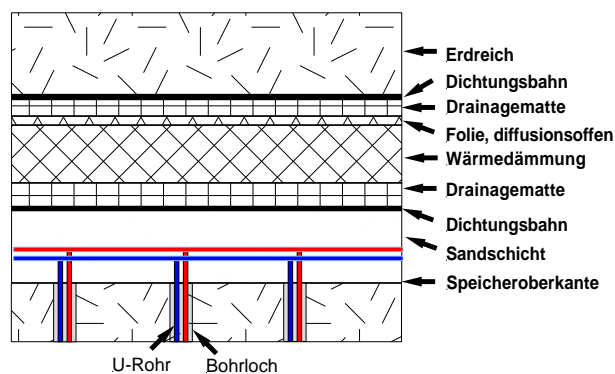


Bild 2: Aufbau der Wärmedämmung beim 2. Ausbau des Erdsonden-Wärmespeichers [1]

dämmung vom feuchten Boden verhindert werden soll. Auf der zweilagig überlappend verlegten XPS-Wärmedämmung befindet sich eine weitere Abdichtung gegen Regen und Oberflächenwasser. Zur messtechnischen Überwachung wurden an mehreren Stellen im Wärmespeichergebiet Wärmestrom-Messplatten (WSMP) und Temperaturlanzen eingebaut. Jede Wärmestrom-Messplatte ist zusätzlich mit einem weiteren Temperatursensor versehen, vgl. Bild 3.

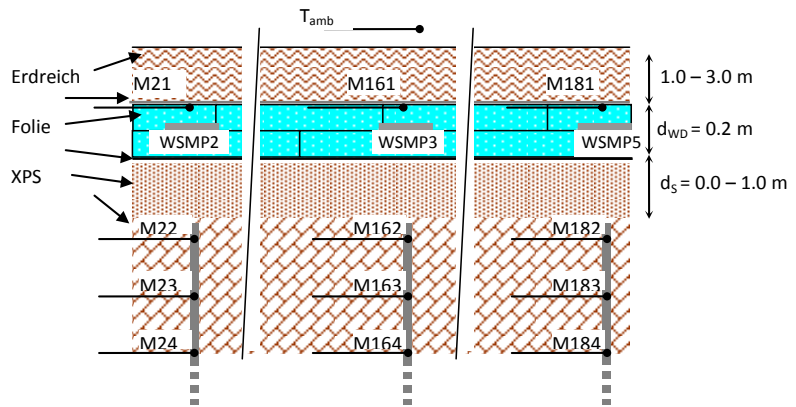


Bild 3: Schematischer Querschnitt des Wärmedämmbaus des ESWSp in Neckarsulm, Lage der Temperaturmesslanzen (M2, M16, M18) und der Wärmestrom-Messplatten (WSMP); die exakte Höhe der Sandschicht ist nicht bekannt ($0 < d_s < 1$ m)

Der Einbau der XPS-Wärmedämmung (100 mm extrudierte Hartschaumplatte, BASF Styrodur, C3035CS) erfolgte in zwei Schichten und dies zumindest teilweise auf regennasser Abdichtbahn (KDB) wie in Bild 4 zu erkennen ist.



Bild 4: Einbau der XPS-Wärmedämmung auf regennasser Abdichtbahn (KDB), Erdsonden-Wärmespeicher in Neckarsulm, (1. Ausbaustufe) (Quelle: ITW)

Messungen an drei Proben, die im Januar 2001 aus der Wärmedämmung der 1. Ausbaustufe entnommen wurden [11] zeigen, dass die XPS-Wärmedämmung zumindest stellenweise feucht geworden ist. Die gemessenen Feuchtegehalte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Im Folgenden soll der Effekt durchfeuchteter Wärmedämmung während des Betriebs am Beispiel des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm gezeigt werden.

Tabelle 1: Gemessene Rohdichte (ρ) und absoluter Feuchtegehalt (u) dreier Dämmstoffproben, Messung nach Ausbau im Januar 2001 [11].

Probe	ρ / [kg/m ³]	u / [kg/m ³]
1	31.8	7.0
2	32.2	8.6
3	33.0	13.4

3 Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung im Betrieb

Die effektive Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung während des Betriebs des Erdsonden-Wärmespeichers kann durch Auswertung der Messdaten von Wärmestrom-Messplatten und Temperatursensoren bestimmt werden. Dazu wurden Messdaten von Wärmestrom-Messplatten an drei Stellen (Pilotspeicher zentral, 2. Ausbaustufe Nord und Süd) in der Wärmedämmung ausgewertet.

Die Wärmestrom-Messplatten wurden zwischen den zwei Dämmstoffschichten platziert, vgl. Bild 5. Jeweils auf und unter der Wärmedämmung befindet sich ein Temperatursensor. Die effektive Wärmeleitfähigkeit kann entsprechend bei bekannter Temperaturdifferenz und Schichtdicke nach der Fourier'schen Wärmeleitung bestimmt werden.

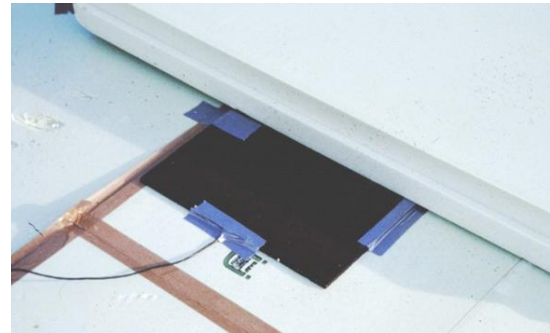


Bild 5: Einbau der Wärmestrom-Messplatte zwischen den XPS-Schichten (Quelle: ITW), Extrudiertes Polystyrol – Hartschaumplatte, BASF Styrodur C 3035CS, Dicke 100 mm

Pilotspeicher

Für den Pilotspeicher (WSMP 2) stehen Messwerte von 29.12.1997 bis 15.09.1999 zur Verfügung.

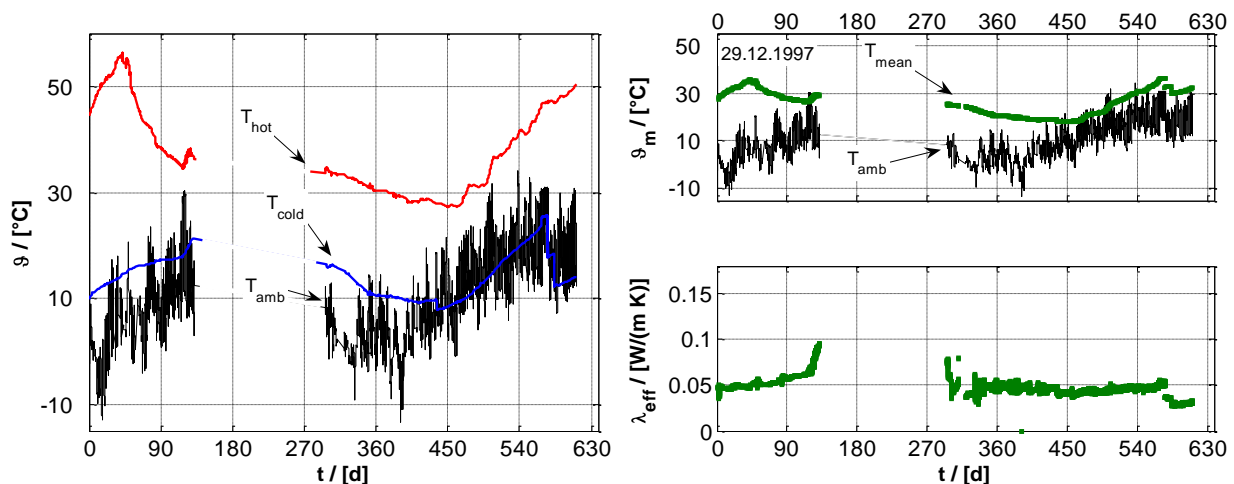


Bild 6: Verlauf der Umgebungstemperatur (T_{amb}), der Temperatur über (T_{cold}) und unter (T_{hot}) der Wärmedämmung (links) sowie Verlauf der Dämmstoffmitteltemperatur und der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung (rechts) im Pilotspeicher vom 29.12.1997 bis 15.09.1999

Anfang 1998 wurden Beladeversuche gefahren, wodurch sich Temperaturen von rund 60 °C im Speicher einstellten, vgl. Bild 6. Die Werte in der Periode von April 1998 bis Oktober 1998 sind für die Analyse aufgrund von Datenlücken infolge von Sensorausfällen nicht geeignet.

2. Ausbaustufe

Für die 2. Ausbaustufe stehen Messdaten von Juni 2002 bis Dezember 2006 zur Verfügung. In Bild 7 ist der Verlauf der Umgebungs- und Dämmstofftemperatur und der effektiven Wärmeleitfähigkeit dargestellt über den Zeitraum von knapp fünf Jahren.

Durch Ausfall zweier Temperatursensoren in 2005 entstanden Datenlücken. Die Temperaturen oberhalb und unterhalb der Dämmstoffplatten an den Positionen M16 (WSMP 3) und M18 (WSMP 5) unterscheiden sich nur unwesentlich im Zeitraum von

Juni 2002 bis Mitte 2005. Dadurch kann angenommen werden, dass die Datenlücken mit nur geringem Fehler durch die Messwerte des jeweils noch funktionierenden Temperatursensors geschlossen werden können.

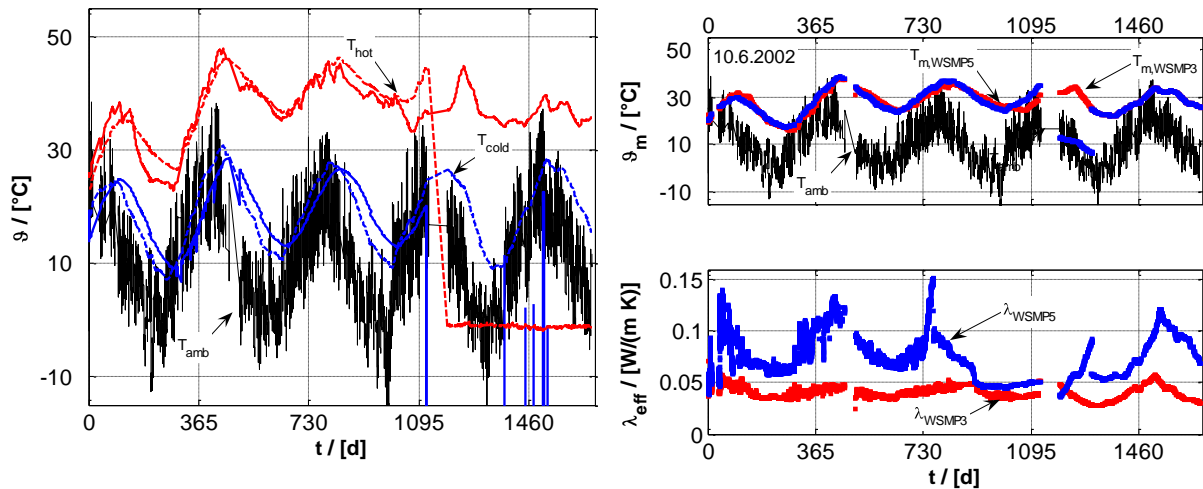


Bild 7: links: Verlauf der Umgebungstemperatur sowie der Temperatur über (T_{hot}) und unter (T_{cold}) der Wärmedämmung an der Süd- und Nordseite der 2. Ausbaustufe; rechts: Verlauf der Umgebungstemperatur (T_{amb}), der Dämmstoffmitteltemperaturen an der Position 3 und 5 und der entsprechenden effektiven Wärmeleitfähigkeit; Auswertung und Analyse der Messdaten der Wärmeleitfähigkeit (Messdaten der effektiven Wärmeleitfähigkeit, die zwischen April und Oktober 1998 gemessen wurden, werden nicht in die Auswertung mit einbezogen)

Die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus Bild 6 und Bild 7 werden als Funktion der Dämmstoffmitteltemperatur in Bild 8 dargestellt. Die Temperaturabhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit wird so ersichtlich. Die zum Teil erheblichen Schwankungen treten aufgrund von transienten Effekten und variablem Wassergehalt der Dämmstoffe auf. Trends sind dennoch gut zu erkennen.

Für die Wärmedämmung des Pilotspeichers ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur. Die effektive Wärmeleitfähigkeit bewegt sich zwischen Dämmstoffmitteltemperaturen von 10 °C bis 40 °C von 0.04 bis 0.06 W/(m K) und damit rund 30 bis 100% über dem Bemessungswert nach DIN 4108.

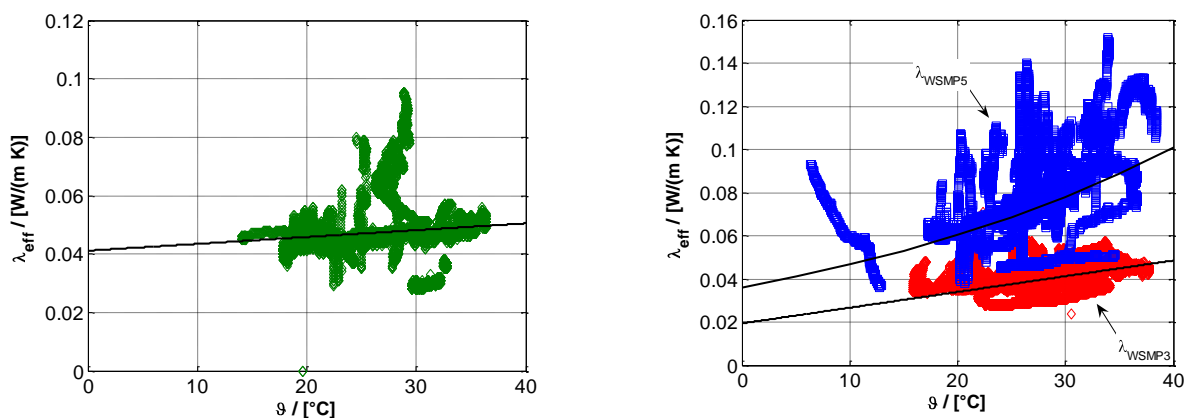


Bild 8: Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit (Punkte) als Funktion der Dämmstoffmitteltemperatur, links Pilotspeicher, rechts als Funktion 2. Ausbaustufe Nord (WSMP 5) und Süd (WSMP 3); Best fit linear für die den Pilotspeicher und die Südseite der 2. Ausbaustufe (WSMP 3), exponentiell für die feuchte Dämmung auf der Nordseite (WSMP 5)

Auch der lineare Verlauf im Falle der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung der Südseite der 2. Ausbaustufe (WSMP 3) deutet daraufhin, dass die Wärmedämmung trocken ist. Der Wert bei 20 °C entspricht in etwa dem Referenzwert nach DIN 4108. Bei Temperaturerhöhung um 20 K steigt die effektive Wärmeleitfähigkeit um etwa 0.01 W/(m K). Dies entspricht einer Zunahme von etwa 25 %.

Der exponentielle Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung auf der Nordseite (WSMP5) lässt vermuten, dass die Wärmedämmung feucht ist. Mit Werten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von bis zu 0.12 W/(m K) liegt diese etwa drei- bis vierfach über den Referenzwerten.

Das unterschiedliche Verhalten der Dämmung an Nord und Südseite könnte darin begründet sein, dass die Wärmedämmung von Süd nach Nord abfällt. Wasser, das sich in der Wärmedämmung zwischen der unteren Abdichtung und der Regenschutzbahn befindet fließt aufgrund des Gefälles nach Norden und verbleibt trotz des diffusionsoffenen Aufbaus dort in der Wärmedämmung.

4 Wärmeleitfähigkeitsmodell

Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit für Betriebssituationen, wie sie bei erdvergrabenen Wärmespeichern realistisch sind, wurde ein Modell entwickelt, welches die Abhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmstoffen als Funktion der Temperatur und des Wassergehalts berücksichtigt. Das Modell basiert auf einem von Krischer und Kast [5], [6] entwickeltem Ansatz. Das neue Modell wird detailliert in [7] beschrieben.

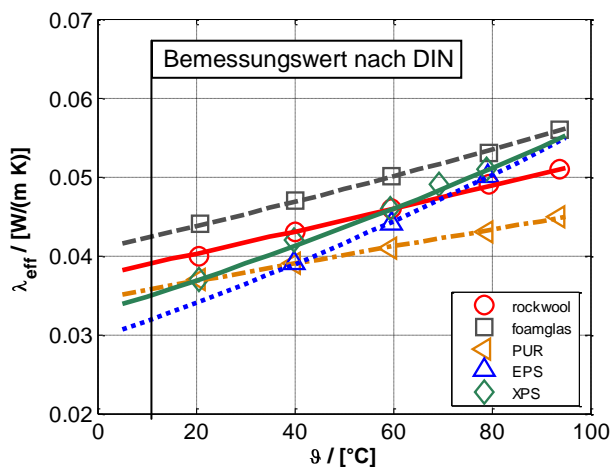


Bild 9: Effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} in Abhängigkeit der Temperatur θ von trockenen Dämmstoffplatten (Punkte: Messwerte, Linien: Modellwerte)

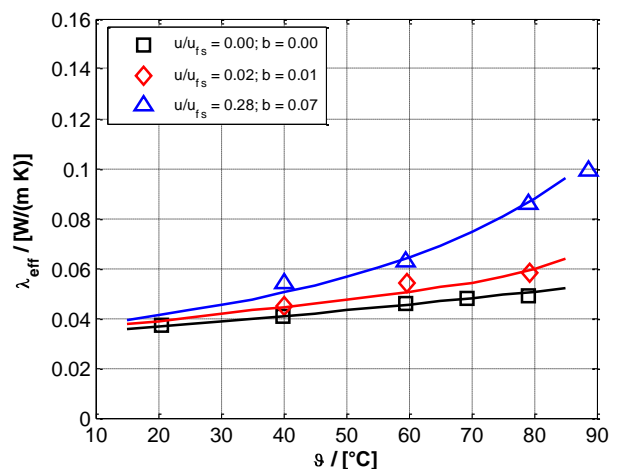


Bild 10: Mess- und Modellwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von XPS Rohdichte $\rho = 34 \text{ kg/m}^3$, Porosität $\Psi=0.97$, freie Sättigung $u_{fs}=11 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur (Punkte: Messwerte, Linien: Modellwerte)

In Bild 9 sind für verschiedene trockene Dämmstoffplatten Mess- und Modellwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur aufgetragen. Bei Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C nimmt die Wärmeleitfähigkeit um 25 bis 30 % zu. In Anwesenheit von Feuchte ist die Zunahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit noch ausgeprägter. Für XPS ist dies in Bild 10 für zwei verschiedene Feuchtigkeitsgehalte dargestellt.

Die linearen Verläufe an den Positionen 2 (1. Ausbaustufe) und 3 (2. Ausbaustufe) entsprechen den im Innenlabor gemessenen Werten, die in Bild 11 gezeigt werden.

Für den Pilotspeicher ist zum Vergleich die von Benner [11] berechnete Wärmeleitfähigkeit der XPS Wärmedämmung aufgetragen. Die Wärmeleitfähigkeit wurde berechnet mit zwei Temperatursensoren (M3), welche jeweils direkt unter bzw. über der Wärmedämmung angebracht sind, sowie den Messwerten der Wärmestrom-Messplatte 2 (WSMP2). Die von Benner [11] berechnete Wärmeleitfähigkeit liegt deutlich über den Werten, welche für den Zeitraum 1997 bis 1999 bestimmt wurden. Dies deutet auf eine Zunahme der Feuchtigkeit hin.

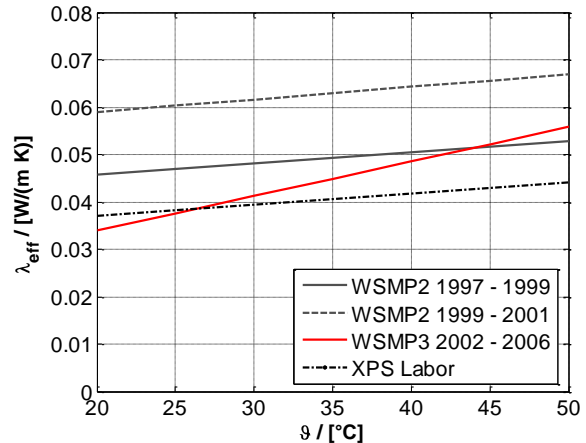


Bild 11: Ausgleichskurven der effektive Wärmeleitfähigkeit von XPS im Vergleich zu den Laborwerten, WSMP 2 1999-2001 von [11]

5 Wärmeverluste über die Oberfläche

Als Grenzwertabschätzung sollen die Wärmeverluste über die Oberfläche des Erdsonden-Wärmespeichers mit trockener Wärmedämmung und mit feuchter Wärmedämmung verglichen werden. Die Berechnung der Wärmeverluste erfolgt mit einer einfachen transienten eindimensionalen Berechnung. Der Schichtaufbau wird entsprechend Bild 3 modelliert. Die für die Berechnung verwendeten Stoffwerte sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Wärmeleitfähigkeit der XPS-Wärmedämmung wird variiert. Als Randbedingungen werden periodische approximierten Speicher- und Umgebungstemperaturen angesetzt, vgl. Bild 12.

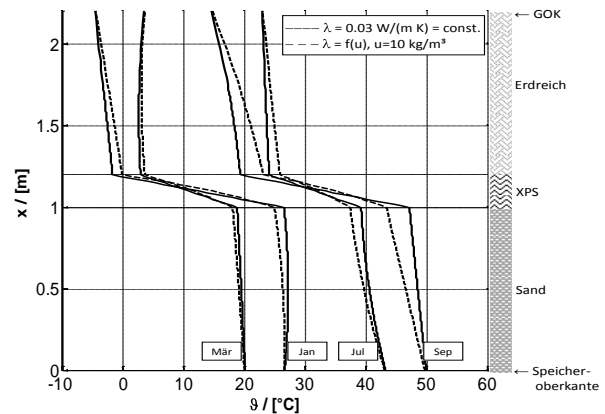


Bild 12: Temperaturprofil für periodische Randbedingungen: Speichertemperatur: 20 bis 50 °C (links), Umgebungstemperatur (-5 bis 25 °C (rechts))

Es ergeben sich Abweichungen von knapp 100 % bezogen auf die spezifischen Wärmeverluste über die Oberfläche zur Umgebung:

- 28 kWh/(m² a) für $\lambda=0.03$ W/(m K)
- 32 kWh/(m² a) für $\lambda=(0.03+0.0002 \cdot \theta)$ W/(m K)
- 54 kWh/(m² a) für WLF-Modell, $u = 5$ kg/m³
- 55 kWh/(m² a) für WLF-Modell, $u = 10$ kg/m³

Alleine für die zweite Ausbaustufe (1650 m²) ergeben sich für den schlechtesten Fall ($u = 10$ kg/m³) Wärmeverluste über die Oberfläche zur Umgebung von jährlich rund 90 MWh.

Tabelle 2: Stoffwerte für die 1d-Berechnung,

		Boden	WD	Sand
d	[m]	1	0.2	1
λ	[W/(m K)]	1.6	variabel	1.6
ρ	[kg/m ³]	2300	34	2300
c	[kJ/(kg K)]	1.4	1.3	1.4

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die ermittelten Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit deuten darauf hin, dass die Wärmedämmung der zweiten Ausbaustufe trotz des diffusionsoffenen Aufbaus (vgl. Bild 2) zumindest an einer Stelle feucht ist. Die Werte für die effektive Wärmeleitfähigkeit im Bereich von $0.05 \text{ W}/(\text{m K})$ bis $0.12 \text{ W}/(\text{m K})$ liegen bis zu einem Faktor drei über den Referenzwerten nach DIN 4108 [4]. Im Vergleich dazu sind die gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit an den beiden anderen Messstellen mit $0.04 \text{ W}/(\text{m K})$ bis $0.05 \text{ W}/(\text{m K})$ im Bereich der Innenlabor-Messdaten.

An der Optimierung witterungsunabhängiger Einbaumethoden für die Wärmedämmung muss zukünftig weiter gearbeitet werden. Zudem muss zum einen die Weiterentwicklung wasserdichter aber diffusionsoffener Konstruktionen vorangetrieben werden

Durch die Implementierung des Modells der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit (erweitertes Schichtenmodell) in transiente Simulationsmodelle sollte zukünftig das Betriebsverhalten von Langzeit-Wärmespeichern realistischer abgebildet werden können. Dafür müssen vorhandene Modelle wie z.B. DST [8] oder SBM [9] (in TRNSYS [10]) grundlegend überarbeitet werden.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Benner M., Bodmann M., Mangold D., Nußbicker J., Raab S., Schmidt T., Seiwald H., Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher (Nov. 98 bis Jan. 03), Forschungsbericht zum BMWi-Vorhaben 0329606 S, Stuttgart 2004
- [2] Nußbicker J., Mangold D., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Bau und Betrieb des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm-Amorbach, 8. Geothermische Fachtagung & 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen, Landau/Pfalz, 2004
- [3] Nußbicker J., 10 Jahre solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmespeicher in Neckarsulm-Amorbach, OTTI Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 26.-27.04.2007, Freising, 2007
- [4] DIN 4108 Teil 4, Thermal insulation and energy economy in buildings - Part 4: Hygrothermal design values, 2004.
- [5] Krischer O., Kast W., Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, 1992
- [6] VDI-Wärmeatlas, Kap. Dee, 9. Auflage, Springer Verlag, 2002
- [7] Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H., Effective Thermal Conductivity of Moistened Insulation Materials as a Function of Temperature, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007
- [8] Hellstrom G., Mazzarella L. and Pahud D., Duct Ground Heat Storage Model. Lund -DST. TRNSYS 13.1 Version January 1996. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- [9] Eskilson P., Superposition Borehole Model, Manual for Computer Code, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Schweden, 1986
- [10] TRNSYS, A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin, Madison and Transsolar, Stuttgart, Germany, 2000
- [11] Benner M., Interne Messdaten, Daten ITW, Uni Stuttgart, 2001.