

Erdreich/Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit direktem Beladesystem

F. Ochs¹⁾, W. Heidemann¹⁾, H. Müller-Steinhagen^{1) 2)}, H. Koch³⁾

¹⁾ Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Germany

Fon ++49 711 685 3278 – Email ochs@itw.uni-stuttgart.de

²⁾ DLR Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik

³⁾ Pfeil und Koch ingenieurgesellschaft

1. Kies-Wasser vs. Erdreich-Wasser-Wärmespeicher

Bei großen Erdbecken-Wärmespeichern (10.000 m³) mit geringem A/V-Verhältnis liegt ein wesentliches Kostenreduktionspotential beim Speichermedium. Ist am Speicherstandort kein Kies vorhanden und lässt sich der Erdaushub wiederverfüllen,

kann dieser als günstiges Wärme-speichermedium genutzt werden. Damit werden einerseits die Deponiekosten für den Aushub und andererseits die Kosten für den Kies gespart. Nachteilig bei dieser Vorgehensweise ist der bisher notwendige Einsatz eines indirekten Be- und Entladesystems über im Erdreich verlegte Kunststoffrohre (ähnlich einer Fußbodenheizung, vgl. Bild 1). Da die Länge und damit die Kosten der Kunststoffrohre linear mit der Speicher-



Bild 1: Rohrschlängensystem im Kies-Wasser Speicher Steinfurt Borghorst (1999)

größe steigen, wird das Einsparpotential der Speicherfüllung durch das aufwändige Rohrschlängensystem wieder kompensiert. In Tabelle 1 sind bereits realisierte Kies-Wasser bzw. Sand-Wasser-Wärmespeicher aufgelistet.

Tabelle 1: Auswahl realisierter Kies-Wasser bzw. Sand-Wasser-Wärmespeicher und zum Vergleich Erdsonden-Wärmespeicher in Neckarsulm								
Ort	Land	Datum	Volumen	Medium	Beladung	WÜ-Länge	$A_{WÜ}/V$	Quelle
			in m ³			in m	in m ⁻¹	
Stuttgart	D	1983	1 000	KW	D + I	4 853	0.24	/01/
Vaulruz	CH	1983	3 500	EW	I	1 200	n/v	/02/
Chemnitz	D	1996	8 000	KW	D	-	-	/03/
Marstal	DK	1996	3 500	SW	I	5 000	n/v	/04/
Augsburg	D	1997	6 000	KW	I	20 000	0.16	/05/
Steinfurt	D	1999	1 500	KW	I	7 000	0.23	/06/
Neckarsulm	D	1997	63 360	ES	I	15 840	0.44	/07/

KW: Kies-Wasser, SW: Sand-Wasser, EW: Erdreich-Wasser, ES: Erdsonden (Bohrlochlänge u. -durchmesser)
WÜ: Wärmeübertrager; I: Indirekte Beladung, D: Direkte Beladung; n/v: nicht verfügbar

Ein wichtiges Kriterium für den Betrieb von Langzeit-Wärmespeichern in solar unterstützten Nahwärmesystemen ist, dass die solar erzeugte Wärme zeitgleich in den Speicher eingebracht werden kann (in Kombination mit einem Pufferspeicher im Laufe von 24 h). Es ist also nicht nur die speicherbare Energiemenge zu betrachten, sondern auch die maximale Leistungsaufnahme des Speichers. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 1 angegebenen Längen der Kunststoffrohrschlangen-Wärmeübertrager (WÜ-Länge) bzw. die Werte für das Verhältnis von Wärmeübertragerfläche zu Volumen (V) des Speichers ($A_{WÜ}/V$).

2. Forschungs- Erdreich/Sand-Wasser- Wärmespeicher

Im Rahmen des vom BMU geförderten Forschungsvorhabens „Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“ werden Außenlaborversuche zum Test und zur Überprüfung verschiedener Bauweisen von Heißwasser, Kies-Wasser- und Erdreich-Wasser-Wärmespeichern durchgeführt. Beim Versuch zum Erdreich-Wasser-Wärmespeicher werden anstelle der aufwändigen und teuren Rohrschlangen vertikale und horizontale Kieswege zwischen die Erdschichten eingebaut, durch die das Wasser gepumpt wird (siehe Bild 2).

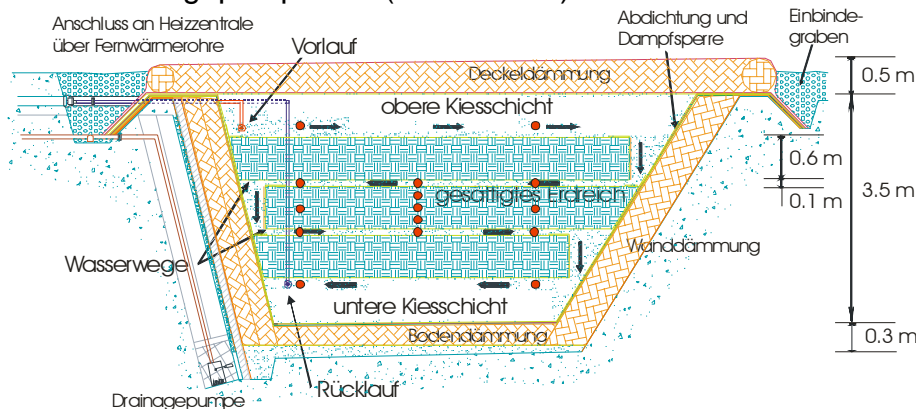


Bild 2: Schema des Erdreich-Wasser Erdbecken-Wärmespeichers mit Kiesschichten als Wasserwege (die Pfeile zeigen die Strömungsrichtung beim Beladen, die Punkte markieren die Lage der Temperatursensoren)

Der im Rahmen des Forschungsvorhabens konzipierte Wärmespeicher wurde mit einem Volumen von rund 100 m³ in einer komplett wärmegeämmten Grube mit einem Bruttovolumen von 200 m³ am ITW gebaut (siehe Fotos). Anstelle des Aushubs wurde Feinsand benutzt. Um ein Ausschwemmen von Erdreichpartikeln zu verhindern, werden die Erdreichschichten in geotextile Fleecestoffe eingepackt. Somit erfolgt der Wärmetransport in die wassergesättigten Erdreichpakete ausschließlich über Wärmeleitung ($A_{WÜ}/V = 2.8$).



Bild 3: Bau des Forschungsspeichers, links Einbringen der Sandschicht und rechts Einpacken der fertigen Schicht in Fleecestoffe, um das Ausschwemmen des Sandes zu verhindern; zu erkennen ist die vertikale Kiesschicht am rechten Rand des Speichers

Weitere mögliche Bauweisen für ein direktes Be- und Entladesystem durch die Herstellung einer so genannten Wasserwegsamkeit sind in /08/ zu finden.

3. Simulation der Strömung durch poröse Medien

Da die Konvektion in den Erdreich- bzw. Sandschichten vernachlässigbar klein ist, wird die Wärme vom Kieskanal überwiegend durch Wärmeleitung in die Erdreich- bzw. Sandschichten transportiert. Neben der Wärmeleitfähigkeit der gesättigten Erdreich- bzw. Sandschicht spielt auch der Wärmeübergang vom durchströmten Kieskanal zum gesättigten Erdreichpaket eine große Rolle. Zur Beurteilung dieser

beiden Wärmetransportmechanismen wurden sowohl Messungen an dem am ITW gebauten Forschungsspeicher (vgl. /09/), als auch Vergleichsrechnungen mit dem kommerziellen CFD-Programm Fluent (/10/) durchgeführt.

Für die Berechnungen wurden folgende Annahmen getroffen: Der Wärmeeintrag ins gesättigte Erdreich- bzw. Sandpaket erfolgt über Wärmeleitung. Die Kies-Wasserschicht wird als poröses Medium modelliert. Für laminare Strömungen in porösen Medien gilt das Gesetz von Darcy:

$$-\text{grad}(p) = \frac{\eta}{K} \cdot w \quad (1)$$

$$\text{mit } w = \frac{V}{A \cdot \varepsilon} = \frac{m}{A \cdot \varepsilon \cdot \rho} \quad (2)$$

dabei ist η die dynamische Viskosität des Fluids und ρ seine Dichte. A ist die Querschnittsfläche des durchströmten Kanals, V der Volumen- und m der Massenstrom. K ist die Permeabilität, die in Abhängigkeit der Porosität ε mit folgender Gleichung abgeschätzt werden kann:

$$K = \frac{d^2 \cdot \varepsilon^2}{A \cdot (1 - \varepsilon)^2} \quad (3)$$

Für A in Glg. 3 kann nach verschiedenen Autoren (/03/, /11/ und /12/) der Wert 150 gesetzt werden. Für turbulente Strömungen in porösen Medien ($Re > 120$) ist der lineare Ansatz nach Darcy ungenügend. Der Druckgradient über das durchströmte Medium lässt sich dann nach Ergun (vgl. /12/) über eine quadratische Beziehung abschätzen:

$$-\text{grad}(p) = \left(\frac{A \cdot \alpha_\varepsilon \cdot \eta}{d^2} \right) \cdot w + \left(\frac{B \cdot \beta_\varepsilon \cdot \rho}{d} \right) \cdot w^2 \quad (4)$$

mit $\alpha_\varepsilon = \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$, $\beta_\varepsilon = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}$ und den empirischen Werten A und B . Für die

Modellierung der Strömungen in porösen Medien steht in Fluent /10/ folgendes Modell zur Verfügung:

$$-\text{grad}(p) = \left(\frac{\eta}{\alpha} \right) \cdot w + \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \right) \cdot w^2 \quad (5)$$

Die für die Berechnung verwendeten Stoffdaten und die notwendigen Koeffizienten sind in Tabelle 2 gegeben. Die berücksichtigte Geometrie für die 2D Berechnungen, ist in Bild 4 schematisch dargestellt:

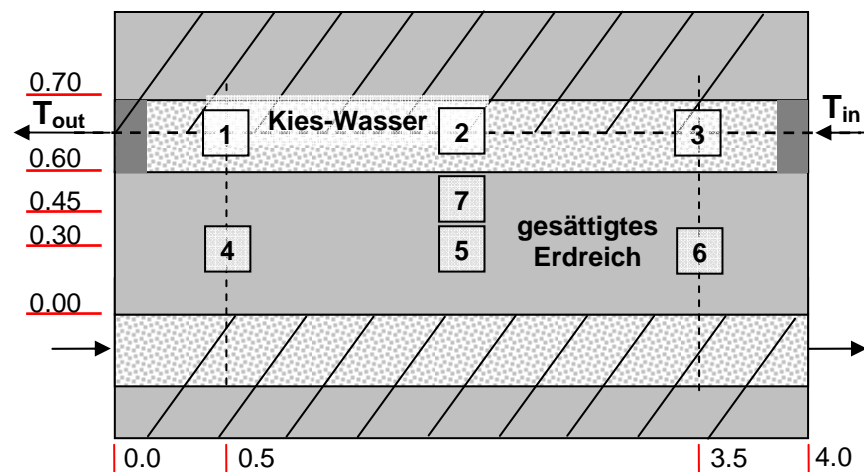


Bild 4: Geometrie des Modells (in m) für die Berechnungen. Die ersten 10 cm der Kies-schicht (Inlet, Outlet) werden aus numerischen Gründen als reines Fluid betrachtet. Das schraffierte Gebiet wird aus Gründen der zeitlichen Optimierung der Rechnung nicht berücksichtigt (Symmetrie). 1-7: Lage der Temperatursensoren. $A_{wü}/V = 2.8$.

Tabelle 2: Stoffwerte der Materialien und Transportkoeffizienten (/01/, /03/, /11/)							
			Kies (Korn)	Sand gesättigt	Sand trocken	Erdreich gesättigt	Wasser Fluid
mittlerer Partikeldurchmesser	d_m	m	0.023	<0.001	<0.001	<0.0001	-
Dichte	ρ	kg/m ³	2629	2000	1650	2000	992.2
spezifische Wärmekapazität	c_p	kJ/(kg K)	0.79	1.38	0.4	1.38	4.177
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m K)	4.8	2.4	1.6	1.8	0.6306
dynamische Viskosität	η	kg/(m s)	-	-	-	-	6.5E-04
Permeabilität	K	1/m ²	1.32E-06	-	-	-	-
Viskositätswiderstand	α	m ²	5.03E-07	-	-	-	-
Trägheitswiderstand	C	1/m	1719.4	-	-	-	-

Für die Berechnung werden zur Parameteridentifikation sowohl die Betriebsdaten, wie Anfangstemperatur (T_{Anfang}) und Beladetemperatur (T_{Inlet}), als auch die Strömungsgeschwindigkeit (w) und die Wärmeleitfähigkeit des gesättigten Sandpakets (λ_{Sand}) variiert. Bild 5 zeigt den Einfluss auf den Verlauf der Kies- und der Sandtemperaturen:

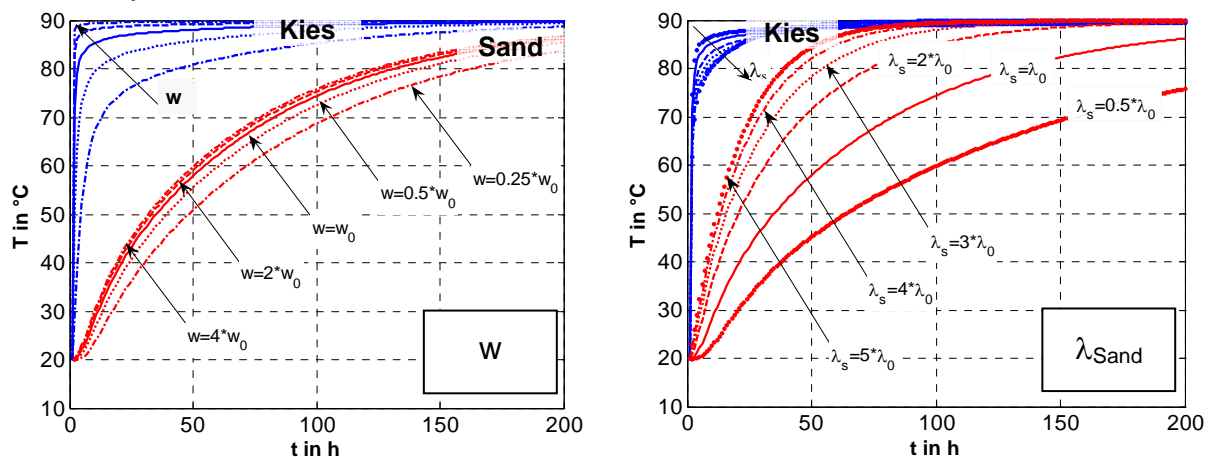


Bild 5: Zeitlicher Verlauf der mittleren Kies- und Sandtemperaturen; Variation der Parameter Strömungsgeschwindigkeit ($w_0=2.97$ m/h) linkes Diagramm und Wärmeleitfähigkeit des Sandpakets ($\lambda_{\text{Sand},0}=2.4$ W/(m K)) rechtes Diagramm

Die Strömungsgeschwindigkeit (w) hat nur geringen Einfluss auf den Temperaturverlauf in der Kiesschicht. Es zeigen sich kaum Veränderungen bei den Kiestemperaturen durch Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Sandpakets. Die Strömungsgeschwindigkeit hat ebenso kaum Einfluss auf die Temperaturen im Sandpaket (Bild 5, links). Jedoch ändert sich der Temperaturverlauf in der Sandschicht deutlich durch Variation der Wärmeleitfähigkeit des gesättigten Sandpakets (Bild 5, rechts).

4. Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messdaten

Über den Zeitraum mehrerer Wochen wurden Be- und Entladeversuche im Außenlabor durchgeführt. Die Be- bzw. Entladung erfolgte über in der obersten bzw. untersten Kiesschicht verlegte perforierte PP-Rohre (DN100), die über erdverlegte Fernwärmerohre an eine Heizzentrale (Fernwärme + Gaskessel) gekoppelt sind. Die Be- und Entladung wurde sowohl mit verschiedenen Solltemperaturen (40, 60, 80 °C) als auch mit verschiedenen Volumenströmen durchgeführt. In Bild 6 werden Mess- und Simulationsergebnisse für eine Beladung mit $T_{\text{soll}} = 80$ °C bei einem Volumenstrom von 1.8 m³/h gegenübergestellt. Messwerte der darüber liegenden Kiesschicht (vgl. Bild 2 und 4) werden für die Wassereintrittstemperatur eingelesen.

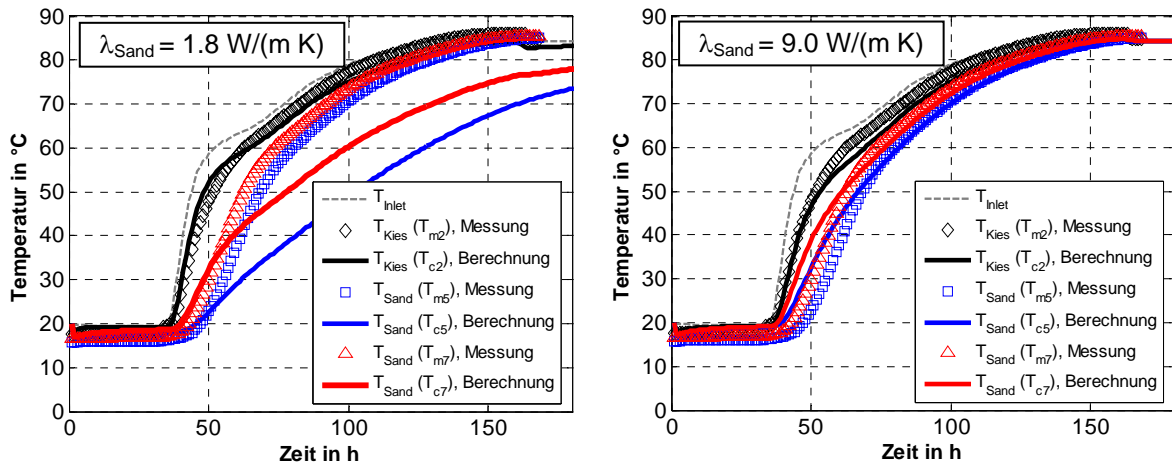


Bild 6: Vergleich der Mess- und Simulationsdaten für verschiedene Werte der Wärmeleitfähigkeit des Sandpakets (λ_{Sand})

In Bild 6 ist zu erkennen, dass sich die gesättigte Sandschicht langsamer als die durchströmte Kiesschicht erwärmt, die Wärme kann aber in die wasser-gesättigte Sandschicht eingebracht werden. Der Vergleich der Messung mit der Rechnung in Bild 6 zeigt aber, dass im Außenlabor die Wärme in das Sandpaket nicht nur über Wärmeleitung, sondern auch über Konvektionsströme eingebracht wird. Denn nur für einen unrealistisch hohen Wert von $\lambda_{\text{Sand}} = 9.0 \text{ W}/(\text{m K})$ kann gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung erreicht werden. Im Falle von Erdreich statt Sand wäre das Wärmeeindringvermögen mit $\lambda_{\text{Erd,max}} < 3.5 \text{ W}/(\text{m K})$ bzw. $\lambda_{\text{Erd,av}} \cong 2.4 \text{ W}/(\text{m K})$ zu gering.

Da im realen Betrieb mit einer Solaranlage der Wärmespeicher nicht über 100 h mit konstanter Temperatur beladen werden kann, wird das Verhalten bei Beladung mit zyklischer Beladetemperatur (Messdaten der Vorlauftemperatur einer Solaranlage in Stuttgart Vaihingen, /13/) und entsprechendem gestuftem Verlauf des Volumenstroms simuliert. Das Ergebnis der Berechnung mit realer Wassereintrittstemperatur (Periode von drei sonnigen Tagen) und realem Volumenstrom ist in Bild 7 dargestellt.

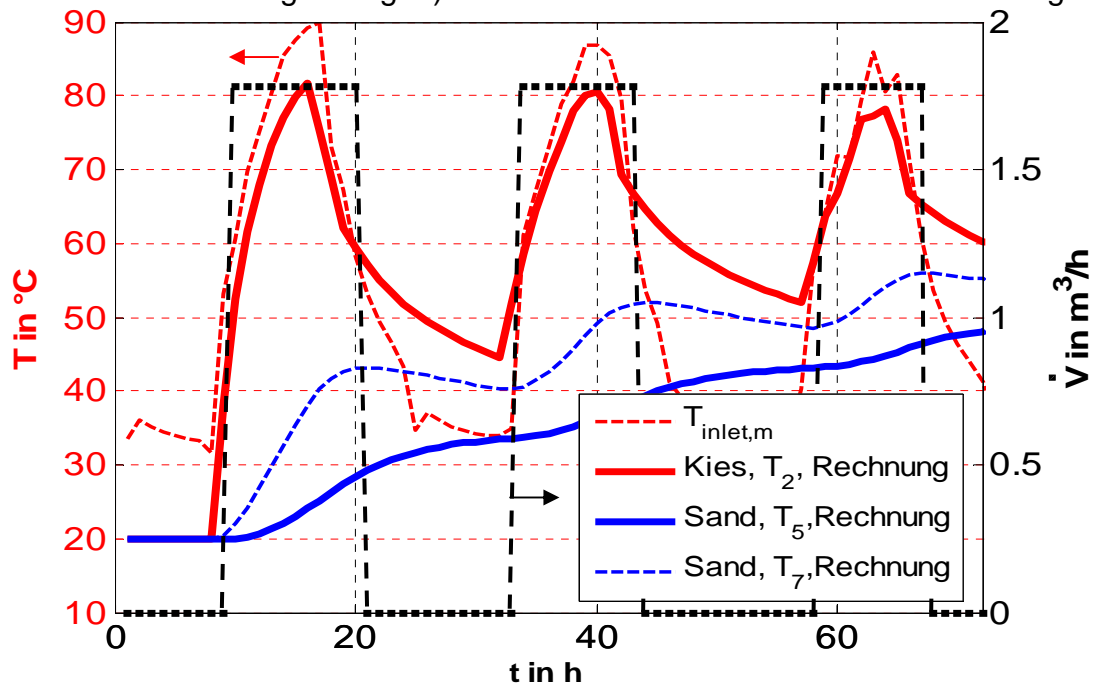


Bild 7: Simulationsergebnisse für Beladung mit zyklischer Beladetemperatur (Messdaten einer Solaranlage in Stuttgart Vaihingen /13/), $d_{\text{Sand}}=0.6 \text{ m}$, $\lambda_{\text{Sand}}= 2.4 \text{ W}/(\text{m K})$, $c_p=1800 \text{ J}/(\text{kg K})$, Lage der Temperaturmessstellen entsprechend Bild 4

Die Kiestemperatur in Bild 7 nimmt mit beginnender Beladung um ca. 8 Uhr innerhalb von 8 Stunden von 20 °C auf ca. 80 °C bei einer maximalen Vorlauftemperatur von 90 °C zu.

Nach dem Beladezyklus gibt die Kiesschicht die Wärme an das Sand- bzw. Erdreichpaket ab, so dass dieses sich bis zum nächsten Beladezyklus auf knapp 35 °C erwärmt. Die Kiesschicht kühlt dabei auf etwa 45 °C ab, so dass nach 24 Stunden die Rücklauftemperatur von 20 °C auf 45 °C steigt. Die Sandschicht erwärmt sich von 20 °C auf 35 °C. Der Verlauf an den folgenden Tagen ist analog, die Temperaturdifferenz zwischen Kiesschicht und Sandschicht bleibt nach jedem Beladezyklus bei etwa 10 K.

Die Wärme wird zwar von der Kiesschicht in die Sandschicht transportiert, jedoch müsste das Verhältnis von Sand- bzw. Erdreichdicke zu Kiesschichtdicke von 60:10 auf 30:10 halbiert werden, um die Wärme innerhalb von 24 Stunden in die Sandschicht transportieren zu können. Die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einem reinen Kies-Wasser-Wärmespeicher wäre damit im vorliegenden Fall nicht mehr gegeben.

5. Schlussfolgerung

Es konnte gezeigt werden, dass das Konzept, Erdreich-Wasser-Wärmespeicher mit direktem Beladesystem, technisch realisierbar ist. Jedoch ist nur im Falle von Sand mit einer relativ hohen effektiven Wärmeleitfähigkeit (Überlagerung von Wärmeleitung und Konvektion) der Wärmeeintrag innerhalb einer Beladungsperiode (24 h) möglich. Im Falle von Erdreich statt Sand als Wärmespeichermedium müsste die Höhe der Erdreichpakete weiter reduziert werden. Die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum reinen Kies-Wasserspeicher aufzuzeigen ist Gegenstand weiterer Arbeiten.

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.

- /01/ Giebe, R.: Ein Kies/Wasser-Wärmespeicher in Praxis und Theorie, Dissertation, Universität Stuttgart, 1989.
- /02/ Hadorn, J.-C., The Vulruz Project. Experimental Results, Proc. Enerstock, Toronto, 1985.
- /03/ Urbaneck, T.: Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern, Dissertation, TU Chemnitz, 2003.
- /04/ Heller, A.: Development of Seasonal Storage in Denmark: Status of Storage Programme 1997-2000, Proc. Terrastock 2000, Stuttgart, 2000.
- /05/ Hausladen G., Pertler, H.: LFU Augsburg – Solare Langzeitwärmespeicherung mittels Großkollektoranlage mit Kies-Wasser-Speicher, DGS, 11. internationales Sonnenforum, Köln, 1998.
- /06/ Pfeil, M., Koch, H.: Saisonaler Kies/Wasser-Wärmespeicher der 3. Generation für die Siedlung Steinfurt Borghorst, OTTI, 10. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 1999.
- /07/ Nußbicker, J., Solar assisted district heating system with duct heat store in Neckarsulm-Amorbach (Germany), Proc. ISES Solar World Congress 2003, Göteborg, Schweden, 2003.
- /08/ Kiedaisch, J.: Entwicklung einer Wasserwegsamkeit durch Geokunststoffe oder Kies für einer Erdreich/Wasser-Wärmespeicher, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2002.
- /09/ Ochs F., et al., Außenlaborversuche zur Entwicklung kostengünstiger Erdbecken-Wärmespeicher für Solarwärme, OTTI, 15. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2005.
- /10/ Fluent®: www.fluent.de.
- /11/ Chang, W.: Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung, Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- /12/ Ergun., S.: Fluid Flow through Packed Columns., Chem. Eng. Prog., 48(2):89-94, 1952.
- /13/ Schenke A., et al., Optimierung großer Solarer Kombianlagen in Theorie und Praxis, OTTI, 16. Symposium „Thermische Solarenergie“, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2006.